

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Кафедра электротехники и электроэнергетики

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ»

В двух частях

Часть 1

Основы теории электрических цепей

Составители:
Е. А. КАЛИНИН
С. А. СБИТНЕВ



Владимир 2014

УДК 621.3.01

ББК 31.21

М54

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент
кафедры приборостроения и информационно-измерительной техники
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
В. С. Грибакин

Печатается по решению редакционно-издательского совета ВлГУ

Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Теоретические основы электротехники». В 2 ч. Ч. 1. Основы теории электрических цепей / Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых ; сост.: Е. А. Калинин, С. А. Сбитнев. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2014. – 60 с.

Составлены в соответствии с программой курса «Теоретические основы электротехники». Содержат описание четырех лабораторных работ, выполняемых на компьютеризированных лабораторных стендах с использованием реальных и виртуальных приборов.

Предназначены для студентов, обучающихся по направлению 140400 – Электроэнергетика и электротехника.

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС 3-го поколения.

Ил. 43. Табл. 7. Библиогр.: 5 назв.

УДК 621.3.01

ББК 31.21

Введение

Лабораторные работы – составная часть изучения дисциплины «Теоретические основы электротехники», являющейся базовой при подготовке студентов по направлению 140400 – Электроэнергетика и электротехника. Цикл лабораторных работ состоит из двух частей: в первой части выполняются работы по разделу «Основы теории электрических цепей», а во второй – по разделу «Установившиеся и переходные процессы в электрических цепях». Для выполнения лабораторных работ используются современные компьютеризированные стенды, реальные и виртуальные приборы. Виртуальная измерительная техника реализована с использованием программных продуктов фирмы «National Instruments».

Комплект типового компьютеризированного варианта лабораторного оборудования «Теория электрических цепей и основы электроники» предназначен для проведения лабораторного практикума по одноимённым разделам курсов «Теоретические основы электротехники», «Теория электрических цепей», «Электротехника и основы электроники», «Общая электротехника».

Основные компоненты компьютеризированного варианта комплекта «Теория электрических цепей и основы электроники»:

- персональный компьютер;
- блок генераторов напряжений;
- наборная панель;
- набор мини-блоков;
- блок мультиметров;
- набор трансформаторов;
- коннектор;
- соединительные провода, перемычки, питающие кабели.

В методических указаниях приведены краткие теоретические сведения, задания на подготовку к работе и на выполнение расчетов и экспериментов.

Лабораторная работа № 1

ЗНАКОМСТВО С КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННЫМ СТЕНДОМ. ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы – изучение методики работы с виртуальными приборами (ВП), приобретение навыков работы с ВП, изучение методов расчета линейных электрических цепей, исследование простейших электрических цепей, экспериментальная проверка законов Ома и Кирхгофа.

Структура и состав типового лабораторного оборудования «Теоретические основы электротехники». Общие сведения

Компоновка оборудования

Общая компоновка типового комплекта оборудования в стендовом исполнении показана на рис. 1. На лабораторном столе закреплена рама, в которой устанавливаются отдельные блоки. Расположение блоков жёстко не фиксировано. Оно может изменяться для удобства проведения того или иного конкретного эксперимента. Наборная панель, на которой собирается электрическая цепь из мини-блоков, может устанавливаться и непосредственно на столе.

В выдвижных ящиках хранятся наборы мини-блоков и устройств, соединительные провода, перемычки и кабели, методические материалы. Один из наборов мини-блоков показан на столе (см. рис. 1).

Блок генераторов напряжений

Лицевая панель блока генераторов напряжений показана на рис. 2. Блок генераторов состоит из источника синусоидальных напряжений с частотой 50 Гц, генератора напряжений специальной формы и генератора постоянных напряжений.

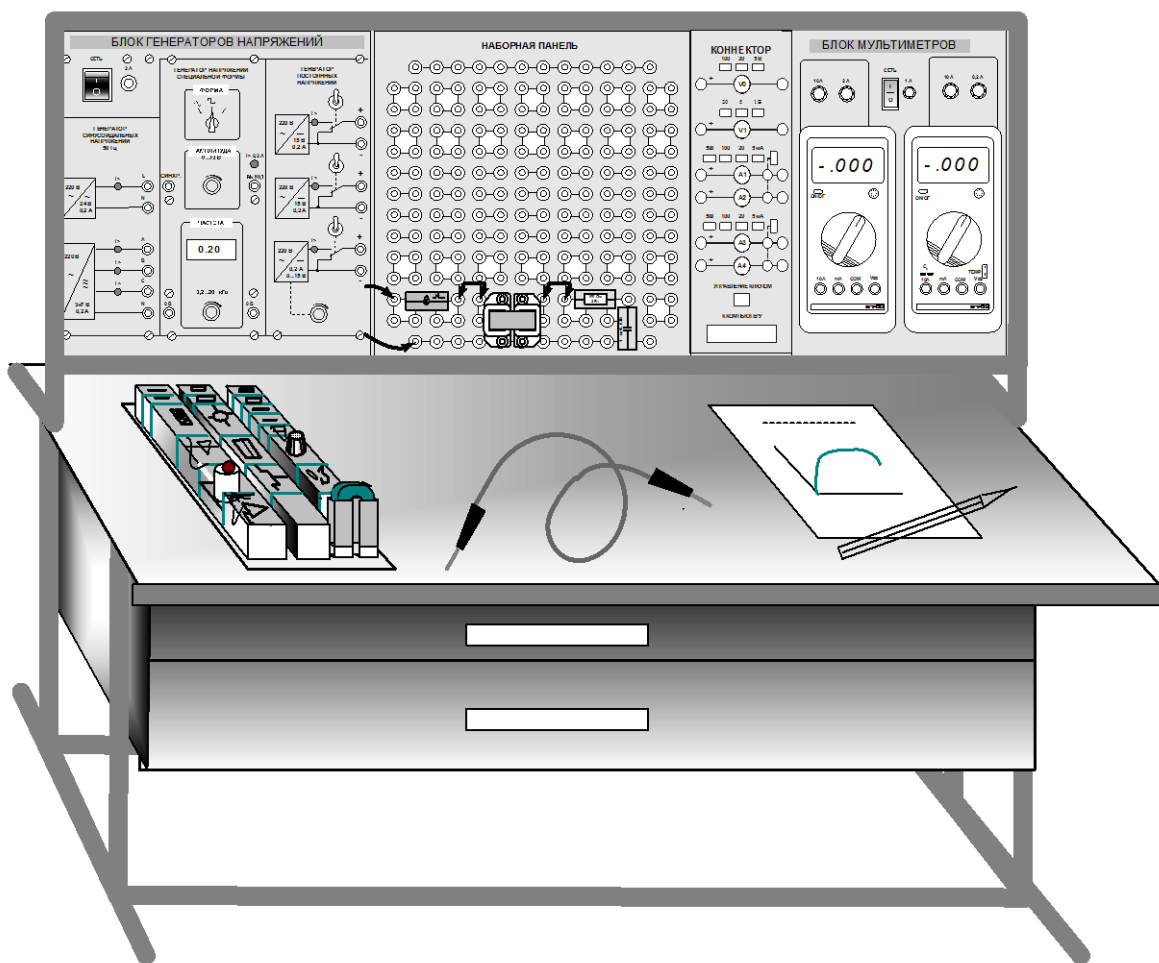


Рис. 1

Все генераторы включаются и выключаются общим выключателем «СЕТЬ» и защищены от коротких замыканий внутренним 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, что позволяет исследовать разветвленные схемы с несколькими источниками, не подключенными к общей шине. Они также 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 220/24В) и трёхфазный стабилизированный по амплитуде вы-

ходного напряжения преобразователь однофазного напряжения в трёхфазное. Выходное сопротивление трёхфазного источника в рабочем диапазоне токов близко к нулю.

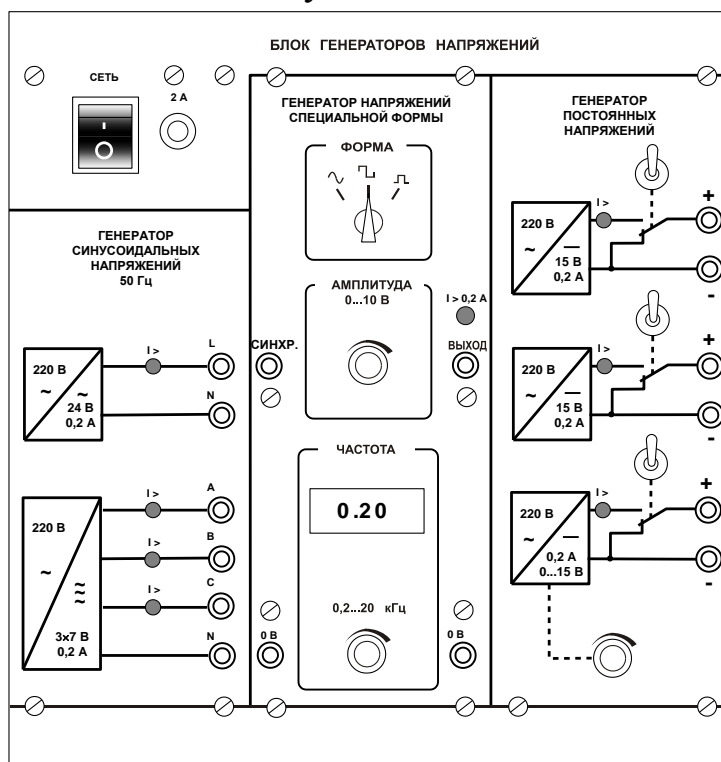


Рис. 2

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. Выход-

ные сопротивления этих источников также близки к нулю, и все они допускают режим работы с обратным током (режим потребления энергии). Для получения постоянных напряжений более 15 В источники могут соединяться последовательно. Для исключения источников из собранной схемы цепи используются переключатели (тумблеры).

Наборная панель

Наборная панель (рис. 3) служит для расположения на ней мини-блоков в соответствии со схемой данного опыта.

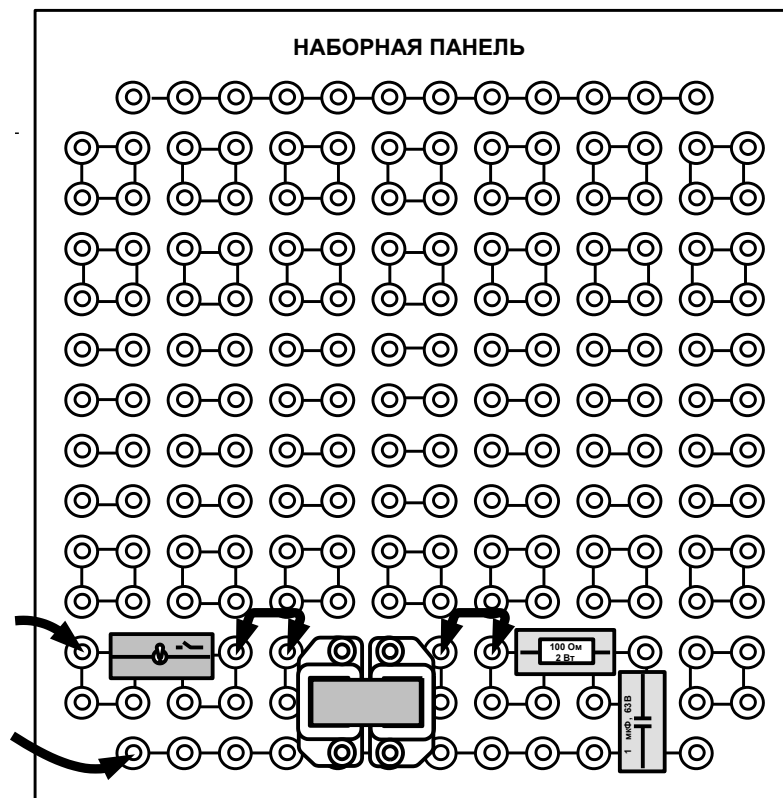


Рис. 3

Гнёзда на этой панели соединены в узлы, как показано на ней линиями. Поэтому часть соединений выполняется автоматически при установке мини-блоков в гнёзда панели. Остальные соединения выполняются соединительными проводами и перемычками.

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.

Набор мини-блоков по теории электрических цепей и основам электроники

Мини-блоки 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 мини-блоки содержат несколько элементов, соединённых между собой, или более сложные функциональные блоки. На этикетках мини-блоков изображены условные графические обозначения элементов или упрощённые электрические схемы их соединения, показано расположение выводов и приведены основные технические характеристики.

Набор трансформаторов

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 16×12 мм. На трёх трансформаторах установлены катушки 900/300 витков, на четвёртом – 100/100 витков, однако они легко переставляются.

Блок мультиметров

Блок мультиметров предназначен для измерения напряжений,

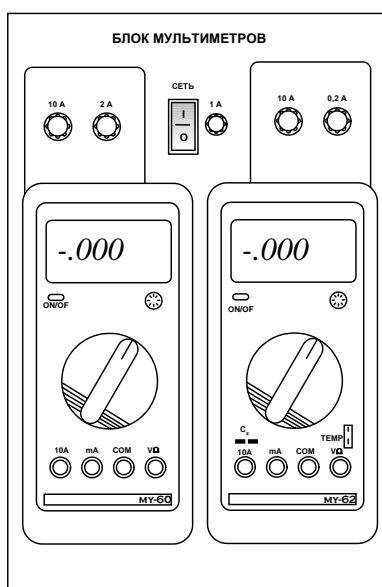


Рис. 4

токов, сопротивлений, а также для проверки диодов и транзисторов. Общий вид блока представлен на рис. 4. В нём установлены два серийно выпускаемых мультиметра МУ-60, МУ-60Т. 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.

Коннектор

Коннектор (рис. 5) входит только в компьютеризированный вариант комплекта и предназначен для ввода измеряемых токов и напряжений в компьютер на плату PCI-6023(24) для измерений с помощью программы «ВП ТОЭ». Он содержит делители напряжений для ввода напряжений, шунты для ввода токов, блоки гальванической развязки измеряемых сигналов, разъем для вывода из компьютера сигналов управления электронным ключом и разъем для подключения плоского кабеля связи коннектора с компьютером.

Общий вид лицевой панели коннектора показан на рис. 5. Изображенные на лицевой панели измерительные приборы V_0 , V_1 , $A_1 \dots A_4$ включаются в цепь как обычные вольтметры и амперметры. Коннектор имеет два канала для ввода напряжений в компьютер и два канала для ввода токов.

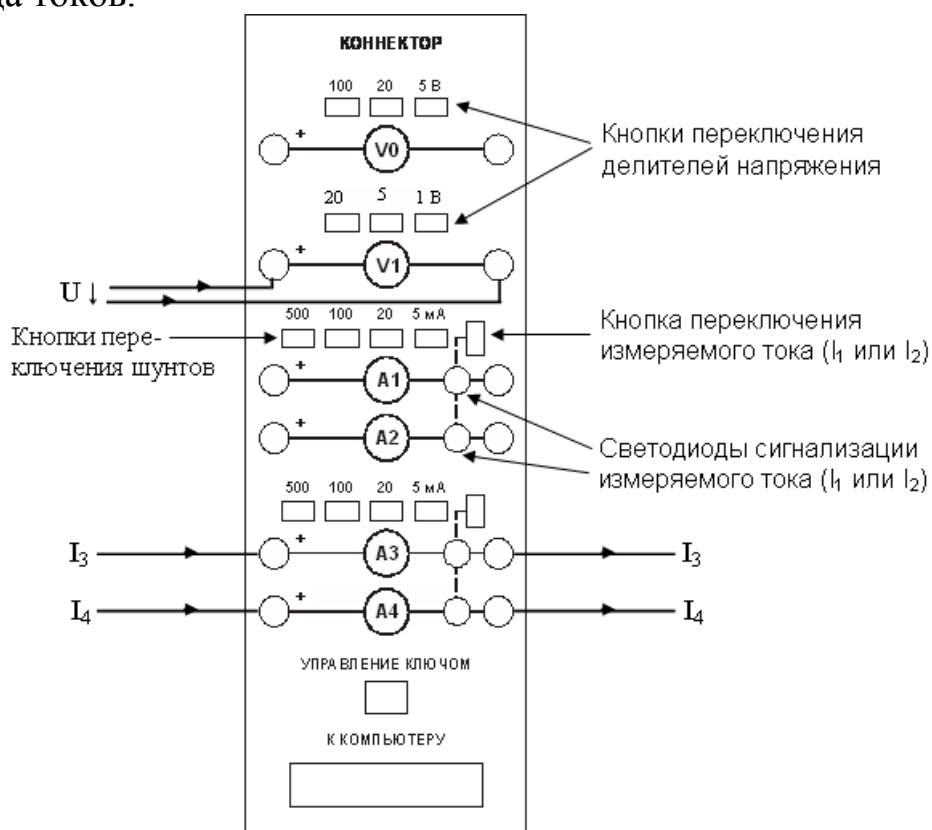


Рис. 5

Однако в цепь можно включить четыре амперметра и кнопками переключения измеряемого тока выбирать вводимое в компьютер значение I_1 или I_2 , I_3 , или I_4 . О выбранном амперметре сигнализируют красный светодиод на лицевой панели коннектора и надпись на виртуальном амперметре на экране дисплея. Кнопки переключения делителей напряжений и шунтов предназначены для выбора пределов измерения как в обычных измерительных приборах.

