

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования

«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**Методические указания по проведению лабораторных
работ по дисциплине**

Электротехника и электроника

Содержание

Введение	3
Инструкция по применению электронных приборов и устройств при проведении практических занятий.	4
Лабораторная работа № 1 «Исследование электрических цепей постоянного тока»	15
Лабораторная работа № 2 «Исследование эквивалентных источников ЭДС» ..	26
Лабораторная работа № 3 «Исследование неразветвленной цепи синусоидального тока»	35
Лабораторная работа № 4 «Исследование трехфазной цепи при соединении нагрузки в звезду»	45
Лабораторная работа № 5 «Исследование трехфазной цепи при соединении нагрузки по схеме треугольник»	54
Лабораторная работа № 6 «Изучение свойств и характеристик полупроводниковых диодов»	62
Лабораторная работа № 7 «Исследование биполярного транзистора»	74
Лабораторная работа № 8 «Исследование тиристор»	81
Лабораторная работа № 9 «Исследование логических элементов»	89
ЛИТЕРАТУРА	96

Введение

Применение современного оборудования, использование компьютерных технологий позволяет существенно расширить возможности изучения дисциплины. Использование при проведении лабораторных занятий виртуальных электроизмерительных приборов (амперметров, вольтметров, фазометра, омметра, осциллографа) позволяет не только расширить возможности экспериментов, но и сделать их значительно нагляднее.

Методические указания имеют достаточно полные теоретические материалы по каждой лабораторной работе, подробные описания экспериментальных установок и методик проведения экспериментов, что позволяет студенту подготовиться, успешно выполнить любую работу, обработать и проанализировать полученные результаты. Для более полного и подробного изучения исследуемого физического процесса студент может обратиться к рекомендуемым учебникам и книгам.

Инструкция по применению электронных приборов и устройств при проведении лабораторных занятий.

1 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.



Рисунок 1 – Общий вид лицевой панели коннектора

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. 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 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.

2 Виртуальные амперметры и вольтметры

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

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

2.3 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).

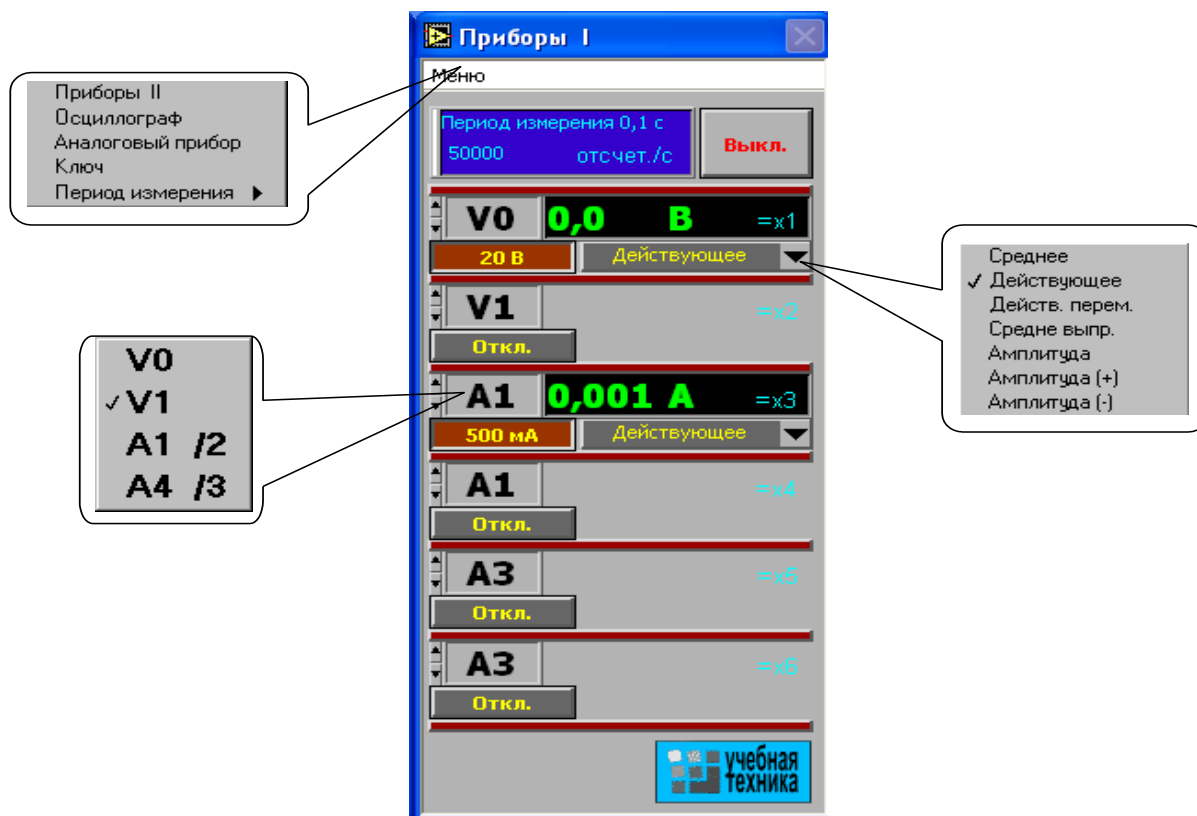


Рисунок 2 – Блок «Приборы I»

2.4 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 рисунке 2, 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.

2.5 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.

2.6 Выберите пределы измерения амперметров и вольтметров, нажав соответствующие кнопки на коннекторе (рис. 1). 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 (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.

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

3 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 (см. рис. 3).

Для активизации прибора достаточно выбрать в соответствующих окнах две величины, через которые определяется искомая величина. Например, если на входе цепи включен 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. 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 в ведённой формуле окно формулы начинает мигать и счёт не производится.

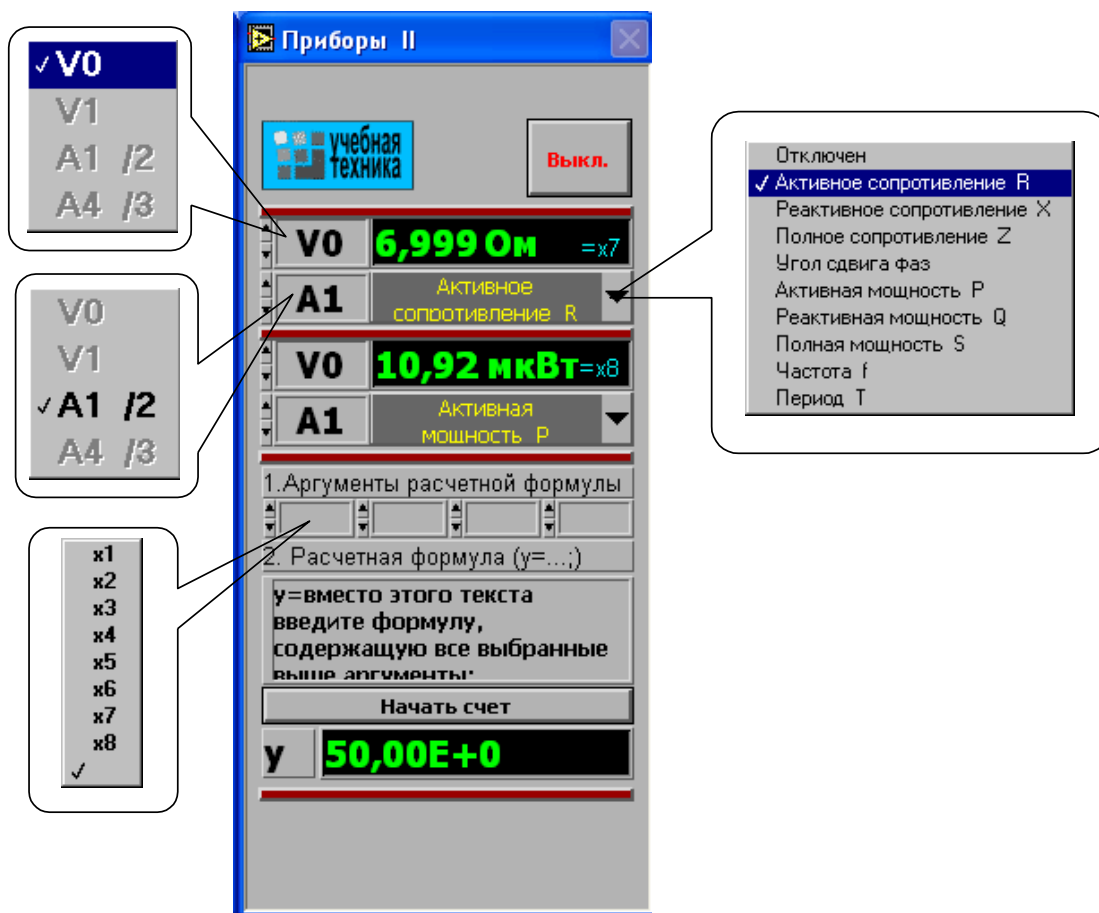


Рисунок 3 – Блок «Приборы II»

4 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. 4). Назначение всех его окон показано на рисунке.

Один из пяти блоков входов и вертикального отклонения луча с пояснениями показан на рисунке 5.

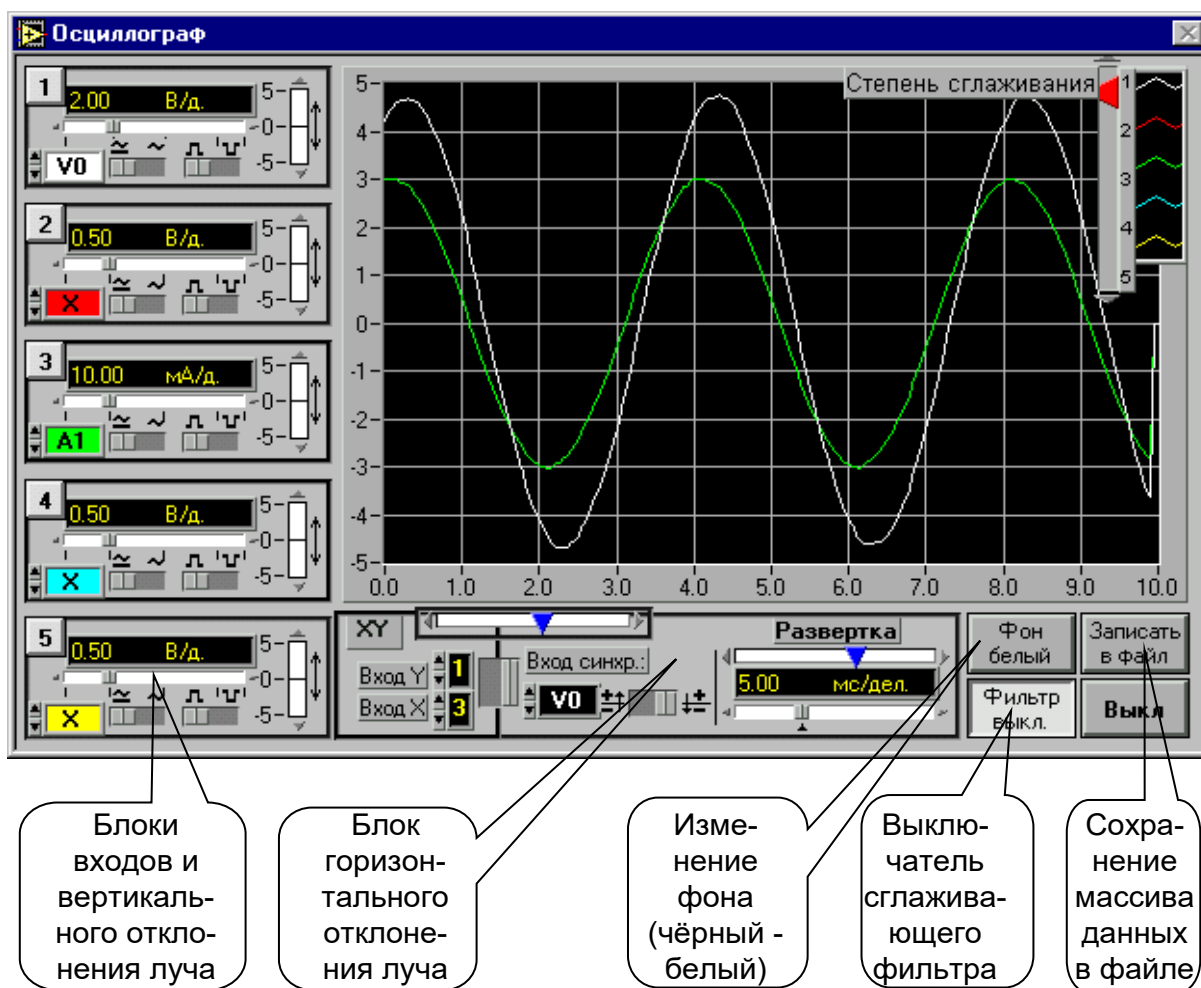


Рисунок 4 – Лицевая панель виртуального осциллографа

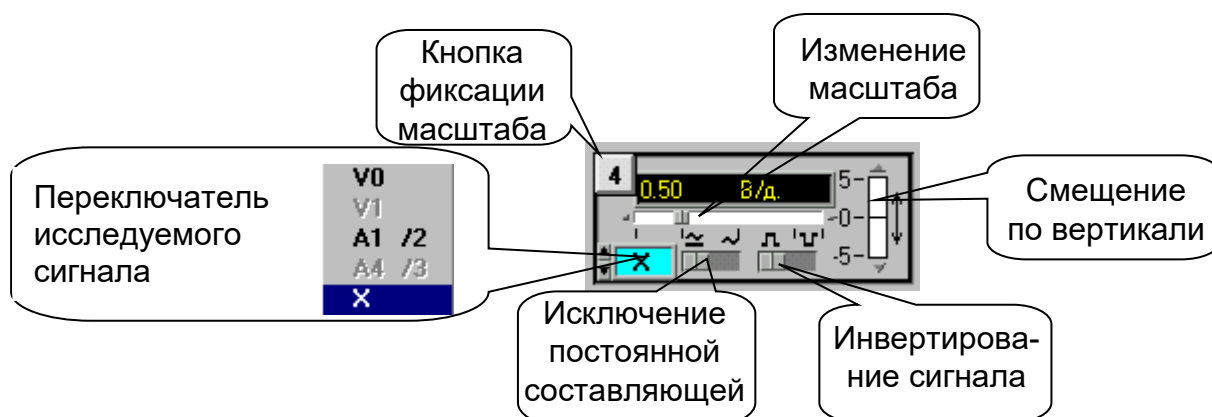


Рисунок 5 – Блок входов и вертикального отклонения

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 (рис. 5). После этого он меняться не будет. Предусмотрено и ручное плавное изменение масштаба внутри ступени.

Органы управления горизонтальным перемещением луча показаны на рисунке 6.

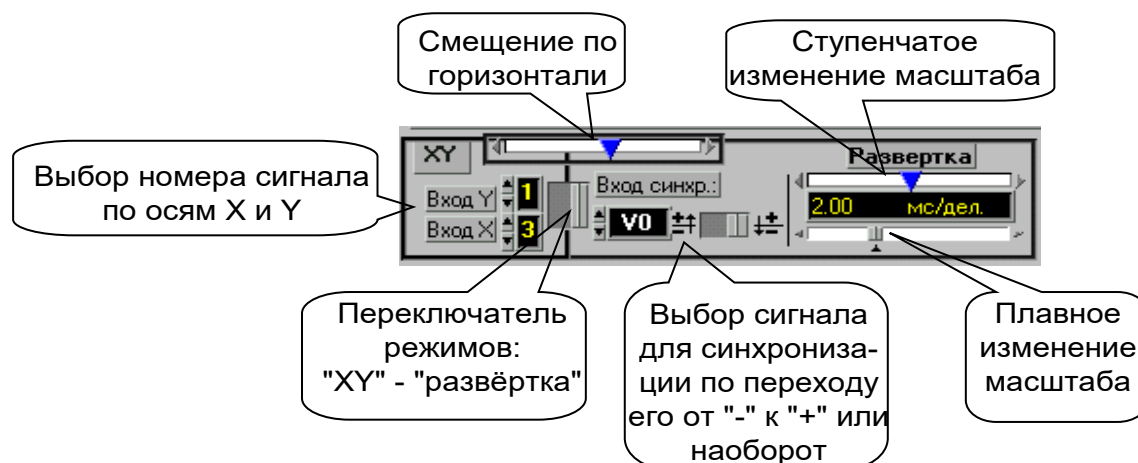


Рисунок 6 – Органы управления горизонтальным положением луча

В правом верхнем углу осциллографа (рис. 4) 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.

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 (рис. 7), в котором

нужно выбрать диск, папку и имя файла, в который Вы хотите записать данные и, выбрав имя файла, нажмите клавишу «Сохранить».

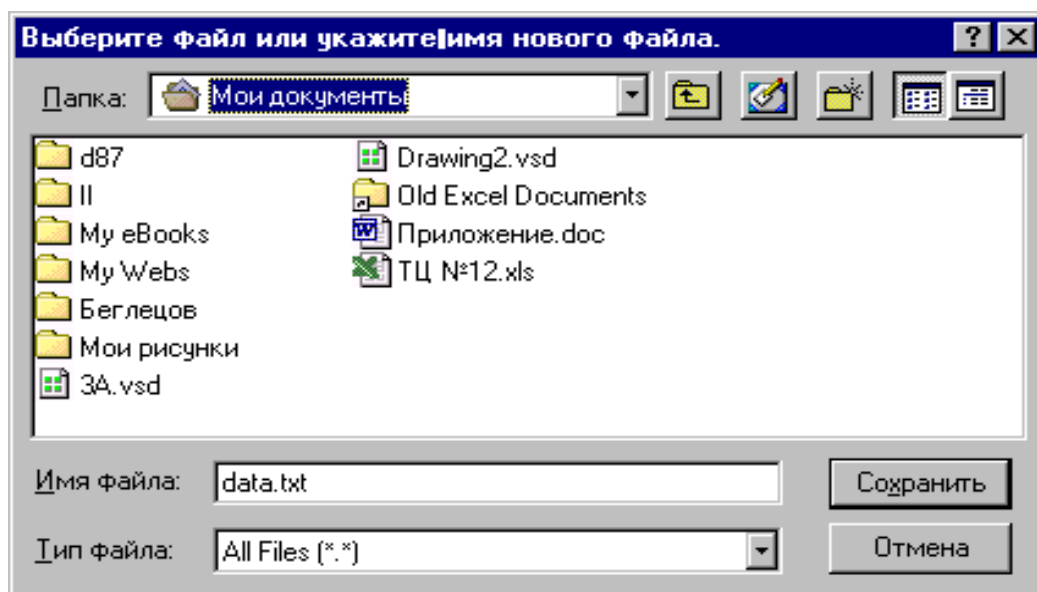


Рисунок 7 – Окно диалога

5 Виртуальный псевдоаналоговый прибор

Для наблюдения динамики изменения измеряемой величины более удобным является стрелочный прибор. Поэтому в комплексе «ВП ТОЭ» имеется псевдоаналоговый стрелочный прибор, который может дублировать показания любого из рассмотренных выше цифровых приборов (рис. 8). Он открывается щелчком мыши на строке «Аналоговый прибор» в меню блока «Приборы I» и подключается к любому из восьми приборов $x_1 \dots x_8$. На нем имеется также окно выбора типа шкалы и клавиша «Инерционный – Безинерционный», с помощью которой можно замедлить или ускорить движение стрелки.

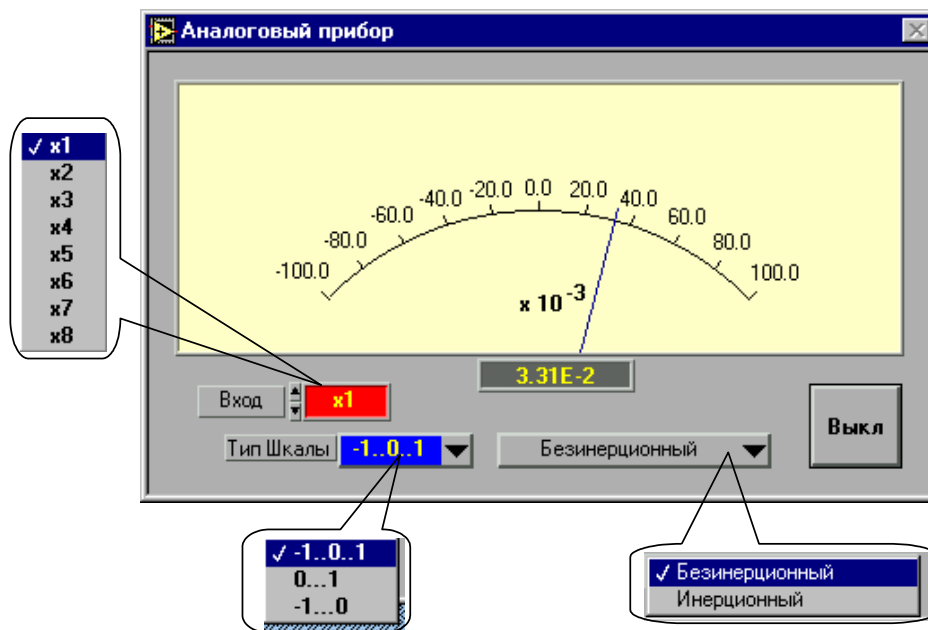


Рисунок 8 – Псевдоаналоговый прибор

6 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 рисунке 9.

