

О.В. Мельничук



ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С ПЕРЕМЕННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

Северск, 2024

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Северский технологический институт –

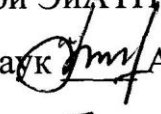
филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования

«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

(СТИ НИЯУ МИФИ)

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой ЭиАТП

канд. техн. наук  А.Л. Федянин

« 15 » октябрь 2024 г.

О.В. Мельничук

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ
ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ
С ПЕРЕМЕННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ**

Методическое руководство

по курсам «Теоретические основы электротехники», «Электротехника»,
«Электротехника и электроника»

для студентов, обучающихся по направлению

подготовки бакалавров 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»,

15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»,

14.05.04 «Электроника и автоматика физических установок»,

14.03.02 «Ядерная физика и технологии»

18.05.02 «Химическая технология материалов современной энергетики»

Второе издание, дополненное

Северск 2024

УДК 621.3(076)
ББК 31.2
М 483

Автор:

Мельничук О.В. – старший преподаватель кафедры ЭиАТП СТИ НИЯУ МИФИ

Рецензент:

Ляпушкин С.В. – кандидат технических наук, доцент отделения ЭиЭ ТПУ г. Томск

Мельничук О.В.

М 483 Исследование цепей с переменными источниками энергии: методические указания / О.В. Мельничук; Северский технологический институт НИЯУ МИФИ –2-е издание, дополненное– Северск: Издательство СТИ НИЯУ МИФИ, 2024. – 35 с. – Текст: электронный

Методические указания содержат описание лабораторных работ, выполнение которых поможет студентам электрических и неэлектрических специальностей освоить курсы «Теоретические основы электротехники» и «Электротехника». Описание лабораторных работ построено по единой системе. После краткой формулировки цели работы дается теоретическое введение, затем приводится описание лабораторной установки и порядок выполнения задания. В конце каждой лабораторной работы есть перечень контрольных вопросов для закрепления полученных навыков и для более полного осмысления результатов эксперимента.

Руководство рассмотрено и одобрено на заседании кафедры ЭиАТП (протокол № 06 от 09 сентября 2024 г.).

Рег. 11/24 от 15.10.2024 г.

Редактор М. В. Ворожейкина

© Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Северский технологический институт- филиал ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (СТИ НИЯУ МИФИ), 2024

Содержание

Введение.....	4
1 Описание комплекта типового лабораторного оборудования «Теория электрических цепей».....	5
1.1 Компоновка оборудования.....	5
1.2 Блок генераторов напряжений.....	6
1.3 Наборная панель.....	7
1.4 Набор миниблоков.....	8
1.5 Блок мультиметров.....	8
1.6 Коннектор.....	10
1.7 Порядок работы с виртуальными амперметрами и вольтметрами.	11
1.8 Измерение сопротивлений, мощностей и углов сдвига фаз с помощью виртуальных приборов.....	13
1.9 Виртуальный осциллограф.....	14
2 Методические указания к выполнению лабораторных работ.....	16
2.1 Параметры синусоидального напряжения (тока).....	16
2.2 Активная мощность цепи синусоидального тока	20
2.3 Цепь синусоидального тока с конденсатором	23
2.4 Цепь синусоидального тока с катушкой индуктивности.....	29
Литература.....	35

Введение

Рассмотренные в методических указаниях лабораторные работы выполняются на комплекте типового лабораторного оборудования «Теория электрических цепей», по одноимённым разделам курсов «Теоретические основы электротехники», «Теория электрических цепей», «Электротехника и основы электроники», «Электротехника» и т.п. в профессиональных высших учебных учреждениях.

Комплект лабораторных работ предназначен: для приобретения и закрепления навыков по сборке и наладке электрических схем; измерений в электрических цепях; расчета и анализа электрических цепей с переменными источниками энергии.

В начале методических указаний описано устройство составных частей комплекта, даны рекомендации по их использованию и приведены некоторые технические характеристики.

В описании лабораторных работ сформулированы цели, приведено краткое теоретическое введение, сформулирован порядок их выполнения.

По результатам работы формируется отчет согласно цели, поставленной в лабораторной работе. Отчет должен быть оформлен в полном соответствии с требованиями к оформлению с применением чертежных инструментов. Графики и векторные диаграммы строятся в масштабе измеряемых величин и соответствующе обозначаются. В конце отчета итогам анализа полученных экспериментальных данных формулируется вывод.

1 Описание комплекта типового лабораторного оборудования «Теория электрических цепей»

1.1 Компоновка оборудования

Общая компоновка типового комплекта оборудования в стендовом исполнении показана на рисунке 1.1. 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 миниблоков может устанавливаться и непосредственно на столе.

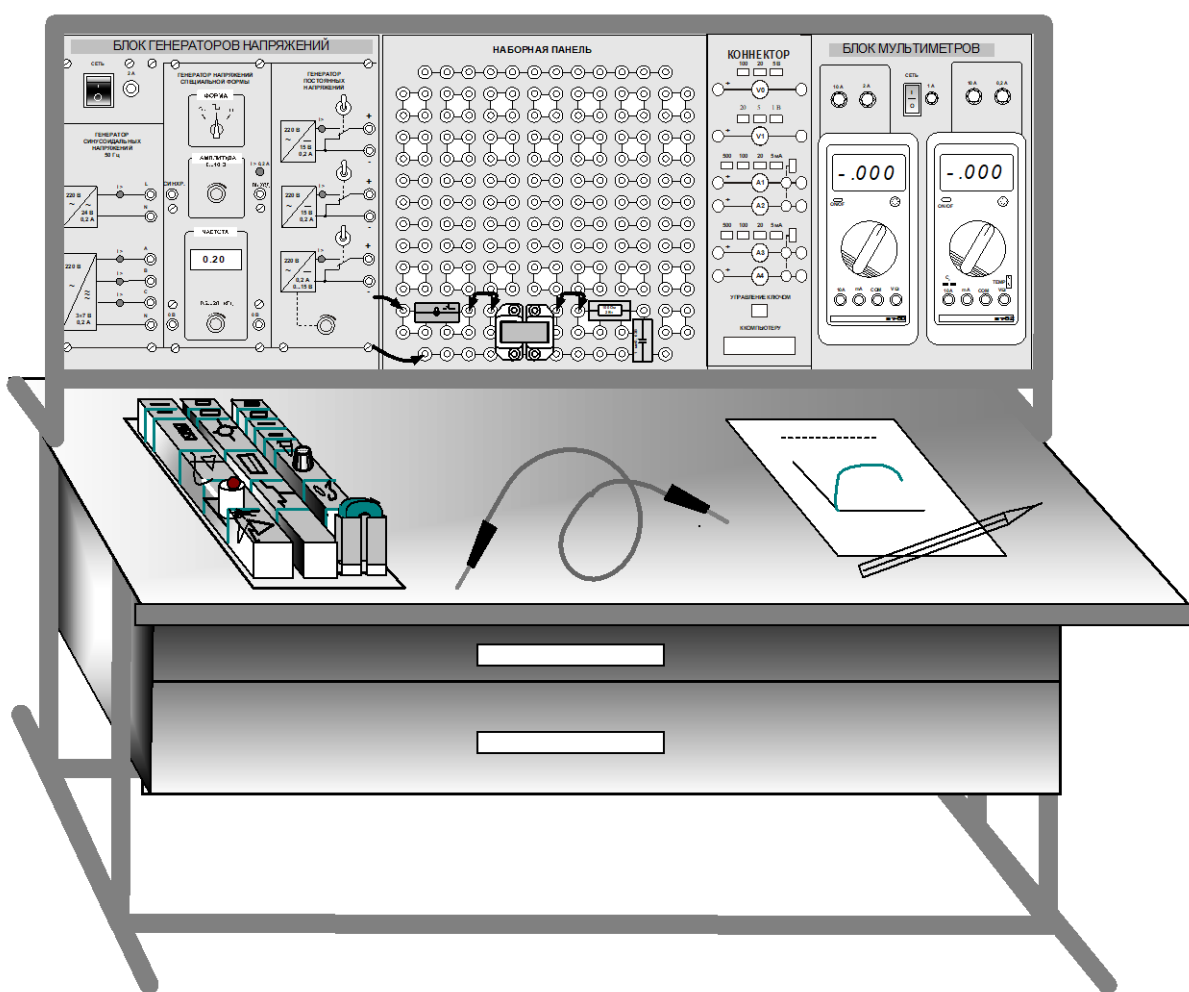


Рисунок 1.1 – Общая компоновка типового комплекта оборудования в стендовом исполнении

1.2 Блок генераторов напряжений

Лицевая панель блока генераторов напряжений показана на рисунке 1.2. Блок состоит из генератора синусоидальных напряжений, генератора напряжений специальной формы и генератора постоянных напряжений.

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

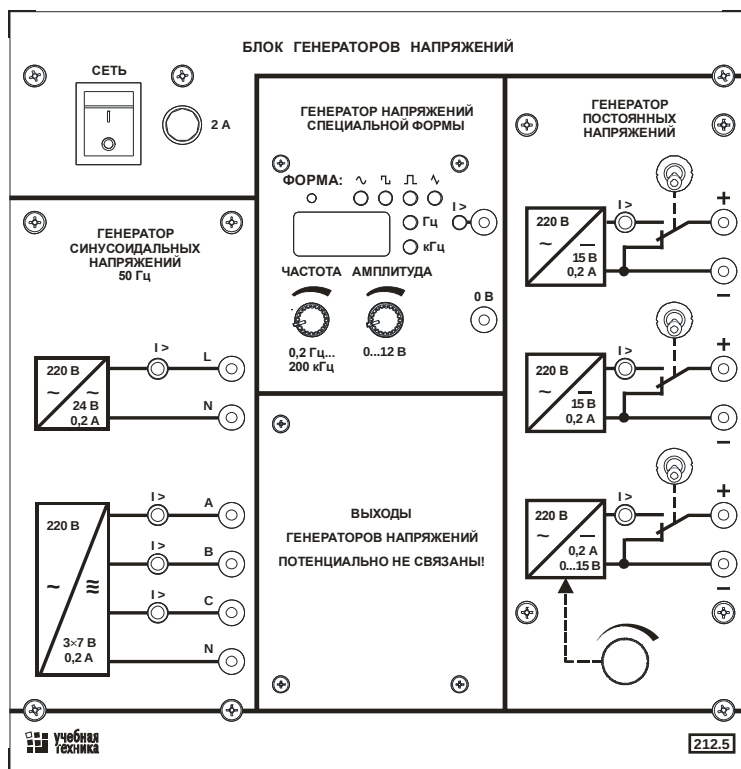


Рисунок 1.2 - Лицевая панель блока генераторов напряжений

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 од-

нополярный сигнал в зависимости от положения переключателя «**ФОРМА**».