Порядок работы с виртуальными амперметрами и вольтметрами

При работе с виртуальными приборами необходимо придерживаться следующего порядка.

- Собрать цепь согласно схеме опыта, включив в нее вместо реальных амперметров и вольтметров виртуальные приборы.
- Включить виртуальные приборы двойным щелчком левой кнопки мыши на ярлыке «ВП ТОЭ». В результате откроется блок «Приборы I» (рис. 6), в котором видны панели виртуальных вольтметров и амперметров. Часть приборов активизирована по умолчанию (т. е. включены пределы измерения).

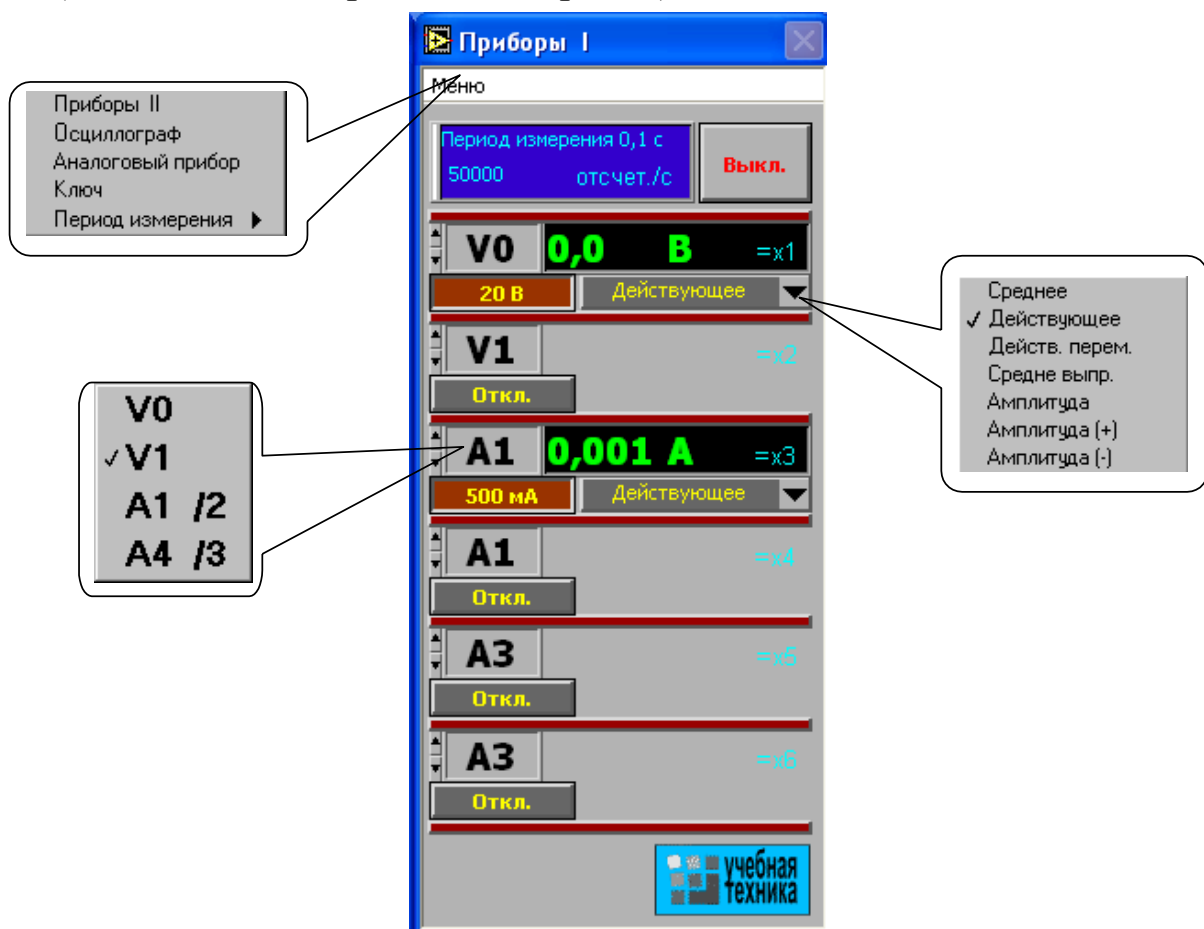


Рис. 6

- Расположение приборов в окне этого блока можно изменить, щелкнув левой кнопкой мыши на обозначении прибора и выбрав в открывшемся перечне нужный прибор. К одному и тому же каналу коннектора, таким образом, можно подключить несколько виртуальных приборов для поочередного измерения, например, дей-

ствующего, амплитудного, среднего и других значений одного и того же переменного напряжения (тока).

- Активизировать нужные виртуальные приборы, щелкнув в соответствующих окнах на кнопках «Откл». Для отключения прибора щелкнуть в окне предела измерения. Чем больше каналов задействовано в виртуальных измерениях тока и напряжения, тем ниже частота сканирования и меньше значений вводится в компьютер за период измерения. Период измерения, в течение которого производится ввод данных в компьютер, по умолчанию равен 0,1 с. Его можно изменить, открыв меню, как показано на рис. 6 и выбрав строку «Период измерения».
- При выполнении измерений переменных напряжений и токов необходимо обращать внимание на число отсчетов в секунду, которое указано в верхней части панели «Приборы I». Необходимо, чтобы число отсчетов, приходящихся на один период измеряемого сигнала (не путать с периодом измерения!), было не менее десяти. При меньшем числе отсчетов резко возрастает погрешность измерений.
- Выбрать род измеряемой величины, щелкнув в окне «Действующее» и выбрав из открывшегося списка нужное значение (для цепи постоянного тока это «Среднее»). В этом окне пункт «Действ. перем.» означает действующее значение сигнала, из которого исключена постоянная составляющая.
- Выбрать пределы измерения амперметров и вольтметров, нажав соответствующие кнопки на коннекторе (см. рис. 5). Выбранные пределы отображаются автоматически в соответствующих окнах виртуальных приборов. Когда измеряемый сигнал превышает допустимый для данного канала уровень, окно с показанием виртуального прибора начинает мигать красным цветом, а в верхней части панели включается надпись «Перегрузка! Перейдите на больший предел». Она гаснет, как только предел измерения становится больше измеряемой величины.
- При снижении измеряемой величины ниже значения следующего предела (более низкого) измерения включается надпись «Перейдите на меньший предел». Через некоторое время она гаснет само-

стоятельно, но окно данного виртуального прибора продолжает мигать, предупреждая о том, что данное измерение желательно сделать точнее.

- Для того чтобы закрыть окно виртуальных приборов, необходимо щелкнуть по клавише «Выкл» на панели «Приборы I».

Измерение сопротивлений, мощностей и углов сдвига фаз с помощью виртуальных приборов

Включить блок «Приборы I», для «включения» виртуальных омметров, ваттметров, фазометра и частотомера выбрать из меню блока «Приборы I» позицию «Приборы II». При этом откроется блок с тремя приборами, которые вычисляют сопротивления, мощности, углы сдвига фаз, частоту и период по мгновенным значениям токов и напряжений, введенным в компьютер через коннектор.

Первые два (верхних) прибора этого блока имеют свое меню, из которого выбираются измеряемые величины (рис. 7).

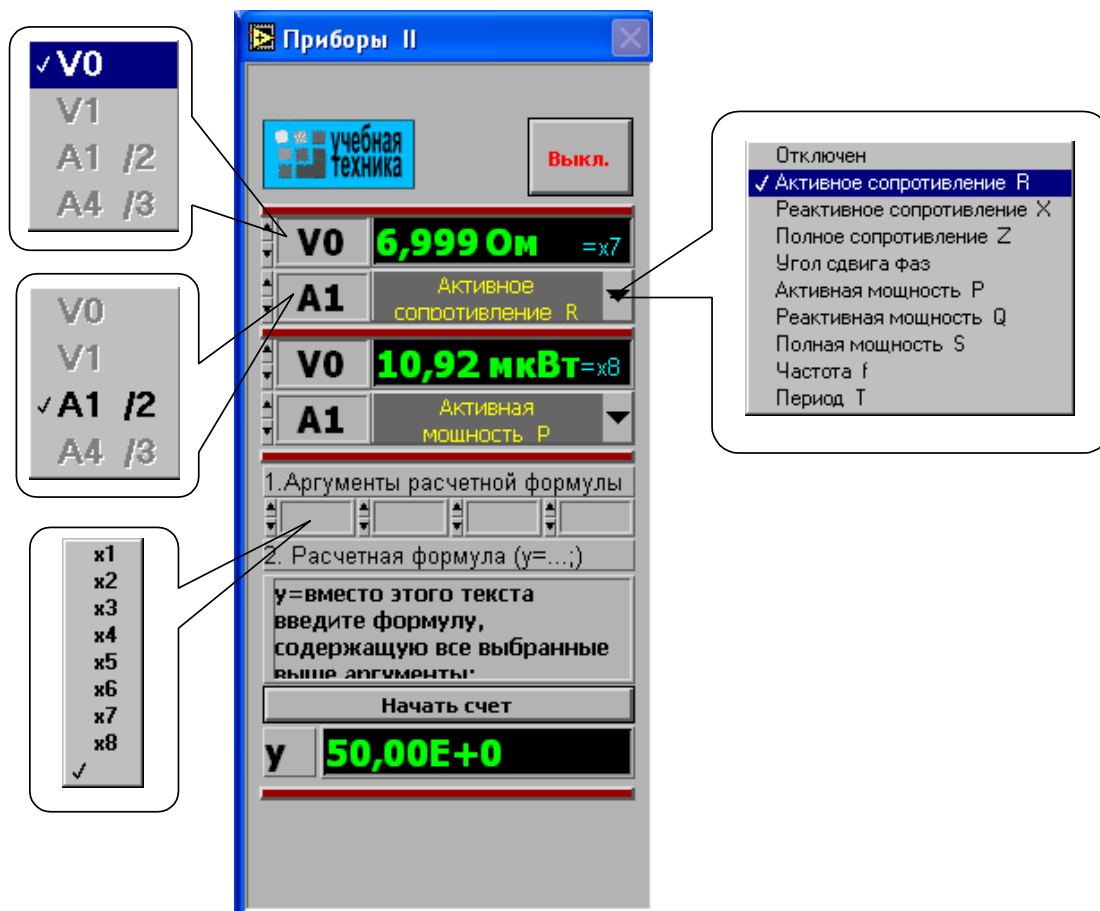


Рис. 7

Для активизации прибора достаточно выбрать в соответствующих окнах две величины, через которые определяется искомая величина. Например, если на входе цепи включены вольтметр V_0 и амперметр A_4 , то для измерения входных мощностей (P, Q, S), входных сопротивлений (r, x, z), а также угла сдвига фаз между напряжением и током ($\varphi = \psi_u - \psi_i$) необходимо в верхнем окне прибора выбрать V_0 , а в нижнем A_4 . Для измерения угла сдвига фаз между токами I_1 и I_4 ($\varphi = \psi_{I1} - \psi_{I4}$) в верхнем окне должно быть A_1 , а в нижнем A_4 (но не наоборот, иначе будет $\psi_{I4} - \varphi_{I1}$). Для измерения частоты или периода необходимо указать только одну величину (в верхнем окне). Очевидно, что для цепи постоянного тока из перечисленных здесь величин имеет смысл измерять только активное сопротивление и активную мощность.

Третий (нижний) прибор в этом блоке производит вычисления по формуле, вводимой самим пользователем. Аргументами этой формулы могут быть 4 из 8 величин $x_1 \dots x_8$ (не более!), измеряемых приборами первого и второго блоков. Обозначения $x_1 \dots x_8$ имеются на рис. 6 и 7. Например, если измеряются две активные мощности – в первом (верхнем) окне мощность источника, а во втором – нагрузки, то третий прибор можно запрограммировать на определение КПД.

Для этого нужно ввести аргументы x_7 (показания первого прибора) и x_8 (показания второго прибора), напечатать формулу $y = x_8/x_7$ и щелкнуть на клавише «Начать счет». В случае синтаксической ошибки во введенной формуле окно формулы начинает мигать и счёт не производится.

Виртуальный осциллограф

Виртуальный осциллограф позволяет наблюдать временные диаграммы сигналов, подаваемых на вход коннектора (двух напряжений и двух токов) в режиме «Развертка» или зависимость одного входного сигнала от любого другого в режиме «XY». Для его включения необходимо подать на вход коннектора исследуемые сигналы, включить и настроить, как описано выше, блок «Приборы I» и выбрать в меню этого блока строку «Осциллограф». После этого на дисплее появится изображение виртуального прибора «Осциллограф» (рис. 8). Назначение всех его окон показано на рисунке.

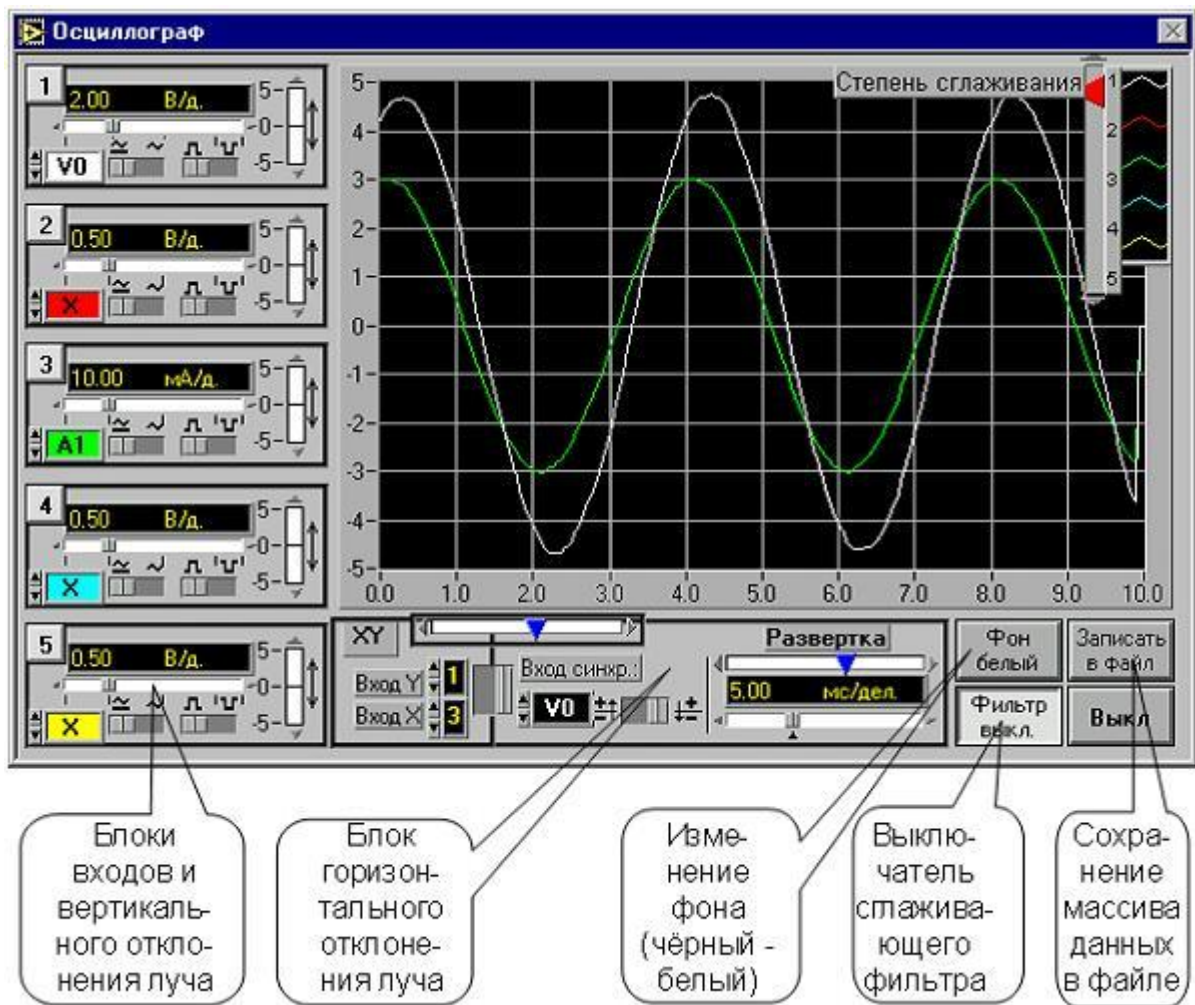


Рис. 8

Один из пяти блоков входов и вертикального отклонения луча показан на рис. 9.