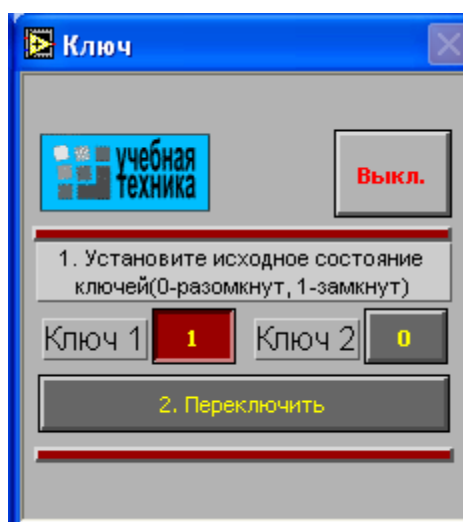


Рисунок 9 – Виртуальный прибор «Ключ»

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 +5 В 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 +5 В на контакте 8 разъема, 0 – отсутствию сигнала. После того, как исходные состояния установлены, они переключаются каждый раз при нажатии клавиши «Переключить».

Лабораторная работа № 1 «Исследование электрических цепей постоянного тока»

Цель занятия: Исследовать токораспределение в цепи постоянного тока.

Программа работы

1. Исследование цепи с последовательным соединением резисторов.
2. Исследование цепи с параллельным соединением резисторов.
3. Исследование цепи со смешанным соединением резисторов.
4. Исследование делителя напряжения в режиме холостого хода.
5. Исследование делителя напряжения под нагрузкой.

Элементы теории

Если резисторы или любые другие нагрузки соединены последовательно (рис. 1), по ним проходит один и тот же ток. Величина тока определяется приложенным напряжением U и суммарным сопротивлением ΣR :

$$I = U / \Sigma R,$$

где $\Sigma R = R_1 + R_2 + R_3$.

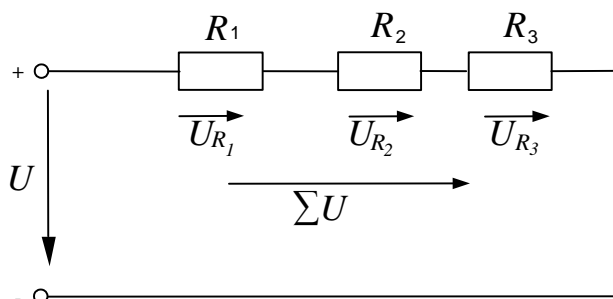


Рисунок 1 – Последовательное соединение резистивных элементов

На каждый отдельный резистор при этом приходится некоторое частичное напряжение. Сумма частичных напряжений равна полному приложенному напряжению:

$$IR_1 + IR_2 + IR_3 = U.$$

Если резисторы или любые другие нагрузки соединены параллельно (рис.2), все они находятся под одинаковым напряжением:

$$U = U_{R1} = U_{R2} = U_{R3}$$

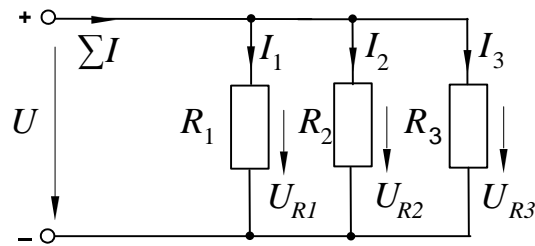


Рисунок 2 – параллельное соединение резистивных элементов

В каждой ветви цепи протекает свой ток. Сумма всех токов ветвей равна полному току:

$$\Sigma I = I_1 + I_2 + I_3.$$

Величина тока ветви зависит от приложенного напряжения и сопротивления данной ветви:

$$I_1 = U / R_1; \quad I_2 = U / R_2 \quad I_3 = U / R_3.$$

Ток в неразветвленной части цепи зависит от приложенного напряжения и эквивалентного сопротивления цепи:

$$\Sigma I = U / R_{\bar{y}}.$$

Для вычисления эквивалентного сопротивления цепи служит формула:

$$R_{\bar{y}} = 1 / (1 / R_1 + 1 / R_2 + 1 / R_3).$$

Для цепи с двумя параллельно соединенными резисторами:

$$R_{\bar{y}} = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2).$$

Смешанные соединения часто встречаются в электрических слабо- и силовых цепях. На рисунке 3 показан пример такой цепи. Она состоит из последовательно (R_1 и R_2) и параллельно (R_3 и R_4) соединенных резисторов.

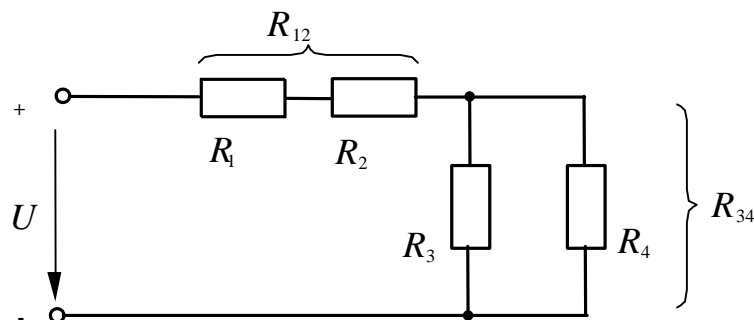


Рисунок 3 – Смешанное соединение резистивных элементов

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. Так, для цепи (рис. 3) это делается следующим образом:

$$R_{12} = R_1 + R_2, R_{34} = R_3 \cdot R_4 / (R_3 + R_4), \Sigma R = R_{12} + R_{34}.$$

Простейший делитель напряжения состоит из двух последовательно соединенных резисторов (рис. 4.1). Делители применяются в тех случаях, когда нужно снизить имеющееся напряжение. Напряжения и сопротивления можно рассчитать, используя соотношения

$$U / U_2 = (R_1 + R_2) / R_2 \rightarrow U_2 = U \cdot R_2 / (R_1 + R_2).$$

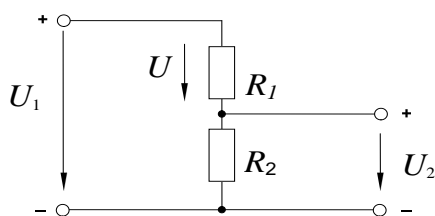


Рисунок 4.1 – Нерегулируемый делитель напряжения

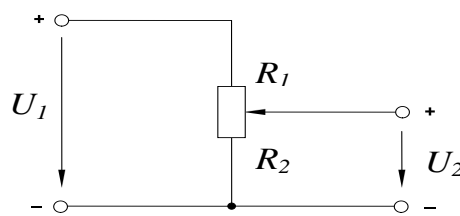


Рисунок 4.2 – Регулируемый делитель напряжения

Чтобы обеспечить регулирование вторичного напряжения, вместо двух постоянных резисторов используют потенциометр (рис. 4.2). Тогда, изменяя положение движка потенциометра (угол поворота α при цилиндрической конструкции потенциометра), можно устанавливать напряжение на выходе делителя в диапазоне $0 \dots U$.

Напряжение U_2 , получаемое в результате деления, обычно подается на нагрузку R_3 (рис. 5.1). Но из-за параллельного соединения между собой резисторов R_2 и R_3 соотношение напряжений меняется по отношению к ситуации, имевшей место при работе делителя вхолостую.

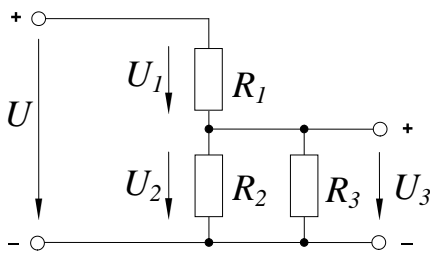


Рисунок 5.1 – нерегулируемый делитель напряжения с подключенной нагрузкой

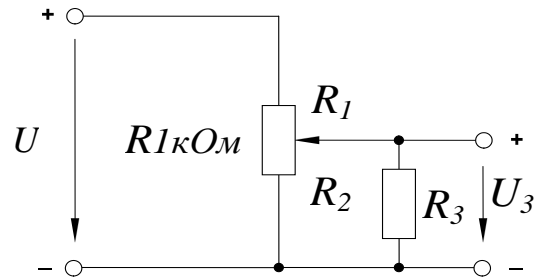


Рисунок 5.2 – Регулируемый делитель напряжения с подключенной нагрузкой

Напряжения и сопротивления делителя напряжения под нагрузкой можно рассчитать, используя уравнение пропорции, но сначала нужно найти эквивалентное сопротивление R_{23} параллельно соединенных резисторов R_2 и R_3 :

$$R_{23} = R_2 \cdot R_3 / (R_2 + R_3); \quad U / U_3 = (R_1 + R_{23}) / R_{23}.$$

Если два постоянных резистора R_1 и R_2 заменить потенциометром (рис. 5.2), становится возможным изменять напряжение U_3 от 0 до U в зависимости от положения движка (угла поворота) потенциометра.

Методические указания к выполнению работы

1 Исследование цепи с последовательным соединением резисторов.

1.1 Соберите цепь согласно схеме (рис. 6).

1.2 Измерьте частичные напряжения (падения напряжения) между точками **В-С**, **Д-Е**, **Ф-Г**, а также полное напряжение цепи между точками **В-Г**. Все измеренные величины занесите в таблицу 1.

1.3 Запишите уравнение по второму закону Кирхгофа, подставьте в него данные измерений и убедитесь в выполнении этого закона. Подсчитайте погрешность.

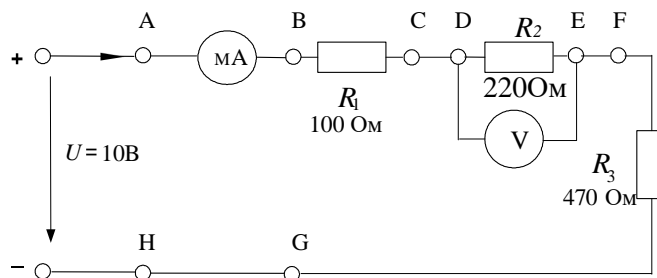


Рисунок 6 – Схема цепи с последовательным соединением резисторов

Таблица 1

Ток, мА				Падения напряжения, В			Полное напряжение, В
Точки цепи				Точки цепи			Точки цепи
A-B	C-D	E-F	H-G	B-C	D-E	F-G	B-G

2 Исследование цепи с параллельным соединением резисторов

2.1. Соберите цепь согласно схеме (рис. 7) и подайте постоянное напряжение 10В на ее вход.

2.2. Измеряя напряжения и токи, убедитесь, что напряжение, прикладываемое к каждому резистору, одинаково и что сумма токов ветвей равна полному току цепи.

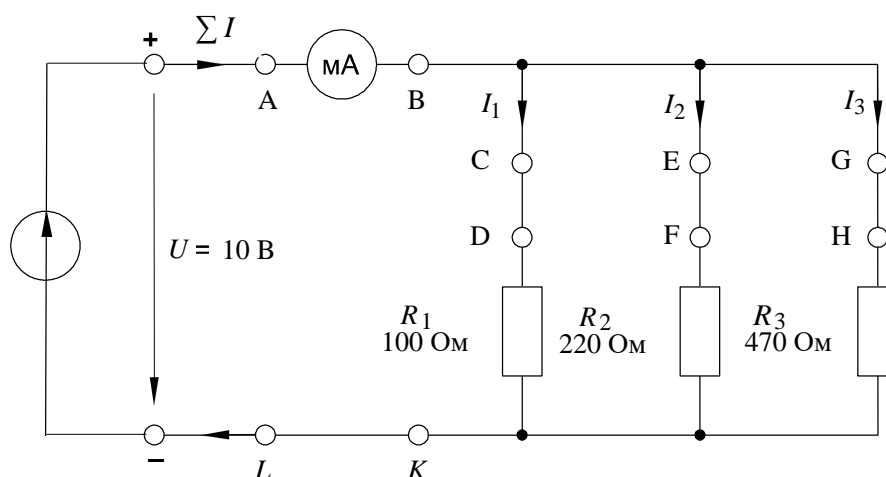


Рисунок 7 – Схема цепи с параллельным соединением резисторов

2.3. Поочередно включая мультиметр в разрывы между точками **A-B**, **C-D**, **E-F**, **G-H** и **L-K**, измерьте токи в соответствующих ветвях.

2.4. Измерьте напряжения на резисторах R_1 , R_2 , и R_3 (между точками **D-K**, **F-K**, **H-K**). Занесите измеренные величины в таблицу 2.

Примечание: Этот опыт можно проделать, включив в цепь одновременно 4 виртуальных амперметра.

Таблица 2

Напряжения, В			Токи ветвей, мА			Полный ток цепи, мА	
Точки измерения			Точки измерения			Точки измерения	
D - К (U_{R1})	F - К (U_{R2})	H - К (U_{R3})	C - D	E - F	G - H	A - B	L - К

3 Исследование цепи со смешанным соединением резисторов

3.1. Соберите цепь согласно схеме (рис. 8) и подайте на ее вход постоянное напряжение 15 В.

3.2. Измерьте токи во всех ветвях и напряжения на всех элементах. Если измерения производятся виртуальными приборами, то измерьте также сопротивления всех элементов $R_1...R_4$ и сопротивление параллельного участка R_{34} (только не забывайте «подключать» виртуальный омметр к соответствующим напряжениям и токам!). Если измерения проводятся мультиметрами, то сопротивление любого участка цепи определяйте как отношение напряжения к току. Результаты измерений занесите в таблицу 3.

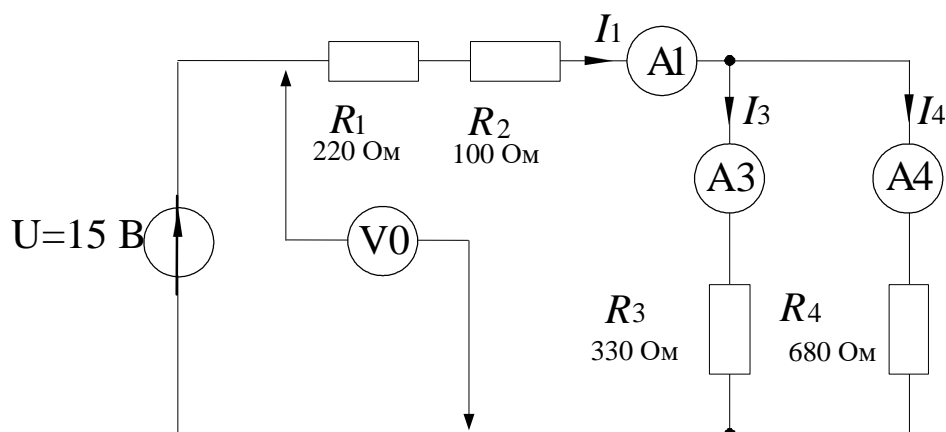


Рисунок 8 – Схема цепи со смешанным соединением резисторов

Таблица 3

Измеряемая или рассчитанная величина	Измеренное значение	Заданные или рассчитанные значения	Погрешность, %
$R_1, Ом$			
$R_2, Ом$			
$R_3, Ом$			
$R_4, Ом$			
$R_{34}, Ом$			
$R_{ЭКВ}, Ом$			
$I_1, мА$			
$I_3, мА$			
$I_4, мА$			
$U, В$			
$U_1, В$			
$U_2, В$			
$U_{34}, В$			

3.4. Рассчитайте значения сопротивлений, токов и напряжений и занесите результаты расчета также в таблицу 3.

3.5. Запишите уравнение по первому закону Кирхгофа, подставьте в него измеренные значения токов и убедитесь в выполнении закона.

3.6. Запишите уравнение по второму закону Кирхгофа, подставьте в него измеренные значения напряжений и убедитесь в выполнении этого закона.

3.7. Сравните результаты расчета и измерений, вычислив расхождение результатов (погрешность) в процентах по формуле:

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

4 Исследование делителя напряжения в режиме холостого хода

4.1. Соберите цепь потенциометра согласно схеме (рис. 9) и подайте на ее вход постоянное напряжение 10 В. Измерьте напряжения U_1 и U_2 при каждом из положений потенциометра, заданных в таблице 4 значениями угла α . Внесите все измеренные величины напряжения в таблицу 4.

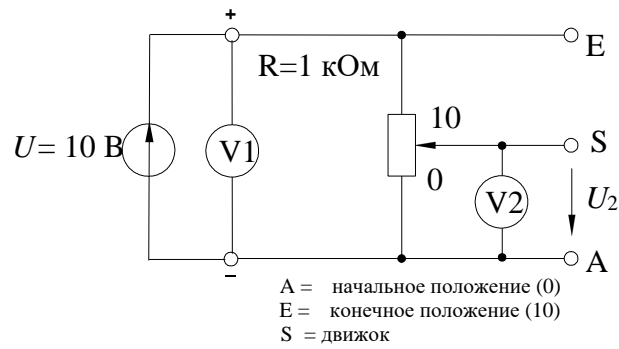


Рисунок 9 – Схема делителя напряжения в режиме холостого хода

Таблица 4

	Положение потенциометра (угол поворота α)											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$U_1, \text{В}$												
$U_2, \text{В}$												

4.2. Перенесите значения напряжения U_2 на график (рис. 10) для построения кривой $U_2 = f(\alpha)$.

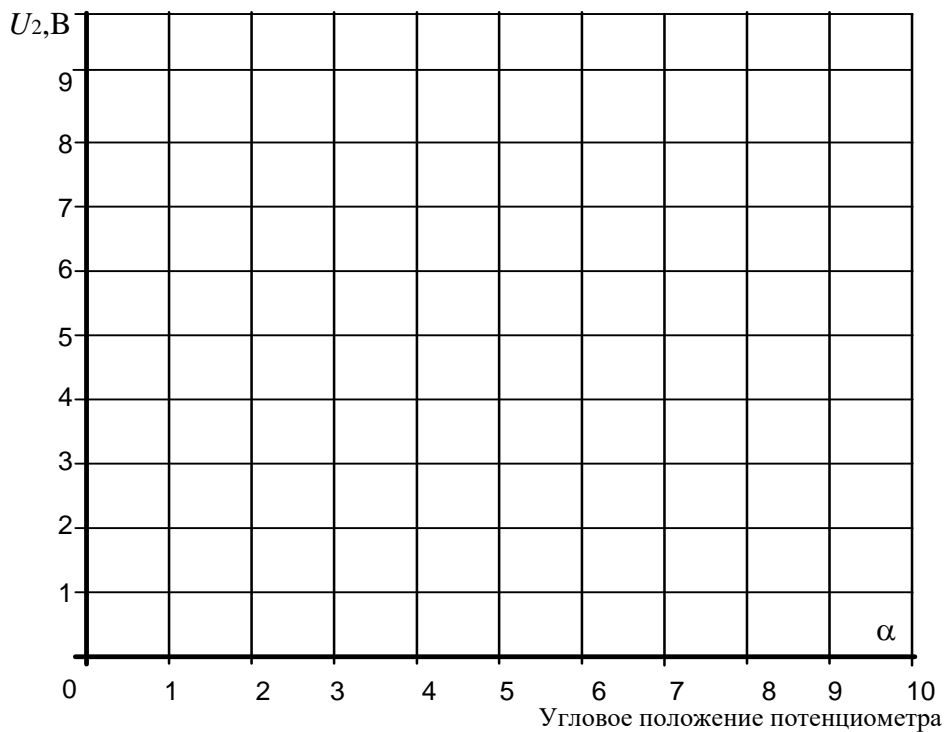


Рисунок 10

5 Исследование делителя напряжения под нагрузкой

5.1. Соберите цепь делителя в соответствии со схемой (рис. 11) и подайте на его вход постоянное напряжение 10 В.

5.2. Измерьте напряжение U_3 при каждом из положений движка потенциометра, указанных в таблице 5 соответственно углу поворота α . Измерения должны быть проведены при различных нагрузках ($R_3=330$ Ом, 680 Ом и 1 кОм).