Регулировка выходной частоты генератора напряжений специальной формы производится энкодером-потенциометром. Регулировка выходной частоты возможна в двух режимах:

- режим точной настройки частоты с малым шагом (величина шага зависит от величины частоты). При работе энкодера-потенциометра в этом режиме светодиод, показывающий форму выходного напряжения генератора мигает;

- режим подекадного переключения выходной частоты. При повороте энкодера-потенциометра на один шаг выходная частота меняется в 10 раз. При работе энкодера-потенциометра в этом режиме светодиод, показывающий форму выходного напряжения генератора, постоянно горит.

Переключение между режимами производится путем нажатия ручки энкодера-потенциометра.

При повороте ручки энкодера меняется выходная частота, и ее величина отображается на индикаторе с размерностью, показываемой светодиодами.

Переключение формы выходного напряжения производится путем нажатия на кнопку ФОРМА. При этом соответствующий светодиод показывает форму выходного напряжения.

Амплитуда сигнала регулируется потенциометром «**АМПЛИТУДА**».

1.3 Наборная панель

Наборная панель служит для расположения на ней миниблоков в соответствии со схемой опыта. На рисунке 1.3 показан фрагмент наборной панели с собранной схемой.

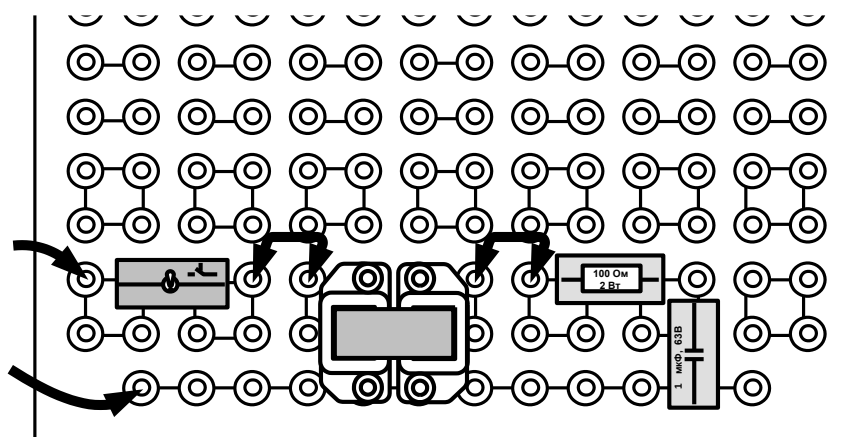


Рисунок 1.3 - Фрагмент наборной панели с собранной схемой

Гнёзда на этой панели соединены в узлы, как показано на ней линиями. Поэтому часть соединений выполняется автоматически при установке миниблоков в гнёзда панели. Остальные соединения выполняются соедине-

тельными проводами и перемычками. Так на фрагменте цепи, показанной на рисунке 1.3, 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.

1.4 Набор миниблоков

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.

1.5 Блок мультиметров

Блок мультиметров предназначен для измерения напряжений, токов, сопротивлений, а также для проверки диодов и транзисторов. Общий вид блока представлен на рисунке 1.4.

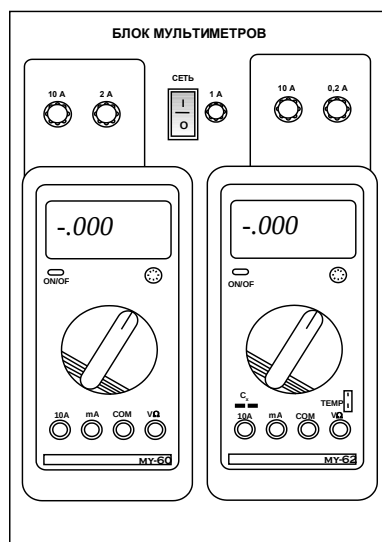


Рисунок 1.4 – Общий вид блока мультиметров

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 неизвестен, 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 имеющихся в данном стенде. Мультиметр МУ60 защищён предохранителем 2 А, который не может перегореть от токов, создаваемых источниками данного стенда.

До подключения мультиметра к цепи необходимо выполнить следующие операции:

- выбор измеряемой величины: - V, $\sim$ V, - A, $\sim$ A или Ω ;
- выбор диапазона измерений соответственно ожидаемому результату измерений;
- правильное подсоединение зажимов мультиметра к исследуемой цепи.

Присоединение мультиметра как вольтметра, амперметра и омметра показано на рисунке 1.5.

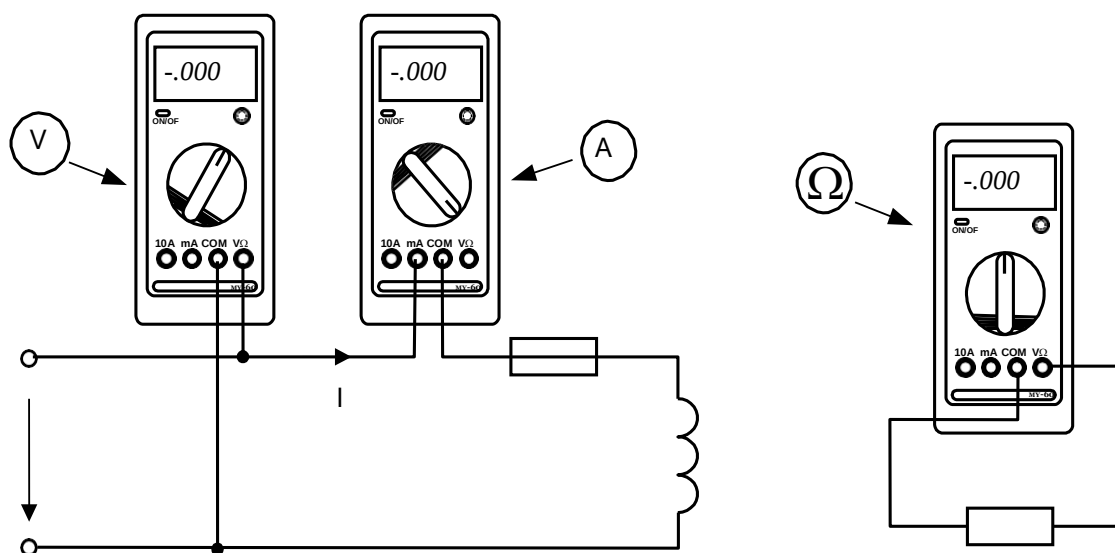


Рисунок 1.5 – Схема присоединения вольтметра, амперметра и омметра

1.6 Коннектор

Коннектор 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 рисунке 1.6.

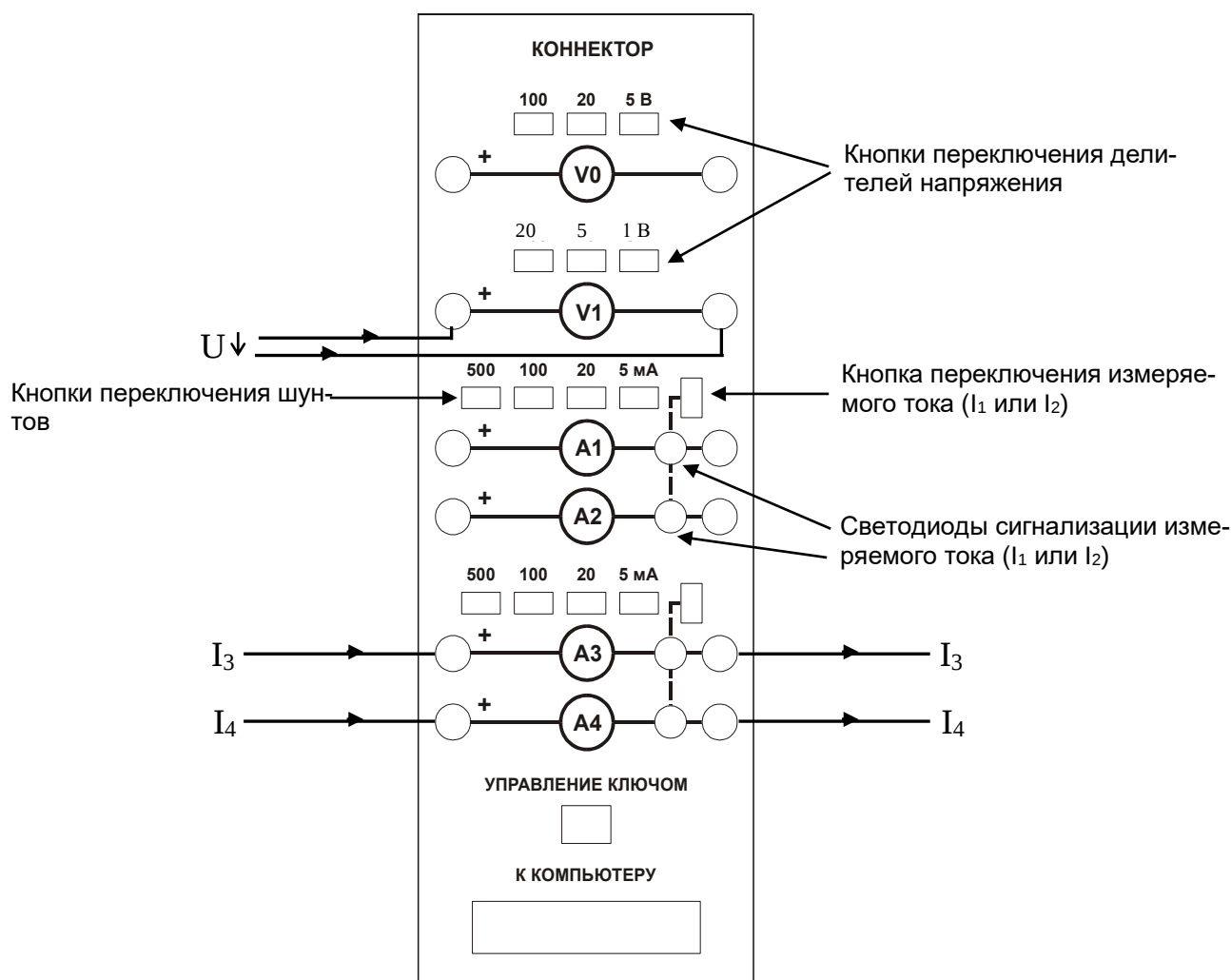


Рисунок 1.6 – Общий вид лицевой панели коннектора

Изображенные на лицевой панели измерительные приборы V0, V1, A1...A4 включаются в цепь как обычные вольтметры и амперметры. Коннектор имеет два канала для ввода напряжений в компьютер и два канала для ввода токов. Однако, в цепь можно включить четыре амперметра и кнопками переключения измеряемого тока выбирать вводимое в компью-

тер значение I_1 или I_2 , I_3 или I_4 . О выбранном токе сигнализирует светодиод на лицевой панели коннектора и надпись на виртуальном амперметре на экране дисплея.