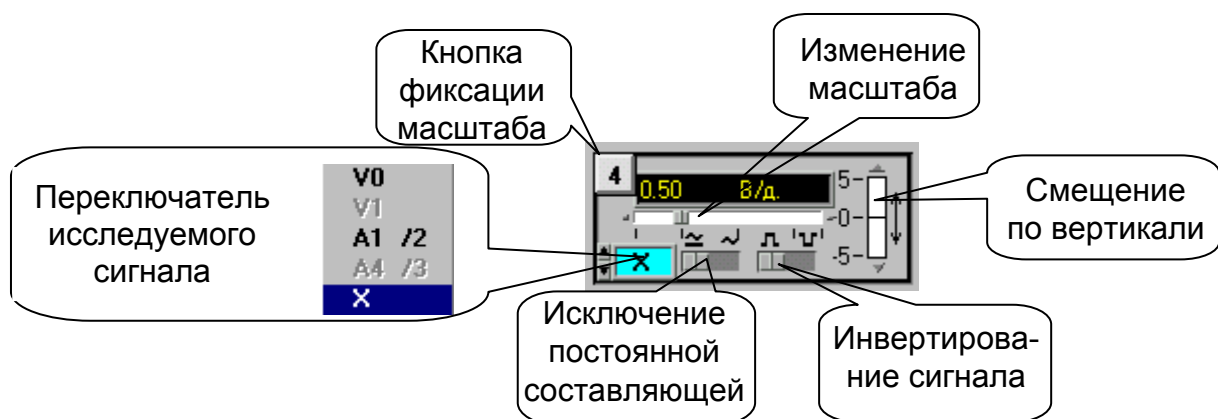


Рис. 9

На любой из пяти входов осциллографа можно подать сигнал с любого входа коннектора. При этом в окне входа осциллографа появляется соответствующее обозначение входа коннектора (виртуального прибора) и появляется луч на экране, цвет которого соответствует цвету фона переключателя исследуемого сигнала.

Масштаб изображения по вертикали устанавливается автоматически и изменяется ступенчато при изменении амплитуды сигнала, но его можно зафиксировать, нажав на кнопку фиксации масштаба (см. рис. 9), после этого он меняться не будет. Предусмотрено и плавное ручное изменение масштаба внутри ступени (движок изменения масштаба).

Органы управления горизонтальным перемещением луча показаны на рис. 10.

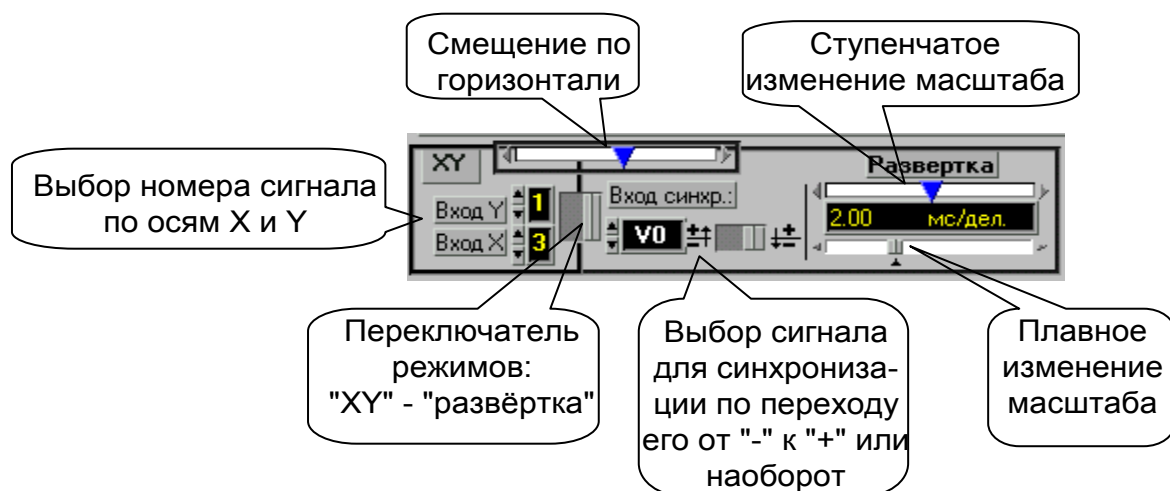


Рис.10

В правом верхнем углу виртуального осциллографа (см. рис. 8) имеются движок управления степенью сглаживания фильтра (появляется только при его включении), а также меню изменения характеристик графика: непрерывный, ступенчатый, гистограмма, точечный, размер и форма точек, толщина линий и другие. Меню открывается при щелчке на любой линии из пяти изображенных в правом верхнем углу цветных линий, соответствующих по номерам входам осциллографа.

Кнопка «Записать в файл» (см. рис. 8) позволяет записать в файл таблицу мгновенных значений всех подключенных сигналов за один период измерения. Затем их можно прочитать и обработать в про-

граммах MathCAD, Excel, Origin и других. После щелчка на этой кнопке появляется окно диалога (рис. 11), в нём нужно выбрать диск, папку и имя файла, в который будут записаны данные. Выбрав имя файла, нажать клавишу «Сохранить».

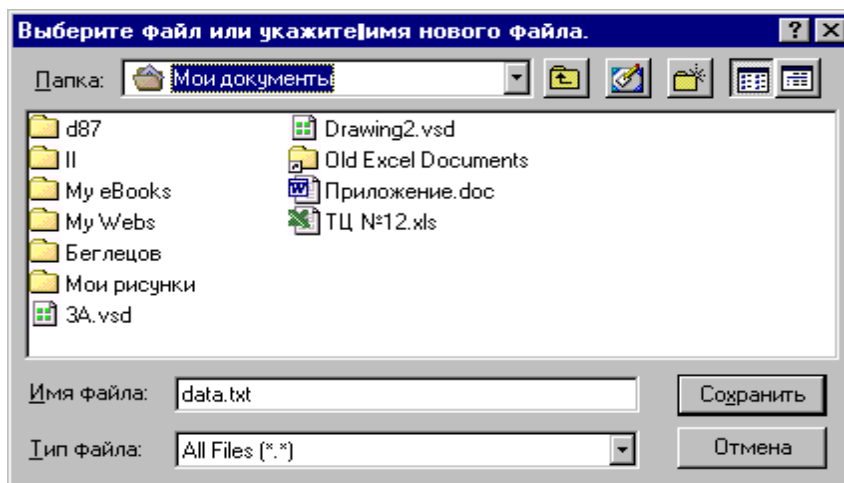


Рис. 11

Виртуальный псевдоаналоговый прибор

Для наблюдения динамики изменения измеряемой величины более удобным является стрелочный прибор. Поэтому в комплексе «ВП ТОЭ» имеется псевдоаналоговый стрелочный прибор (рис. 12), который может дублировать показания любого рассмотренного выше цифрового прибора.

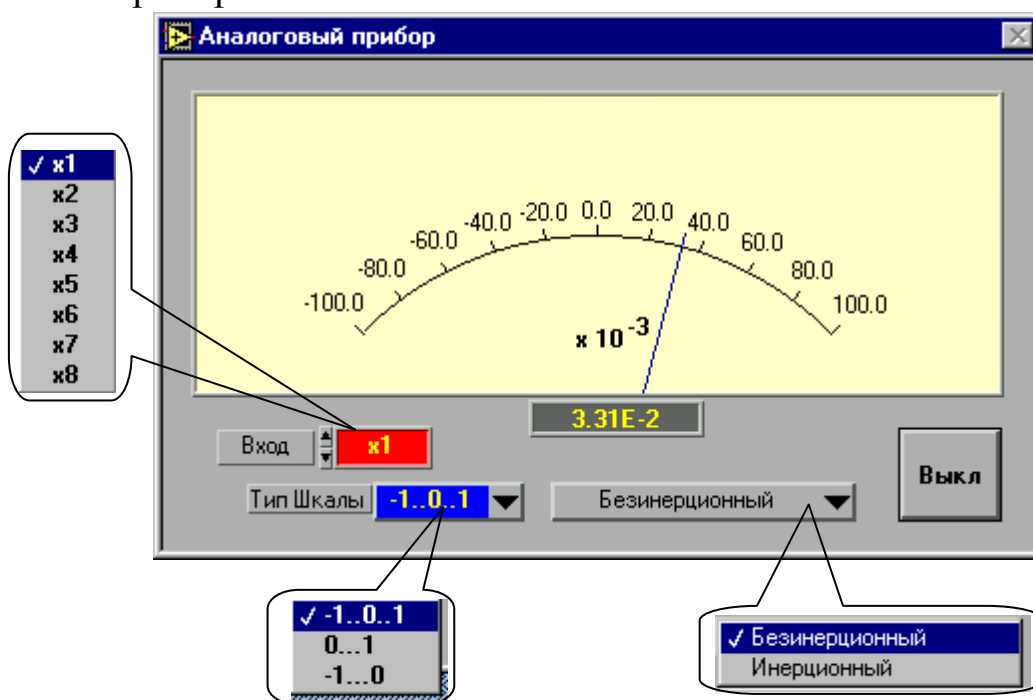


Рис. 12

Он открывается щелчком мыши на строке «Аналоговый прибор» в меню блока «Приборы I» и подключается к любому из восьми цифровых приборов x1...x8. На нем имеется также окно выбора типа шкалы и клавиша «Инерционный – Безинерционный», с помощью которой можно замедлить или ускорить движение стрелки. Шкала прибора перенастраивается автоматически при выходе стрелки за ее пределы. Показание стрелки дублируется в цифровом виде в специальном окне прибора.

Виртуальный прибор «Ключ»

Виртуальный прибор «Ключ» предназначен для управления электронными ключами, транзисторами, тиристорами и другими приборами, работающими в ключевом режиме. Он открывается щелчком на строке «Ключ» в меню блока «Приборы I». Его вид показан на рис. 13.

После включения прибора необходимо установить исходное состояние ключей в окнах «Ключ 1» и «Ключ 2». Значение 1 в окне первого ключа соответствует наличию сигнала управления +5В на контакте 4 относительно общего контакта 7 разъема «Управление ключом» на коннекторе, значение 0 – отсутствию сигнала. Значение 1 в окне второго ключа соответствует наличию сигнала +5В на контакте 8 разъема коннектора, 0 – отсутствию сигнала. После того как исходные состояния установлены, они переключаются каждый раз при нажатии клавиши «Переключить».

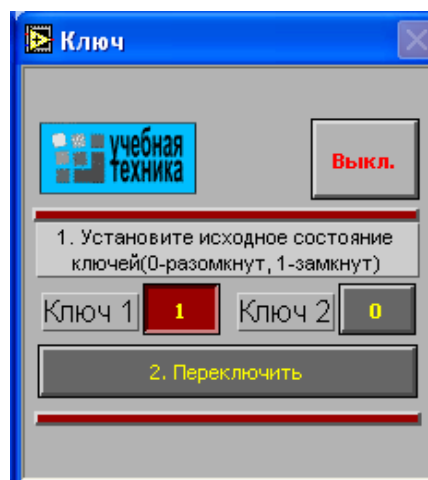


Рис. 13

Краткие теоретические сведения

Электрической цепью называют совокупность устройств и объектов (элементов), соединенных друг с другом, по которым может протекать *электрический ток*, и предназначенных для распределения, преобразования и передачи электрической энергии.

Для протекания тока необходимы *источники электрической энергии* – источники напряжения (ЭДС) или тока.

Электрическая цепь содержит также устройства, в которых энергия электрического тока преобразуется в другие виды энергии (механическую, тепловую, световую и т.д.). Эти устройства называются *приёмниками электрической энергии*, или *нагрузками*.

Если элемент цепи характеризуется линейными алгебраическими или дифференциальными уравнениями, то его называют *линейным*.

Цепи, содержащие только линейные элементы, называют *линейными* цепями. Основное свойство таких цепей – применимость принципа наложения (суперпозиции), заключающегося в том, что результирующая реакция линейной цепи на несколько приложенных одновременно возмущений равна сумме реакций, обусловленных каждым возмущением в отдельности.

Для замыкания и размыкания цепей используют *выключатели* (тумблеры) того или иного вида.

Ток, неизменный по величине и направлению, называют *постоянным* и обозначают символом I .

Закон Ома математически выражает соотношение между напряжением U , током I и сопротивлением r на участке цепи:

$$I = U/r, \quad U = I r, \quad r = U/I,$$

где I – ток, А;

U – напряжение, В;

r – сопротивление участка цепи, Ом.

Сопротивление участка цепи постоянному току называют *омическим*.

В замкнутой цепи с постоянным сопротивлением ток изменяется пропорционально напряжению.

Если при постоянном напряжении изменяется сопротивление, то ток изменяется обратно пропорционально сопротивлению.

Мощность, измеряемая в ваттах, может быть рассчитана по следующим формулам:

$$P = UI = U^2/r = I^2 r, \text{ Вт.}$$

Для любого узла электрической цепи справедлив первый закон Кирхгофа: алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю:

$$\Sigma I = 0,$$

при этом токи, втекающие в узел, считаются положительными, а вытекающие – отрицательными (или наоборот).

Для любого замкнутого контура электрической цепи справедлив второй закон Кирхгофа: алгебраическая сумма ЭДС (E) для замкнутого контура равна алгебраической сумме падений напряжений в нём:

$$\Sigma E = \Sigma U,$$

положительными считаются E и U , направления которых совпадают с направлением обхода контура, и наоборот.

Задание на подготовку к работе

1. Ознакомиться с основными определениями, относящимися к линейным электрическим цепям с сосредоточенными параметрами.
2. Изучить методы расчета линейных электрических цепей с одним источником ЭДС.
3. Изучить способы измерения параметров элементов электрических цепей.

Рабочее задание

В электрической цепи, изображённой на рис. 14, произвести измерения напряжений, токов, сопротивлений и мощности, используя для этого виртуальные приборы.