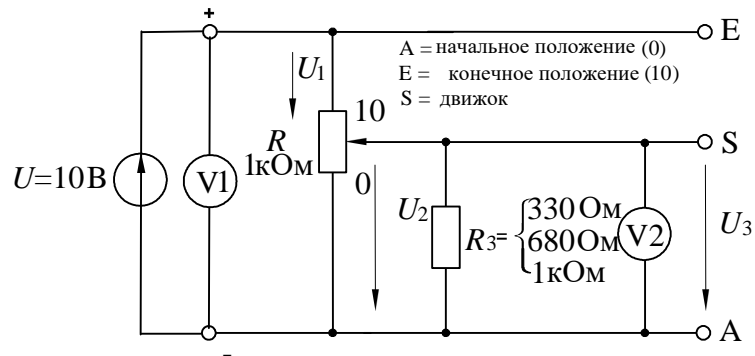


Рисунок 11 – Схема делителя напряжения под нагрузкой

5.3. Внесите все измеренные величины в таблицу 5 и перенесите их также на график (рис. 12) для построения кривой $U_3 = f(\alpha)$.

Таблица 5

	Положение потенциометра (угол поворота α)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_3, \text{В}; R_3=1 \text{ кОм}$											
$U_3, \text{В}; R_3=680 \text{ Ом}$											
$U_3, \text{В}; R_3=330 \text{ Ом}$											

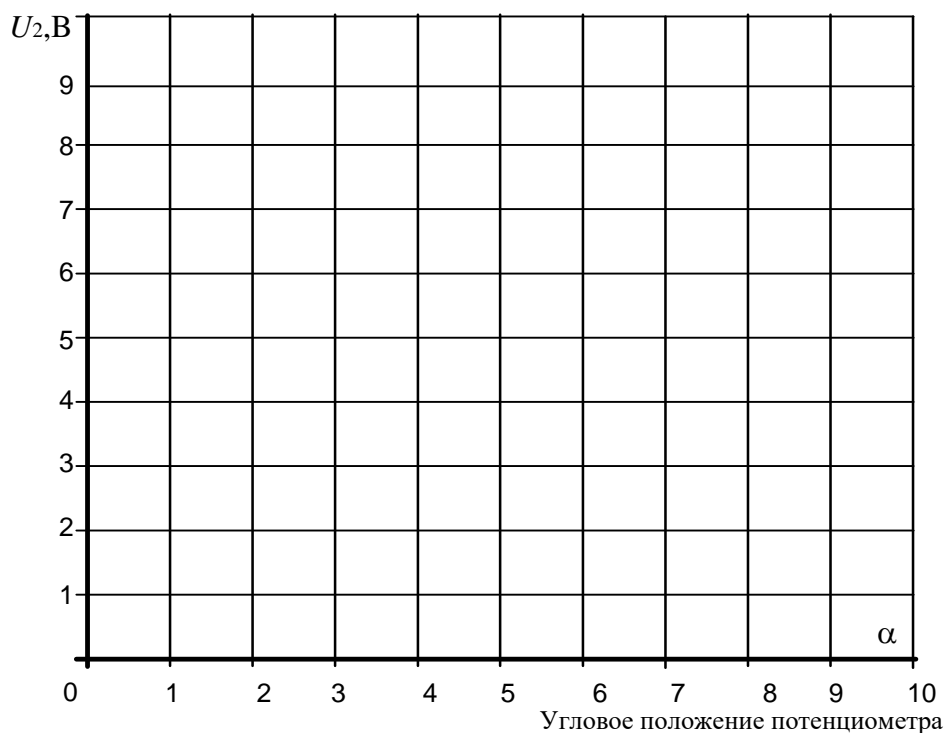


Рисунок 12

Содержание отчета

1. Фамилия, имя, отчество студента, номер группы, дата выполнения работы.
2. Наименование и цель работы.
3. Программа работы.
4. Принципиальные схемы исследуемых цепей.
5. Таблицы измерений и вычислений, примеры расчетов.
6. Графики и диаграммы.
7. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Чему равно полное сопротивление цепи при последовательном соединении резисторов?
2. Каковы падения напряжения по отношению к сопротивлениям соответствующих резисторов при их последовательном соединении?

3. Чему равно полное сопротивление цепи с параллельным соединением резисторов?
4. Каковы токи ветвей по отношению к сопротивлениям этих ветвей?
5. Какую форму имеет кривая $U=f(\alpha)$ при работе делителя в режиме холостого хода?
6. Какое напряжение получается при суммировании U_1 и U_2 ?
7. Чему равна величина сопротивления, с которого снимается напряжение U_2 , при положении 3 потенциометра?
8. Как изменяется форма кривой $U=f(\alpha)$ при подключении к делителю нагрузочного сопротивления?
9. Как влияет величина нагрузочного сопротивления на форму кривой $U=f(\alpha)$?

Лабораторная работа № 2 «Исследование эквивалентных источников ЭДС»

Цель работы: Изучить свойства реального источника ЭДС.

Программа работы

1. Исследование реального источника ЭДС.
2. Исследование последовательного включения источников ЭДС.
3. Исследование параллельного включения источников ЭДС.

Элементы теории

В теории электрических цепей используют так называемые расчетные источники электрической энергии: источник ЭДС и источник тока. При расчетах электрических цепей применяют как идеальные, так и реальные источники.

В настоящей работе мы исследуем реальный источник ЭДС, который отличается от идеального наличием внутреннего сопротивления (у идеального источника ЭДС оно равно нулю).

Эквивалентная схема такого источника представлена на рисунке 1.

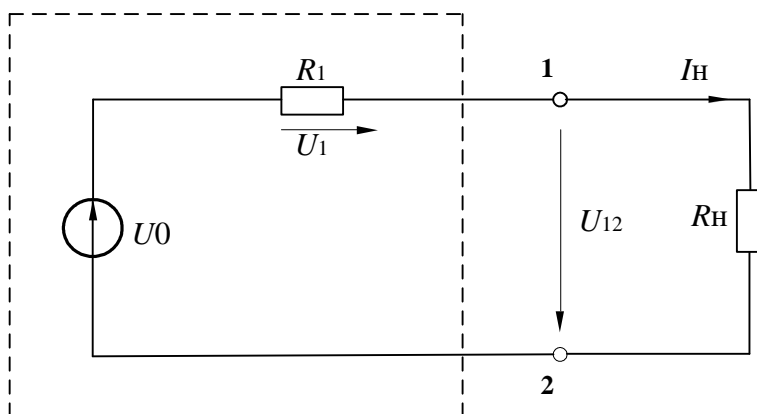


Рисунок 1 – Схема реального источника ЭДС

Когда эквивалентный источник ненагружен, т.е. ток в нем отсутствует (режим холостого хода), имеем для выходного напряжения U_{12}

$$U_{12} = E,$$

где E – ЭДС источника.

Когда эквивалентный источник ЭДС (напряжения) нагружен, выходное напряжение определяется следующим уравнением равновесия напряжения по

2-му закону Кирхгофа:

$$U_{12} = E - I_i \cdot R_{\hat{a}i},$$

где $I_i = E / (R_{\hat{a}i} + R_i)$ – ток нагрузки, $R_{вн}$ – внутреннее сопротивление эквивалентного источника, R_n – сопротивление нагрузки.

Если выходные зажимы 1 и 2 источника замкнуты друг на друга (режим короткого замыкания), имеем

$$U_{12} = 0.$$

Возникающий при этом ток короткого замыкания I_K ограничен внутренним сопротивлением источника

$$I_{\hat{e}} = E / R_{\hat{a}i}.$$

Параметры E , $R_{вн}$ и I_K эквивалентного источника напряжения могут быть представлены на графике (рис. 2) в виде характеристики $I_i = f(U)$. Здесь же показана характеристика нагрузки: $U = R_i \cdot I_i$.

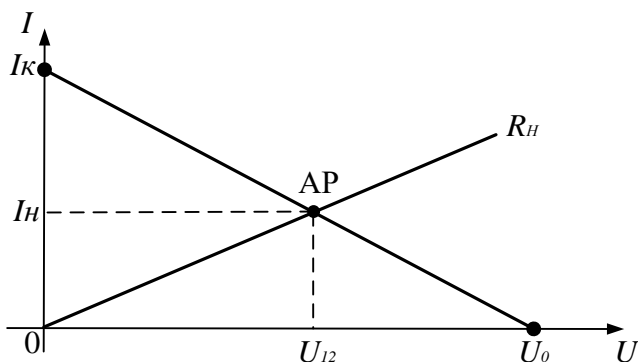


Рисунок 2 – Характеристики эквивалентного источника напряжения

Последовательное соединение (рис. 3) источников ЭДС (напряжения) дает большую по величине общую ЭДС (напряжение):

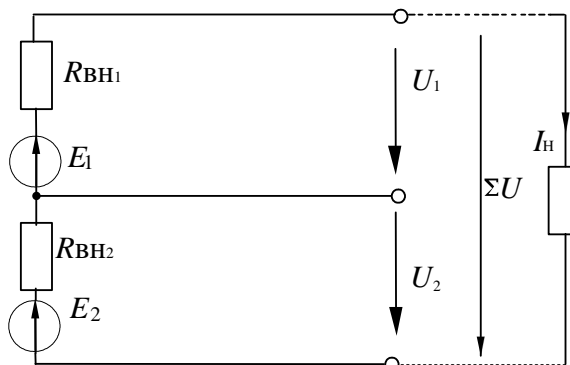


Рисунок 3 – Последовательное соединение источников ЭДС

$$\Sigma E = E_1 + E_2.$$

Необходимым условием является, чтобы полюса источников были соединены корректно – положительный полюс одного источника с отрицательным полюсом следующего (*согласное включение*).

Если полюса источников соединены противоположным образом (*встречное включение*), общее напряжение цепи определяется как разность ЭДС (напряжений) источников:

$$\Sigma E = E_1 - E_2.$$

Внутренние сопротивления последовательно соединенных источников суммируются в общее внутреннее сопротивление

$$\Sigma R_{\text{вн}} = R_{\text{вн}1} + R_{\text{вн}2}.$$

Когда цепь с последовательно соединенными источниками напряжения нагружена на резистор R_H , возникает ток, зависящий от общего напряжения, сопротивления нагрузки и суммы внутренних сопротивлений отдельных источников:

$$I_i = \Sigma E / (R_i + R_{\text{вн}1} + R_{\text{вн}2}).$$

Параллельным соединением (рис. 4) нескольких источников ЭДС (напряжения) одинаковой величины обеспечивается более высокий ток нагрузки I_H .

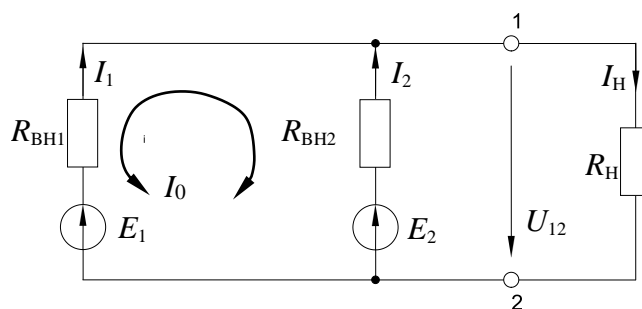


Рисунок 4 – Параллельное включение источников ЭДС

Соединять нужно одноименные полюса источников. Если ЭДС источников различны, то в них возникает уравнительный ток I_0 . Он зависит от разности напряжений и соответствующих внутренних сопротивлений:

$$I_0 = \frac{E_1 - E_2}{R_{\dot{a}i1} + R_{\dot{a}i2}}$$

Ток общей нагрузки I_n зависит от сопротивления нагрузки R_n , эквивалентной ЭДС и эквивалентного внутреннего сопротивления, также как и в одиночном источнике:

$$I_i = \frac{E_{\dot{y}}}{R_{\dot{y}\dot{a}i} + R_i}$$

При параллельном соединении двух источников эквивалентное внутреннее сопротивление и ЭДС равны:

$$R_{\dot{y}\dot{a}i} = \frac{R_{\dot{a}i1} \cdot R_{\dot{a}i2}}{R_{\dot{a}i1} + R_{\dot{a}i2}};$$

$$E_{\dot{y}} = \frac{E_1 G_{\dot{a}i1} + E_2 G_{\dot{a}i2}}{G_{\dot{a}i1} + G_{\dot{a}i2}},$$

где $G_{\dot{a}i1} = 1/R_{\dot{a}i1}$, $G_{\dot{a}i2} = 1/R_{\dot{a}i2}$ – внутренние проводимости.

Методические указания к выполнению работы

1 Исследование реального источника ЭДС

1.1. Соберите цепь согласно схеме (рис.5). В качестве источника используйте регулируемый источник 0...15В, установив на его выходе 5В.

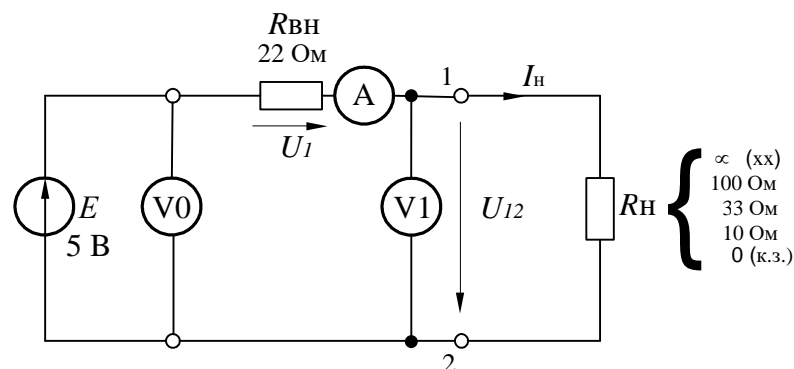


Рисунок 5 – Электрическая схема для исследования реального источника ЭДС

Поскольку используемый источник питания стабилизирован (что означает равенство нулю его собственного внутреннего сопротивления), для цели данного эксперимента он должен быть дополнен сопротивлением $R_{вн}=22$ Ом.

1.2. Для определения ЭДС источника E измерьте напряжение на разомкнутых выводах 1 и 2 (режим холостого хода, $R_H = \infty$, $U_{12} = E$).

1.3. Измерьте напряжение U_{12} и ток цепи I_H при сопротивлениях нагрузки равных 100 Ом; 33 Ом; 10 Ом.

1.4. Измерьте ток короткого замыкания источника I_K , для чего между выводами 1 и 2 должна быть включена перемычка (режим короткого замыкания, $R_H=0$, $I_H=I_K$). Результаты измерений занесите в таблицу 1.

1.5. По полученным данным на рисунке 6 постройте графики $I = f(U)$ и $U = I \cdot R_L$.

Таблица 1

$R_H, \text{ Ом}$	∞ (х.х.)	100	33	10	0 (к.з.)
$U_{12}, \text{ В}$	$E =$				0
$I_H, \text{ мА}$	0				$I_K = \dots\dots\dots$

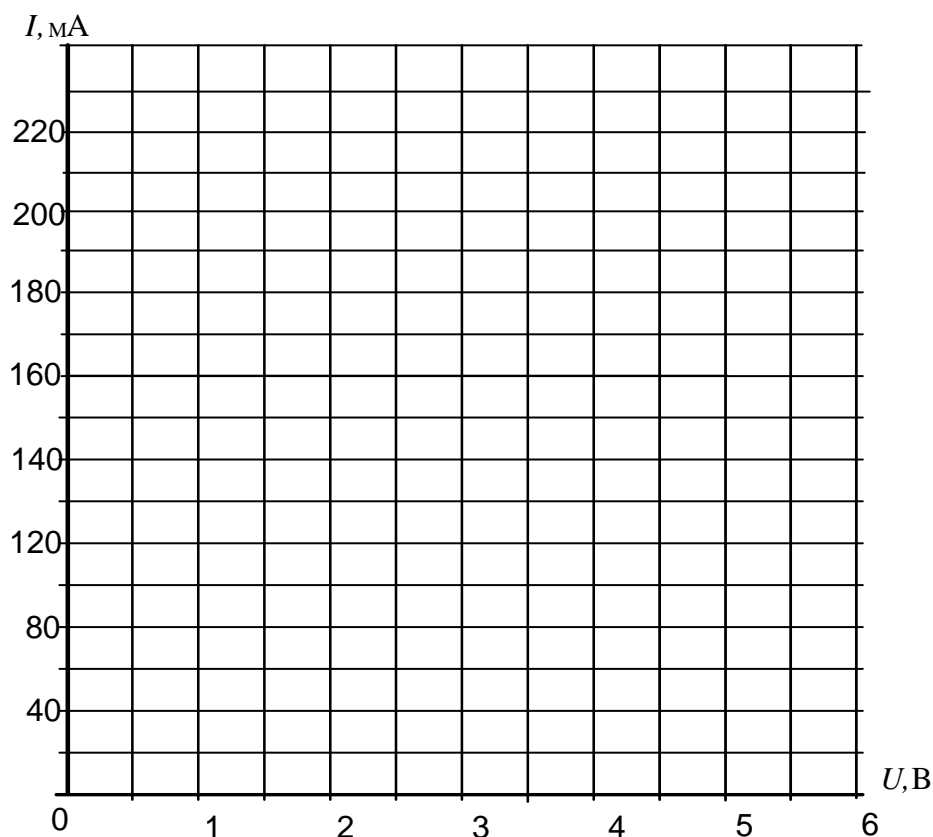


Рисунок 6

2 Исследование последовательного включения источников ЭДС.

2.1. Соберите цепь с последовательным соединением источников напряжения согласно схеме (рис. 7), используя в качестве одного из источников нерегулируемый источник 15 В, в качестве другого – регулируемый, установив на нем напряжение 5...10 В.

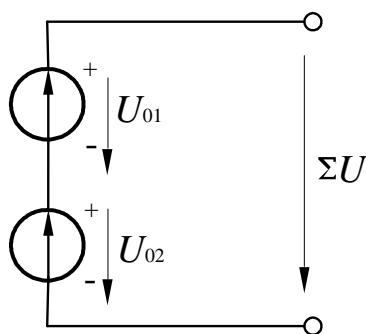


Рисунок 7 – Электрическая схема для исследования последовательного включения источников ЭДС

2.2. Измерьте и запишите ЭДС каждого источника и общее напряжение

$$E_1 = \quad \text{В}; \quad E_2 = \quad \text{В}; \quad U_{\text{содл.}} = \quad \text{В}.$$

Затем поменяйте полярность одного из источников (поменяв местами его полюса) и снова измерьте напряжение $U_{встр.} =$ В.

$$\text{Убедитесь, что } U_{\text{н.д.}} = E_1 + E_2; \quad U_{\text{встр.}} = E_1 - E_2.$$

3 Исследование параллельного включения источников ЭДС.

3.1. Измерьте точное значение ЭДС нерегулируемого источника напряжения 15 В и установите точно такое же значение напряжения на регулируемом источнике. Запишите значение $E_1 = E_2 = \dots$ в таблицу 2.

3.2. Соберите цепь с параллельным соединением источников напряжения согласно схеме (рис. 8), используя в качестве E_1 нерегулируемый источник напряжения, а в качестве E_2 – регулируемый.

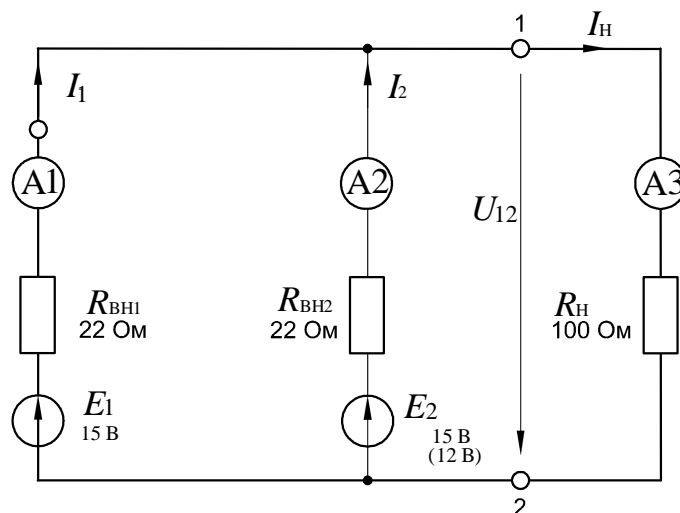


Рисунок 8 – Схема для исследования параллельного включения источников ЭДС

3.3. Сделайте все измерения при одинаковых ЭДС в режиме холостого хода и при $R_H = 100$ Ом запишите результаты в таблицу 2. Для измерения напряжения используйте один из мультиметров, например А3, поставив вместо него перемычку.