Кнопки переключения делителей напряжения и шунтов предназначены для выбора пределов измерения, как в обычных измерительных приборах.

1.7 Порядок работы с виртуальными амперметрами и вольтметрами

При работе с виртуальными приборами придерживайтесь следующего порядка.

1) Соберите цепь согласно схеме опыта, включив в нее вместо реальных амперметров и вольтметров виртуальные приборы, изображенные на лицевой панели коннектора.

2) Включите виртуальные приборы двойным щелчком левой кнопки мыши на ярлыке «ВП ТОЭ». В результате откроется блок «Приборы I» (рисунке 1.7), в котором содержатся вольтметры и амперметры. Часть из них активизирована по умолчанию (т.е. включены пределы измерения).

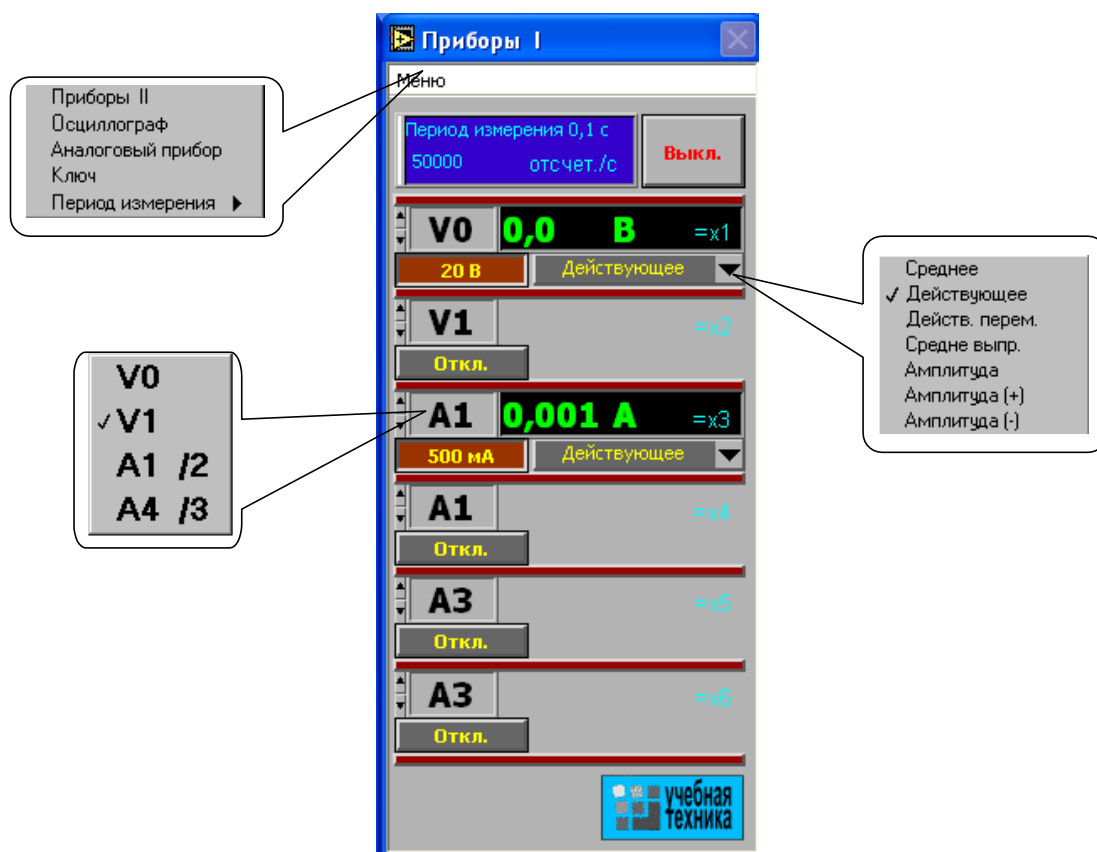


Рисунок 1.7 – Меню для работы с виртуальными приборами

3) 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 одновременного измерения, например, действующего, амплитудного, среднего и др. значений одного и того же напряжения (тока).

4) Активизируйте нужные виртуальные приборы, щелкнув в соответствующих окнах на кнопках «Откл». Для отключения прибора щелкните 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 рисунок. 1.7 и выбрав мышью строку «Период измерения».

При выполнении измерений переменных напряжений и токов необходимо обращать внимание на число отсчётов в секунду, которое указано в верхней части панели «Приборы I». Необходимо, чтобы число отсчётов, приходящихся на один период измеряемого сигнала (не путать с периодом измерения!), было не менее десяти. При меньшем числе отсчётов резко возрастает погрешность измерений.

5) Выберите род измеряемой величины, щелкнув в окне «Действующее» и выбрав из открывшегося списка нужное значение. (Для цепи постоянного тока это, скорее всего, «Среднее»). В этом окне пункт «Действ. перем.» означает действующее значение сигнала, из которого исключена постоянная составляющая.

6) Выберите пределы измерения амперметров и вольтметров, нажав соответствующие кнопки на коннекторе (рисунок 1.6). 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.

7) При снижении измеряемой величины ниже значения следующего (более низкого) предела измерения включается надпись «Перейдите на меньший предел». Через некоторое время она гаснет самостоятельно, но окно данного виртуального прибора продолжает мигать, предупреждая о том, что данное измерение желательно сделать точнее.

8) Для того, чтобы закрыть окно виртуальных приборов, необходимо щелкнуть по клавише «Выкл».

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

Сначала включите блок «Приборы I». Затем для «включения» виртуальных ваттметров, омметров, фазометра и т.д. выберите из меню блока «Приборы I» позицию «Приборы II». При этом откроется блок с тремя приборами, которые вычисляют сопротивления, углы сдвига фаз мощности и т. д. по мгновенным значениям токов и напряжений, введенным в компьютер через коннектор.

Первые два прибора этого блока имеют свое меню, из которого выбираются измеряемые величины (рисунок 1.8).

Для активизации прибора достаточно выбрать в соответствующих окнах две величины, через которые определяется искомая величина. Например, если на входе цепи включен вольтметр V0 и амперметр A4, 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 V0, а в нижнем A4. Для измерения угла сдвига фаз между токами I1 и I4 ($\varphi = \psi I1 - \psi I4$) в верхнем окне должно быть A1, а в нижнем A4 (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.

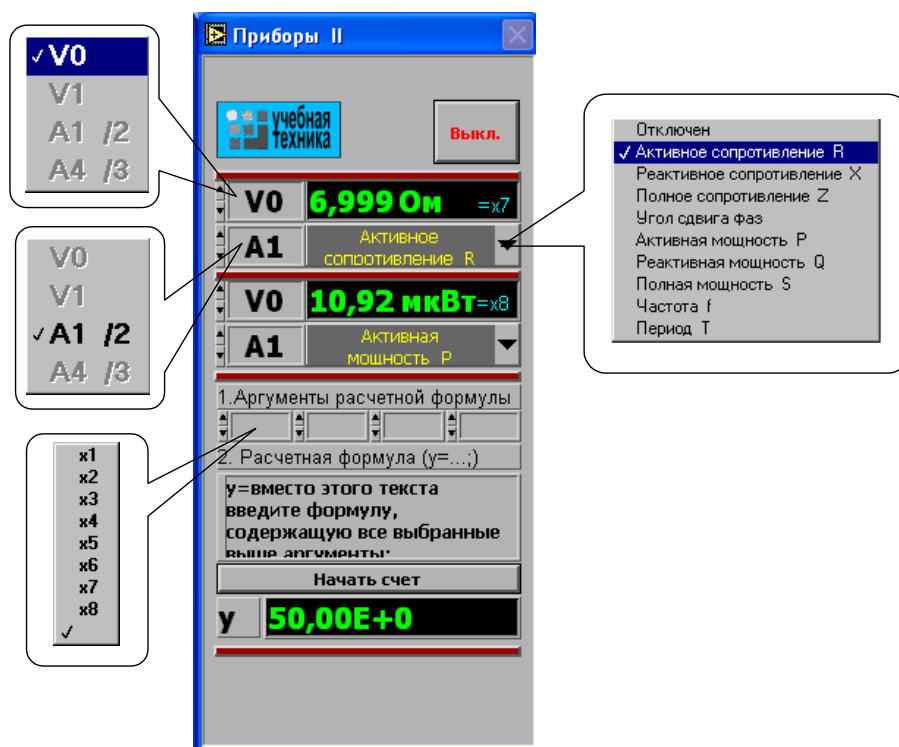


Рисунок 1.8 – Меню приборов для измерения сопротивления, угла сдвига фаз и мощности

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 рисунках 1.6 и 1.7. Например, если измеряются две активные мощности – в верхнем окне мощность источника, а в нижнем нагрузки, то третий прибор можно запрограммировать на определение КПД. Для этого нужно ввести аргументы x_7 и x_8 , напечатать формулу $y = x_8/x_7$ и щелкнуть на клавише «Начать счет».

В случае синтаксической ошибки во ведённой формуле окно формулы начинает мигать и счёт не производится.

1.9 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». Назначение всех его окон показано на рисунке 1.9.