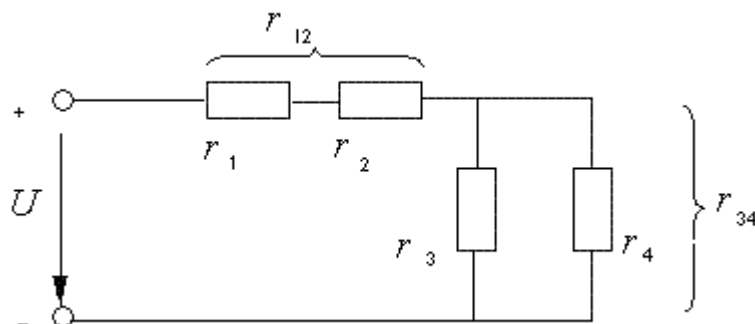


Рис. 14

Смешанные соединения часто встречаются в электрических слабо- и сильноточных цепях. На рис. 14 показан пример такого соединения. Цепь состоит из последовательно (r_1 и r_2) и параллельно (r_3 и r_4) соединенных резисторов. Участки цепи с последовательным и параллельным соединением резисторов относительно друг друга соединены последовательно. Чтобы вычислить полное сопротивление цепи, поочередно подсчитывают эквивалентные сопротивления участков цепи, получая в конце искомый результат (метод свёртывания). Для цепи (см. рис. 14) это делается следующим образом:

$$r_{12} = r_1 + r_2, \quad r_{34} = r_3 r_4 / (r_3 + r_4), \quad r_{\text{ЭКВ}} = r_{12} + r_{34}.$$

Ток, потребляемый от источника, зависит от приложенного напряжения и эквивалентного сопротивления цепи

$$I = U/r_{\text{ЭКВ}}.$$

Экспериментальное исследование и обработка результатов измерений

- Привести персональный компьютер в рабочее состояние. Запустить программу «ВП ТОЭ», открыть меню и выбрать из него пункт «Приборы I».
- Собрать на наборном поле электрическую цепь согласно схеме (рис. 15) и подать на ее вход постоянное напряжение 15 В. Величины сопротивлений задает преподаватель.

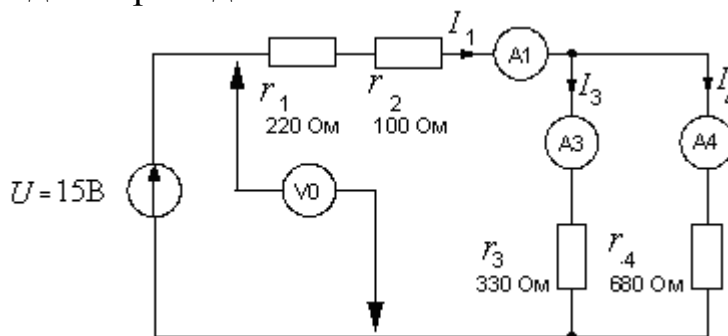


Рис. 15

- Измерить токи во всех ветвях и напряжения на всех элементах с помощью виртуальных амперметров и вольтметров. Виртуальными омметрами и ваттметрами (меню блока «Приборы II») измерить также сопротивления каждого из элементов $r_1 \dots r_4$, сопротивление параллельного участка r_{34} , мощности, выделяющиеся в каждом резисторе, и потребляемую от источника P_{Σ} (только не забывайте «подключать» виртуальные омметр и ваттметр к соответствующим напряжениям и токам через соответствующие гнезда на коннекторе!).

- Результаты измерений занести в таблицу.
- Рассчитать значения сопротивлений, токов и напряжений и занести результаты расчетов также в эту же таблицу.
- Для оценки достоверности полученных результатов измерений проверить соотношение по первому закону Кирхгофа: $I_1 = I_3 + I_4$. При удовлетворительном результате проверки записать результаты измерений и проверки в таблицу.
- Проверить выполнение второго закона Кирхгофа для одного из контуров (контур задаёт преподаватель).
- Сравнить результаты расчетов и измерений, вычислив расхождение результатов (погрешность) в процентах по формуле:

$$\frac{\text{Измеренная величина} - \text{Расчетная величина}}{\text{Расчетная величина}} 100\% .$$

Результаты занести в таблицу.

- Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

Измеряемая или рассчитываемая величина	Измеренное значение	Заданные или рассчитанные значения	Погрешность, %
r_1 , Ом			
r_2 , Ом			
r_3 , Ом			
r_4 , Ом			
r_{34} , Ом			
$r_{ЭКВ}$, Ом			
I_1 , мА			
I_3 , мА			
I_4 , мА			
U , В			
U_1 , В			
U_2 , В			
U_{34} , В			
P_1 , Вт			
P_2 , Вт			
P_3 , Вт			
P_4 , Вт			
P_{34} , Вт			
P_{Σ} , Вт			

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Краткие теоретические сведения и расчетные формулы для определения токов, напряжений и мощностей в электрических цепях постоянного тока.
3. Краткое описание методики измерений параметров элементов электрической цепи с помощью виртуальных приборов.
4. Таблицы с расчетными и экспериментальными данными.
5. Анализ полученных результатов и выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Какие измерительные приборы называются «виртуальными»?
2. Как соотносятся период измеряемого периодического сигнала с периодом измерений при использовании виртуальных приборов?
3. Как влияет период измеряемого сигнала на число отсчетов в секунду? Как число отсчетов в секунду влияет на погрешность измерений? Как изменить число отсчетов?
4. Сколько виртуальных амперметров (вольтметров) можно одновременно подключить к исследуемой схеме?
5. Как с помощью виртуальных приборов измерить сопротивление (мощность)? Чем эти измерения отличаются от измерений мультиметрами?
6. Какой ток называется постоянным?
7. Какие источники электрической энергии относятся к источникам напряжения (ЭДС), а какие – к источникам тока?
8. Какие схемы замещения источников электрической энергии Вы знаете?
9. Как измерить ЭДС источника? Внутреннее сопротивление?
10. Какие режимы работы источника электрической энергии Вы знаете? Дайте им краткую характеристику.
11. Как аналитически найти условие получения максимальной мощности во внешней цепи (режим согласования)?
12. Как преобразовать схему замещения источника напряжения в схему замещения источника тока, и наоборот?
13. Что такое «внешняя характеристика» источника электрической энергии? Какой вид имеет эта характеристика у источника ЭДС и источника тока?
14. Сформулируйте обобщенный закон Ома для активного участка цепи.
15. Запишите закон Ома в матричной форме и поясните его структуру.
16. Сформулируйте и запишите первый и второй законы Кирхгофа.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВЕТВЛЕННОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА С НЕСКОЛЬКИМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭДС

Цель работы – изучение методов расчета разветвленных линейных электрических цепей, исследование электрической цепи активный двухполюсник – пассивный двухполюсник, расчетное и экспериментальное определение параметров активного двухполюсника, приобретение навыков работы с виртуальными приборами.

Краткие теоретические сведения

Разветвленная электрическая цепь состоит из трёх ветвей и более, двух узлов и более, двух источников электрической энергии и более, находящихся в разных ветвях. Если в какую-либо ветвь включено несколько источников ЭДС, то их заменяют одной эквивалентной $E_{\text{экв}}$, равной алгебраической сумме ЭДС, входящих в эту ветвь. Таким образом, сложная схема может быть приведена к обобщенной, в которой каждая ветвь содержит только один источник.

Задача анализа разветвленной электрической цепи обычно сводится к нахождению токов ветвей и напряжений на различных участках цепи. При расчете разветвленных цепей направления токов в ветвях до расчета выбираются произвольно, а после анализа цепи направления токов уточняются. Обычно применяют метод контурных токов и метод узловых напряжений.

Метод контурных токов основан на том, что ток в любой ветви можно представить в виде алгебраической суммы контурных токов, протекающих по этой ветви. При этом по любой ветви должен проходить хотя бы один контурный ток. Этот метод основан на втором законе Кирхгофа, число же уравнений в системе сокращается по сравнению с методом непосредственного применения законов Кирхгофа, так как не нужно составлять уравнения по первому закону Кирхгофа. Число уравнений равно числу независимых контуров (независимый контур – это контур, в который входит хотя бы одна новая ветвь, не входящая в другие контуры).

Метод узловых напряжений позволяет уменьшить количество уравнений системы до числа, равного количеству узлов без одного. При составлении уравнений потенциал одного узла принимается равным нулю – этот узел называют базисным. Сущность метода заключается в том, что сначала определяют потенциалы всех узлов схемы (потенциал базисного узла равен нулю), а токи ветвей, соединяющих узлы, находят по обобщенному закону Ома. Этим методом рекомендуются пользоваться в тех случаях, когда число уравнений меньше числа уравнений, составленных по методу контурных токов. Особый интерес представляет случай, когда в схеме всего два узла при любом числе ветвей, этот метод получил название «метод двух узлов». В этом случае нужно составить всего одно уравнение. Метод имеет широкое практическое применение, поскольку к одному источнику напряжения может подключаться несколько потребителей.

Задание на подготовку к работе

1. Ознакомиться с основными определениями, относящимися к разветвленному линейному электрическому цепям с сосредоточенными параметрами.
2. Изучить методы расчета разветвленных линейных электрических цепей с несколькими источниками ЭДС.
3. Изучить особенности составления уравнений для методов контурных токов и узловых напряжений.
4. Дать определения активного и пассивного двухполюсников.
5. Записать в общем виде выражения для определения параметров активного двухполюсника ($E_{\text{ЭКВ}}$, $r_{\text{ВТ ЭКВ}}$).

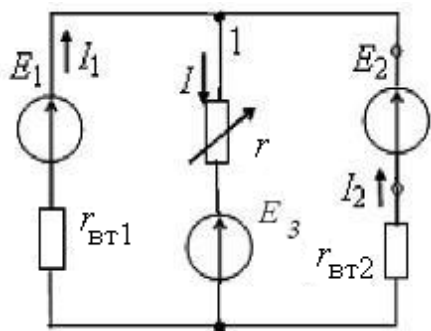


Рис. 16

Рабочее задание

В работе исследуется двухконтурная схема цепи (рис. 16) с тремя источниками постоянного напряжения. Если ЭДС E_3 равна нулю (но цепь замкнута), то схема будет имитировать электрическую цепь электропитания автомобиля. В состав та-

кой цепи входят: генератор с ЭДС E_1 (14,4 В) и внутренним сопротивлением $r_{вт1}$, аккумуляторная батарея с ЭДС E_2 (12 В) и внутренним сопротивлением $r_{вт2}$ и эквивалентная нагрузка r (например, светотехническая аппаратура). При расчете исходной схемы методом двух узлов потенциал базисного (в данном случае нижнего) узла принимается равным нулю, а потенциал φ_1 узла 1 определяется из уравнения

$$G_{11}\varphi_1 = G_1 E_1 + G_2 E_2 + G_3 E_3,$$

где $G_{11} = G_1 + G_2 + G_3 = 1/r_{вт1} + 1/r_{вт2} + 1/r$ – собственная проводимость узла 1, равная сумме проводимостей ветвей, подключенных к узлу 1. Слагаемые в правой части уравнения (узловые токи) берутся со знаком „плюс”, поскольку все ЭДС направлены к узлу 1. Токи ветвей определяют по обобщенному закону Ома (с учетом выбранных условно положительных направлений токов в ветвях). Например, для первой ветви

$$I_1 = (E_1 - \varphi_1)/r_{вт1}.$$

1. Выполнить расчет схемы методом двух узлов при $E_1 = E_3 = 15$ В, $E_2 = (8 \dots 12)$ В, $r_{вт1}$, $r_{вт2}$ и r , величины которых задает преподаватель.

Вычисленные значения напряжений и токов занести в таблицу.

Значение параметра	Узловые напряжения	Токи ветвей схемы, А			Мощности, выделяющиеся в сопротивлениях, Вт			
	U_{10} , В	I_1	I_2	I	P_1	P_2	P_r	P_Σ
Рассчитанное								
Измеренное								

2. Преобразовать исходную схему как соединение активного и пассивного двухполюсников, считая сопротивление нагрузки r пассивным двухполюсником. Вычислить параметры активного двухполюсника $E_{эКВ}$, $r_{вт\ эКВ}$, рассчитать ток нагрузки I .

Экспериментальное исследование и обработка результатов измерений

- Привести персональный компьютер в рабочее состояние. Запустить программу «ВП ТОЭ», открыть меню и выбрать из него пункт «Приборы I».
- Собрать на наборном поле электрическую цепь согласно схеме (см. рис. 16), предусмотрев включение виртуального вольтметра для измерения межузлового напряжения и виртуальных амперметров для измерения токов ветвей. Схему зарисовать для включения в отчет.
- В соответствии с заданием установить значения ЭДС E_1, E_2, E_3 источников энергии, их внутренние сопротивления $r_{вт1}$ и $r_{вт2}$ и сопротивление нагрузки r . При проведении опытов сопротивление нагрузки r необходимо изменять в широких пределах. Условные положительные направления токов в ветвях схемы указаны на рис. 16.
- В собранной электрической цепи произвести измерения напряжений, токов, сопротивлений и мощностей, используя для этого виртуальные приборы (меню блока «Приборы II» для последних двух измерений).
- Результаты измерений занести в таблицу (при необходимости добавив ячейки).
- Измерить параметры активного двухполюсника $E_{экв}, r_{вт экв}$. Для этого вынуть сопротивление нагрузки r из схемы и измерить напряжение холостого хода $U_{xx} = E_{экв}$ между положительным выводом источника E_3 и точкой 1. Для измерений напряжения $U_{xx} = E_{экв}$ использовать как виртуальные приборы, так и мультиметры МУ-60, МУ-60Т. При измерении внутреннего сопротивления $r_{вт экв}$ активного двухполюсника необходимо выключить(!!!) все источники ЭДС (при этом тумблеры выключения замкнут внешние цепи по отношению к источникам) и измерить входное сопротивление получившегося пассивного двухполюсника мультиметром МУ-60 (МУ-60Т).
- Сравнить расчетные и измеренные параметры пассивного и активного двухполюсников.
- Составить баланс мощностей и провести его анализ.
- Сравнить и проанализировать расчетные и экспериментальные результаты и сделать выводы.

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Краткие теоретические сведения и расчетные формулы для определения токов, напряжений и мощностей в разветвленных электрических цепях постоянного тока.
3. Расчетная схема, схема эксперимента с виртуальными приборами, преобразованные схемы активного и пассивного двухполюсников.
4. Расчеты электрических параметров исследуемых схем.
5. Таблицы с расчетными и экспериментальными данными.
6. Анализ полученных результатов и выводы по работе, соответствующие поставленным целям.

Контрольные вопросы

1. Какие методы расчета разветвленных электрических цепей постоянного тока Вы знаете? Дайте им краткую сравнительную характеристику и обоснуйте области применимости.
2. Каким уравнением можно воспользоваться для наиболее полной проверки правильности расчета электрической цепи?
3. Каким образом рассчитывается мощность, отдаваемая источниками напряжения и источниками тока?
4. Зависит ли вид второго закона Кирхгофа от направления обхода контура?
5. В каких случаях выбирают режим максимальной мощности, выделяемой в нагрузке, а в каких – режим максимального КПД?
6. В каких случаях целесообразно использовать метод эквивалентного генератора (активного двухполюсника)?
7. Как распределяется общий ток между параллельно соединёнными ветвями?
8. В каких случаях источник электрической энергии работает как потребитель?
9. Каково внутреннее сопротивление активного двухполюсника, если при подключении по очереди сопротивлений 300 и 1200 Ом оказалось, что выделяющиеся в них мощности одинаковы?

10. Запишите формулы для преобразования треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду сопротивлений, и наоборот.
11. В каких случаях расчет цепи целесообразно проводить по методу узловых потенциалов, а в каких – по методу контурных токов?
12. Как учитывается ветвь с источником тока при составлении уравнений по методу узловых потенциалов?
13. Запишите первый и второй законы Кирхгофа в матричной форме и поясните их структуру.
14. Запишите узловые уравнения в матричной форме и поясните их структуру.
15. Запишите контурные уравнения в матричной форме и поясните их структуру.
16. В чем заключается сущность метода наложения?

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ НЕРАЗВЕТВЛЕННЫХ ЦЕПЕЙ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Цель работы – изучение методов расчета и анализа электрических цепей синусоидального тока, расчетное и экспериментальное определение действующих значений напряжений, токов и сдвигов фаз между ними; активных и реактивных мощностей; условий возникновения резонанса напряжений; приобретение навыков построения векторных диаграмм и работы с виртуальными приборами.