3.4. Установите ЭДС $E_2 = 12$ В, выполните измерения при неодинаковых ЭДС источников в режиме холостого хода и при $R_H = 100$ Ом и запишите результаты в таблицу 2.

3.5 По известным параметрам: E_1 , E_2 , $R_{вн1}$, $R_{вн2}$, R_H рассчитайте эквивалентную ЭДС, уравнивающий ток I_0 , ток I_H и напряжение U_{12} на нагрузке, токи источников I_1 и I_2 . Сравните результаты расчета и эксперимента.

Таблица 2

Опыт	Измеряемая или расчетная величина	Измерено	Рассчитано	Погрешность, %
Холостой ход $E_1=E_2=\dots В$	$E_{Э}$, В I_0 , мА			
Нагрузка $R_H=100 \text{ Ом}$ $E_1=E_2=\dots В$	U_{12} , В I_H , мА I_1 , мА I_2 , мА			
Холостой ход $E_1=\dots В$ $E_2=\dots В$	$E_{Э}$, В I_0 , мА			

Продолжение таблицы 2

Нагрузка $R_H=100 \text{ Ом}$ $E_1=\dots В$ $E_2=\dots В$	U_{12} , В I_H , мА I_1 , мА I_2 , мА			
--	--	--	--	--

Примечание: Токи I_1 и I_2 , можно определить из уравнений 2-го закона

Кирхгофа:

$$R_{вн1} I_1 + U_{12} = E_1,$$

$$R_{вн2} I_2 + U_{12} = E_2.$$

Содержание отчета

1. Фамилия, имя, отчество студента, номер группы, дата выполнения работы.
2. Наименование и цель работы.
3. Программа работы.
4. Принципиальные схемы исследуемых цепей.
5. Таблицы измерений и вычислений, примеры расчетов.

6. Графики и диаграммы.

7. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Чем отличается реальный источник ЭДС от идеального?

2. Запишите уравнение по второму закону Кирхгофа для реального источника ЭДС, нагруженного сопротивлением R_H .

3. Как влияет уменьшение внутреннего сопротивления источника $R_{вн}$ на вид его характеристики $I_H = f(U)$?

4. Чем ограничен ток реального источника ЭДС в режиме короткого замыкания?

5. Для какой цели применяют последовательное включение нескольких источников ЭДС?

6. Для какой цели применяют параллельное включение нескольких источников ЭДС?

7. Как определяется эквивалентная ЭДС и внутреннее сопротивление при последовательном включении двух источников ЭДС?

8. Как определяется эквивалентная ЭДС и внутреннее сопротивление при параллельном включении двух источников ЭДС?

Лабораторная работа № 3 «Исследование неразветвленной цепи синусоидального тока»

Цель работы: Изучить основные закономерности в электрической цепи с последовательным соединением резистора, конденсатора и индуктивной катушки. Овладеть методикой построения векторных диаграмм. Изучить условия возникновения и сущность резонанса напряжений.

Программа работы

1. Исследование режима работы цепи синусоидального тока при последовательном соединении резистора и индуктивной катушки.
2. Исследование режима работы цепи синусоидального тока при последовательном соединении резистора и конденсатора.
3. Исследование режима работы цепи синусоидального тока при последовательном соединении конденсатора и индуктивной катушки.

Элементы теории

Электрическая цепь с последовательным соединением резистора и катушки индуктивности представлена на рисунке.1.

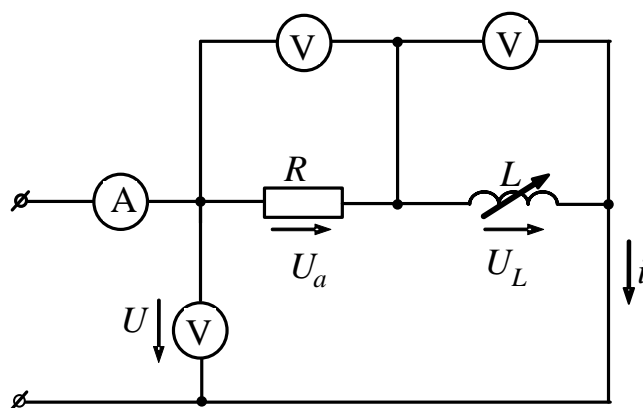


Рисунок 1 – Последовательное соединенипе резистора и индуктивной катушки

При прохождении по такой цепи синусоидального тока $i=I_m \sin \omega t$ мгновенное значение напряжения, приложенного к цепи, является суммой двух составляющих:

$$u = u_a + u_L = i \cdot r + L \frac{di}{dt} = r \cdot I_m \cdot \sin \omega t + L \cdot I_m \cdot \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

Активная составляющая $U_a = I \cdot r$ совпадает по фазе с током i , а реактивная – опережает по фазе ток на угол $\pi/2$. На векторной диаграмме действующие значения этих величин должны быть представлены двумя ортогональными векторами (рис. 2) $\dot{U}_a = \dot{I} \cdot r$ и $\dot{U}_L = \dot{I} \cdot x_L$.

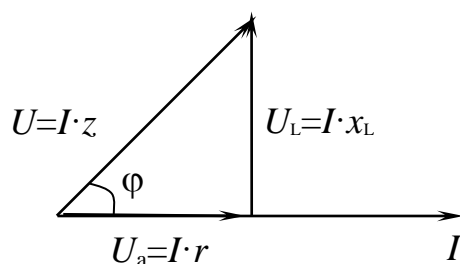


Рисунок 2 – Векторная диаграмма последовательного соединения R и L

Вектор U определяется в результате геометрического сложения

этих векторов:

$$\dot{U} = \dot{U}_a + \dot{U}_L$$

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_L^2} = I \sqrt{r^2 + x_L^2},$$

откуда $I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x_L^2}} = \frac{U}{z}$, где $z = \sqrt{r^2 + x_L^2}$ — полное сопротивление цепи.

Вектор тока отстает от вектора напряжения на угол φ , величина которого определяется из треугольника напряжений:

$$\cos \varphi = \frac{U_a}{U} = \frac{r}{z}; \quad \varphi = \arccos \frac{r}{z}.$$

На рисунке 3 приведена электрическая цепь, состоящая из последовательного соединения резистора и конденсатора.

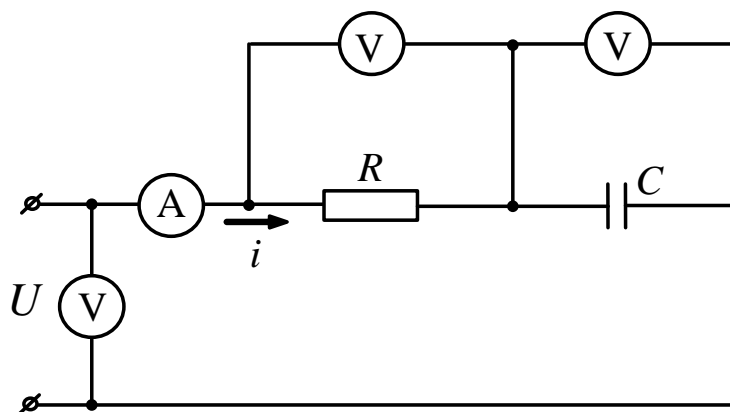


Рисунок 3 – Последовательное соединение резистора и конденсатора

Здесь напряжение также является векторной суммой двух напряжений:

$$u = I_m \cdot r \cdot \sin \omega t + I_m \frac{1}{\omega \bar{n}} \cdot \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) = I_m \cdot r \cdot \sin \omega t + I_m \cdot x_c \cdot \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}).$$

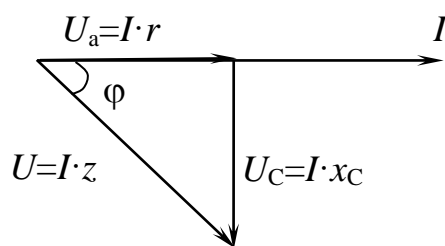


Рисунок 4 – Векторная диаграмма последовательного соединения R и C

Действующее значение общего напряжения:

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_c^2} = I \cdot \sqrt{r^2 + x_c^2} = I \cdot z,$$

где $z = \sqrt{r^2 + x_c^2}$.

Вектор тока I опережает вектор напряжения U на угол $\varphi = \arccos \frac{r}{z}$.

Цепь с последовательным соединением катушки индуктивности и конденсатора представлена на рис. 5.

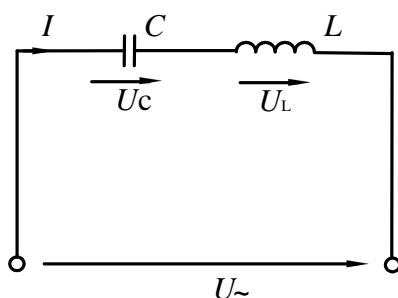


Рисунок 5 – Цепь с последовательным соединением катушки и конденсатора

Когда по цепи протекает один и тот же синусоидальный ток I , напряжение на конденсаторе u_C отстает от тока I на 90° , а напряжение на катушке индуктивности u_L опережает ток на 90° . Эти напряжения находятся в противофазе (повернуты относительно друг друга на 180°).

Когда одно из напряжений больше другого, цепь оказывается либо преимущественно индуктивной (рис. 6, а), либо преимущественно емкостной (рис. 6, б). Если напряжения u_L и u_C имеют одинаковые значения и компенсируют друг друга, то суммарное напряжение на участке цепи $L - C$ оказывается равным нулю. Остается только небольшая составляющая напряжения на активном сопротивлении катушки и проводов. Такое явление называется **резонансом напряжений** (рис. 6, в).

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

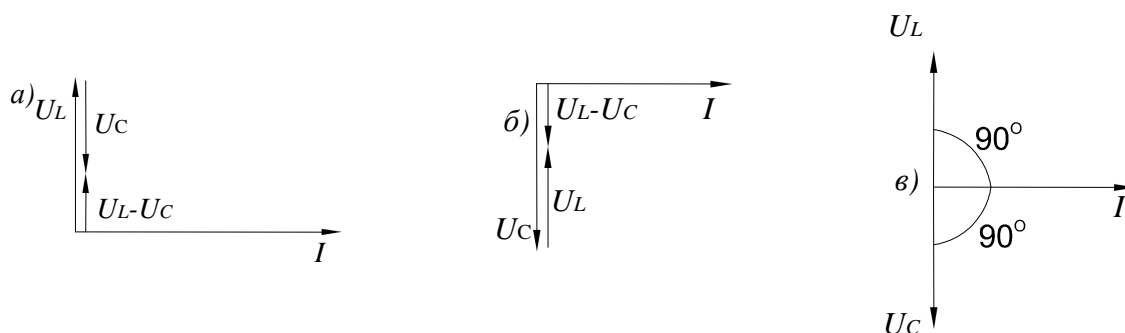


Рисунок 6 – Векторные диаграммы неразветвленной цепи LC

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

$$\omega_0 L - 1/\omega_0 C = 0, \text{ откуда}$$

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

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

Методические указания к выполнению работы

1 Исследование цепи с последовательным соединением резистора и катушки.

1.1. Соберите цепь согласно схеме (рис. 7), подсоедините регулируемый источник синусоидального напряжения и установите его параметры: $U=5$ В, $f=200$ 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).

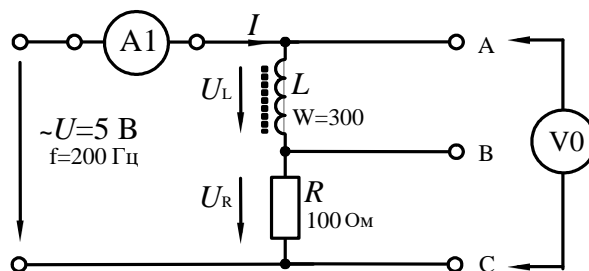


Рисунок 7 – Схема экспериментального исследования неразветвленной цепи RL

1.2. Выполните измерения тока и напряжений, указанных в таблице 1.

Если измерения производятся виртуальными приборами, то измерьте также R , φ , x_L , z .

Таблица 1

U , В	U_L , В	U_R , В	I , мА	φ , град	R , Ом	x_L , Ом	z , Ом	Примечание
								Расчет
								Вирт. изм.

Вычислите $\varphi = \arctg(U_L/R)$, $z = U/I$, $x_L = U_L/I$, занесите результаты вычислений в таблицу 1 и сравните с результатами виртуальных измерений, если они есть.

1.3. Выберите масштабы и постройте векторную диаграмму напряжений (рис. 8) и треугольник сопротивлений (рис. 9).

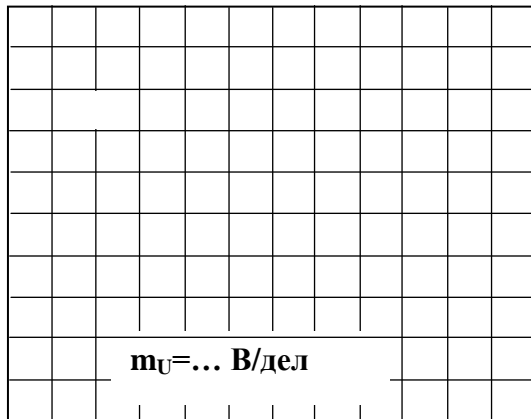


Рисунок 8

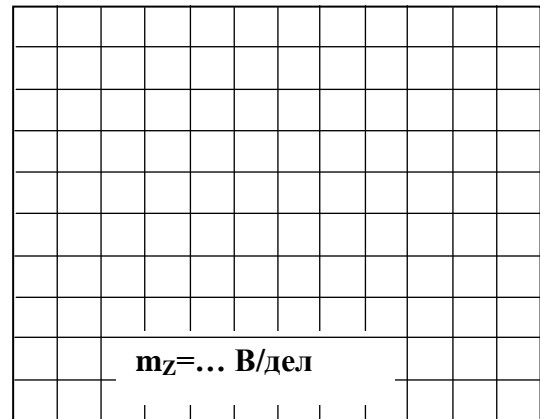


Рисунок 9

2 Исследование цепи с последовательным соединением резистора и конденсатора.

2.1. Соберите цепь согласно схеме (рис. 10), подсоедините регулируемый источник синусоидального напряжения и установите его параметры: $U=5$ В, $f=1$ кГц.

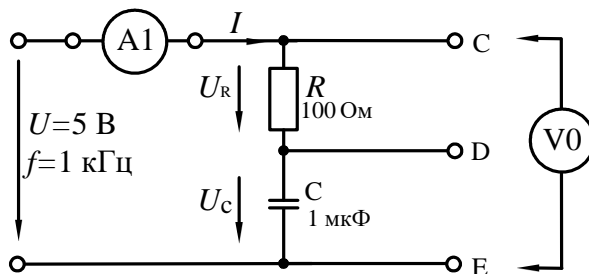


Рисунок 10 –Исследования неразветвленной цепи RC

2.2. Выполните мультиметрами или виртуальными приборами измерения действующих значений тока и напряжений, указанных в таблице 2. При измерениях напряжений подключайте мультиметр или канал V0 коннектора к зажимам С-Е, С-D, D-Е:

Таблица 2

U , В	U_C , В	U_R , В	I , мА	φ , град	R , Ом	x_C , Ом	z , Ом	Примечание
								Расчет
								Вирт. изм.

2.3. Вычислите: фазовый угол $\varphi = \arctg(U_C / U_R)$; полное сопротивление цепи $z = U / I$; активное сопротивление цепи $R = z \cdot \cos \varphi$; емкостное реактивное сопротивление цепи $x_C = z \cdot \sin \varphi$. Если вы работаете с виртуальными приборами, то измерьте с помощью блока «Приборы II» R , φ , x_C , z и запишите

их значения также в таблицу 2 под рассчитанными величинами. Сравните результаты.

2.4. Выберите масштабы и постройте векторную диаграмму напряжений (рис. 11).

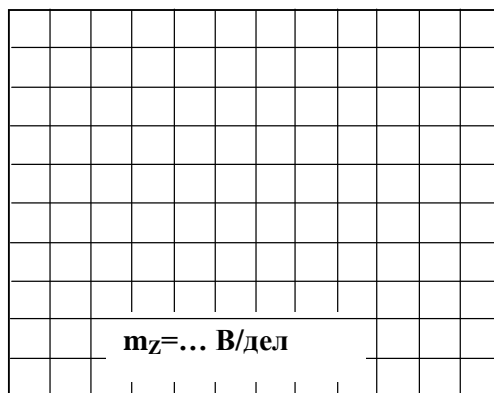


Рисунок 11

3 Исследование цепи с последовательным соединением конденсатора и катушки.

3.1. Соберите цепь согласно схеме (рис. 12), подсоедините регулируемый источник синусоидального напряжения и установите напряжение на его входе 2В и частоту 500Гц. В качестве индуктивности с малым активным сопротивлением используйте катушку трансформатора 300 витков, вставив между подковами разъемного сердечника полоски бумаги в один слой (немагнитный зазор).

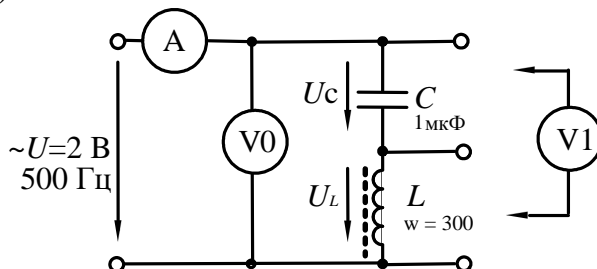


Рисунок 12 –Исследования неразветвленной цепи LC

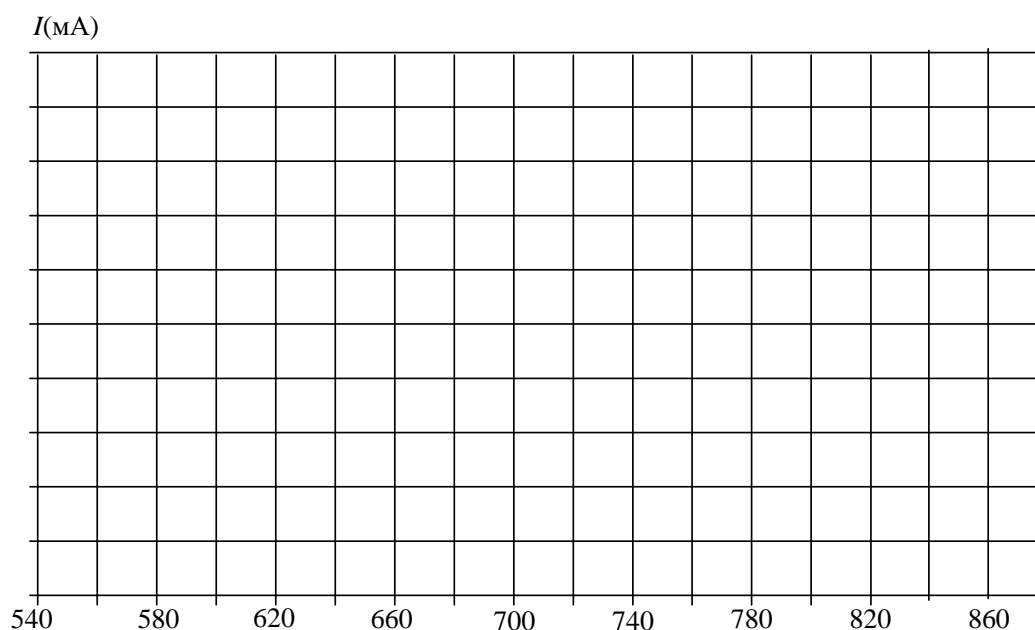
3.2. Изменяя частоту приложенного напряжения в диапазоне 500÷800 Гц, произведите измерения тока в цепи и напряжений на элементах. Результаты измерений занесите в таблицу 3. Для точной настройки по максимуму тока необходимо поддерживать неизменным напряжение на входе цепи. При измерениях виртуальными приборами резонанс настраивается по переходу через ноль угла сдвига фаз между входными напряжением и током. Тогда нет необходимости поддерживать входное напряжение неизменным.

Таблица 3

f , Гц	I , мА	U , В	U_L , В	U_C , В
500				
520				
540				
560				
580				
600				
650				
700				
800				
900				

3.3. По полученным данным на рисунке 13 постройте зависимость тока от частоты питающего напряжения. Выделите режим резонанса по максимальному значению тока.

3.4. На рисунке 14 в одинаковом масштабе постройте векторные диаграммы для режима до резонанса, резонансного режима и режима после резонанса.



4. Как определяется фазовый сдвиг между напряжением и током в цепи с последовательным соединением резистора и конденсатора?

5. Чему равно полное сопротивление такой цепи?