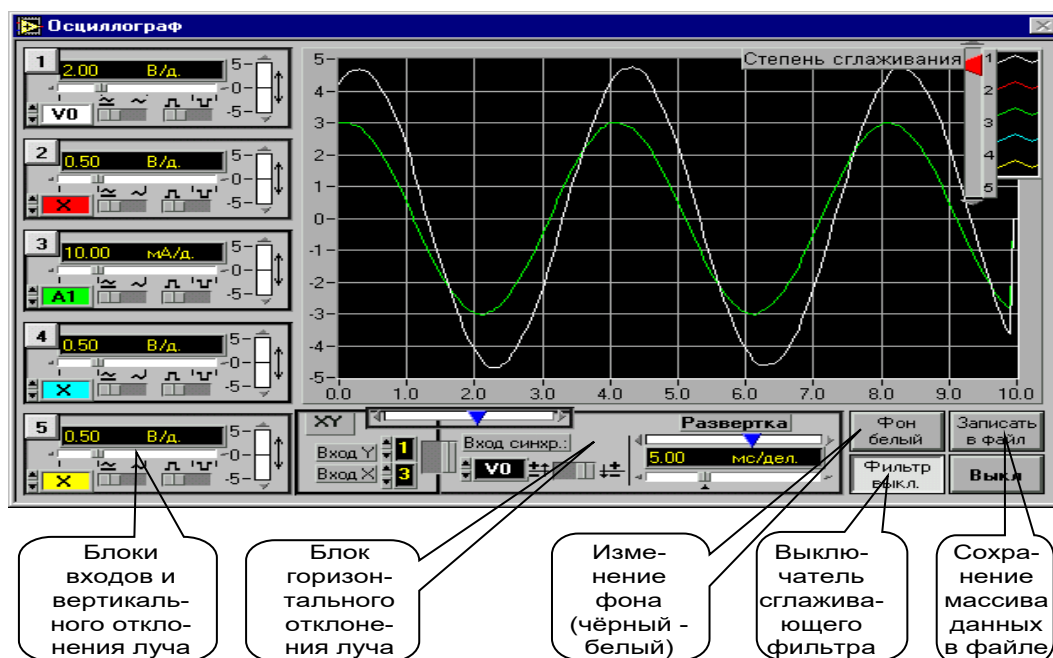


Рисунок 1.9 – Изображение виртуального прибора «Осциллограф»

Один из пяти блоков входов блок вертикального отклонения луча с пояснениями показан на рисунке 1.10.

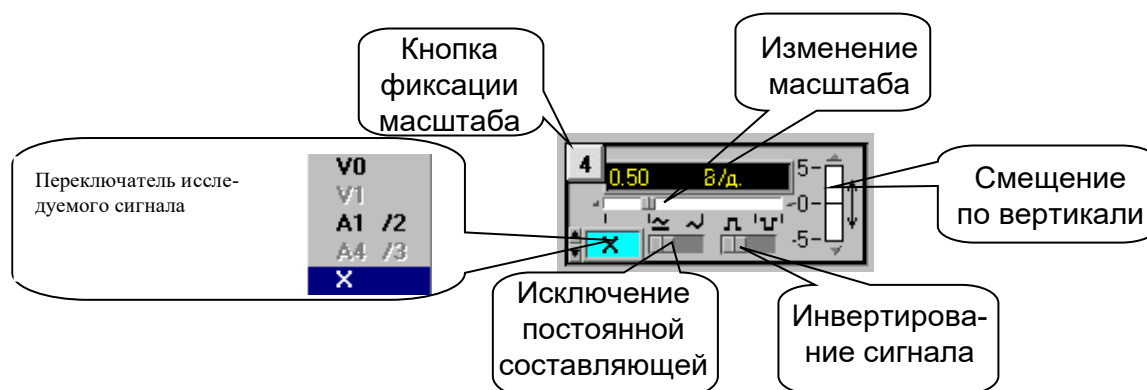


Рисунок 1.10 – Изображение блока вертикального отклонения луча

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 (рисунок 1.10). После этого он меняться не будет. Предусмотрено и ручное плавное изменение масштаба внутри ступени.

Органы управления горизонтальным перемещением луча показаны на рисунке 1.11.

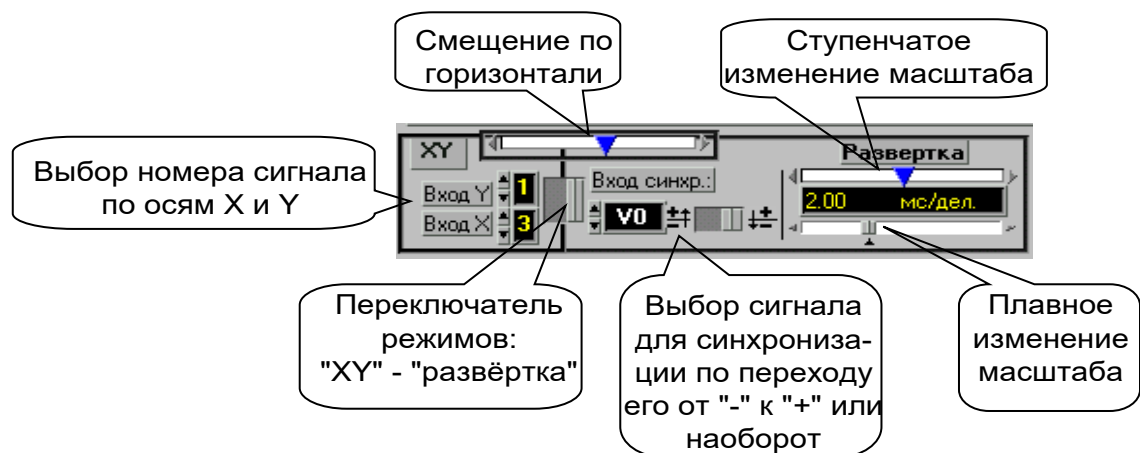


Рисунок 1.11 – Органы управления горизонтальным перемещением луча

В правом верхнем углу осциллографа (рисунок 1.9) имеется 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 т.п. Меню открывается при щелчке на любом из изображенных там пяти лучей.

В правом нижнем углу осциллографа (рисунок 1.9) кнопка «Записать в файл» позволяет записать в файл таблицу мгновенных значений всех подключенных сигналов за один период измерения. Затем их можно прочитать и обработать в программах MathCAD, Excel, Origin и др. После щелчка на этой кнопке появляется окно диалога (рисунок 1.12), в котором нужно выбрать диск, папку и имя файла, в который Вы хотите записать данные и. Выбрав имя файла нажмите клавишу «Сохранить»

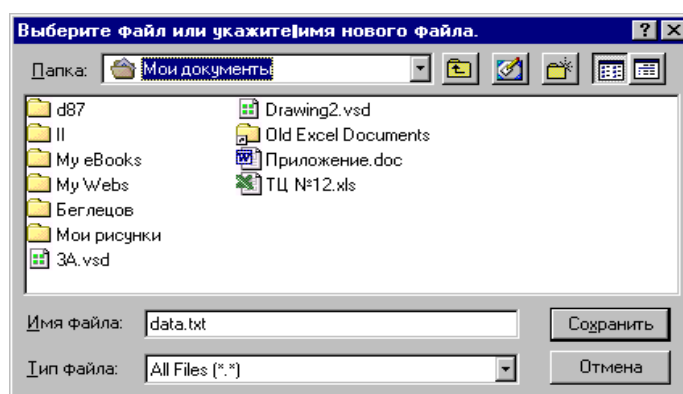


Рисунок 1.12 – Окно диалога для сохранения данных

2 Методические указания к выполнению лабораторных работ

2.1 Параметры синусоидального напряжения (тока)

2.1.1 Цель работы

Определить основные и дополнительные параметры синусоидального напряжения (тока) экспериментальным путем.

2.1.2 Общие сведения

Переменный ток, в противоположность постоянному току, периодически меняет свое направление. Кривая (функция) переменного тока или напряжения, соответственно, может иметь различную форму. На рисунке 2.1 показаны некоторые из типичных для электротехники и электроники функций. Кроме того, различают однофазные и многофазные переменные напряжения, и токи. Например, электроснабжение массовых потребителей осуществляется, как правило, посредством трехфазного тока.

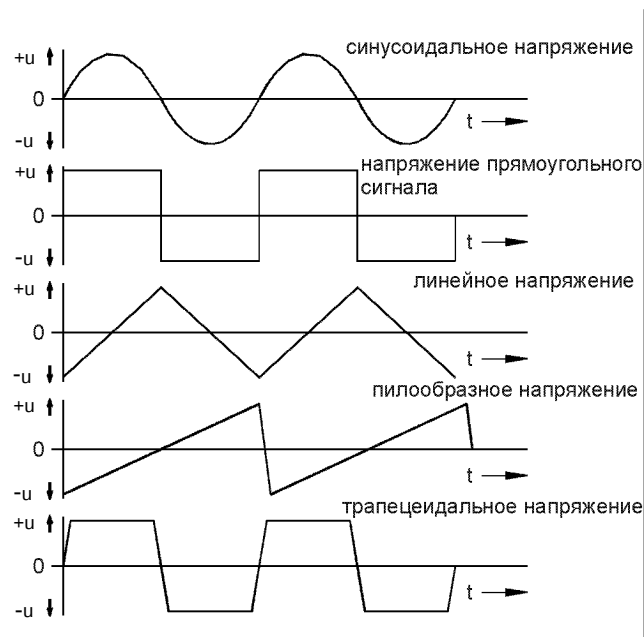


Рисунок 2.1 – Различные формы изменения переменных напряжений.

Последующие эксперименты ограничены синусоидальными напряжениями, которые наиболее часто встречаются в электротехнике и электронике.

Эксперименты затрагивают такие параметры как **частота, амплитуда, действующее (среднеквадратичное) значение, фазовый сдвиг (угол) и мощность**.

На рисунке 2.2 показаны напряжение и ток, как синусоидальные функции времени.