Краткие теоретические сведения

Переменный ток в противоположность постоянному току периодически меняет свое направление. Зависимость (функция) переменного тока или напряжения от времени может иметь различную форму. На рис. 17 показаны некоторые типичные для электротехники и электроники функции. Кроме того, различают *однофазные* и *многофазные переменные* напряжения и токи. Электроснабжение массовых

потребителей осуществляется, как правило, посредством *трехфазного* переменного тока.

Последующие выкладки относятся к однофазным *синусоидальным* напряжениям и токам, которые наиболее часто используются в электротехнике.

Синусоидальные напряжения и токи характеризуются следующими параметрами: *период, частота, амплитуда, действующее (среднеквадратическое) значение, начальная фаза, фазовый сдвиг (угол) между током и напряжением, мощность.*

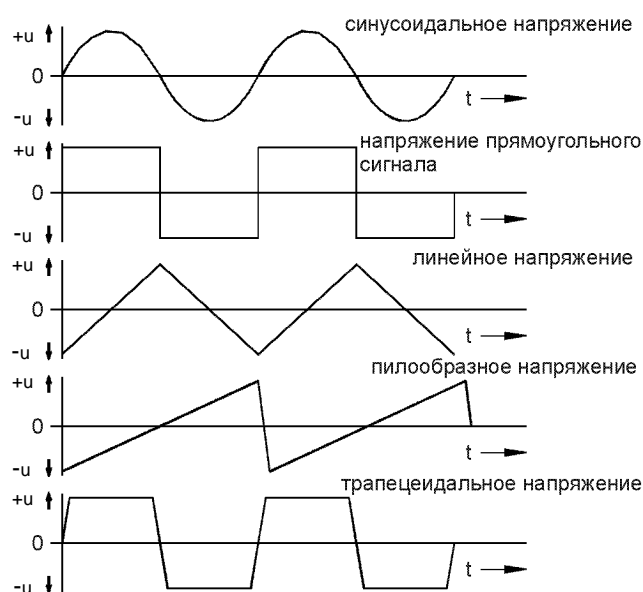


Рис. 17

На рис. 18 показаны напряжение и ток как синусоидальные функции времени.

Наименьший промежуток времени, через который значения переменного напряжения или тока повторяются, называется *периодом*. Период обозначается буквой T и измеряется в секундах.

В течение одного периода T напряжение последовательно оказывается равным нулю, положительному максимуму U_m (*амплитудное значение*), затем нулю, отрицательному максимуму и снова нулю.

Аналогично выглядит график изменения тока, но в общем случае ток может быть сдвинут во времени относительно напряжения (отставать от напряжения или опережать его).

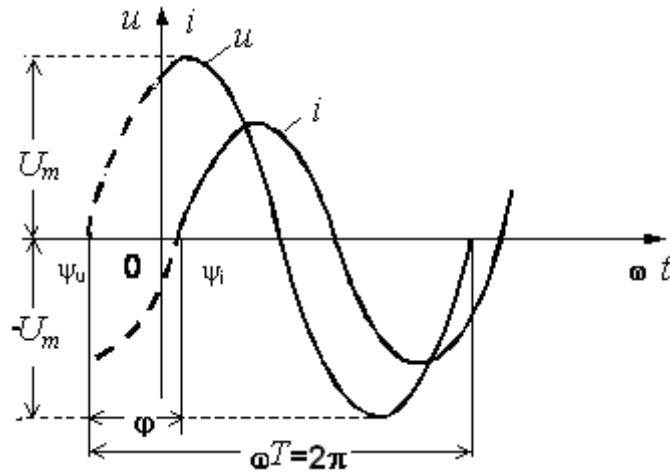


Рис. 18

Мгновенные значения синусоидальных напряжения u и тока i :

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u), \quad i = I_m \sin(\omega t + \psi_i),$$

где U_m , I_m – амплитудные значения напряжения и тока соответственно;

ψ_u и ψ_i – начальные фазы напряжения и тока (измеряются в радианах или в градусах).

Разность фаз напряжения и тока (фазовый сдвиг):

$$\varphi = \psi_u - \psi_i.$$

Частота f (циклическая) в герцах (Гц) выражается как число периодов в секунду $f = 1/T$.

Угловая частота ω (рад/с) $\omega = 2\pi f$.

Действующие значения синусоидальных тока и напряжения

$$I = I_m / \sqrt{2}, \quad U = U_m / \sqrt{2}.$$

Если синусоидальное напряжение прикладывается к резистивной нагрузке, в ней возникает синусоидальный ток. При этом ток и напряжение совпадают *по фазе*, то есть оба они достигают положительных и отрицательных амплитудных значений одновременно (рис. 19).

Мощность, которая выделяется в чисто резистивной нагрузке, определяется как произведение напряжения на ток. Кривую мгновенных значений мощности можно построить, перемножая мгновенные значения напряжения и тока, взятые попарно в различные моменты времени.

Среднее значение мгновенной мощности (она пульсирует с двойной частотой) выражается через действующие значения приложенного напряжения и тока через резистор

$$P = UI$$

или, выражая через активное сопротивление r ,

$$P = I^2 r \quad \text{и} \quad P = U^2/r.$$

Эта мощность называется *активной мощностью*.

Если последовательно с резистором включить конденсатор (рис. 20) и на эту цепь подать переменное синусоидальное напряжение, то один и тот же синусоидальный ток будет протекать через оба компонента цепи.

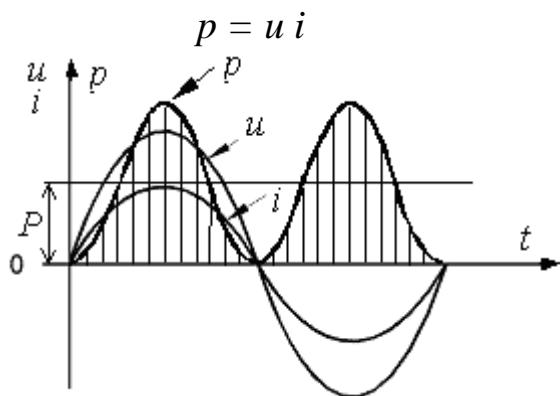


Рис. 19

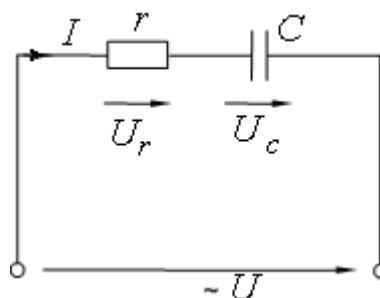


Рис. 20

Для анализа многокомпонентных схем синусоидального переменного тока можно использовать метод векторных диаграмм (или комплексный метод). На векторной диаграмме каждая синусоидальная функция времени (ток или напряжение) представляется вектором, длина которого соответствует в выбранном масштабе амплитуде или действующему значению, а направление определяется начальной фазой, отсчитываемой от выбранного начала отсчета углов (в комплексном методе – соответствующим радиус-вектором на комплексной плоскости). Например, напряжение $u = U_m \sin(\omega t + \psi)$ изображается радиус-вектором \dot{U}_m длиной U_m (равной амплитуде напряжения) или вектором \dot{U} длиной $U_m/\sqrt{2}$ (равной действующему значению), расположенным под углом ψ к горизонтали (положительное направление угла отсчитывается против часовой стрелки).

Между напряжениями \dot{U}_r , \dot{U}_c и \dot{U} существуют фазовые сдвиги, обусловленные емкостным реактивным сопротивлением конденсатора $x_c = 1 / (\omega C) = 1 / (2\pi f C)$. Эти фазовые сдвиги могут быть представ-

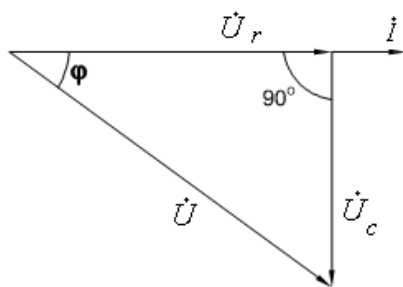


Рис. 21

лены с помощью векторной диаграммы напряжений (рис. 21).

Фазовый сдвиг между током \dot{I} и напряжением на резисторе \dot{U}_r отсутствует, тогда как сдвиг между этим током и напряжением на конденсаторе \dot{U}_c равен -90° (ток опережает напряжение

на 90°). При этом сдвиг между полным напряжением \dot{U} , приложенным к цепи, и током \dot{I} определяется соотношением сопротивлений x_c и r .

Из-за фазового сдвига между током и напряжением в цепях, подобных данной, простое арифметическое сложение действующих или амплитудных значений напряжений на отдельных элементах цепи невозможно. Невозможно и сложение разнородных (активных и реактивных) сопротивлений. Однако в комплексной форме

$$\dot{U} = \dot{U}_r + \dot{U}_c.$$

Если каждую сторону треугольника напряжений разделить на ток, то получим треугольник сопротивлений (рис. 22). В треугольнике сопротивлений z представляет собой так называемое полное сопротивление цепи.

Действующее значение полного напряжения цепи, как следует из векторной диаграммы:

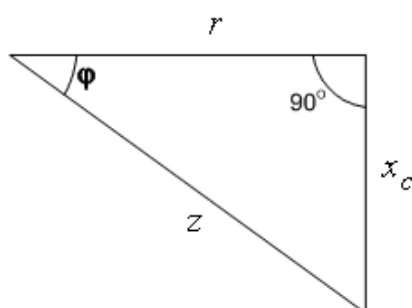


Рис. 22

$$U = \sqrt{U_r^2 + U_c^2} = zI.$$

Полное сопротивление цепи

$$z = \sqrt{r^2 + x_c^2} = U/I,$$

активное сопротивление цепи

$$r = z \cos \varphi,$$

ёмкостное реактивное сопротивление цепи

$$x_c = z \sin \varphi.$$

Угол сдвига фаз

$$\varphi = \arctg(-U_C/U_r) = \arctg(-x_C/r).$$

Если последовательно с резистором включить катушку индуктивности (рис. 23) и на эту цепь подать переменное синусоидальное напряжение, то один и тот же синусоидальный ток будет протекать через оба компонента цепи. При этом сопротивление r можно считать омическим сопротивлением провода катушки и данная схема может служить моделью реальной катушки индуктивности.

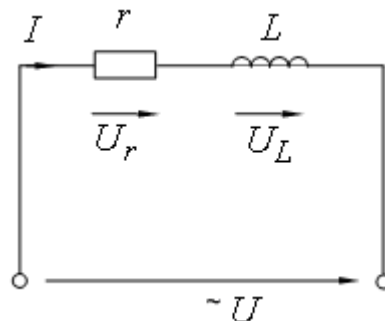


Рис. 23

Между напряжениями \dot{U}_r , \dot{U}_L и \dot{U} существуют фазовые сдвиги, обусловленные индуктивным реактивным сопротивлением $x_L = \omega L$ катушки. Эти фазовые сдвиги могут быть представлены с помощью векторной диаграммы напряжений (рис. 24). Фазовый сдвиг между током \dot{I} и напряжением \dot{U}_r на резисторе отсутствует, тогда как сдвиг между этим током и падением напряжения \dot{U}_L на катушке индуктивности равен 90° (ток отстает от напряжения на 90°). При этом сдвиг между полным напряжением \dot{U} , приложенным к цепи, и током \dot{I} определяется соотношением сопротивлений x_L и r .

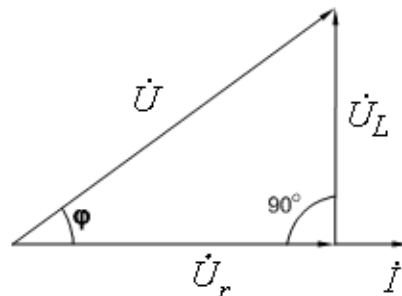


Рис. 24

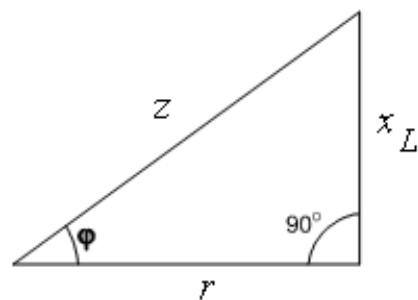


Рис. 25

Разделив все стороны треугольника напряжений на ток, получим треугольник сопротивлений (рис. 25), в котором z представляет собой так называемое полное сопротивление цепи.

Из-за фазового сдвига между током и напряжением в цепях, подобных данной, простое арифметическое сложение действующих или амплитудных значений напряжений на отдельных элементах цепи невозможно, но в комплексной форме $\dot{U} = \dot{U}_r + \dot{U}_L$.

Расчет ведется по следующим формулам, вытекающим из векторной диаграммы и треугольника сопротивлений.

Действующее значение полного напряжения цепи

$$U = \sqrt{U_r^2 + U_L^2};$$

$$U = zI.$$

Полное сопротивление цепи

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2};$$

$$z = U/I.$$

Активное сопротивление цепи

$$r = z \cos \varphi,$$

индуктивное реактивное сопротивление цепи

$$x_L = z \sin \varphi.$$

Угол сдвига фаз

$$\varphi = \arctg(x_L/r).$$

При последовательном соединении r , L и C (рис. 26, а) и действии на эту цепь переменного синусоидального напряжения один и тот же синусоидальный ток будет протекать через все компоненты цепи. Такая цепь носит название "последовательный резонансный контур".

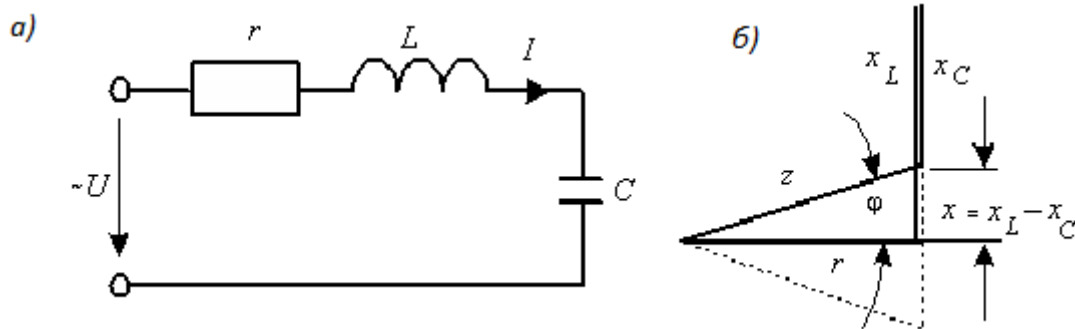


Рис. 26

В последовательном резонансном контуре активное сопротивление не зависит от частоты, а реактивные индуктивное и ёмкостное сопротивления изменяются в соответствии со следующими выражениями:

$$x_L(\omega) = \omega L, \quad x_C(\omega) = 1/\omega C, \quad x(\omega) = x_L(\omega) - x_C(\omega).$$

Индуктивное сопротивление увеличивается, а ёмкостное — уменьшается при увеличении частоты. При этом по цепи с последовательным соединением резистора, конденсатора и катушки индуктивности протекает один и тот же синусоидальный ток \dot{I} . Фазовый сдвиг между током \dot{I} и напряжением \dot{U}_r на резисторе отсутствует, напряжение \dot{U}_c на конденсаторе отстает от тока \dot{I} на 90° , а напряжение \dot{U}_L на катушке индуктивности опережает ток на 90° . Последние два напряжения находятся в противофазе (повернуты относительно друг друга на 180°).

Когда одно из двух последних напряжений больше другого, цепь оказывается либо преимущественно индуктивной (рис. 27, а), либо преимущественно ёмкостной (рис. 27, б). Если напряжения \dot{U}_L и \dot{U}_c имеют одинаковые значения и компенсируют друг друга, то суммарное напряжение на участке цепи L - C оказывается равным нулю. Остается только составляющая напряжения на активном сопротивлении реальной катушки. Такое явление называется резонансом напряжений (рис. 27, в).