6. Поясните построение векторной диаграммы цепи с последовательным соединением резистора и конденсатора.

7. Чему равно полное сопротивление цепи, состоящей из последовательного соединения резистора, индуктивной катушки и конденсатора?

8. Какой режим работы электрической цепи называют резонансом напряжений?

9. Каковы особенности работы цепи в режиме резонанса напряжений?

Лабораторная работа № 4 «Исследование трехфазной цепи при соединении нагрузки в звезду»

Цель работы: Изучить основные соотношения в трехфазной цепи при соединении нагрузки в звезду.

Программа работы

1. Исследование режима цепи при симметричной нагрузке.
2. Исследование режима цепи при несимметричной нагрузке.
3. Исследование аварийных режимов трёхфазной цепи при соединении нагрузки в звезду.

Элементы теории

Если нагрузки (приемники) соединены в трехфазную цепь по схеме «звезда» (рис. 1), то к сопротивлениям нагрузки приложены фазные напряжения. Линейные токи равны фазным и определяются по закону Ома:

$$I_A = \frac{U_A}{Z_A}; \quad I_B = \frac{U_B}{Z_B}; \quad I_C = \frac{U_C}{Z_C},$$

а ток в нейтрали равен векторной сумме этих токов: $\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$.

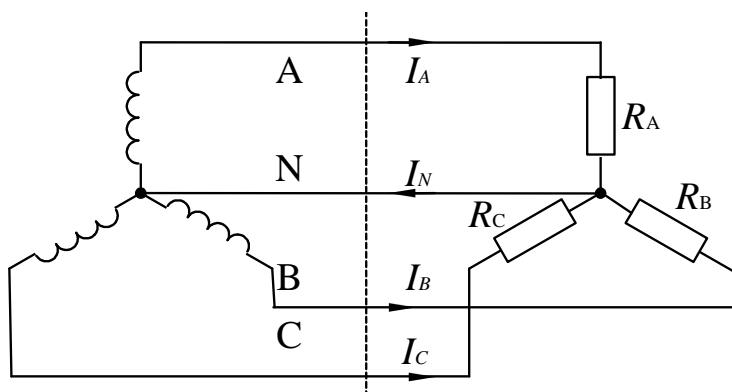


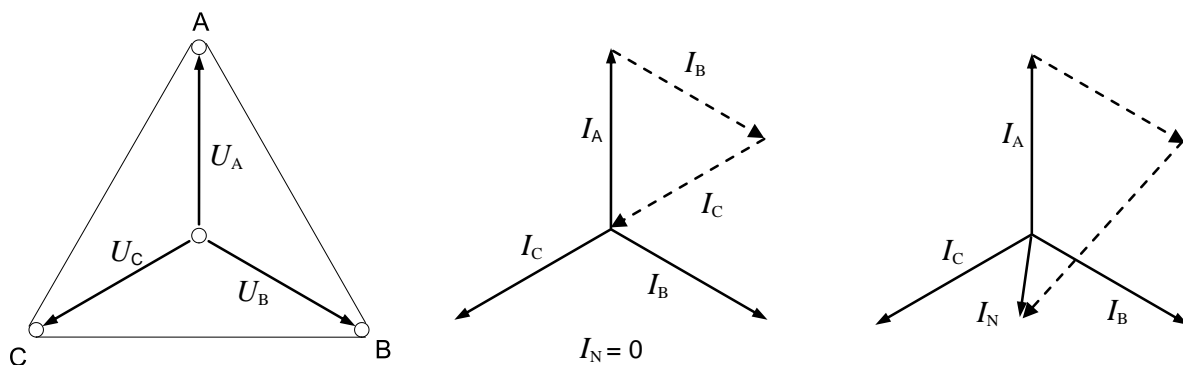
Рисунок 1 – Трехфазная цепь при включении нагрузки в звезду

При симметричных напряжениях U_A, U_B, U_C и одинаковых сопротивлениях $R_A=R_B=R_C=R$ токи I_A, I_B, I_C также симметричны и их векторная сумма (I_N) равна нулю. Тогда

$$I_l = I_\phi = U_\phi / R; \quad I_N = 0.$$

Если же сопротивления фаз нагрузки неодинаковы, то через нулевой провод протекает некоторый ток $I_N \neq 0$. Это поясняется на векторных диаграммах (рис. 2).

Если же сопротивления фаз нагрузки неодинаковы, то через нулевой провод протекает некоторый ток $I_N \neq 0$. Это поясняется на векторных диаграммах (рис. 2).



а) симметричная нагрузка б) несимметричная нагрузка

Рисунок 2 – Векторные диаграммы для разных режимов работы цепи

Мощность трёхфазной нагрузки складывается из мощностей фаз:

$$\Sigma P = P_A + P_B + P_C.$$

Когда нагрузка симметричная и чисто резистивная, имеем

$$\Sigma P = 3P_\phi = 3U_\phi I_\phi.$$

При смешанной (активно-индуктивной или активно-емкостной) нагрузке.

Активная мощность $\Sigma P = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi = \sqrt{3}U_\phi I_\phi \cos \varphi$. Реактивная мощность

$$\Sigma Q = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi = \sqrt{3}U_\phi I_\phi \sin \varphi. \text{ Полная мощность } \Sigma S = 3U_\phi I_\phi = \sqrt{3}U_\phi I_\phi.$$

Аварийными являются режимы, которые возникают при коротких замыканиях в нагрузке или в линиях и обрыве проводов. Остановимся на некоторых типичных аварийных режимах.

Обрыв нейтрального провода при несимметричной нагрузке

В симметричном режиме $I_N = 0$, поэтому обрыв нейтрального провода не приводит к изменению токов и напряжений в цепи и такой режим не является аварийным. Однако, при несимметричной нагрузке $I_N \neq 0$, поэтому обрыв нейтрали приводит к изменению всех фазных токов и напряжений. На векторной диаграмме напряжений точка «0» нагрузки, совпадающая до этого с точкой «N» генератора, смещается таким образом, чтобы сумма фазных токов оказалась равной нулю (рис. 3). Напряжения на отдельных фазах могут существенно превысить номинальное напряжение.

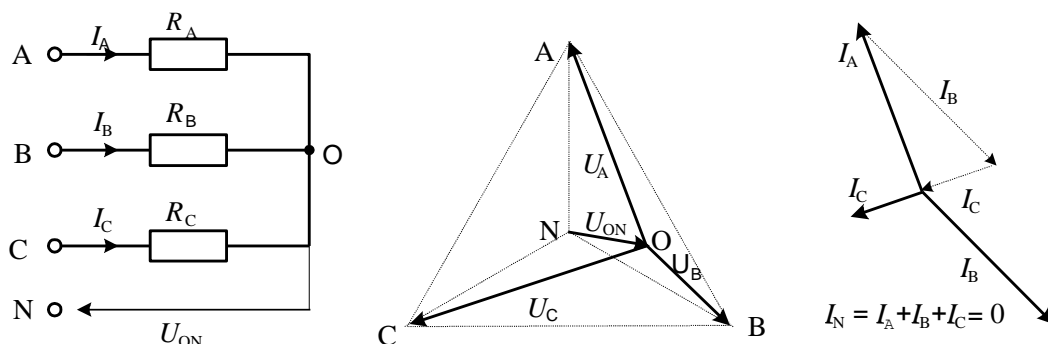


Рисунок 3 – Векторная диаграмма цепи при обрыве нейтрали

Обрыв фазы при симметричной нагрузке в схеме с нулевым проводом

При обрыве провода, например, в фазе А ток этой фазы становится равным нулю, напряжения и токи в фазах В и С не изменяются, а в нулевом проводе появляется ток $\dot{I}_N = \dot{I}_B + \dot{I}_C$.

Он равен току, который до обрыва протекал в фазе А (рис. 4).

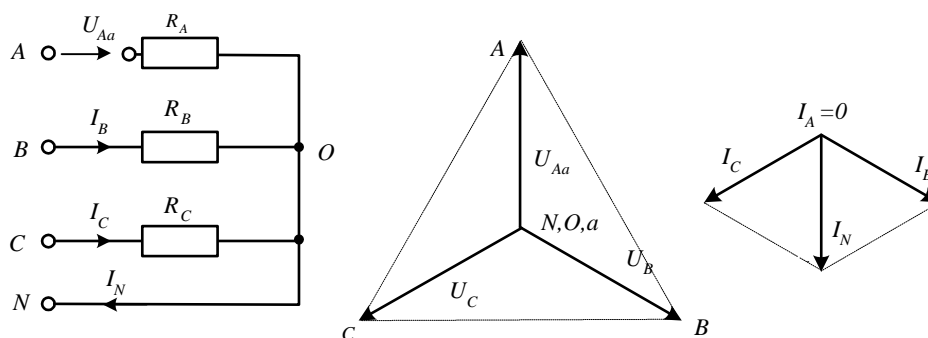


Рисунок 4 – Векторная диаграмма цепи при обрыве фазы в схеме с нулевым проводом

Обрыв фазы при симметричной нагрузке в схеме без нулевого провода

При обрыве, например, фазы А сопротивления R_A и R_B оказываются соединёнными последовательно и к ним приложено линейное напряжение U_{BC} . Напряжение на каждом из сопротивлений составляет $\sqrt{3}/2$ от фазного напряжения в нормальном режиме. Нулевая точка нагрузки на векторной диаграмме напряжений смещается на линию BC и при $R_B=R_C$ находится точно в середине отрезка BC (рис. 5).

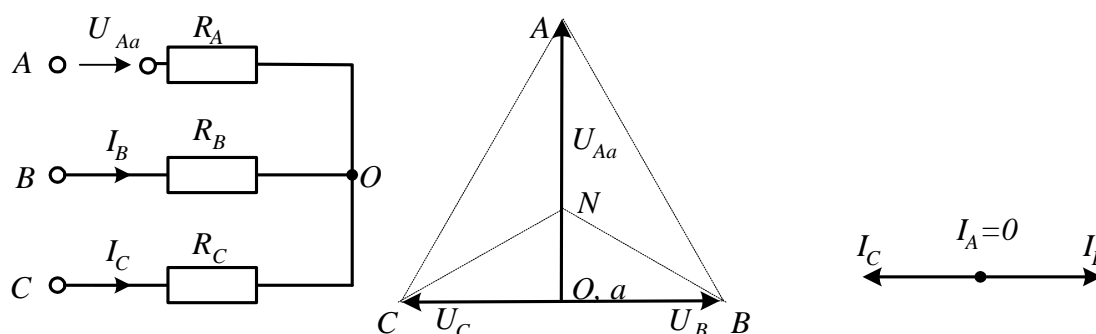


Рисунок 5 – Векторная диаграмма цепи при обрыве фазы в схеме без нулевого провода

Методические указания к выполнению работы

1 Исследование режима цепи при симметричной нагрузке.

1.1. Соберите цепь с симметричной нагрузкой ($R_A = R_B = R_C = 1$ кОм) согласно схеме (рис. 6).

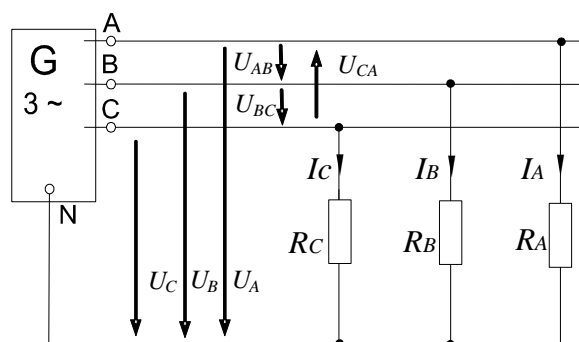


Рисунок 6 – Исследование работы цепи при симметричной нагрузке

1.2. Измерьте действующие значения напряжений и токов согласно таблице 1 и вычислите мощности.

Таблица 1

Схема «звезда»		Нагрузка симметричная	Нагрузка несимметричная
Линейные и фазные токи, ток нейтрали мА	I_A		
	I_B		
	I_C		
	I_N		
Линейн. напряжения, В	U_{AB}		
	U_{BC}		
	U_{CA}		
Фазные напряжения, В	U_A		
	U_B		
	U_C		
Фазные мощности, мВт	P_A		
	P_B		
	P_C		
Общая мощность, мВт	ΣP		

2. Исследование режима цепи при несимметричной нагрузке.

2.1. Повторите измерения и вычисления для несимметричной нагрузки ($R_A=1 \text{ кОм}$, $R_B=680 \text{ Ом}$, $R_C=330 \text{ Ом}$).

2.2. На рисунке 7 в масштабе постройте векторные диаграммы.

3.4. Убедитесь, что в схеме без нулевого провода короткое замыкание в фазе нагрузки не приводит к отключению, а при коротком замыкании между линейными проводами установка отключается.

3.5. Прodelайте измерения токов и напряжений всех величин, указанных в таблице 2 в различных режимах и по экспериментальным данным постройте векторные диаграммы для каждого случая в выбранном масштабе.

Таблица 2

Режим	$U_{AO}, В$	$U_{BO}, В$	$U_{CO}, В$	$U_{ON}, В$	$I_A, МА$	$I_B, МА$	$I_C, МА$	$I_N, МА$
$R_A=1 кОм$ $R_B=680 Ом$ $R_C=330 Ом$ Обрыв нейтрали								
$R_A=R_B=R_C=1 кОм$ Схема с нейтралью Обрыв фазы А								

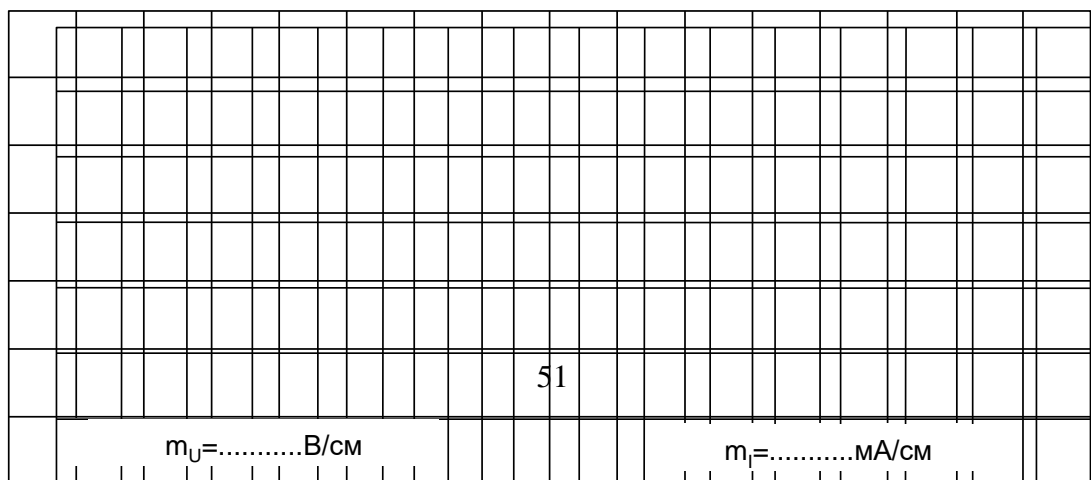
Продолжение таблицы 2

$R_A=R_B=R_C=1 кОм$ Схема без нейтрали Обрыв фазы А								
$R_A=R_B=R_C=1 кОм$ Схема без нейтрали К. 3. фазы А								

Векторные диаграммы

1. $R_A=1 кОм, R_B=680 Ом, R_C=330 Ом.$ Обрыв нейтрали

2. $R_A= R_B= R_C =1 кОм,$ Схема с нейтралью, обрыв фазы А



3. $R_A = R_B = R_C = 1 \text{ кОм}$, *Схема без нейтрали, обрыв фазы A*

$m_U = \dots\dots\dots \text{В/см}$								$m_I = \dots\dots\dots \text{мА/см}$							

4. $R_A = R_B = R_C = 1 \text{ кОм}$, *Схема без нейтрали, короткое замыкание фазы A*

$m_U = \dots\dots\dots \text{В/см}$								$m_I = \dots\dots\dots \text{мА/см}$							

Содержание отчета

1. Фамилия, имя, отчество студента, номер группы, дата выполнения работы.
2. Наименование и цель работы.
3. Программа работы.
4. Принципиальные схемы исследуемых цепей.
5. Таблицы измерений и вычислений, примеры расчетов.
6. Графики и диаграммы.
7. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Каковы соотношения между линейными и фазными токами и напряжениями при соединении нагрузки в звезду?
2. Как вычисляется ток нейтрального провода при соединении нагрузки в звезду?
3. Чему равен этот ток при симметричной и несимметричной нагрузке?
4. Как вычисляется мощность трехфазной цепи?
5. К чему приводит обрыв нейтрального провода при симметричной и несимметричной нагрузке? Поясните с помощью векторной диаграммы.
6. К чему приводит обрыв фазы при симметричной нагрузке в схеме с нулевым проводом? Поясните с помощью векторной диаграммы.
7. К чему приводит обрыв фазы при симметричной нагрузке в схеме без нулевого провода? Поясните с помощью векторной диаграммы.
8. К чему приводит короткое замыкание фазы? Поясните с помощью векторной диаграммы.

Лабораторная работа № 5

«Исследование трехфазной цепи при соединении нагрузки по схеме треугольник»

Цель работы: Исследовать трехфазную цепь при соединении нагрузки в треугольник в различных режимах.

Программа работы

1. Исследование цепи при симметричной активной нагрузке.
2. Исследование цепи при несимметричной активной нагрузке.
3. Исследование работы цепи в аварийных режимах.

Элементы теории

Если нагрузки (приемники) соединены в трехфазную цепь по схеме «треугольник» (рис. 1), нагрузка R_{AB} , R_{BC} и R_{CA} каждой фазы включается на полное *линейное напряжение*, которое равно *фазному* $U_{Л}=U_{Ф}$.

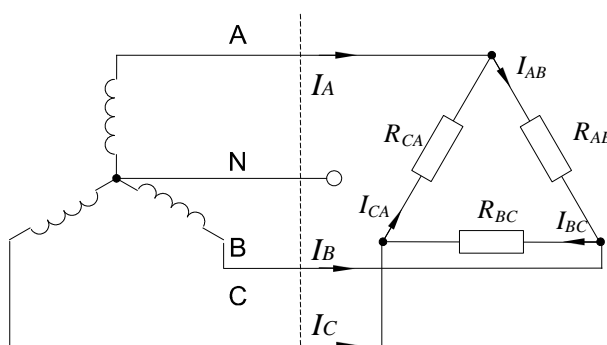


Рисунок 1 – Трехфазная цепь при соединении нагрузки в треугольник

Фазные токи I_{AB} , I_{BC} и I_{CA} определяются по закону Ома:

$$I_{AB} = \frac{U_{AB}}{R_{AB}}; \quad I_{BC} = \frac{U_{BC}}{R_{BC}}; \quad I_{CA} = \frac{U_{CA}}{R_{CA}}.$$

Линейные токи определяются по первому закону Кирхгофа:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}.$$

При симметричных напряжениях U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} и одинаковых нагрузках фаз $R_{AB}=R_{BC}=R_{CA}=R$ токи также симметричны:

$$I_{Ф}=U_{Ф}/R; \quad I_{Л}=I_{Ф}/\sqrt{3}.$$

Это поясняется на векторных диаграммах (рис. 2).

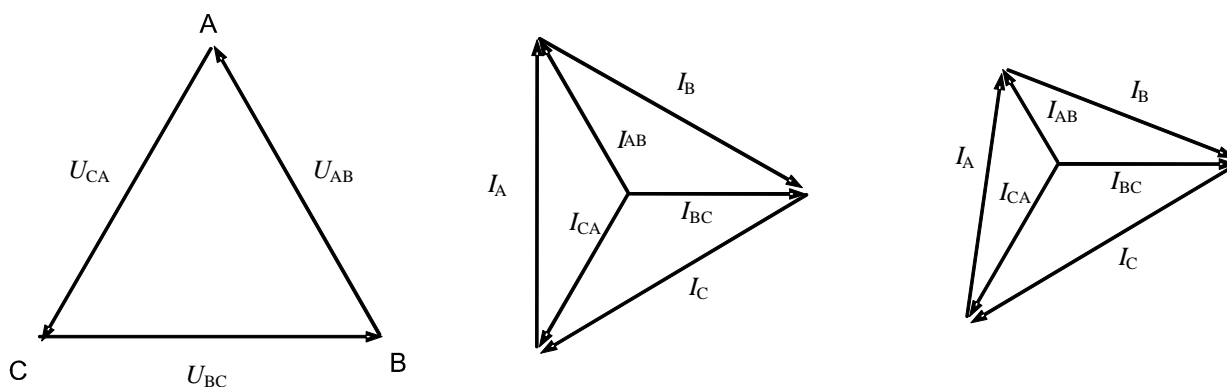
Мощность ΣP , потребляемая трехфазной нагрузкой при ее соединении в «треугольник», складывается из мощностей фаз $\Sigma P = P_{AB} + P_{BC} + P_{CA}$.