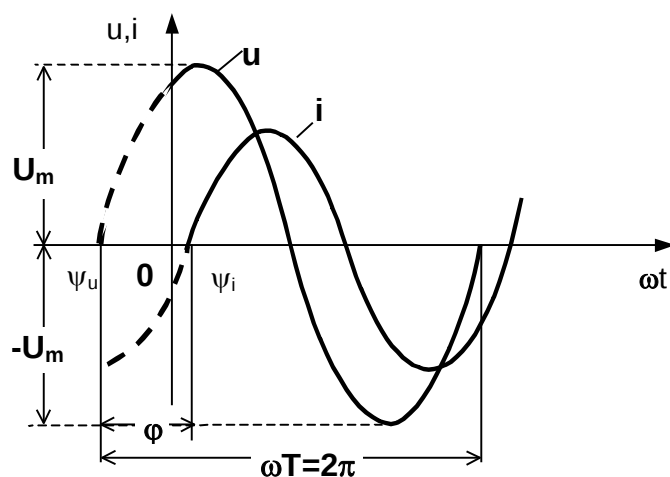


Рисунок 2.2 – График изменения синусоидального напряжения (тока)

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

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

Мгновенные значения – это значения в данный конкретный момент времени синусоидальных напряжения u и тока i , выражаются как

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

где ψ_u и ψ_i – начальные фазы напряжения и тока;

U_m и I_m – амплитудные (максимально возможные) значения напряжения и тока;

$\omega = 2\pi f$ – угловая частота, рад/с.

Другие параметры синусоидальных величин и формулы для их вычисления приведены ниже.

Разность фаз напряжения и тока (фазовый сдвиг) находится по формуле

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

Линейная частота f в Герцах (Гц) выражается как число периодов в секунду

$$f = 1/T.$$

Действующее значение – среднеквадратичное значение функций синусоидальных тока и напряжения равно

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

Действующим значением гармонического тока принято называть значение такого постоянного тока, который протекая через одно и тоже неизменное сопротивление R за период времени T выделяет такое же количество тепла, что и рассматриваемый гармонический ток.

2.1.3 Экспериментальная часть

Задание

Вывести на экран виртуального осциллографа синусоидальные токи и напряжение на резисторе и определить следующие величины:

- амплитудное значение напряжения U_m ;
- амплитудное значение тока I_m ;
- действующее значение напряжения U ;
- действующее значение тока I ;
- период T ;

- частота f ;
- угловую частоту ω ;
- фазовый сдвиг φ ;
- мгновенное значение напряжения u в момент времени $t = T/3$.

Порядок выполнения эксперимента

- Собрать цепь согласно схеме, на рисунке 2.3, подключить регулируемый источник синусоидального напряжения ($U=3\dots7$ В, $f=0,2\dots1$ кГц). В качестве измерительных приборов включить в схему каналы коннектора.

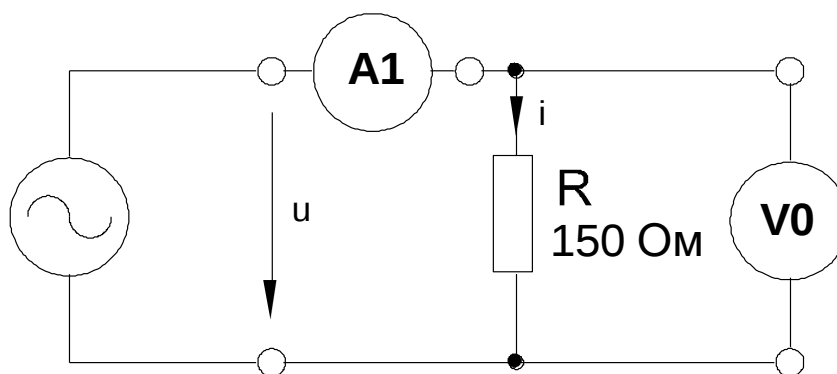


Рисунок 2.3 – Схема электрической цепи

- 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 примерно одного - двух периодов напряжения и тока.
- Определить по осциллографу:
 - амплитудное значение напряжения U_m ;
 - амплитудное значение тока I_m ;
 - действующее значение напряжения

$$U = U_m / \sqrt{2};$$
 - действующее значение тока

$$I = I_m / \sqrt{2};$$
 - период T ;
 - частота

$$f = 1/T;$$
 - угловая частота

$$\omega = 2\pi f;$$
 - фазовый сдвиг

$$\varphi = \psi_u - \psi_i;$$

- мгновенное значение напряжения u в момент времени $t = T/3$.
- Записать результаты измерений и вычислений в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Экспериментальные данные

Средства измерения	U_m , В	I_m , мА	U , В	I , мА	T , мс	f , В	ω , рад/с	φ , град	$u(T/3)$ В
Осциллограф									
Виртуальный прибор							-		-

- Измерить U_m , I_m , U , I с помощью виртуальных приборов, занести результаты в таблицу 2.1 и сравнить с результатами измерения осциллографом.
- Включить блок «Приборы II», сделать необходимые «подключения», измерьте T , f , φ . Записать полученные значения в таблицу 2.1 и сравнить с результатами, полученными с помощью осциллографа.

2.1.4 Контрольные вопросы

- 1 Дайте определение мгновенного значения напряжения (тока).
- 2 Дайте определение амплитудного значения напряжения (тока).
- 3 Что называется периодом?
- 4 Дайте определения начальной фазы напряжения (тока).
- 5 Как определить разность фаз по диаграмме на экране осциллографа.
- 6 Дайте определение действующего значения напряжения (тока). Какова связь между амплитудным и действующим значениями напряжения (тока).

2.2 Активная мощность цепи синусоидального тока

2.2.1 Цель работы

Экспериментальным путем определить активную мощность участка электрической цепи, используя прямые и косвенные измерения.

2.2.2 Общие сведения

Когда синусоидальное напряжение прикладывается к активной 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 (рисунок 2.4).

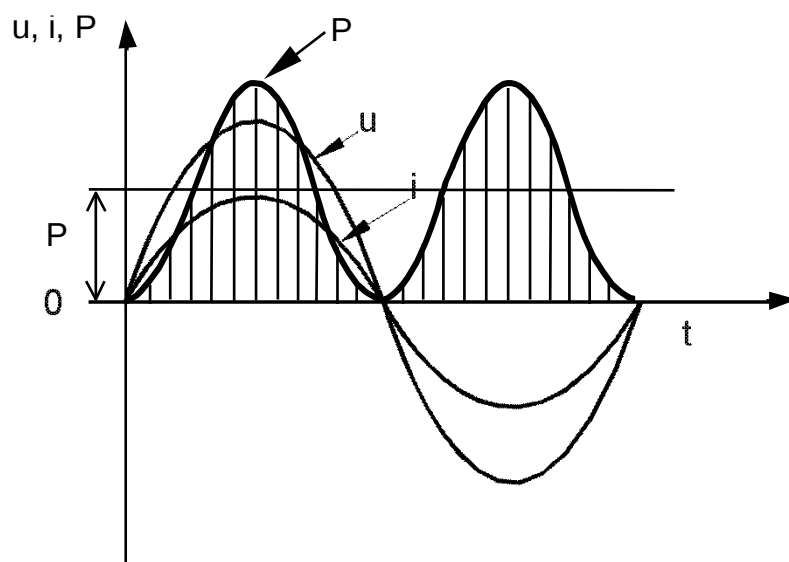


Рисунок 2.4 – График мгновенных значений напряжения, тока и мощности в цепи с активным сопротивлением

Мощность, которая выделяется в чисто активной нагрузке, определяется как произведение напряжения на ток. Кривую мгновенных значений мощности можно построить, перемножая мгновенные значения напряжения и тока

$$p(t) = u(t) i(t) .$$

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

$$P = U \cdot I$$

или через омическое сопротивление R

$$P = I^2 \cdot R \quad \text{и} \quad P = U^2 / R$$

и называется **активной мощностью**.

2.2.3 Экспериментальная часть

Задание

Снять с помощью виртуального осциллографа синусоидальные кривые напряжения и тока в резистивной цепи, сделать бумажные копии осциллограмм и построить кривую мощности, перемножая мгновенные значения напряжения и тока.

Порядок выполнения эксперимента

- Собрать цепь согласно схеме (рисунок 2.5), подключить источник синусоидального напряжения и установить следующее напряжение с помощью осциллографа: $U = 5 \text{ В}$, $f = 0,5 \text{ кГц}$.

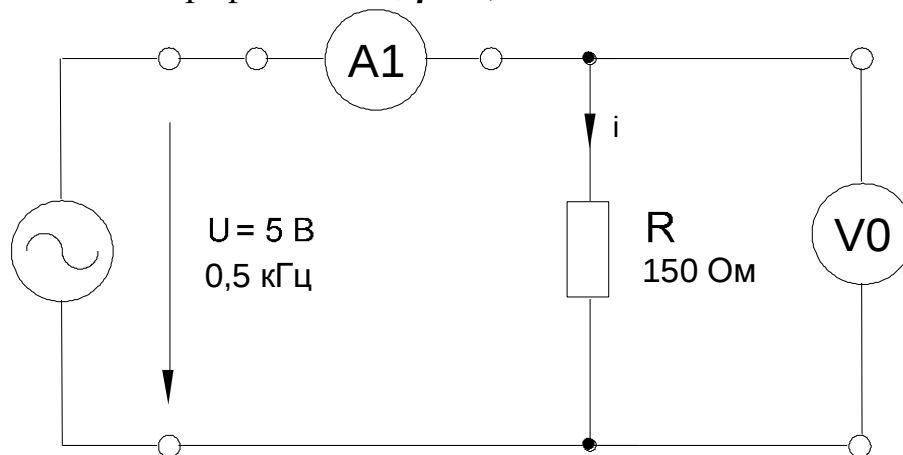


Рисунок 2.5 – Схема соединения цепи

- Включить виртуальный приборы V0, A1 и осциллограф.
- «Подключите» два входа осциллографа к приборам V0 и A1, а остальные отключить.
- Установить параметры развёртки осциллографа так, чтобы на экране было изображение примерно одного-двух периодов напряжения и тока.
- Перенести осциллограммы напряжения и тока на бумагу (рисунок 2.6).
- Определить мгновенные значения напряжения и тока для моментов времени, указанных в таблице 2.2, и затем построить кривую мощности на графике (рисунок 2.6).

Таблица 2.2 – Экспериментальные данные

Время, мс	Напряжение u , В	Ток i , мА	Мгновенная мощность p , мВт
0			
0.2			
0.4			
0.6			
0.8			
1.0			
1.2			
1.4			
1.6			
1.8			
2.0			

- По графику $p(t)$ на рисунке 2.6 определить среднее значение (активную мощность) P_{cp} , Вт.