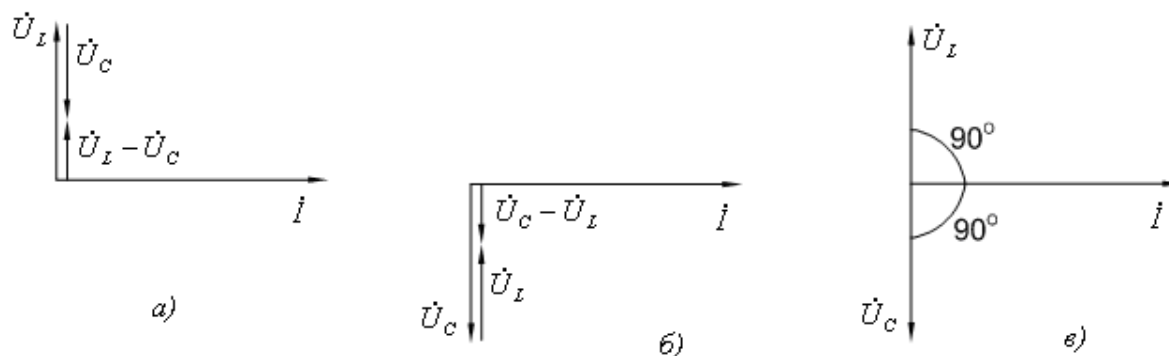


Рис. 27

При резонансе напряжений реактивное сопротивление цепи $x = x_L - x_C$ оказывается равным нулю. При заданных значениях L и C резонанс напряжений может быть получен путем изменения частоты.

Поскольку $x_L = \omega L$, а $x_C = 1/\omega C$, резонансная частота ω_0 может быть определена из уравнения

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

откуда

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

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

Вид треугольника сопротивлений для последовательной r - L - C -цепи будет зависеть от соотношения величин x_L и x_C (рис. 26, б). Если $x_L > x_C$ (сплошная линия), то реактивное сопротивление носит индуктивный характер, если $x_C > x_L$ (пунктирная линия), то реактивное сопротивление носит ёмкостный характер. Полное сопротивление, как следует из треугольника сопротивлений (см. рис. 26, б):

$$z(\omega) = \sqrt{r^2 + x^2}.$$

При резонансной частоте $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ индуктивное сопротивление равно ёмкостному $x_L(\omega_0) = x_C(\omega_0) = \sqrt{L/C} = \rho$.

Это сопротивление называется характеристическим сопротивлением последовательного резонансного контура, а отношение напряжений при резонансе

$$U_C/U = U_L/U = I\rho/Ir = \rho/r = Q$$

– добротностью резонансного контура.

Если $Q > 1$, то при резонансе напряжения $U_L(\omega_0)$ и $U_C(\omega_0)$ превышают приложенное напряжение в Q раз, при этом могут произойти пробой диэлектриков конденсаторов и изоляции катушек индуктивностей.

Задание на подготовку к работе

1. Изучить методы расчета линейных электрических цепей синусоидального тока, уделив особое внимание комплексному методу.
2. Записать выражения, связывающие мгновенные, амплитудные и действующие значения синусоидальных токов и напряжений, величину и знак разности фаз между напряжением и током для различных (по характеру) реактивных сопротивлений, объяснить связь этих вы-

ражений с векторными диаграммами; дать представление этих же величин в комплексной форме.

3. Записать выражения для определения тока в цепи классическим способом и в комплексной форме для цепей $r-L$, $r-C$, $r-L-C$.

4. Записать выражения для вычисления полного сопротивления для цепей $r-L$, $r-C$, $r-L-C$.

5. Записать выражения для вычисления комплексного сопротивления в алгебраической и показательной формах для цепей $r-L$, $r-C$, $r-L-C$.

6. Изучить определения и привести формулы активной и реактивной мощностей.

7. Определить параметры резонансного режима для заданных значений r , L и C .

Рабочее задание

1. Определить расчетные параметры синусоидальных тока и напряжений в простейшей активной цепи; определить эти же параметры экспериментально, используя виртуальные приборы и мультиметры.

2. Получить осциллограммы тока и напряжений.

3. Исследовать последовательную $r-C$ -цепь.

4. Исследовать последовательную $r-L$ -цепь.

5. Исследовать последовательную $r-L-C$ -цепь, рассчитать и экспериментально определить параметры резонансного режима ω_0 , ρ , Q .

Экспериментальное исследование и обработка результатов измерений

- Привести персональный компьютер в рабочее состояние. Запустить программу «ВП ТОЭ», открыть меню и выбрать из него пункт «Приборы I».

- Собрать на наборном поле электрическую цепь согласно схеме (рис. 28).

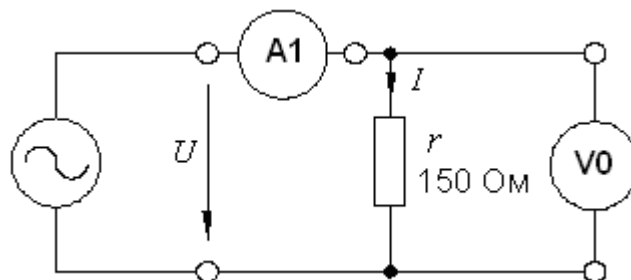


Рис. 28

- Установить на регулируемом источнике синусоидального сигнала напряжение $U = (3 + N_{\text{бригады}}) \text{В}$, частоту $f = (600 + 100N_{\text{бригады}}) \text{Гц}$.
- Включить виртуальные приборы V0, A1 и осциллограф.
- «Подключить» два входа осциллографа к приборам V0 и A1, а остальные отключить.
- Установить параметры развёртки осциллографа так, чтобы на экране было изображение одного-двух периодов напряжения и тока.
- Определить по осциллографу: амплитудные значения напряжения и тока U_m, I_m , их действующие значения U, I ; период T , частоты f и ω , фазовый сдвиг $\varphi = \psi_u - \psi_i$ между напряжением и током, мгновенное значение напряжения $u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ в момент времени $t = T/(2 + N_{\text{бригады}})$. Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу.

Средства измерения	U_m , В	I_m , мА	U , В	I , мА	T , мс	f , Гц	ω , рад/с	φ , град	$u(t)$, В
Осциллограф									
Виртуальный прибор									

- Измерить U_m, I_m, U, I с помощью виртуальных приборов, занести результаты в таблицу и сравнить с результатами измерения осциллографом.
- Включить блок «Приборы II», сделать необходимые «подключения», измерить T, f, φ . Записать полученные значения в таблицу и сравнить с результатами, полученными с помощью осциллографа.
- Собрать цепь согласно схеме (рис. 29), выбрав из линейки сопротивлений ближайшее номинальное значение в соответствии с выражением $r = (50 + 50N_{\text{бригады}}) \text{Ом}$; подсоединить регулируемый источник синусоидального напряжения и установить его параметры как в предыдущем эксперименте.

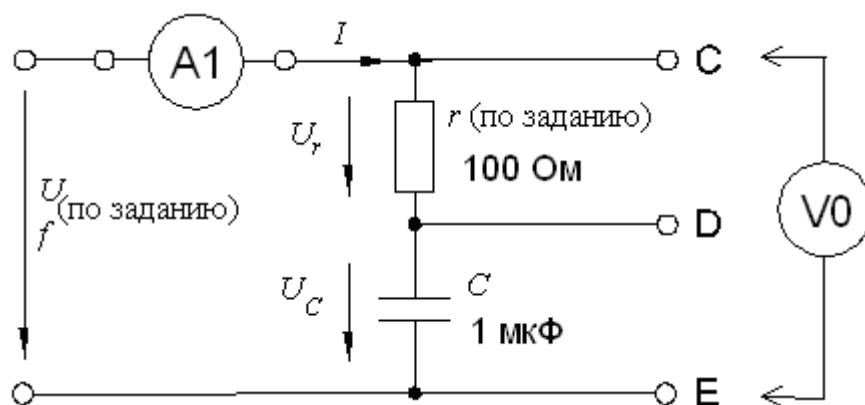


Рис. 29

- Включить виртуальные приборы V0, A1 и осциллограф.
- «Подключить» два входа осциллографа к приборам V0 и A1, а остальные отключить.
- Виртуальными приборами выполнить измерения действующих значений тока и напряжений, результаты занести в следующую таблицу. При измерениях соответствующих напряжений подключайте канал V0 коннектора к зажимам C-E, C-D, D-E поочередно. Снимите осциллограммы напряжений и тока (попарно), определите по осциллографу действующие значения тока и напряжений, фазовый сдвиг между напряжением и током, результаты занесите в следующую таблицу, осциллограммы (лучше на светлом фоне) сохраните для анализа и последующего включения в отчет.

Средства измерения	U , В	U_r , В	U_c , В	I , мА	φ , град	r , Ом	x_c , Ом	z , Ом	P , Вт	Q , ВАр	S , ВА
Расчетные значения											
Виртуальный прибор											
Осциллограф											

- Измерьте виртуальными приборами с помощью блока «Приборы II» φ , r , x_c , z , активную, реактивную, полную мощности и

запишите их значения также в ту же таблицу под рассчитанными величинами. Сравните и проанализируйте результаты.

- Постройте векторную диаграмму напряжений, треугольники сопротивлений и мощностей для последовательной r - C -цепи, проанализируйте их взаимосвязь.
- Соберите цепь согласно схеме (рис. 30), подсоедините регулируемый источник синусоидального напряжения и установите его параметры: $U=(3+N_{\text{бригады}})\text{В}$, частоту $f=(200+100N_{\text{бригады}})\text{Гц}$. В качестве индуктивности с малым активным сопротивлением используйте катушку трансформатора 300 витков, вставив между подковами разъемного сердечника полоски бумаги в один слой (немагнитный зазор).

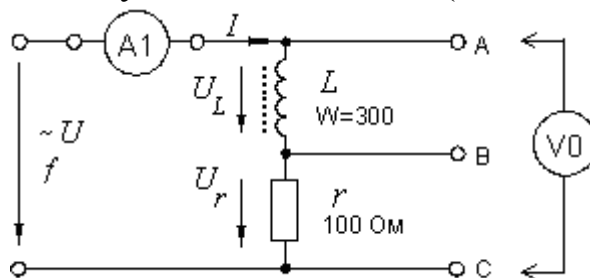


Рис. 30

- Выполните измерения тока и напряжений, указанных в таблице (как в предыдущем эксперименте), заменив U_C на U_L . Измерьте виртуальными приборами с помощью блока «Приборы II» φ , r , x_L , z , активную, реактивную, полную мощности и также запишите их значения в новую таблицу (аналогичную предыдущей) под рассчитанными величинами. Снимите осциллограммы напряжений и тока (попарно), определите по осциллографу действующие значения тока и напряжений, фазовый сдвиг между напряжением и током, результаты занесите в таблицу, осциллограммы сохраните для анализа и включения в отчет. Рассчитайте величину индуктивности катушки, используемой в эксперименте, эта величина понадобится в дальнейших расчетах.
- Сравните и проанализируйте результаты.
- Постройте векторную диаграмму напряжений, треугольники сопротивлений и мощностей для последовательной r - L -цепи, проанализируйте их взаимосвязь.

- Перед началом исследований последовательной r - L - C -цепи измерьте мультиметром активное сопротивление r катушки индуктивности, указанной на схеме (рис. 31). Вычислите резонансную частоту f_0 , Гц; характеристическое сопротивление ρ , Ом, и добротность Q резонансного контура. Ёмкость конденсатора выбрать по номеру бригады из ряда: 1,0; 1,22; 1,47; 1,69 мкФ (подключая параллельно конденсатору $C = 1$ мкФ соответствующие конденсаторы из набора мини-блоков).
- Собрать цепь согласно схеме (см. рис. 31), включив в неё в качестве измерительных приборов соответствующие гнезда коннектора и считая сопротивление r сопротивлением катушки индуктивности. Добавочное сопротивление $r_{доб}$ на этом этапе можно принять равным нулю ($Q > 1$). Подсоедините регулируемый источник синусоидального напряжения и установите его параметры: $U = 5$ В, $f = f_0$.

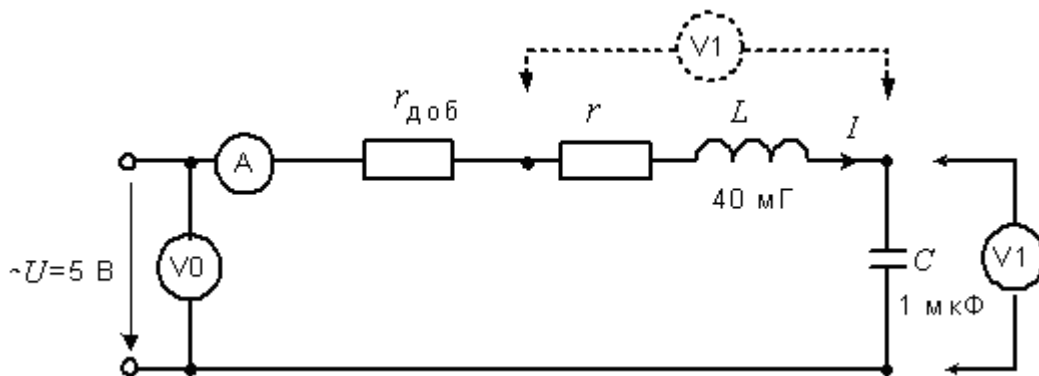


Рис. 31

- Включите виртуальные приборы. Изменяя частоту приложенного напряжения вблизи от расчетной резонансной, добейтесь резонанса по максимальному току. Для точной настройки по максимуму тока необходимо поддерживать неизменным напряжение на входе цепи. При измерениях виртуальными приборами резонанс настраивается по переходу через ноль угла сдвига фаз между входным напряжением и током, тогда нет необходимости поддерживать входное напряжение неизменным. Сравните экспериментальную резонансную частоту с расчётной, объясните, чем может быть вызвано расхождение.
- Выполните измерения тока и напряжений, составьте новую таблицу (аналогичную предыдущим), занесите в неё результаты измерений.

- Измерьте виртуальными приборами с помощью блока «Приборы II» φ , r , x_C , x_L , z , активную, реактивную, полную мощности и запишите их значения также в последнюю таблицу под рассчитанными величинами. Сравните и проанализируйте результаты.
- По результатам измерений оцените величины характеристического сопротивления $\rho = x_L(\omega_0) = x_C(\omega_0)$ и добротности $Q = U_C/U = U_L/U$, сравните их с расчетными.
- Произведите измерения и запишите в нижеследующую таблицу результаты измерений при резонансе $f=f_0$, при $f_1 \approx 0,75f_0$ и $f_2 \approx 1,25f_0$. Снимите осциллограммы напряжений и тока для этих трех случаев, осциллограммы сохраните для анализа и включения в отчет.

f , Гц	I , мА	U , В	U_{r-L} , В	U_C , В	$\varphi = \psi_u - \psi_i$
$f_0 =$					
$f_1 =$					
$f_2 =$					

- Постройте векторные диаграммы напряжений в одном масштабе для трех случаев и проанализируйте их.
- Включите в цепь добавочное сопротивление $r_{доб} = 100 \dots 330$ Ом и убедитесь, что резонансная частота не изменилась, а ток и напряжения U_{r-L} и U_C при резонансе стали меньше.
- Измерьте активную, реактивную, полную мощности, оцените величину добротности Q , сравните их с аналогичными величинами при резонансе.