При симметричной чисто активной нагрузке

$$\Sigma P = 3P_{\Phi} = 3U_{\Phi}I_{\Phi}.$$

При смешанной (активно-индуктивной или активно-емкостной) нагрузке:
активная мощность

$$P = 3U_{\Phi}I_{\Phi} \cdot \cos\varphi = \sqrt{3}U_{ЛЛ}I_{ЛЛ} \cdot \cos\varphi.$$



а) симметричная нагрузка б) несимметричная нагрузка

Рисунок 2 – Векторные диаграммы цепи при симметричной и несимметричной нагрузке

Реактивная мощность

$$Q = 3U_{\Phi}I_{\Phi} \cdot \sin\varphi = \sqrt{3}U_{ЛЛ}I_{ЛЛ} \cdot \sin\varphi.$$

Полная мощность

$$S = 3U_{\Phi}I_{\Phi} = \sqrt{3}U_{ЛЛ}I_{ЛЛ}.$$

При коротких замыканиях в фазах нагрузки или между линейными проводами токи резко возрастают и происходит аварийное отключение установки защитой.

Обрывы фаз или линейных проводов при соединении нагрузки в треугольник не приводят к перегрузкам по токам или напряжениям, как это иногда случается при соединении нагрузки в звезду.

При обрыве одной фазы нагрузки (рис. 3) ток этой фазы становится равным нулю, а в оставшихся двух фазах ток не меняется. Два линейных тока

уменьшаются в $\sqrt{3}$ раз, т. е. становятся равными фазному току, а третий остаётся неизменным.

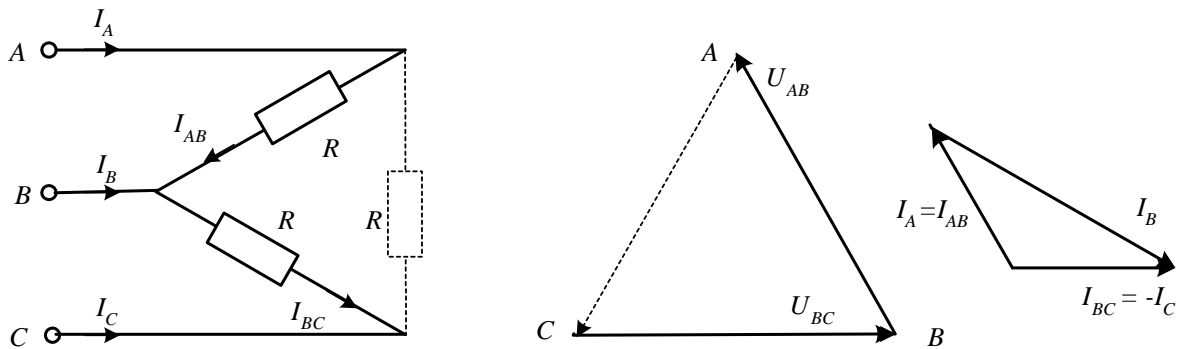


Рисунок 3 – Векторная диаграмма цепи при обрыве фазы нагрузки

При обрыве линейного провода (например, В) фазные сопротивления R_{AB} и R_{BC} оказываются соединёнными последовательно и включёнными параллельно с сопротивлением R_{CA} на напряжение U_{CA} (рис. 4). Цепь фактически становится однофазной.

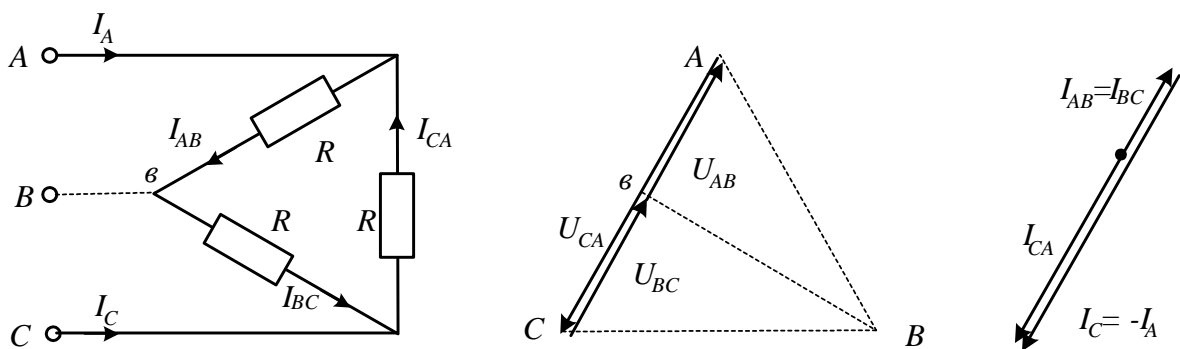


Рисунок 4 – Векторная диаграмма цепи при обрыве линейного провода

При одновременном обрыве линейного провода и одной фазы нагрузки цепь также становится однофазной (рис. 5 и 6).

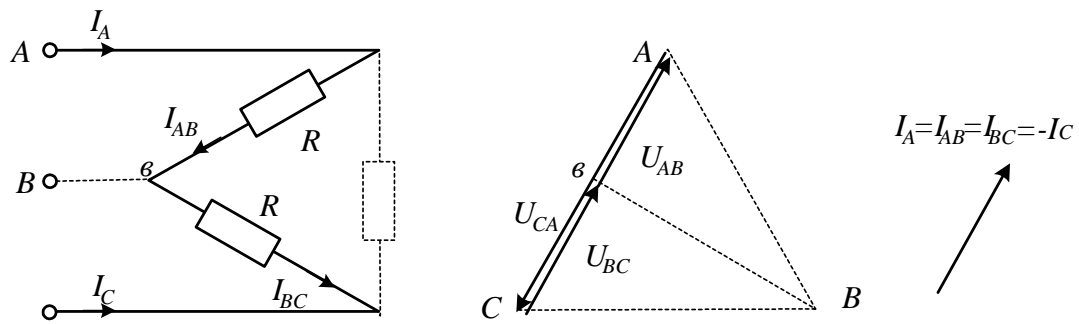


Рисунок 5 Векторная диаграмма цепи при одновременном обрыве одной фазы и линейного провода

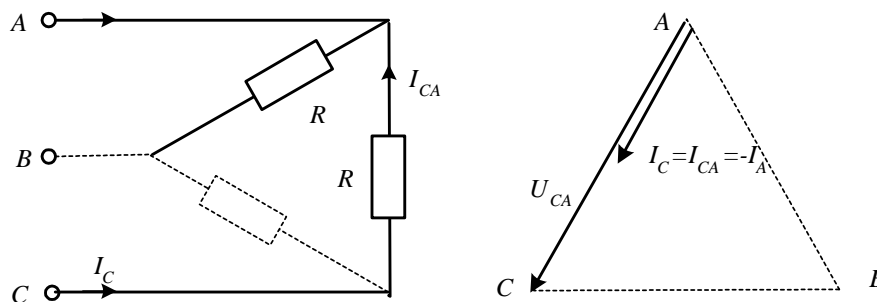


Рисунок 6 – Векторная диаграмма цепи при одновременном обрыве одной фазы и линейного провода

Методические указания к выполнению работы

1 Исследование цепи при симметричной активной нагрузке.

1.1. Соберите цепь с симметричной нагрузкой ($R_{AB}=R_{BC}=R_{CA}=1$ кОм) согласно схеме (рис. 7). Для измерения шести токов (три фазных и три линейных) включите в цепь три виртуальных амперметра и три мультиметра в режиме измерения токов.

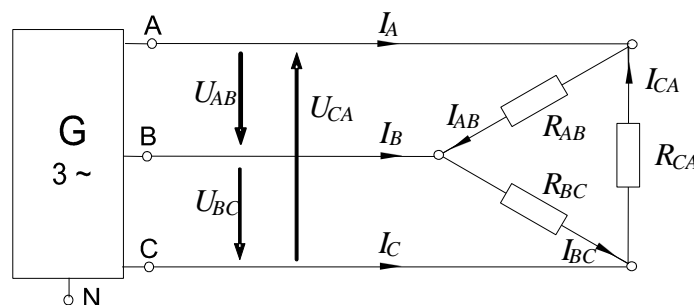


Рисунок 7 – Исследование цепи при симметричной активной нагрузке

3 Исследование цепи в аварийных режимах.

3.1. Соберите цепь согласно схеме (рис. 9) с сопротивлениями фаз $R_{AB}=R_{BC}=R_{CA}=1$ кОм и измерьте линейные и фазные токи в симметричном режиме.

3.2. Проведите измерения фазных и линейных токов (отличных от нуля) во всех режимах, указанных в таблице 2. (Измерения токов можно производить одним- двумя амперметрами, переключая их из одной фазы в другую, либо виртуальными приборами).

3.3. По экспериментальным данным постройте векторные диаграммы для каждого аварийного случая в выбранном масштабе.

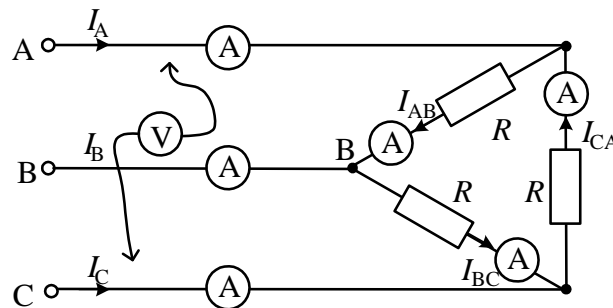


Рисунок 9 – Схема исследования цепи в аварийных режимах

Таблица 2

Режим	$I_{AB}, \text{мА}$	$I_{BC}, \text{мА}$	$I_{CA}, \text{мА}$	$I_A, \text{мА}$	$I_B, \text{мА}$	$I_C, \text{мА}$
Симметричный режим, $R_{\phi}=1$ кОм						
Обрыв фазы АВ нагрузки						
Обрыв линейного провода А						
Обрыв фазы АВ и линии С						
Обрыв фазы АВ и линии А						

Содержание отчета

1. Фамилия, имя, отчество студента, номер группы, дата выполнения работы.
2. Наименование и цель работы.
3. Программа работы.
4. Принципиальные схемы исследуемых цепей.
5. Таблицы измерений и вычислений, примеры расчетов.
6. Графики и диаграммы.
7. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Каковы соотношения между линейными и фазными напряжениями при включении нагрузки в треугольник?
2. Как рассчитываются фазные токи при включении нагрузки в треугольник?
3. Каковы соотношения между линейными и фазными токами при включении нагрузки в треугольник в симметричном и несимметричном режимах?
4. Как вычисляется мощность трехфазной цепи (активная, реактивная, полная)?
5. Поясните с помощью векторных диаграмм работу цепи при коротких замыканиях в фазах нагрузки.
6. Поясните при помощи векторных диаграмм работу цепи при обрыве одной из фаз нагрузки.
7. Поясните при помощи векторных диаграмм работу цепи при обрыве линейного провода.

Лабораторная работа № 6 «Изучение свойств и характеристик полупроводниковых диодов»

Цель работы: изучить свойства, характеристики и области применения полупроводниковых диодов.

Программа работы

1. Снять вольтамперную характеристику полупроводникового диода в прямом и обратном направлениях.
2. Исследовать полупроводниковый диод для стабилизации постоянного напряжения (стабилитрон).
3. Исследовать характеристики светодиода.
4. Исследовать полупроводниковый диод с переменной емкостью (варикап).

Элементы теории

Полупроводниковым диодом называют электропреобразовательный прибор с одним электронно-дырочным (*p-n*) переходом.

Все полупроводниковые диоды делятся на две группы: точечные и плоскостные.

В точечном диоде используется пластинка германия или кремния с электропроводностью *n*-типа, толщиной 0,1-0,6 мм и площадью 0,5-1,5 мм²; с пластинкой соприкасается стальная игла, образующая *p-n* – переход в месте контакта.

Из-за малой площади контакта прямой ток и междуэлектродная емкость таких диодов сравнительно невелики, что позволяет применять их в области очень высоких частот. Точечные диоды применяются в основном для выпрямления переменного тока.

В плоскостных диодах *p-n* – переход образуется двумя полупроводниками с различными типами электропроводности, причем площадь перехода у таких диодов лежит в пределах от сотых долей квадратного миллиметра до нескольких десятков квадратных сантиметров.

Электрические характеристики плоскостного диода определяются характеристиками $p-n$ – перехода.

Выпрямительный диод – полупроводниковый прибор, в котором используются вентильные свойства $p-n$ – перехода.

Благодаря большой площади перехода плоскостные диоды рассчитаны на большой прямой ток. Обычно прямое напряжение диода не превышает 1-2 В, при этом плотность тока в полупроводнике достигает 1-10 А/мм².

При подаче на полупроводниковый диод обратного напряжения в нем возникает незначительный обратный ток, обусловленный движением неосновных носителей заряда через $p-n$ – переход.

При повышении температуры $p-n$ – перехода число неосновных носителей заряда увеличивается, что приводит к возрастанию обратного тока диода.

В случае приложения к диоду обратного напряжения в несколько сотен вольт внешнее электрическое поле становится настолько сильным, что способно вырвать электроны из валентной зоны в зону проводимости. Обратный ток при этом резко увеличивается, что вызывает нагрев диода, дальнейший рост тока и, наконец, тепловой пробой (разрушение) $p-n$ – перехода. Основными параметрами точечных и плоскостных выпрямительных диодов являются: прямой ток диода $I_{пр}$, который нормируется при определенном прямом напряжении; максимально допустимый прямой ток диода $I_{пр\ max}$; максимально допустимое обратное напряжение диода $U_{обр.\max}$; обратный ток диода $I_{обр}$, который нормируется при максимальном обратном напряжении.

Полупроводниковый стабилитрон – полупроводниковый диод, напряжение на котором в области электрического пробоя слабо зависит от тока и который используется для стабилизации напряжения. Полупроводниковый стабилитрон работает на участке электрического пробоя $p-n$ – перехода. Вольтамперная характеристика стабилитрона приведена на рисунке 1.

Как видно из рисунка в области пробоя напряжение на стабилитроне $U_{ст}$ лишь незначительно изменяется при больших изменениях тока стабилизации $I_{ст}$. Такую характеристику стабилитрона применяют для получения стабильного напряжения, например, в параметрических стабилизаторах напряжения.

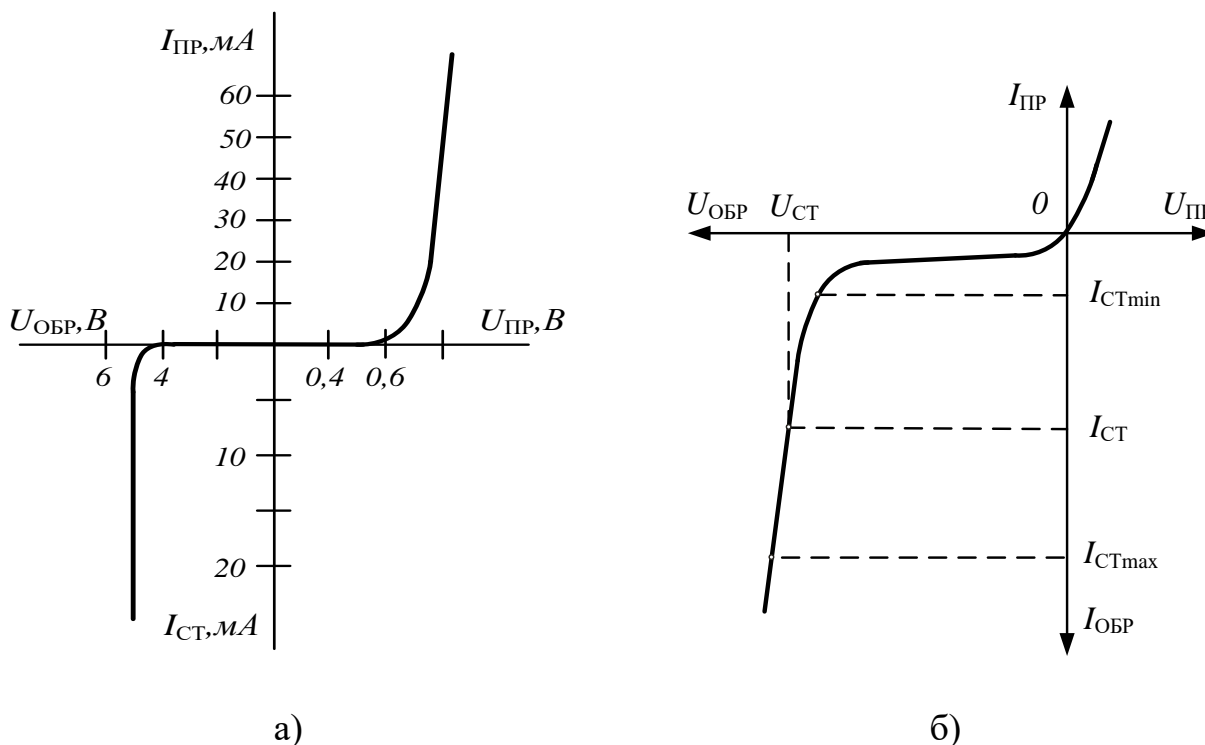


Рисунок 1 – Вольтамперная характеристика кремниевого стабилитрона (а) и рабочая область вольтамперной характеристики стабилитрона (б)

Стабилизирующее напряжение современных стабилитронов лежит в пределах 1-1000В.

Варикап – полупроводниковый диод, в котором используется зависимость емкости $p-n$ – перехода от обратного напряжения и который предназначен для применения в качестве элемента с электрически управляемой величиной емкости.

Материалом для изготовления варикапов служит кремний. Зависимость емкости варикапа от обратного напряжения показана на рисунке 2.

Основными параметрами варикапа являются: общая емкость варикапа C_v , которая фиксируется обычно при небольшом обратном напряжении $U_{обp}=2\div 5$ В;

коэффициент перекрытия по емкости $K_c = C_{\max}/C_{\min}$. Для большинства варикапов $C_B = 10 - 500$ пФ, а коэффициент перекрытия по емкости $K_c = 5 \div 20$.

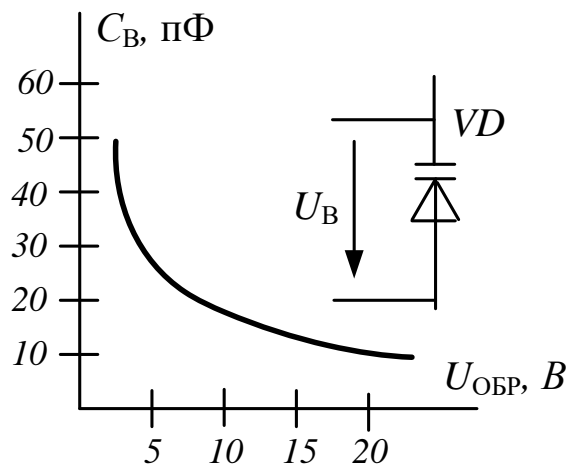


Рисунок 2 – Зависимость емкости варикапа от обратного напряжения

Фотодиод – полупроводниковый фотоэлектрический прибор, имеющий один электронно-дырочный переход.

Фотодиоды могут работать в одном из двух режимов: а) без внешнего источника электрической энергии (режим фотогенератора); б) с внешним источником электрической энергии (режим фотопреобразователя).

Фотодиоды, работающие в режиме фотогенератора, часто применяют в качестве источников питания, преобразующих энергию солнечного излучения в электрическую. Они называются солнечными элементами и входят в состав солнечных батарей.

Режим фотопреобразователя соответствует подаче напряжения на фотодиод в запирающем направлении.

Светодиод – полупроводниковый диод, в котором предусмотрена возможность вывода светового излучения из области $p-n$ – перехода сквозь прозрачное окно в корпусе.

Принцип действия светодиода основан на том, что при переходе возбужденного электрона на более низкий энергетический уровень и рекомбинации носителей заряда происходит выделение энергии в виде квантов

света. Длина волны этого излучения зависит от ширины запрещенной зоны, т.е. от материала, из которого выполнен полупроводниковый диод.

Основными параметрами светодиодов являются яркость свечения при определенном значении прямого тока, цвет свечения и предельный прямой ток. Светодиоды находят широкое применение в цифровых, буквенных и знаковых индикаторах многих измерительных и вычислительных устройств, а также в качестве источников светового излучения.