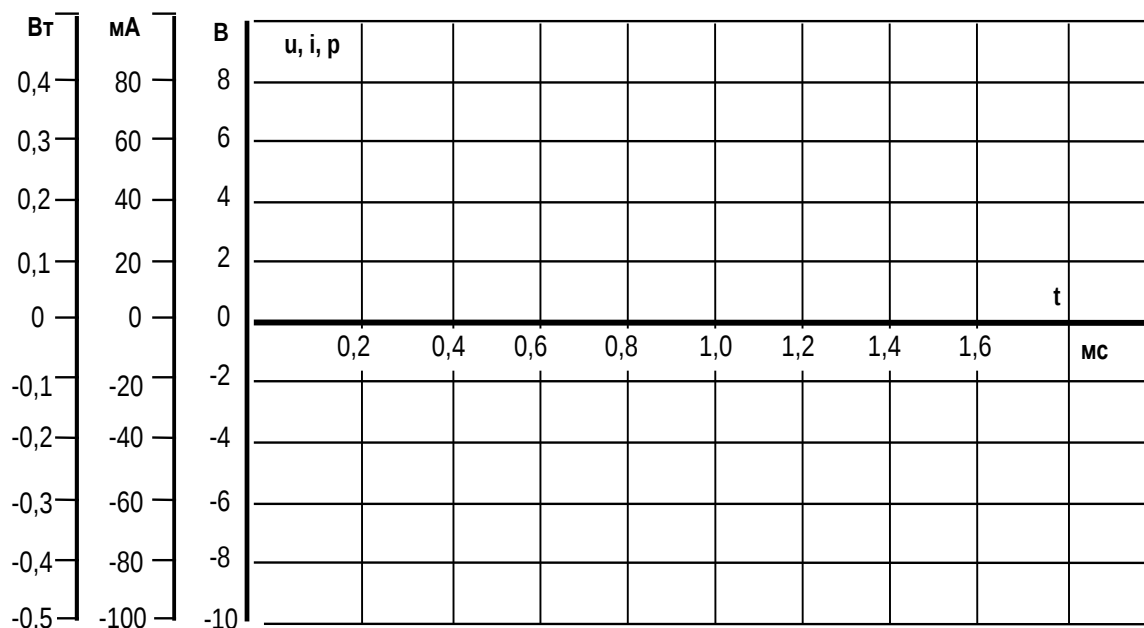


Рисунок 2.6 – Пример оформления сетки координат для построения графиков напряжения, тока и мощности

- Включить блок «Приборы II», выбирая из меню прибор «Активная мощность», подключить его к V0 и A1 и измерить значение активной мощности виртуальным ваттметром P , Вт.
- Сравнить полученные значения по осциллограмме P_{cp} и P , измеренное виртуальным ваттметром.

2.2.4 Контрольные вопросы

- 1 Дайте определение мощности в линейной электрической цепи.
- 2 Какая мощность называется активной?
- 3 Как экспериментально может быть определена активная мощность?

2.3 Цепь синусоидального тока с конденсатором

2.3.1 Цель работы

Исследовать свойства электрической цепи синусоидального тока с конденсатором.

2.3.2 Общие сведения

Когда к конденсатору приложено синусоидальное напряжение, он периодически заряжается и разряжается. Ввиду переменного характера

напряжения периодически меняется также полярность заряда конденсатора. Ток в конденсаторе i_C достигает своего амплитудного значения каждый раз, когда напряжение u_C на нем проходит через нуль (рисунок 2.7). Таким образом, синусоида тока i_C опережает синусоиду напряжения u_C на 90° .

Фазовый сдвиг определяется по формуле

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = -90^\circ.$$

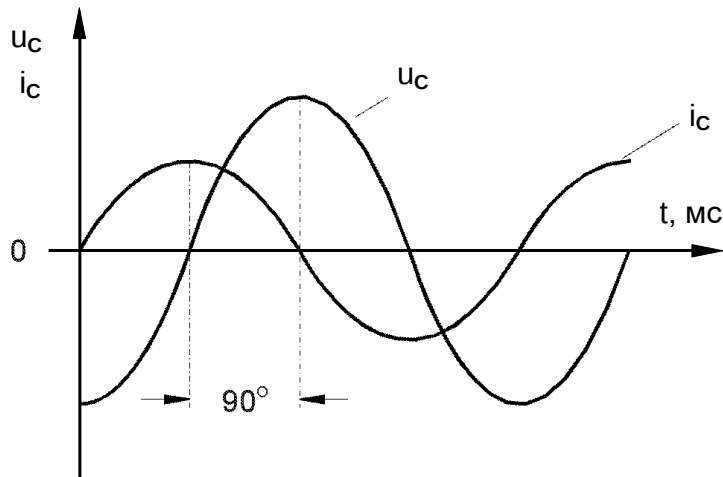


Рисунок 2.7 – График мгновенных значений напряжения и тока в цепи с конденсатором

Когда конденсатор подключен к переменному синусоидальному напряжению, в нем возникает синусоидальный ток, опережающий напряжение на 90° (рисунок 2.8).

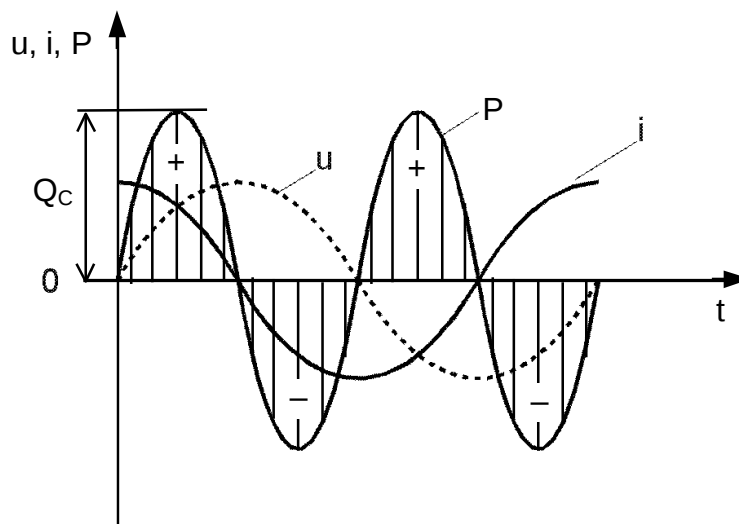


Рисунок 2.8 – График изменения мгновенной мощности в цепи с конденсатором

Мгновенная мощность, потребляемая конденсатором (как и любой другой цепью) определяется как произведение напряжения и тока:

$$p = u \cdot i$$

График изменения этой мощности можно построить, перемножая попарно ординаты графиков $u(t)$ и $i(t)$, взятые в один и тот же момент времени. Полученная таким образом кривая (рисунок 2.8) представляет собой синусоиду двойной частоты с амплитудой.

$$Q_C = U_{Cm} \cdot I_{Cm} / 2 = U_C \cdot I_C.$$

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**.

Средняя (активная) мощность, потребляемая конденсатором, равна нулю.

Конденсатор, в цепи синусоидального тока, оказывает токоограничивающий эффект, который вызван встречным действием напряжения при изменении знака заряда. Этот токоограничивающий эффект принято выражать как **емкостное реактивное сопротивление (емкостной реактанс)** x_C .

Величина емкостного сопротивления x_C зависит от величины емкости конденсатора, измеряемой в Фарадах, и частоты приложенного напряжения переменного тока. В случае синусоидального напряжения имеем

$$x_C = 1/(\omega C) = 1/(2\pi fC),$$

где x_C - реактивное емкостное сопротивление, Ом;

C - емкость конденсатора, Ф;

ω - угловая частота синусоидального напряжения (тока), рад/с.

Когда известны действующие значения тока в конденсаторе и падения напряжения на нем от этого тока, реактивное емкостное сопротивление можно вычислить по закону Ома

$$x_C = U_{Cm} / I_{Cm} \text{ или } x_C = U_C / I_C.$$

Емкостному сопротивлению присваивают знак «-» в отличие от индуктивного, которому приписывают знак «+».

2.3.3 Экспериментальная часть

Задание

Вывести кривые тока и напряжения конденсатора на экран виртуального осциллографа и определить фазовый сдвиг между синусоидами $u_C(t)$ и $i_C(t)$.

Выведите кривые тока и напряжения конденсатора на экран виртуального осциллографа, перенесите их на график и постройте кривую изменения мгновенных значений мощности перемножением мгновенных значений напряжения и тока.

Выведите на экран виртуального осциллографа кривые тока и напряжения различных конденсаторов емкостью 0,22, 0,47, 1 мкФ. Определите соответствующие реактивные сопротивления по формулам $X_C = 1/(2\pi fC)$ и $X_C = U_C/I_C$.

Порядок выполнения эксперимента

- Собрать цепь согласно схеме (рисунке 2.9) и подключить регулируемый источник синусоидального напряжения при $U=5$ В и $f=1$ кГц. Напряжение источника установить с помощью мультиметра.
- Включить виртуальные приборы V0, A1 и осциллограф.
- «Подключите» два входа осциллографа к приборам V0 и A1, а остальные отключить.

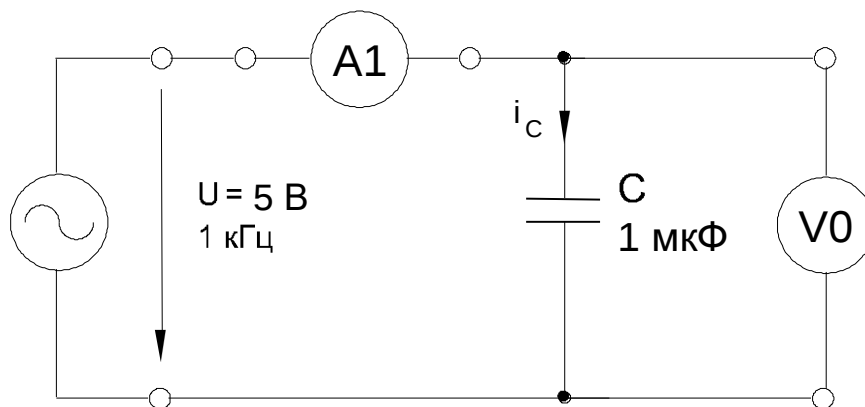


Рисунок 2.9 – Схема электрической цепи

- Установить параметры развёртки осциллографа так, чтобы на экране было изображение примерно одного-двух периодов напряжения и тока.
- Занесите данные осциллографирования напряжения и тока конденсатора в таблицу 2.3 соответственно указанным моментам времени.
- Перенести кривые на график (рисунок 2.10) и определить период и фазовый сдвиг между напряжением на конденсаторе $u_C(t)$ и током $i_C(t)$.