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Краткие теоретические сведения и расчетные формулы для определения сопротивлений, токов, напряжений и мощностей в неразветвленных электрических цепях синусоидального тока.
3. Схемы, таблицы с расчетными и экспериментальными данными, векторные диаграммы, треугольники сопротивлений и мощностей, осциллограммы тока и напряжений.
4. Расчеты электрических параметров исследуемых схем.
5. Анализ полученных результатов и выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Какие методы расчета электрических цепей синусоидального тока Вы знаете? Дайте им краткую характеристику.
2. Какими параметрами характеризуются синусоидальные токи и напряжения?
3. Как в общем случае (ψ_i не равно нулю) определить активную и реактивную составляющие тока в последовательной $r-L-C$ -цепи?
4. Существуют ли физически в последовательной $r-L-C$ -цепи активный и реактивный токи?
5. В каком случае реактивное сопротивление $r-L-C$ -цепи и сдвиг фаз между током и напряжением имеют отрицательные знаки?
6. Как изменится векторная диаграмма, если частоту f увеличить (уменьшить) в два раза?
7. Как рассчитать цепь, если в ней кроме резистора последовательно включены два конденсатора и две катушки индуктивности?
8. Как определяется полоса пропускания последовательного резонансного контура?
9. Как изменить добротность последовательного резонансного контура в n раз (например, уменьшить в 3 раза)?
10. Как измерить активное и индуктивное сопротивления катушки, используя режим резонанса напряжений?
11. Какой характер имеет полное сопротивление последовательной $r-L-C$ -цепи при резонансе?
12. Изобразите схему электрической цепи, содержащую пять последовательно соединенных элементов, в которой при напряжении на входе $U=100$ В действующие значения напряжений на каждом из её пяти элементов также равны 100 В. Приведите Ваши рассуждения.
13. Цепь с последовательно соединенными r и L находится под действием синусоидального напряжения. Изменится ли активная мощность в цепи (если да, то как) при увеличении частоты?
14. Объясните характер энергетических процессов в последовательном резонансном контуре.
15. Приведите примеры практического применения резонанса в электрических цепях.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ РАЗВЕТВЛЕННЫХ ЦЕПЕЙ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Цель работы – изучение методов расчета и анализа разветвленных электрических цепей синусоидального тока, расчетное и экспериментальное определение действующих значений напряжений, токов и сдвигов фаз между ними; соотношений между активными, реактивными, полными и комплексными мощностями; условий возникновения и достижения резонанса токов; приобретение навыков построения векторных диаграмм и работы с виртуальными приборами.

Краткие теоретические сведения

Расчёт разветвлённых цепей синусоидального тока в установившихся режимах работы ведут с помощью комплексных функций и представляют их в виде векторных диаграмм на комплексной плоскости (комплексный метод).

Методы расчёта цепей постоянного тока (посредством законов Кирхгофа, методами узловых напряжений, контурных токов, наложения, преобразования схем) справедливы и для расчёта цепей синусоидального тока. При этом синусоидально изменяющиеся величины (ЭДС, напряжение и ток) представляют в виде комплексных чисел, которые, в свою очередь, изображают в виде радиус-векторов на комплексной плоскости. При этом алгебраические действия над синусоидальными величинами заменяют действиями над комплексными числами или над радиус-векторами. Сопротивления в цепях синусоидального тока также представляют в виде комплексных чисел: полное комплексное сопротивление двухполюсника для гармонического сигнала называется *импеданс*, а полная комплексная проводимость – *адмиттанс*. Кроме того, вводятся понятия полной и комплексной мощности, тогда все законы и баланс мощности будут справедливы для цепей синусоидального тока в комплексной форме.

В данной работе исследуется цепь с параллельным соединением ветвей – пассивных двухполюсников.

Если к цепи с параллельным соединением резистора и конденсатора (рис. 32) приложить переменное синусоидальное напряжение, то одно и то же напряжение будет приложено к обоим компонентам цепи.

Общий ток \dot{I} цепи разветвляется на ток \dot{I}_C через конденсатор (ёмкостная составляющая общего тока) и ток \dot{I}_r – через резистор (активная составляющая).

Между токами \dot{I} , \dot{I}_C и \dot{I}_r существуют фазовые сдвиги, обусловленные ёмкостным реактивным сопротивлением x_C конденсатора. Они могут быть представлены с помощью векторной диаграммы токов (рис. 33).

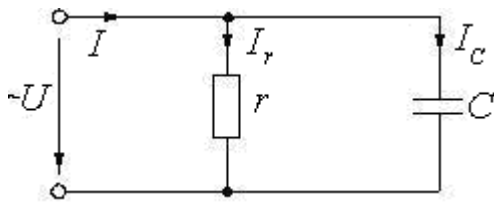


Рис. 32

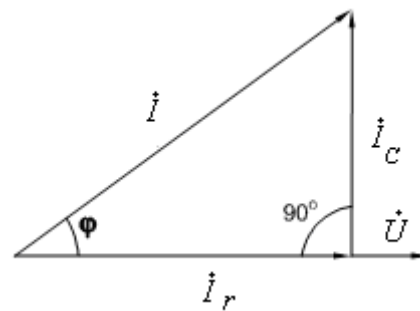


Рис. 33

Фазовый сдвиг между напряжением \dot{U} цепи и током \dot{I}_r через резистор отсутствует, тогда как между этим напряжением и током \dot{I}_C через конденсатор он равен $+90^\circ$ (т.е. ток опережает напряжение на 90°). При этом сдвиг фаз между полным током \dot{I} и напряжением \dot{U} цепи определяется соотношением между проводимостями b_C и g . Разделив каждую сторону треугольника токов на напряжение, получим треугольник проводимостей (рис. 34).

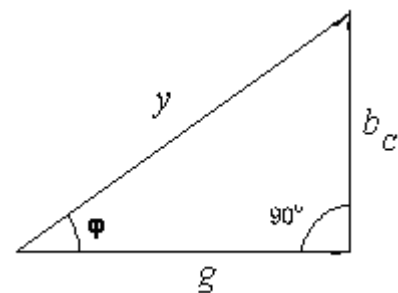


Рис. 34

В треугольнике проводимостей $g=1/r$, $b_C=1/x_C$, а $y = 1/z$ представляет собой так называемую полную проводимость цепи, тогда как

g – активная, b_c – реактивная (ёмкостная) проводимости (измеряются в сименсах (См)).

Из-за фазового сдвига между током и напряжением в цепях, подобных данной, простое арифметическое сложение действующих или амплитудных значений токов в параллельных ветвях невозможно; оно возможно в векторной форме $\dot{I} = \dot{I}_r + \dot{I}_c$.

Расчет ведется по следующим формулам, вытекающим из векторной диаграммы и треугольника проводимостей.

Действующие значения полного тока цепи, активной и ёмкостной составляющих соответственно:

$$I = \sqrt{I_r^2 + I_c^2}, \quad I = U/z = Uy, \quad I_r = Ug, \quad I_c = Ub_c.$$

Полная проводимость цепи

$$y = \sqrt{g^2 + b_c^2}; \quad y = I/U = 1/z,$$

где z – полное сопротивление цепи.

Угол сдвига фаз между током и напряжением

$$\varphi = \arctg(I_c/I_r) = \arctg(b_c/g).$$

Активная и реактивная проводимости $g = y \cos\varphi$; $b_c = y \sin\varphi$.

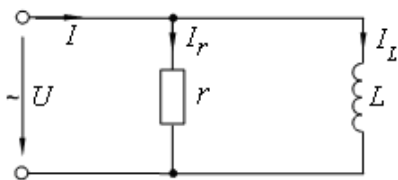


Рис. 35

Если к цепи с параллельным соединением резистора и катушки индуктивности (рис. 35) приложить переменное синусоидальное напряжение, то одно и то же напряжение будет приложено к обоим компонентам цепи.

Общий ток \dot{I} цепи разветвляется на ток \dot{I}_L через катушку (индуктивная составляющая общего тока) и ток \dot{I}_r – через резистор (активная составляющая).

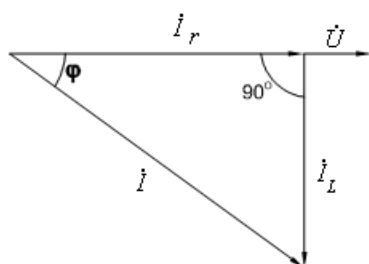


Рис. 36

Между токами \dot{I} , \dot{I}_L и \dot{I}_r существуют фазовые сдвиги, обусловленные индуктивным реактивным сопротивлением x_L катушки. Они могут быть представлены с помощью векторной диаграммы токов (рис. 36). Фазовый сдвиг между напряже-

нием \dot{U} цепи и током \dot{I}_r через резистор отсутствует, тогда как ток \dot{I}_L в катушке всегда отстает от напряжения цепи (или тока \dot{I}_r через резистор) на 90° . При этом сдвиг фаз между полным током \dot{I} и напряжением \dot{U} цепи определяется соотношением между проводимостями b_L и g (угол отрицательный).

Разделив каждую сторону треугольника токов на напряжение, получим треугольник проводимостей (рис. 37), в котором y представляет собой так называемую полную проводимость цепи, g – активную, а b_L – реактивную (индуктивную) проводимости.

Из-за фазового сдвига между током и напряжением в цепях, подобных данной, простое арифметическое сложение действующих или амплитудных значений токов в параллельных ветвях, как в параллельной чисто резистивной цепи, невозможно, оно возможно только в векторной форме $\dot{I} = \dot{I}_r + \dot{I}_L$.

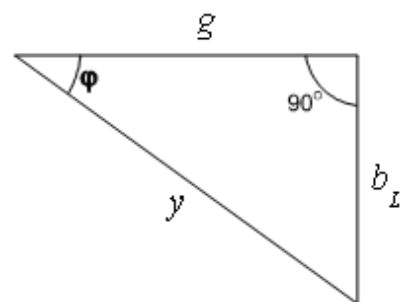


Рис. 37

Расчет ведется по следующим формулам.

Действующие значения полного тока цепи, активной и индуктивной составляющих соответственно:

$$I = \sqrt{I_r^2 + I_L^2}, \quad I = U/z = Uy, \quad I_r = Ug, \quad I_L = Ub_L.$$

Полная проводимость цепи

$$y = \sqrt{g^2 + b_L^2}, \quad y = 1/z,$$

где z – полное сопротивление цепи.

Угол сдвига фаз между током и напряжением

$$\varphi = - \arctg (I_L / I_r) = - \arctg (b_L / g).$$

Активная и реактивная проводимости цепи $g = y \cos \varphi$, $b = y \sin \varphi$.

Если к цепи с параллельным соединением резистора и катушки индуктивности параллельно подключить еще и конденсатор (рис. 38, а), то одно и то же переменное синусоидальное напряжение будет приложено к трем компонентам цепи. Токи в ветвях такой цепи будут пропорциональны проводимостям ветвей. Такая цепь получила название ”параллельный резонансный контур”.

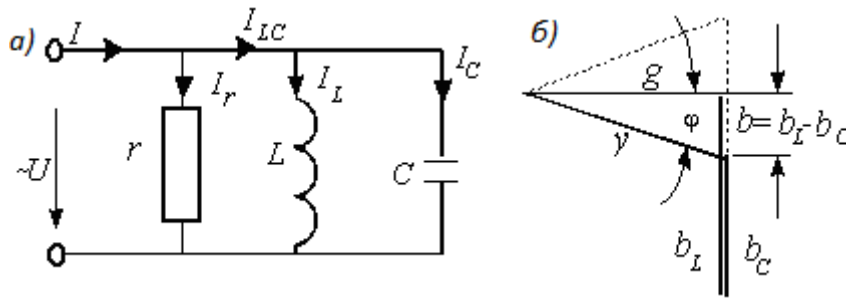


Рис. 38

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

$$b_L(\omega) = 1/\omega L; \quad b_C(\omega) = \omega C; \quad b(\omega) = b_L(\omega) - b_C(\omega).$$

Общий ток \dot{I} цепи разветвляется на ток \dot{I}_C через конденсатор (ёмкостная составляющая общего тока), ток \dot{I}_L – через катушку индуктивности (индуктивная составляющая общего тока), ток \dot{I}_r – через резистор (активная составляющая), причем ток \dot{I}_L отстает от напряжения \dot{U} на 90° , а ток \dot{I}_C опережает его на 90° (см. рис. 33, 36). Токи \dot{I}_C и \dot{I}_L имеют противоположные фазы (различаются на 180°), в зависимости от их величин уравновешивают друг друга полностью или частично. Когда $I_C = I_L$, имеет место резонанс токов.

При резонансе токов реактивная проводимость цепи $b = b_L - b_C$ равна нулю. Резонансная частота определяется из уравнения

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

откуда так же, как и при резонансе напряжений,

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

Полная проводимость при резонансе токов оказывается равной активной проводимости. Поэтому ток I в неразветвленной части цепи имеет минимальное значение, тогда как токи I_L и I_C могут превышать его в несколько раз.

При резонансной частоте

$$b_L(\omega_0) = b_C(\omega_0) = \sqrt{C/L} = \gamma.$$

Эта проводимость называется характеристической проводимостью резонансного контура, а отношение

$$I_L/I = I_C/I = U\gamma/Ug = \gamma/g = Q$$

так же, как и в последовательном контуре, называется добротностью. Если $Q > 1$, то при резонансе токов $I_L(\omega_0)$ и $I_C(\omega_0)$ превышают ток I источника в Q раз.

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

$$I(\omega) = Uy(\omega); \quad I_L(\omega) = U/\omega L; \quad I_C = U \omega C; \quad I_{LC} = Ub(\omega).$$

При резонансной частоте $\omega = \omega_0$ ток I , потребляемый от источника, имеет минимальное значение и равен току I_r в активном сопротивлении, а ток на реактивном участке цепи I_{LC} равен нулю. Такая схема называется "фильтр - пробка". Угол сдвига фаз изменяется в соответствии с выражением

$$\varphi = -\arctg[(1/\omega L - \omega C)/g].$$

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 на угол φ).

Особый интерес представляет вопрос о мощностях в цепях переменного тока.

На рис. 39, а изображена произвольная цепь синусоидального тока, состоящая из источника питания и пассивного двухполюсника. В общем случае ток и напряжение на входе пассивного двухполюсника сдвинуты по фазе на угол φ :

$$u(t) = U_m \sin(\omega t); \quad i(t) = I_m \sin(\omega t - \varphi), \quad (\text{ток отстает от напряжения}).$$

Мгновенная мощность, потребляемая цепью от источника питания:

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

где U, I – действующие значения напряжения и тока.

График изменения этой мощности представлен на рис. 39, б вместе с графиками изменения тока и напряжения. Мощность колеблется с двойной частотой, большую часть периода она имеет положительное значение, а меньшую – отрицательное. Отрицательное значе-

ние мощности свидетельствует о возврате части накопленной в конденсаторах и катушках индуктивности энергии в источник электрической энергии, питающий цепь.

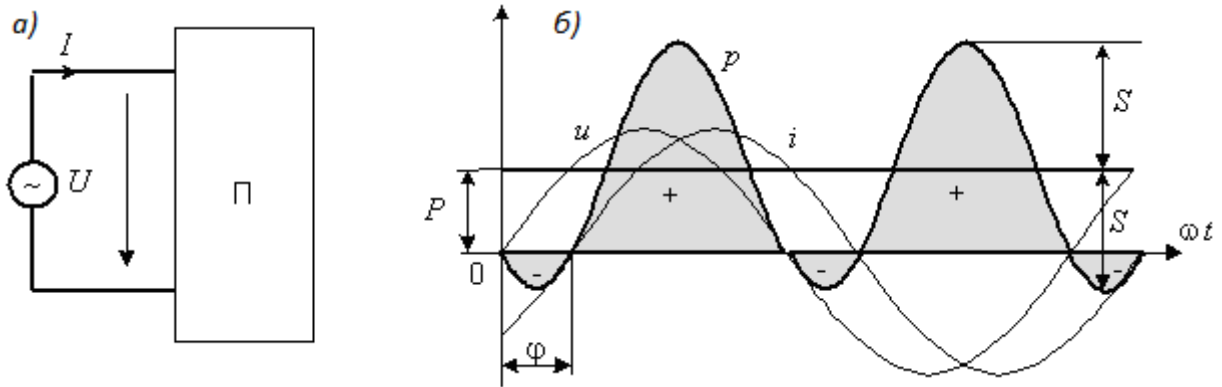


Рис. 39

Среднее значение потребляемой за период мощности

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

называется активной мощностью. Она характеризует среднюю скорость необратимого преобразования электрической энергии в другие виды энергии. Потребляемая в пассивной цепи активная мощность всегда имеет положительное значение, измеряется в ваттах (Вт).