Методические указания к выполнению работы

1 Снятие вольтамперной характеристики полупроводникового диода в прямом и обратном направлениях.

Примечание: *Для снятия вольтамперной характеристики использовать диод, на корпусе которого имеется белая метка.*

1.1. К диоду (рис. 3, а) при прямой полярности приложите напряжение постоянного тока $U_{пр.}$, величины которого указаны в таблице 1, измерьте с помощью мультиметра соответствующие токи $I_{пр.}$ и их значения занесите в эту таблицу. Используйте при этом схему измерения с погрешностью по току (рис. 3, а).

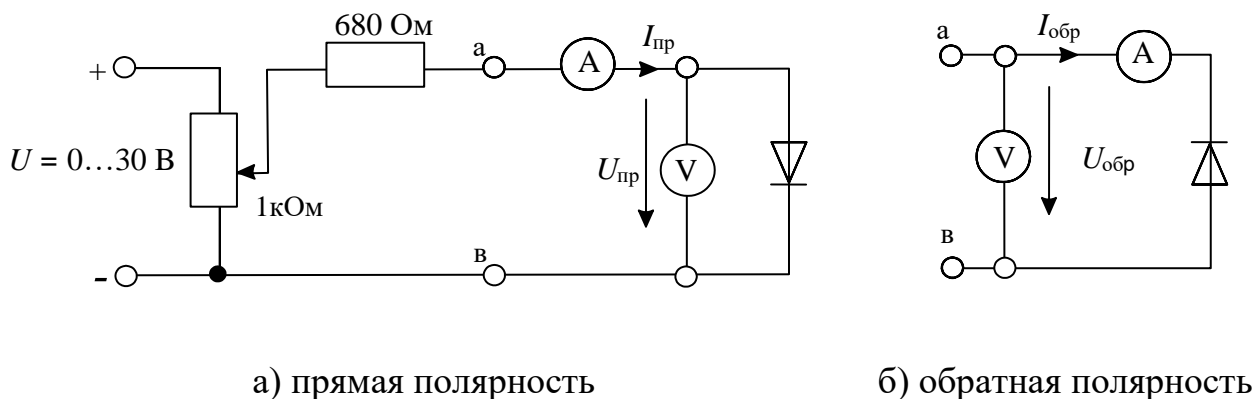


Рисунок 3 Схема для получения вольтамперной характеристики диода

Таблица 1

$U_{пр}, \text{В}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
$I_{пр}, \text{мА}$						

1.2. Измените полярность диода, переключите вольтметр для измерений с погрешностью по напряжению как показано на рис. 3, б и повторите эксперимент при величинах обратных напряжений, указанных в табл. 2. Для получения напряжений больше 15 В соедините два источника последовательно.

Таблица 2

$U_{\text{ОБР}}, \text{В}$	0	2,5	5	10	15	20	25	30
$I_{\text{ОБР}}, \text{мкА}$								

1.3. Перенесите измеренные данные из таблиц на график (рис.4) и постройте вольтамперную характеристику диода.

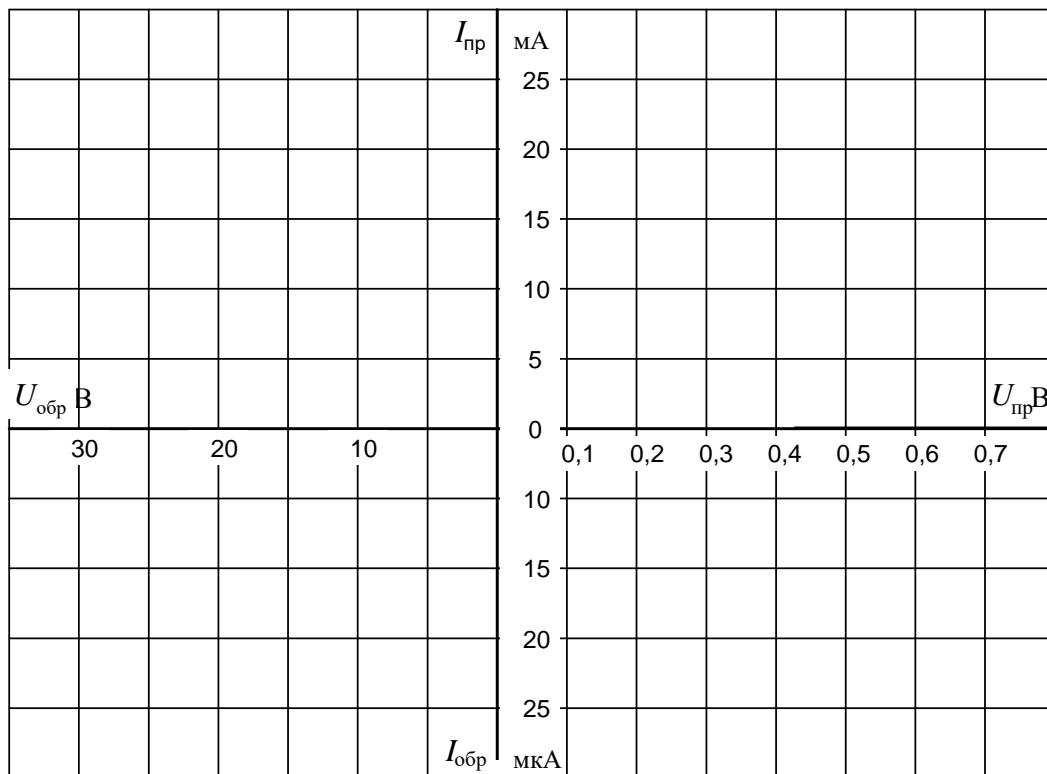


Рисунок 4

2 Исследование стабилитрона

Снять с помощью осциллографа вольтамперную характеристику и определить напряжение $U_{\text{ст}}$ стабилитрона.

2.1. Соберите цепь согласно схеме (рис. 5) и подайте на вход синусоидальное напряжение 24 В частотой 50 Гц. На схеме А и V — входы коннектора.

2.2. Включите и настройте виртуальный осциллограф в режиме X-Y – (А – горизонтальный вход, V – вертикальный вход).

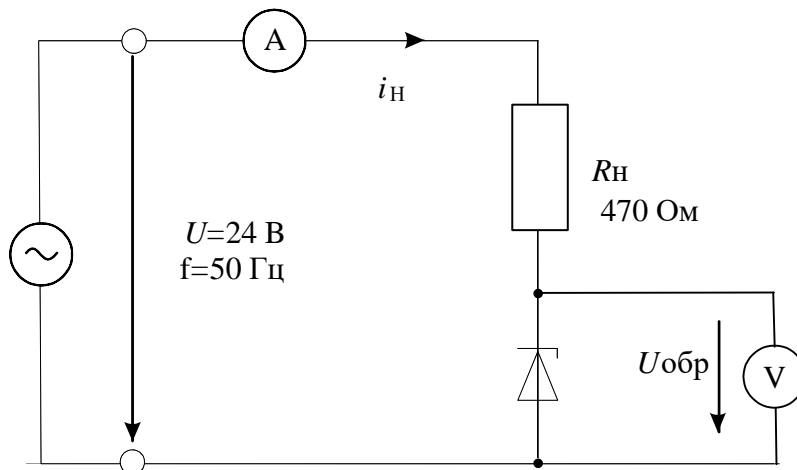


Рисунок 5 – Схема для получения вольтамперной характеристики стабилитрона

2.3. Перенесите изображение с экрана осциллографа на график (рис. 6).

					$U_{обр}, В$				
					12				
					9				
					6				
					3				
					0				$I_{обр}, мА$
-40	-30	-20	-10			20	40	60	80
					-3				

Рисунок 6

2.4. Исследование параметрического стабилизатора напряжения

Исследовать зависимость выходного напряжения и тока стабилитрона от входного напряжения в цепи параметрического стабилизатора напряжения.

Соберите цепь согласно схеме (рис. 7). Устанавливая последовательно величины входного напряжения постоянного тока по таблице 3, измерьте

соответствующие выходные напряжения и токи стабилитрона посредством мультиметров. Результаты занесите в таблицу 3.

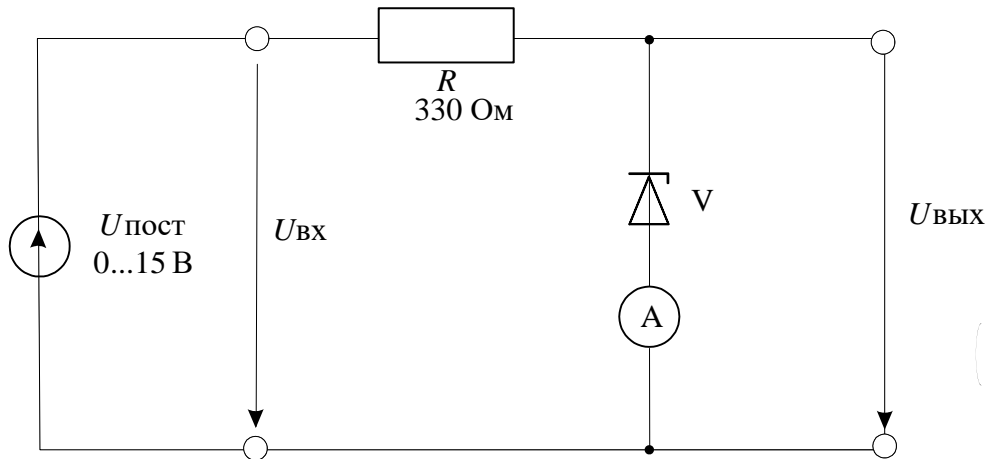


Рисунок 7 – Схема параметрического стабилизатора напряжения

Таблица 3

$U_{ВХ}, В$	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$U_{ВЫХ}, В$									
$I_{СТ}, мА$									

Постройте на графике (рис. 8) кривую зависимости выходного напряжения $U_{ВЫХ}$ от входного $U_{ВХ}$.

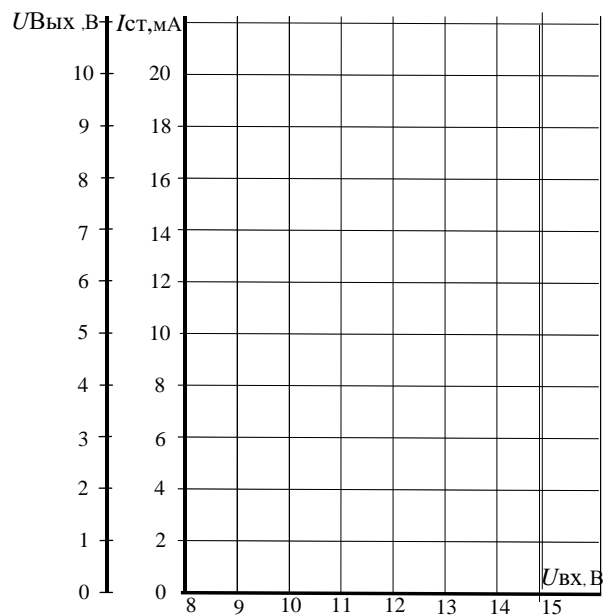


Рисунок 8

3 Исследование светодиода

3.1. Снять вольтамперную характеристику светодиода посредством осциллографа.

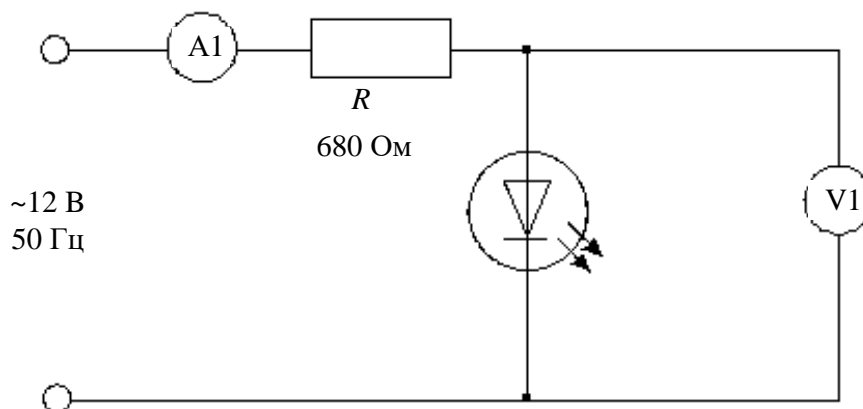


Рисунок 9 – Схема для снятия вольтамперной характеристики светодиода

Подведите одно из линейных напряжений 12 В, 50 Гц трехфазного источника к цепи (рис. 9) и заосциллографируйте зависимость напряжения от тока. На схеме А1 и V1 – входы коннектора. Для получения на виртуальном осциллографе зависимости напряжения от тока включите режим X-Y переключателем «XY-развертка».

Перенесите осциллограмму на график (рис. 10).

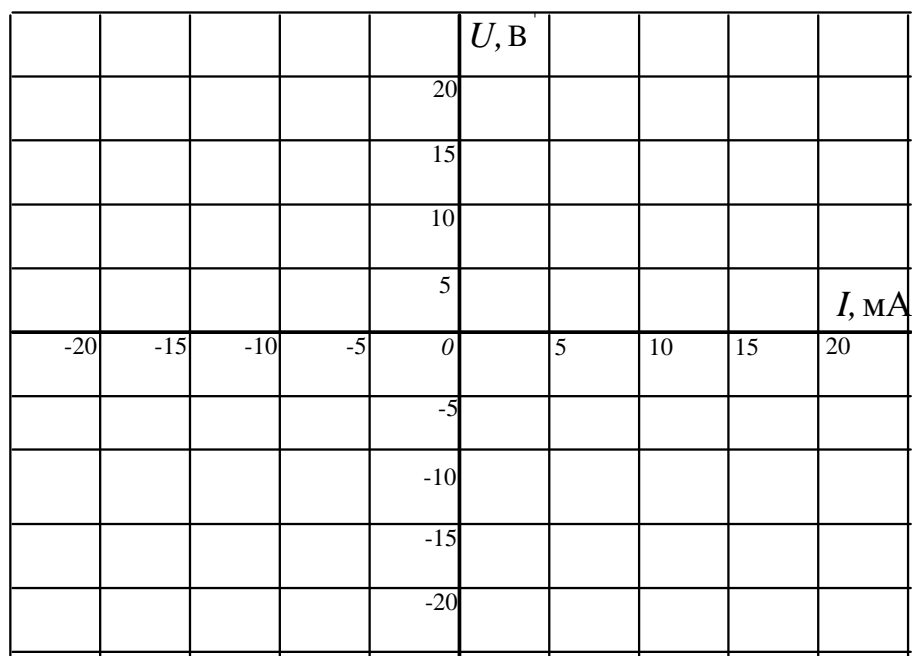


Рисунок 10

3.2. Изучение влияния напряжения $U_{\text{СД}}$, тока $I_{\text{СД}}$ светодиода и его полярности на световую эмиссию.

Соберите цепь согласно схеме (рис. 11) и изменяйте входное напряжение последовательными шагами, как указано в таблице 5. Измерьте прямое напряжение $U_{\text{СД}}$ и ток $I_{\text{СД}}$ светодиода с помощью мультиметра и установите светоизлучение (отсутствует, слабое, среднее, сильное). Занесите данные в таблицу.

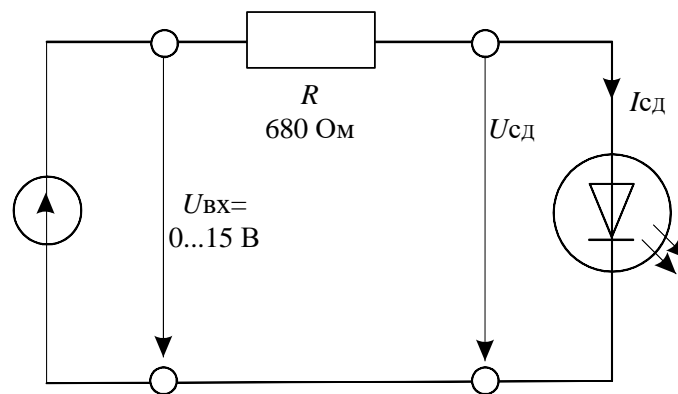


Рисунок 11 – Схема для исследования влияния напряжения и тока светодиода на световую эмиссию

Таблица 5

$U_{\text{ВХ}}, \text{В}$	$U_{\text{СД}}, \text{В}$	$I_{\text{СД}}, \text{мА}$	светоизлучение
2			
4			
6			
8			
10			
12			
14			
15			

Измените полярность диода и убедитесь, что светоизлучения не наблюдается.

4 Исследование варикапа

4.1. Снять с помощью осциллографа вольтамперную характеристику варикапа.

Приложите синусоидальное напряжение 12 В, 50 Гц (одно из линейных напряжений трехфазного источника) к цепи (рис. 12) и заосциллографируйте зависимость напряжения от тока. На схеме А1 и V1 – входы коннектора. Для получения на виртуальном осциллографе зависимости напряжения от тока включите режим X-Y переключателем «XY-развертка».

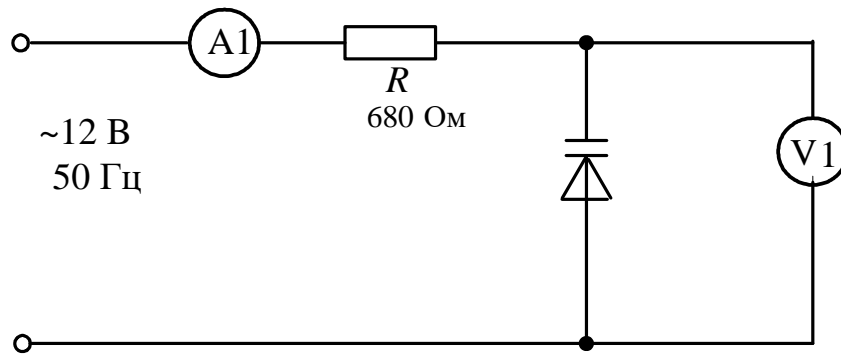


Рисунок 12 – Схема для снятия вольтамперной характеристики варикапа

Перенесите осциллограмму на график (рис. 13).

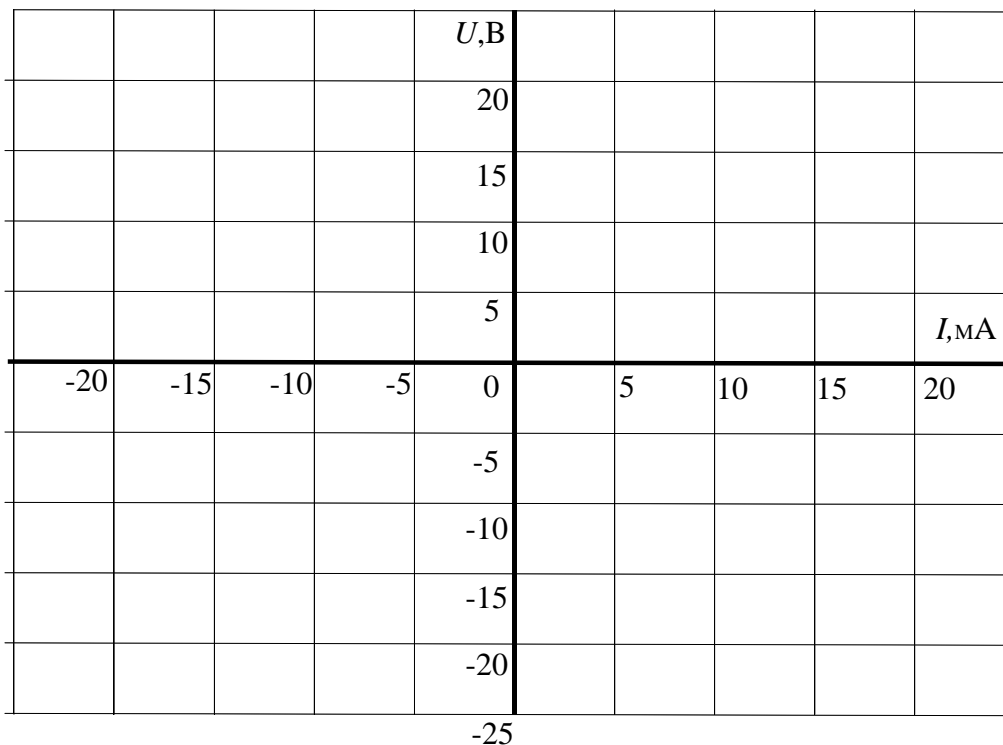


Рисунок 13

Содержание отчета

1. Фамилия, имя, отчество студента, номер группы, дата выполнения работы.
2. Наименование и цель работы.
3. Программа работы.
4. Принципиальные схемы исследуемых цепей.
5. Таблицы измерений и вычислений, примеры расчетов.
6. Графики и диаграммы.
7. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой полупроводниковый диод?
2. Чем конструктивно отличаются точечные диоды от плоскостных?
3. Нарисуйте и объясните вольтамперную характеристику полупроводникового диода.
4. Чем отличаются характеристики точечных и плоскостных диодов?
5. Как называется напряжение, при котором диод становится проводящим?
6. На каком участке вольтамперной характеристики и в каком режиме работает стабилитрон?
7. Какой минимальный ток необходим светодиоду для слабого светоизлучения?
8. Как ведет себя светоизлучение при изменении полярности прикладываемого напряжения?
9. Как ведет себя емкость запорного слоя варикапа при увеличении обратного напряжения?