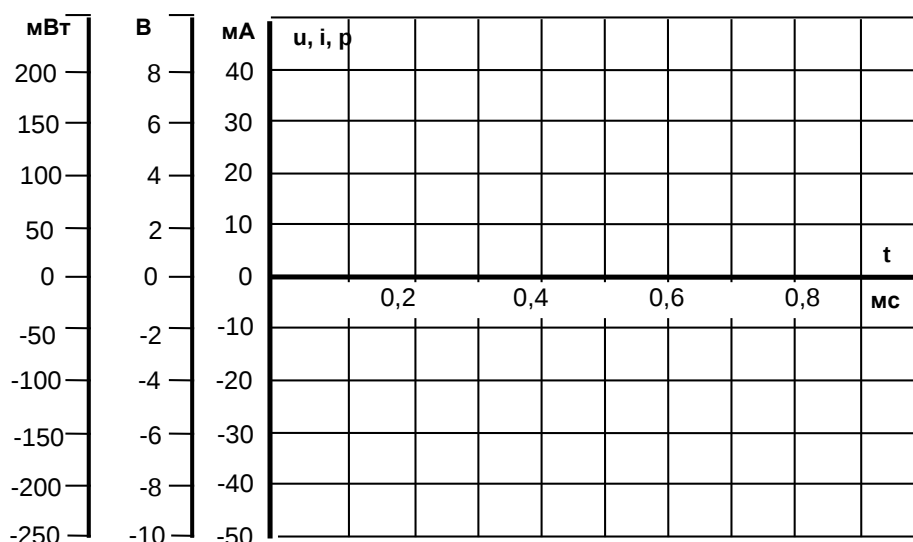


Рисунок 2.10 – Пример оформления сетки координат для построения графиков напряжения, тока и мощности для цепи **RC**

- Определить из осциллограммы **период T , угловую частоту ω и фазовый сдвиг φ** .
- Включить блок «Приборы II», выбрать из меню прибор «Угол сдвига фаз» и «подключите» его к V0 и A1.
- В блоке «Приборы II», выберите из меню функции «Активная мощность» и «Реактивная мощность», подключите их к V1 и A1, запишите значения реактивной мощности **Q_C** и убедитесь, что активная мощность близка к нулю.
- Выполните вычисления мгновенных значений мощности, соответственно указанным моментам времени, и занесите результаты в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Экспериментальные данные

Время t , мс	Ток i_C , мА	Напряжение u_C , В	$p = u_C \cdot i_C$, мВт
0			
0,1			
0,2			
0,3			
0,4			
0,5			
0,6			
0,7			
0,8			
0,9			
1,0			

- Перенесите данные таблицы 2.3 на график (рисунок 2.10).
- По графику $p(t)$ определите максимальное значение (реактивную мощность) и сравните ее с реактивной мощностью, измеренной варметром.

По осциллограмме: $Q_C = \dots\dots$ мВт;

По варметру: $Q_C = \dots\dots$ ВАр.

- Соберите цепь согласно схеме (рисунок 2.9), установите синусоидальное напряжение $U=5$ В и $f=1$ кГц на выходе регулируемого источника, затем присоедините источник к входным зажимам цепи.
- Включите виртуальные приборы V0, A1 и осциллограф.
- «Подключите» два входа осциллографа к приборам V0 и A1, а остальные отключите.
- Установите параметры развёртки осциллографа так, чтобы на экране было изображение примерно одного-двух периодов напряжения и тока.
- Снимите с осциллограмм или измерьте виртуальными приборами амплитудные значения напряжений U_m и тока I_m для емкостей и частот, указанных в таблице 2.4, и занесите их в соответствующие ячейки таблицы.

Таблица 2.4 – Экспериментальные данные

f , кГц		1	0,8	0,6	0,4
U_m , В	1,0 мкФ				
U_m , В	0,47 мкФ				
U_m , В	0,22 мкФ				
I_m , мА	1,0 мкФ				
I_m , мА	0,47 мкФ				
I_m , мА	0,22 мкФ				
$x_C = U_m / I_m$, кОм	1,0 мкФ				
	0,47 мкФ				
	0,22 мкФ				
$x_C = 1/(\omega C)$, кОм	1,0 мкФ				
	0,47 мкФ				
	0,22 мкФ				

- Вычислите величины x_C по формулам U_m / I_m и $1/(\omega C)$ занесите их в таблицу 2.4. Сравните результаты.
- Перенесите величины x_C на график (рисунок 2.11) для построения кривой $x_C = f(f)$.

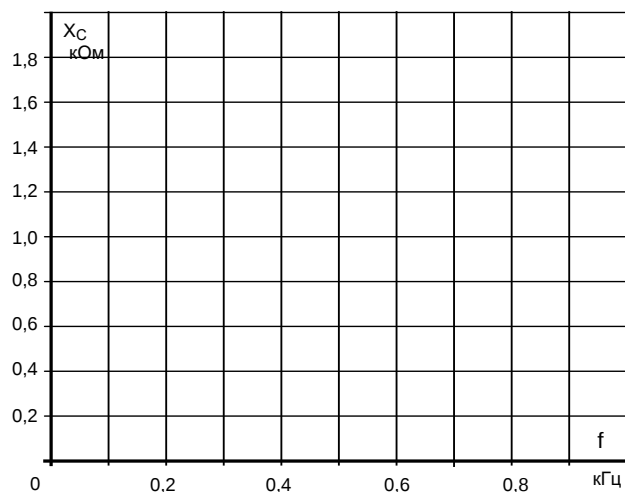


Рисунок 2.11 – Пример оформления сетки координат для построения графика зависимости $x_c = f(f)$.

2.3.4 Контрольные вопросы

- 1 Дайте определение фазового сдвига.
- 2 Чему равен фазовый сдвиг на участке цепи с емкостным сопротивлением?
- 3 Дайте определение мощности в линейной электрической цепи.
- 4 Какой физический процесс иллюстрирует график изменения емкостной мощности?
- 5 Какое физическое явление выражает емкостное сопротивление?
- 6 Как зависит емкостное сопротивление от частоты? Почему?

2.4 Цепь синусоидального тока с катушкой индуктивности

2.4.1 Цель работы

Исследовать свойства электрической цепи синусоидального тока с катушкой индуктивности.

2.4.2 Общие сведения

Когда к катушке индуктивности подведено синусоидальное напряжение, ток в ней отстает от синусоиды напряжения на ней на 90° . Соответственно, мгновенное значение тока достигает амплитудного значения на четверть периода позже, чем мгновенное значение напряжения (рисунок 2.12). В этом рассуждении пренебрегается активным сопротивлением катушки.

Фазовый сдвиг определяется по формуле

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = 90^\circ.$$

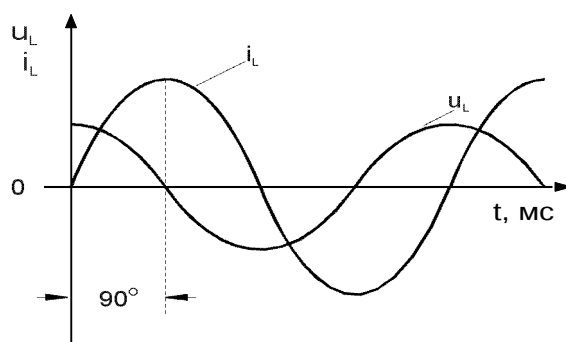


Рисунок 2.12 – Графики мгновенных значений напряжения и тока в цепи с катушкой индуктивности

Изменение во времени **мгновенной мощности**, потребляемой в катушке, может быть представлено на графике (рисунок 2.13) путем перемножения мгновенных значений тока ***i*** и напряжения ***u***. Положительная полуволна кривой мощности равнозначна подведению энергии к катушке. Во время отрицательной полуволны катушка отдает запасенную ранее энергию магнитного поля. В идеальной катушке потерь активной мощности нет. В действительности же возвращаемая энергия всегда меньше потребляемой из-за потерь энергии в активном сопротивлении катушки.

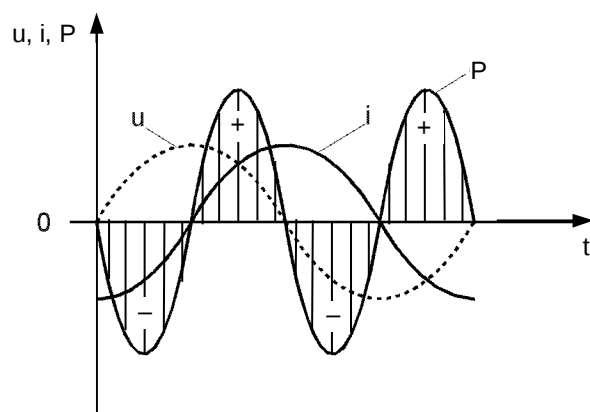


Рисунок 2.13 – График изменения мгновенной мощности в цепи с катушкой индуктивности

В идеальной катушке (при ***R=0***) график мощности ***p(t)*** представляет собой синусоиду двойной частоты (рисунок 2.13) с амплитудой

$$Q_L = U_{Lm} I_{Lm}/2 = U_L I_L.$$

Это значение является максимальной мощностью, потребляемой или отдаваемой идеальной катушкой индуктивности. Она называется **индуктивной реактивной мощностью**.

Средняя (активная) мощность, потребляемая такой катушкой, равна нулю.

Катушка индуктивности в цепи переменного тока оказывает токоограничивающий эффект благодаря индуцируемой в ней противоЭДС. Этот токоограничивающий эффект принято выражать как **индуктивное реактивное сопротивление (индуктивный реактанс) x_L** .

Величина индуктивного сопротивления x_L зависит от величины индуктивности катушки, измеряемой в Генри, и частоты приложенного напряжения переменного тока. В случае синусоидального напряжения имеем

$$x_L = \omega L = 2\pi fL ,$$

где x_L - реактивное индуктивное сопротивление, Ом;

L - индуктивность катушки, Гн.