Амплитуда переменной составляющей мощности (это максимальное отклонение мгновенной мощности от средней)

$$S = UI = I^2 z = U^2 y$$

называется полной мощностью. Она характеризует максимальную мощность, на которую должен быть рассчитан источник для питания данной цепи. Её иногда называют кажущейся, габаритной или аппаратной мощностью, единицей измерения является вольт-ампер (ВА). Величина $Q = UI \sin \varphi = I^2 x$ называется реактивной мощностью. Она характеризует максимальную скорость обмена энергией между источником и цепью (потребителем). Она может быть как положительной ($\varphi > 0$, нагрузка носит индуктивный характер), так и отрицательной ($\varphi < 0$, нагрузка носит ёмкостный характер). В связи с этим считают, что индуктивность потребляет «реактивную энергию», а ёмкость вырабатывает её. Реактивная мощность измеряется в вольт-амперах реактивных (ВАр).

При анализе электрических цепей синусоидального тока символическим методом используют выражение комплексной мощности, равное произведению действующих значений комплексного напряжения на сопряженный комплекс тока:

$$\begin{aligned} \tilde{S} &= \dot{U} \cdot \dot{I}^* = U \cdot e^{j\varphi_u} \cdot I \cdot e^{-j\varphi_i} = U \cdot I \cdot e^{j(\varphi_u - \varphi_i)} = U \cdot I \cdot e^{j\varphi} = \\ \varphi &= U \cdot I \cdot \cos \varphi + j \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi = P + j \cdot Q, \end{aligned}$$

где

$\dot{U} = U \cdot e^{j\varphi_u}$ – комплекс действующего значения напряжения;

$\dot{I} = I \cdot e^{j\varphi_i}$ – комплекс действующего значения тока;

$\dot{I}^* = I \cdot e^{-j\varphi_i}$ – сопряженный комплекс действующего значения тока;

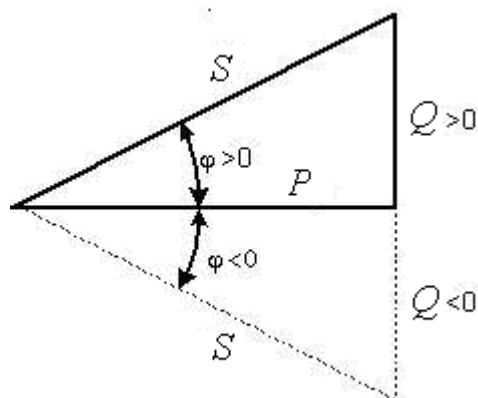
$\varphi = \varphi_u - \varphi_i$ – сдвиг по фазе между напряжением и током.

Из приведенных формул следует, что вещественной частью полной комплексной мощности является активная мощность, а мнимой частью комплексной мощности – реактивная мощность.

Соотношения между различными мощностями в цепи синусоидального тока можно наглядно представить в виде треугольника мощностей (рис. 40).

Баланс мощности в цепях синусоидального тока формулируется с использованием понятия комплексной мощности. Комплексная мощность источника электроэнергии должна равняться комплексной мощности потребителя

$$\tilde{S}_{\text{ист}} = \tilde{S}_{\text{потр}}.$$



$$P = S \cos \varphi$$

$$Q = S \sin \varphi$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P}$$

Рис. 40

Получим уравнение

$$P_{\text{ист}} + jQ_{\text{ист}} = P_{\text{потр}} + jQ_{\text{потр}}.$$

Два комплексных числа равны, если равны по отдельности их вещественные и мнимые части, следовательно, уравнение распадается на два:

$$P_{\text{ист}} = P_{\text{потр}} \text{ и } Q_{\text{ист}} = Q_{\text{потр}}.$$

В электрической цепи синусоидального тока выполняется баланс как активных, так и реактивных (но не полных!) мощностей, то есть суммы как активных, так и реактивных мощностей всех источников соответственно равны суммам активных и реактивных мощностей всех потребителей.

Задание на подготовку к работе

1. Изучить методы расчета разветвленных линейных электрических цепей синусоидального тока.
2. Записать выражения для вычисления полной комплексной проводимости для рассмотренных выше вариантов двухполюсников.
3. Привести в комплексной форме выражения, связывающие токи и напряжение через проводимости, выражения реактивной и полной проводимостей – через параметры цепи.
4. Определить параметры резонансного режима для заданных значений r , L и C .
5. Дать определения и привести формулы активной, реактивной, полной и комплексной мощностей.
6. Записать уравнение баланса мощностей в цепи синусоидального тока и дать его толкование.

Рабочее задание

1. Определить расчетные значения параметров синусоидальных токов и напряжения для заданных исходных данных.
2. Получить осциллограммы токов и напряжений для различных типов пассивных двухполюсников.
3. Исследовать параллельную rC -цепь.
4. Исследовать параллельную rL -цепь.
5. Исследовать параллельную rLC -цепь, рассчитать и экспериментально определить параметры резонансного режима ω_0 , γ , Q .

Экспериментальное исследование и обработка результатов измерений

- Привести персональный компьютер в рабочее состояние. Запустить программу «ВП ТОЭ», открыть меню и выбрать из него пункт «Приборы I».
- Собрать на наборном поле электрическую цепь согласно схеме (рис. 41), выбрав из линейки сопротивлений ближайшее номинальное значение в соответствии с выражением $r = (50 + 50N_{\text{бригады}})$ Ом.

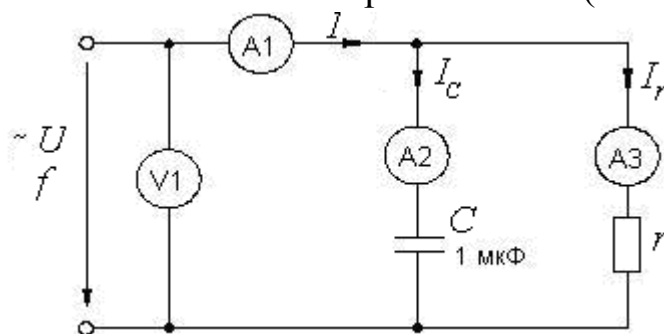


Рис. 41

- Установить на регулируемом источнике синусоидального сигнала напряжение $U = (3 + N_{\text{бригады}})$ В, частоту $f = (600 + 100N_{\text{бригады}})$ Гц, подсоединить его к исследуемой цепи.
- Включить виртуальные приборы V1, A1, A2, A3 и осциллограф.
- Выполнить измерения U, I, I_C, I_r и занести результаты в таблицу.

Средства измерения	U , В	I , мА	I_C , мА	I_r , мА	φ , град	r , Ом	x_C , Ом	z , Ом	P , Вт	Q , ВАр	S , ВА
Расчетные значения											
Виртуальный прибор											
Осциллограф											

- Снимите осциллограммы токов и напряжений и сохраните их для анализа и последующего включения в отчет.

- Включите блок «Приборы II», сделайте необходимые «подключения», измерьте φ , r , x_C , z , P , Q , S . Запишите полученные значения в таблицу и сравните с результатами, полученными с помощью виртуальных приборов и осциллографа (с помощью осциллографа измеряют амплитудные значения токов и напряжений).
- Вычислите активную, реактивную и полную проводимости.
- Сравните результаты вычислений с результатами виртуальных измерений.
- Постройте векторную диаграмму токов и треугольник проводимостей.
- Соберите цепь согласно схеме (рис. 42), подсоедините регулируемый источник синусоидального напряжения и установите его параметры как в предыдущем эксперименте. В качестве индуктивности с малым активным сопротивлением используйте катушку трансформатора 300 витков, вставив между подковами разъемного сердечника полоску бумаги в один слой (немагнитный зазор), выберите из линейки сопротивлений ближайшее номинальное значение в соответствии с выражением $r = (50 + 50N_{\text{бригады}})$ Ом.
- Включить виртуальные приборы V0, A1, A2, A3 и осциллограф.

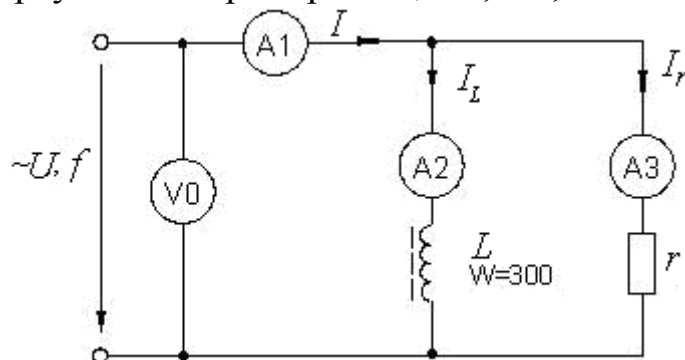


Рис. 42

- Выполнить измерения U , I , I_L , I_r и занести результаты в таблицу, аналогичную предыдущей.
- Снимите осциллограммы токов и напряжений и сохраните их для анализа и включения в отчет.
- Включите блок «Приборы II», измерьте φ , r , x_L , z , P , Q , S . Запишите полученные значения в подготовленную таблицу и сравните с результатами, полученными с помощью виртуальных приборов и осциллографа.

- Вычислите активную, реактивную и полную проводимости.
- Сравните результаты вычислений с результатами виртуальных измерений.
- Постройте векторную диаграмму токов и треугольник проводимостей.
- Перед началом исследований параллельной rLC -цепи измерьте мультиметром активное сопротивление r катушки индуктивности, указанной на схеме (рис. 43). Вычислите резонансную частоту f_0 , Гц; характеристическую проводимость γ , См, и добротность Q параллельного резонансного контура. Ёмкость конденсатора выбрать по номеру бригады из ряда: 1,0; 1,22; 1,47; 1,69 мкФ (подключая параллельно конденсатору $C = 1$ мкФ соответствующие конденсаторы из набора мини-блоков). Величину индуктивности катушки трансформатора используйте из выполненного расчета в лабораторной работе № 3.

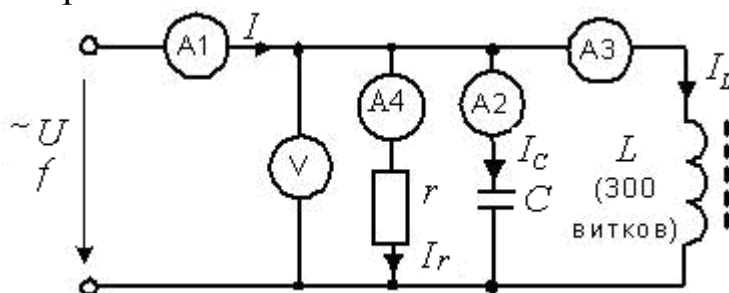


Рис. 43

- Соберите цепь согласно схеме (рис. 43), подсоедините регулируемый источник синусоидального напряжения и установите его параметры: $U = 5$ В, $f = f_0$. В качестве индуктивности с малым активным сопротивлением используйте катушку трансформатора 300 витков, вставив между подковами разъемного сердечника полоску бумаги в один слой (немагнитный зазор), выберите из линейки сопротивлений ближайшее номинальное значение в соответствии с выражением $r = (50 + 50N_{\text{бригады}})$ Ом.
- Включите виртуальные приборы. Изменяя частоту приложенного напряжения вблизи от расчетной резонансной, добейтесь резонанса по минимальному току источника (для точной настройки используйте методику лабораторной работы № 3). Сравните экспериментальную резонансную частоту с расчётной, объясните, чем может быть вызвано расхождение.

- Выполните измерения токов и напряжения, составьте новую таблицу (аналогичную предыдущим), занесите в неё результаты измерений.
- Измерьте виртуальными приборами с помощью блока «Приборы II» φ , r , x_C , x_L , z , активную, реактивную, полную мощности и запишите их значения также в последнюю таблицу в соответствующие ячейки под рассчитанными величинами. Рассчитайте активную, реактивную и полную проводимости. Сравните и проанализируйте результаты.
- По результатам измерений оцените величины характеристической проводимости $\gamma = b_L(\omega_0) = b_C(\omega_0)$ и добротности $Q = I_L/I = I_C/I$, сравните их с расчетными.
- Произведите измерения и запишите в нижеследующую таблицу результаты измерений при резонансе $f = f_0$, $f_1 \approx 0,75f_0$ и $f_2 \approx 1,25f_0$. Снимите осциллограммы напряжения и токов для этих трех случаев, осциллограммы сохраните для анализа и включения в отчет.
- Постройте векторные диаграммы токов в одном масштабе для трех случаев и проанализируйте их.

f , Гц	U , В	I , мА	I_r , мА	I_C , мА	I_L , мА	$\varphi = \psi_u - \psi_i$
$f_0 =$						
$f_1 =$						
$f_2 =$						

- Запишите уравнение баланса мощностей для цепей синусоидального тока, проверьте его экспериментально. Для этого измерьте активную, реактивную, полную мощности источника, отдельно сумму активных и реактивных мощностей пассивных двухполюсников на трех частотах. Проанализируйте получившиеся соотношения и сделайте выводы.

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Краткие теоретические сведения и расчетные формулы для определения проводимостей, токов, напряжений и мощностей в разветвленных электрических цепях синусоидального тока.
3. Схемы, таблицы с расчетными и экспериментальными данными, векторные диаграммы, треугольники проводимостей и мощностей, осциллограммы токов и напряжений.
4. Расчеты электрических параметров исследуемых схем.
5. Баланс мощностей.
6. Анализ полученных результатов и выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Какие методы расчета разветвленных электрических цепей синусоидального тока Вы знаете? Дайте им краткую характеристику.
2. Запишите законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме, поясните их.
3. При каких условиях возникает резонанс токов?
4. Как экспериментально определить режимы резонанса токов и напряжений?
5. В схеме, подключенной к синусоидальному напряжению, последовательно-параллельно включены L и rC , причем действующие значения напряжений на входе цепи и на каждом из её элементов равны. Постройте на комплексной плоскости все токи и напряжения и определите сдвиг фаз между \dot{U}_L и \dot{U}_{rC} .
6. Что такое характеристическая проводимость? Каков её физический смысл?
7. Что такое добротность резонансного контура? Какие физические процессы можно ею характеризовать? Как её можно определить экспериментально?
8. Какой характер имеет полная проводимость параллельной rLC -цепи при резонансе?
9. Что называется амплитудно-частотной и фазочастотной характеристиками резонансного контура?

10. Что такое коэффициент мощности ($\cos\varphi$)? Коэффициент реактивной мощности?
11. Зачем нужно увеличивать $\cos\varphi$ в электроэнергетических цепях?
12. Какие процессы характеризует активная мощность? Реактивная мощность?
13. Какие энергетические процессы происходят в параллельном колебательном контуре?
14. Могут ли быть отрицательными: а) активная мощность; б) реактивная мощность; в) полная мощность; г) комплексная мощность? Приведите примеры.
15. В чем заключается смысл баланса мощностей в цепях синусоидального тока?

РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бессонов, Л. А.* Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М. : Гардарики, 2007. – 701 с. – ISBN 5-8297-0046-8.
2. Теоретические основы электротехники. В 3 т. Т. 1 / К. С. Демирчян [и др.]. – 4-е изд. – СПб. : Питер, 2003. – 463 с.
3. *Коровкин, Н. В.* Теоретические основы электротехники : сб. задач / Н. В. Коровкин [и др.]. – СПб. : Питер, 2004. – 511 с.
4. Теоретические основы электротехники. В 2 т. Т. 1. Основы теории линейных цепей / под ред. П. А. Ионкина. – 2-е изд. – М. : Высш. шк., 1976. – 544 с.
5. Руководство по выполнению базовых экспериментов. ЭЦПЕТ.001 РБЭ (901,902). – Челябинск : Учеб. техника, 2006. – 138 с.

Оглавление

Введение.....	3
Лабораторная работа № 1. ЗНАКОМСТВО С КОМПЬЮТЕРИ- ЗИРОВАННЫМ СТЕНДОМ. ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	4
Лабораторная работа № 2. ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВЕТВЛЕННОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА С НЕСКОЛЬКИМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭДС.....	23
Лабораторная работа № 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ НЕРАЗВЕТВЛЕННЫХ ЦЕПЕЙ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА.....	28
Лабораторная работа № 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ РАЗВЕТВЛЕННЫХ ЦЕПЕЙ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА.....	44
Рекомендуемый библиографический список	59

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ»

Ч. 1. Основы теории электрических цепей

Составители:

КАЛИНИН Евгений Авенирович
СБИТНЕВ Станислав Александрович

Подписано в печать 12.02.14.

Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 3,49. Тираж 100 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.