Если активное сопротивление катушки мало и им можно пренебречь, то реактивное (индуктивное) сопротивление можно определить через действующие значения или амплитуды напряжения и тока

$$x_L = U_L / I_L \text{ или } x_L = U_{Lm} / I_{Lm}.$$

Индуктивному сопротивлению присваивают знак «+» в отличие от емкостного, которому приписывают знак «-».

2.4.3 Экспериментальная часть

Задание

Выведите на дисплей виртуального осциллографа кривые изменения во времени мгновенных значений тока i_L и напряжения u_L катушки индуктивности и определите фазовый сдвиг между ними. По итогам проделанной работы сформулируйте свойство электрической цепи с катушкой индуктивности.

Выведите кривые тока и напряжения катушки на экран виртуального осциллографа, перенесите их на график и постройте кривую изменения мгновенных значений мощности перемножением мгновенных значений напряжения и тока. По итогам проделанной работы сформулируйте свойство электрической цепи с катушкой индуктивности.

Выведите на дисплей виртуального осциллографа кривые тока и напряжения различных катушек индуктивности при различных частотах и постройте зависимость $x_L = f(f)$. Соответствующий индуктивный реактанс находится по амплитудным значениям тока и напряжения из осциллограмм и проверяется по формуле $x_L = \omega L$. По итогам проделанной работы сформулируйте свойство электрической цепи с катушкой индуктивности.

Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь согласно схеме (рисунок 2.14), подсоедините к ее входу регулируемый источник синусоидального напряжения с параметрами $U = 5 \text{ В}$, $f = 1 \text{ кГц}$.

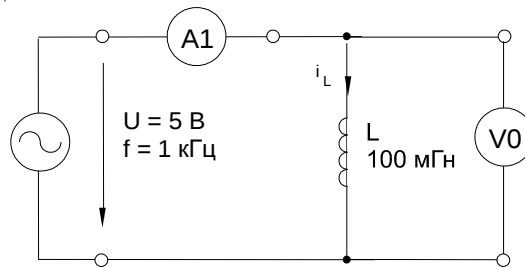


Рисунок 2.14 – Схема электрической цепи

- Включите виртуальные приборы V0, A1 и осциллограф.
- «Подключите» два входа осциллографа к приборам V0 и A1, а остальные отключите.
- Установите параметры развёртки осциллографа так, чтобы на экране было изображение примерно одного-двух периодов напряжения и тока.
- Занесите данные осциллографирования напряжения и тока в катушке в таблицу 2.5 соответственно указанным в ней моментам времени.
- Перенесите кривые на график (рисунок 2.15) и определите период и фазовый сдвиг между напряжением на катушке индуктивности $u_L(t)$ и током $i_L(t)$.

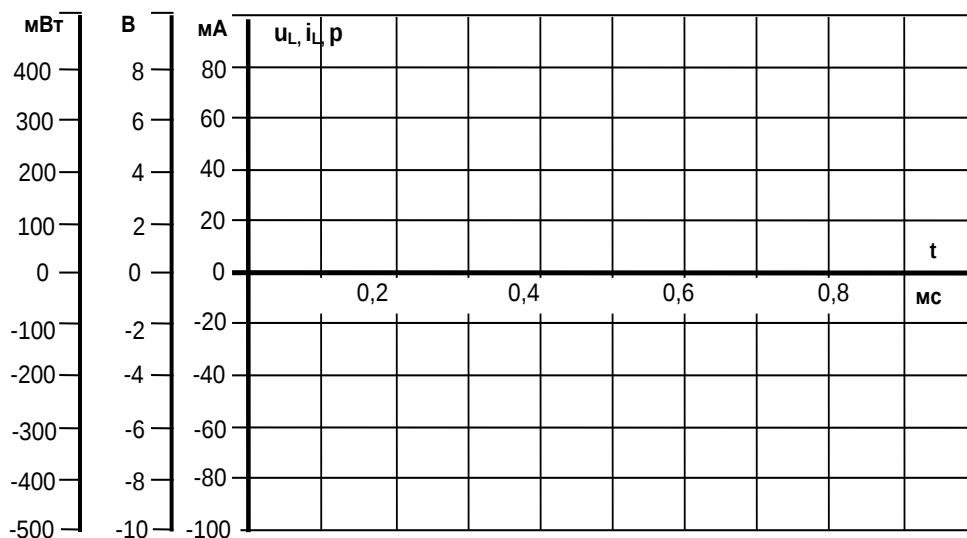


Рисунок 2.15 – Пример оформления сетки координат для построения графиков напряжения, тока и мощности в цепи **RL**

- Определить из осциллограммы **период T , угловую частоту ω и фазовый сдвиг φ** .
- Включите блок «Приборы II», выберите из меню прибор «Угол сдвига фаз» и «подключите» его к V0 и A1. Убедитесь, что вы правильно определили фазовый сдвиг по осциллографу.

- В собранной цепи, согласно схеме (рисунок 2.14), параметры подсоеди-
единенного к ней регулируемого источника синусоидального напряже-
ния установите: $U=5...7\text{В}$ и $f=200\text{ Гц}$. В качестве индуктивности с ма-
лым активным сопротивлением используйте катушку трансформатора
300 витков, вставив между подковами разъемного сердечника полоски
бумаги в один слой (немагнитный зазор).
- Включите виртуальные приборы V0, A1 и осциллограф.
- «Подключите» два входа осциллографа к приборам V0 и A1, а осталь-
ные отключите.
- Установите параметры развёртки осциллографа так, чтобы на экране
было изображение примерно одного-двух периодов напряжения и тока.
- Включите блок дополнительных приборов, выберите из меню приборы
«Активная мощность» и «Реактивная мощность» и подключите их к V1
и A1. Запишите значения реактивной мощности Q_L и активной P . Убе-
дитесь, что $P \ll Q_L$.
- Выполните вычисления мгновенных значений реактивной мощности и
результаты занесите в таблицу 2.5

Таблица 2.5 Экспериментальные данные

Время t , мс	Ток i_L , мА	Напряжение u_L , В	$p = u_L i_L$, мВт
0			
0,1			
0,2			
0,3			
0,4			
0,5			
0,6			
0,7			
0,8			
0,9			
1,0			

- Перенесите данные таблицы 2.5 на график (рисунок 2.15).
- По графику $p(t)$ определите максимальную возвращаемую мощность
(реактивную мощность)

$$Q_L = (P_{\text{макс}} - P_{\text{мин}}) / 2 =$$

- Сравните эту мощность с мощностью, измеренной варметром:

$$Q_L = \dots$$

- В собранной цепи согласно схеме (рисунок 2.14), установите парамет-
ры регулируемого источника синусоидального напряжения $U=5\text{ В}$, $f=1\text{ кГц}$.

- Включите виртуальные приборы V0, A1 и осциллограф.
- «Подключите» два входа осциллографа к приборам V0 и A1, а остальные отключите.
- Установите параметры развёртки осциллографа так, чтобы на экране было изображение примерно одного-двух периодов напряжения и тока.
- Снимите с осциллограммы амплитудные значения U_m и I_m для индуктивностей и частот, указанных в таблице 2.5 и занесите их в соответствующие ячейки таблицы.
- Вычислите величины x_L по формулам U_m/I_m и ωL и занесите их в таблицу 2.6.

Таблица 2.6 – Экспериментальные данные

f , кГц		0,5	1	1,5	2
U_{mL} , В	100 мГн				
U_{mL} , В	40 мГн				
U_{mL} , В	10 мГн				
I_{mL} , мА	100 мГн				
I_{mL} , мА	40 мГн				
I_{mL} , мА	10 мГн				
$x_L = U_m/I_m$, кОм	100 мГн				
	40 мГн				
	10 мГн				
$x_L = \omega L$, кОм	100 мГн				
	40 мГн				
	10 мГн				

- Перенесите величины x_L на график (рисунок 2.17) для построения кривой $x_L = f(f)$.

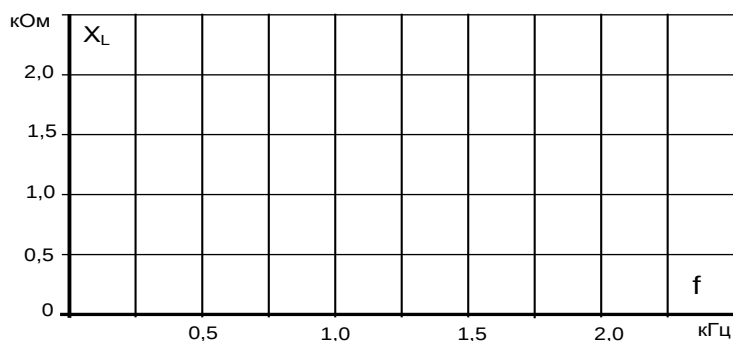


Рисунок 2.17 – Пример оформления сетки координат для построения графика зависимости $x_L = f(f)$.

2.4.4 Контрольные вопросы

- 1 Дайте определение фазового сдвига.
- 2 Чему равен фазовый сдвиг на участке цепи с реальной катушкой индуктивности? Почему?
- 3 Дайте определение мощности в линейной электрической цепи.

- 4 Какой физический процесс иллюстрирует график изменения индуктивной мощности?
- 5 Какое физическое явление выражает индуктивное сопротивление?
- 6 Как зависит индуктивное сопротивление от частоты? Почему?

Литература

- 1) Бессонов, Лев Алексеевич. Теоретические основы электротехники. В 2 т. Том 1. Электрические цепи : учебник для вузов / Л. А. Бессонов. — 12-е изд., испр. и доп. — Электрон. дан. — Москва : Юрайт, 2023. — 831 с.
- 2) Атабеков, Г. И. Основы теории цепей: учебник для вузов / Атабеков Г. И. — 7-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 424 с.
- 3) Новожилов, Олег Петрович. Электротехника (теория электрических цепей) в 2 ч. Часть 1. : учебник для вузов / О. П. Новожилов. — Электрон. дан. — Москва : Юрайт, 2023. — 403 с.
- 4) Беглецов Н.Н., Галишников Ю.П., Сенигов П.Н. Электрические цепи постоянного тока. Руководство по выполнению базовых экспериментов. ЭЦПОТ.001 РБЭ (901) — Челябинск: ООО «Учебная техника», 2006. 77 с.