Лабораторная работа № 7 «Исследование биполярного транзистора»

Цель работы: Изучить основные характеристики биполярных транзисторов.

Программа работы.

1. Исследовать влияние тока базы на вольтамперную характеристику $I_K(U_{ЭК})$ для $n-p-n$ транзистора с помощью осциллографа.

2. Экспериментально исследовать влияние сопротивления в цепи коллектора на коэффициент усиления по напряжению.

Элементы теории

Транзистор (рис. 1) представляет собой полупроводниковый триод, у которого тонкий p -проводящий слой помещен между двумя n -проводящими слоями ($n-p-n$ транзистор) или n -проводящий слой помещен между двумя p -проводящими слоями ($p-n-p$ транзистор).

$p-n$ переходы между средним слоем (база) и двумя крайними слоями (эмиттер и коллектор) обладают выпрямительным свойством, которое можно исследовать как в случае любого выпрямительного диода.

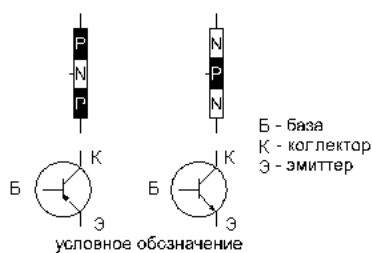


Рисунок 1 – Биполярный транзистор

В транзисторе $p-n-p$ типа (рис. 2,а) ток эмиттера к коллектору через базу обусловлен неосновными для базы носителями заряда – дырками. При положительном направлении напряжения $U_{ЭБ}$ эмиттерный $p-n$ переход открывается, и дырки из эмиттера проникают в область базы. Часть из них уходит к источнику напряжения $U_{ЭБ}$, а другая часть достигает коллектора.

Возникает так называемый транзитный ток от эмиттера к коллектору. Он резко возрастает с увеличением $U_{ЭБ}$ и тока базы.

В транзисторе $n-p-n$ типа (рис. 2, б) транзитный ток через базу обусловлен также неосновными для нее носителями заряда – электронами. Там они появляются из эмиттера, если к эмиттерному $p-n$ переходу прикладывается напряжение $U_{БЭ}$, полярность которого показана на рис. 2, б.

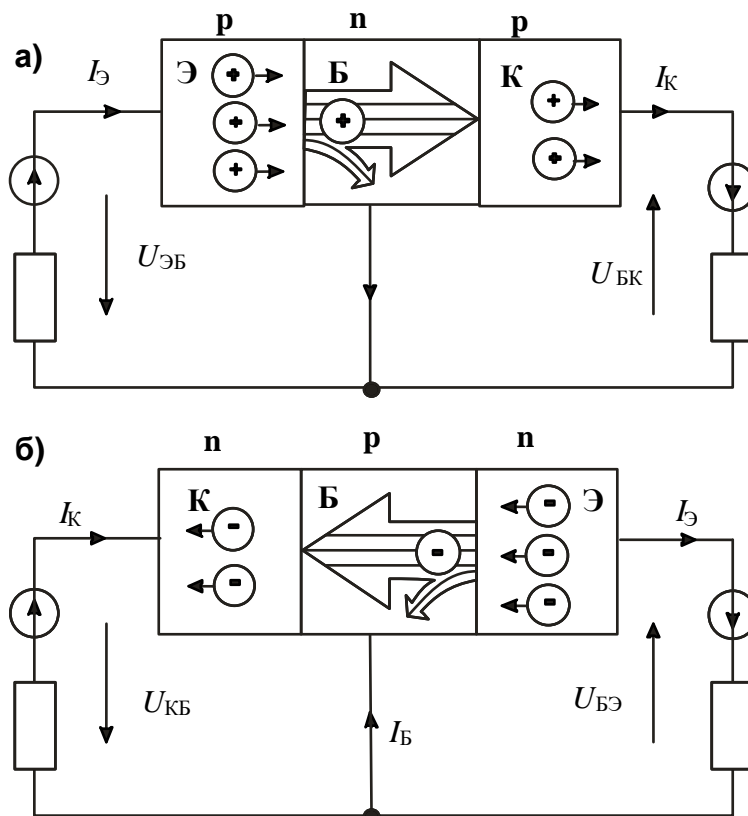


Рисунок 2 – Принцип действия биполярного транзистора $n-p-n$ типа

Токи эмиттера, коллектора и базы связаны между собой уравнением первого закона Кирхгофа:

$$I_{К} = I_{Э} - I_{Б}.$$

Обычно ток базы существенно меньше $I_{К}$ и $I_{Э}$, но от него сильно зависит как $I_{К}$, так и $I_{Э}$. Отношение приращения тока коллектора к приращению тока базы называется коэффициентом усиления по току:

$$\beta = \Delta I_{К} / \Delta I_{Б}.$$

Он может иметь значения от нескольких десятков до нескольких сотен. Поэтому с помощью сравнительно малого тока базы можно регулировать относительно большие токи коллектора (и эмиттера).

Свойства транзисторов описываются следующими четырьмя семействами характеристик:

Входная характеристика показывает зависимость тока базы I_B от напряжения в цепи база/эмиттер $U_{БЭ}$ (при $U_{КЭ} = \text{const}$).

Выходная характеристика показывает зависимость тока коллектора I_K от напряжения цепи коллектор/эмиттер $U_{КЭ}$ при различных фиксированных значениях тока базы.

Характеристика управления представляет собой зависимость тока коллектора I_K от тока базы I_B (при $U_{КЭ} = \text{const}$).

Характеристика обратной связи есть зависимость напряжения цепи база / эмиттер $U_{БЭ}$, соответствующего различным неизменным значениям тока базы, от напряжения цепи коллектор/эмиттер $U_{КЭ}$ при различных фиксированных значениях тока базы.

Методические указания к выполнению работы

1 Исследование влияния тока базы на вольтамперную характеристику $I_K(U_{ЭК})$ для $n-p-n$ транзистора.

1.1. Соберите цепь согласно схеме (рис. 3). В этой цепи в качестве источника синусоидального напряжения используется линейное напряжение трехфазного генератора, а диод включен для исключения обратного напряжения на транзисторе. Приборы А1 и V0 – входы коннектора, служащие для вывода тока I_K и напряжения $U_{КЭ}$ на виртуальный осциллограф. Миллиамперметр А служит для измерения тока базы и может быть как мультиметром, так и виртуальным прибором.

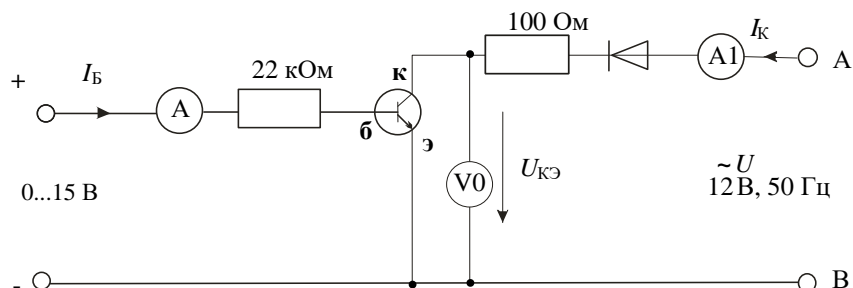


Рисунок 3 – Схема для исследования влияния тока базы на вольтамперную характеристику $n-p-n$ транзистора

1.2. Включите виртуальные приборы A1, V0 и виртуальный осциллограф. На осциллографе установите режим XY. В качестве входа Y выберите ток коллектора, т.е. A1 (по умолчанию это канал 3). В качестве входа X выберите $U_{кэ}$, т.е. V0 (по умолчанию – канал 1).

1.3. Установите регулятор постоянного напряжения на ноль и зафиксируйте кнопкой 1 осциллографа масштаб по напряжению. Затем установите регулятор постоянного напряжения на максимум и зафиксируйте кнопкой 3 осциллографа масштаб тока. Теперь при регулировании тока базы масштабы по осям осциллографа автоматически изменяться не будут.

1.4. Регулируя ток базы от 0 до максимального значения и наоборот, наблюдайте за изменением кривой $I_K(U_{кэ})$ на осциллографе. При нескольких значениях тока базы (включая нулевое и максимальное) перерисуйте кривую $I_K(U_{кэ})$ с осциллографа на рисунок 4. Не забудьте указать масштабы по осям и токи базы для каждой кривой.

1.5. На семействе кривых $I_K(U_{кэ})$ выберите какое-либо постоянное напряжение $U_{кэ}$ (например, 5 В) и на рисунке 5 постройте зависимость $I_K(I_B)$ для этого значения напряжения $U_{кэ}$. Нанесите шкалы по осям.

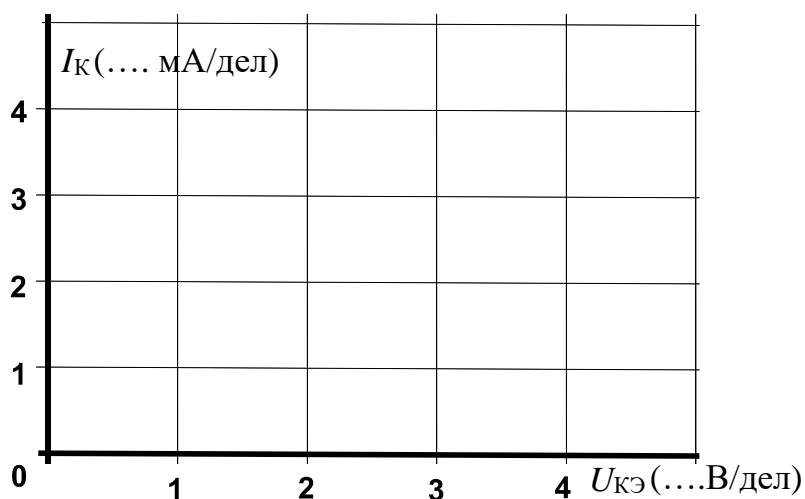


Рисунок 4

$I_K (\dots \text{мА/дел})$				
			$I_B (\dots \text{мА/дел})$	

Рисунок 5

2 Экспериментальное исследование влияния сопротивления в цепи коллектора на коэффициент усиления по напряжению.

2.1. Соберите цепь согласно схеме (рис. 6). Для начала установите $R_K = 220 \text{ Ом}$. Подайте на вход делителя $1 \text{ кОм} / 100 \text{ Ом}$ синусоидальное напряжение ($2 \dots 3 \text{ В}$) частотой $1 \dots 2 \text{ кГц}$.

Примечание: К выходу источника переменного тока подключен делитель напряжения ($1 \text{ кОм}/100 \text{ Ом}$), чтобы обеспечить более точную регулировку и измерение входного напряжения. Это означает, что при напряжении источника $U=2\text{В}$ на входе усилителя будет напряжение $U_{\text{ВЫХ}} = 0,2 \text{ В}$.

2.2. Включите виртуальные приборы V0 и V1, установите на них род измеряемой величины – «действующее значение переменной составляющей» и период измерения $0,02 \text{ с}$.

2.3. Включите виртуальный осциллограф, активизируйте каналы V0 и V1 и установите длительность развертки 200 мкс . Установите потенциометром ток покоя коллектора таким образом, чтобы среднее значение выходного напряжения составляло примерно $7,5 \text{ В}$ (по осциллографу), а регулятором синусоидального напряжения установите максимально возможную амплитуду выходного напряжения, при которой еще нет сильных искажений синусоиды.

2.4. Запишите в таблицу 3 значения $U_{\text{ВХ}}$ и $U_{\text{ВЫХ}}$, учитывая что напряжение, измеряемое вольтметром V1 в 10 раз больше, чем $U_{\text{ВХ}}$. Вычислите коэффициент усиления. Проведите этот опыт при всех значениях

сопротивления R_K , указанных в таблице 3 и на рисунке 7 постройте график зависимости ν_U от R_K .

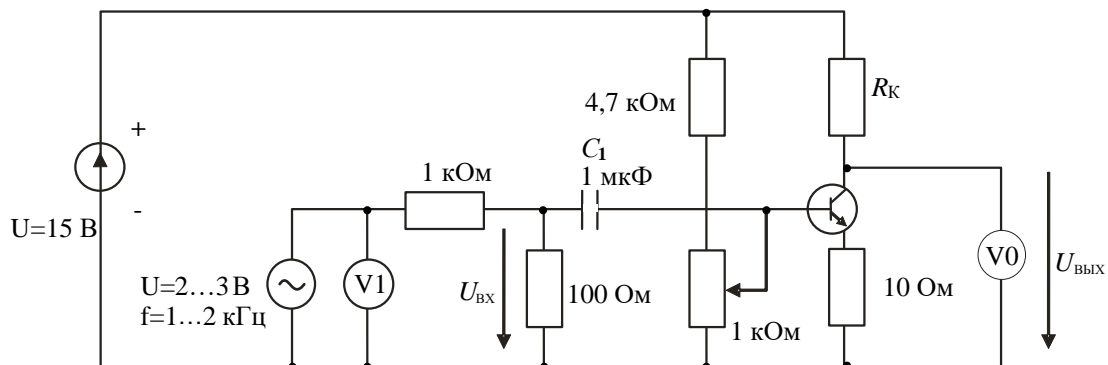


Рисунок 6 Схема для исследования влияния сопротивления в цепи коллектора на коэффициент усиления по напряжению

Таблица 3

R_K , кОм	0,22	0,33	0,47	1	1,47	2,2
U_{BX} , мВ						
$U_{BЫX}$, В						
ν_U						

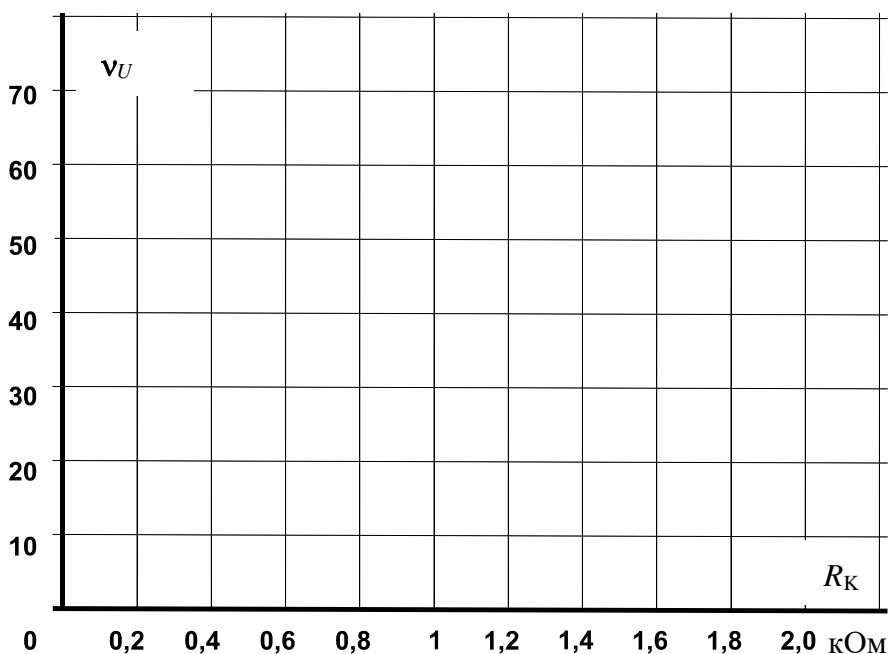


Рисунок 7

Содержание отчета

1. Фамилия, имя, отчество студента, номер группы, дата выполнения работы.
2. Наименование и цель работы.
3. Программа работы.
4. Принципиальные схемы исследуемых цепей.
5. Таблицы измерений и вычислений, примеры расчетов.
6. Графики и диаграммы.
7. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Какие характеристики описывают работу биполярного транзистора?
2. Как влияет ток базы на вольтамперную характеристику $n-p-n$ транзистора?
3. Каковы общие свойства обоих $p-n$ переходов транзисторов двух типов?
4. Каковы отличия $p-n$ переходов в двух типах транзисторов?
5. Какое влияние оказывает сопротивление в цепи коллектора на коэффициент усиления?
6. Какое влияние оказывает сопротивление в цепи коллектора на форму выходного напряжения?

Лабораторная работа № 8 «Исследование тиристоров»

Цель работы: Изучить характеристики и область применения тиристоров.

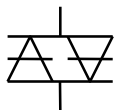
Программа работы

1. Снять статическую характеристику симистора.
2. Снять динамическую характеристику симистора.
3. Исследовать влияние напряжения цепи управляющий электрод / катод тиристора на ток управления и анодный ток.

Элементы теории

Диодные тиристоры, именуемые также **динисторами**, изменяют свое состояние соответственно приложенному напряжению. При некотором

симистор



условное обозначение

Рисунок 1 – Условное обозначение симистора

граничном напряжении (**напряжении отпирания**)

динистор переходит от состояния с высоким сопротивлением к состоянию с низким

сопротивлением. Он сохраняет состояние низкой

резистивности до тех пор, пока ток в нем не упадет ниже величины **тока удержания**. Так называемый

симистор (рис. 1) призван выполнять функции

двух динисторов, включенных **встречно-параллельно**. Изменение состояния симистора происходит при обеих полярностях приложенного напряжения, обеспечивая проведение тока в обоих направлениях.

Симисторы используются главным образом для включения триодных тиристоров, выпускаемых на большие токи и напряжения.

Триодные тиристоры, обычно называемые просто **тиристорами**

(рис. 2), имеют четыре слоя **p-n-p-n** один из которых соединен с внешним управляющим электродом (УЭ). Это позволяет приводить цепь катод (К) / анод (А) тиристора в открытое состояние.

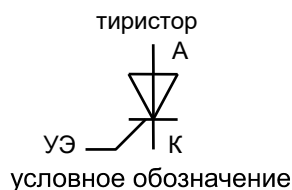


Рисунок 2 – Условное обозначение триодного тиристора

Тиристор может быть также переведен в открытое состояние катодно-анодным напряжением. Однако этого способа, если возможно, следует избегать, чтобы не разрушить тиристор.

Будучи открытым, тиристор сохраняет проводящее состояние, даже когда напряжение на управляющем электроде выключается. Цепь катод / анод возвращается к запертому состоянию, когда анодный ток уменьшается ниже минимальной величины (ток удержания $I_{уд}$).

При фазовом способе управления на управляющий электрод тиристора подаются короткие импульсы напряжения, отпирающие тиристор в определенной точке полуволны приложенного напряжения. Запирается тиристор автоматически в момент перехода тока через ноль. Изменение точки (фазового угла) отпирания приводит к изменению среднего за полупериод значения тока нагрузки (рис. 3).

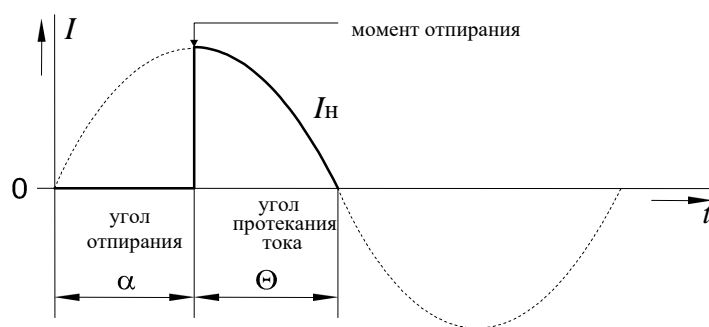


Рисунок 3 – Фазовое управление работой тиристора

Методические указания к выполнению работы

1. Снять статическую характеристику симистора.

1.1. Соберите цепь согласно схеме (рис. 4). Если вы используете виртуальные приборы, то установите период измерения 0,02 с.

1.2. Плавно увеличивая напряжение регулируемого источника напряжения, определите напряжение отпирания симистора (это наибольшее напряжение, при котором ток еще равен нулю, при дальнейшем увеличении напряжения источника ток возрастает скачком, а напряжение на симисторе скачком уменьшается). Запишите значение $U_{отп.}$ в таблицу 1.

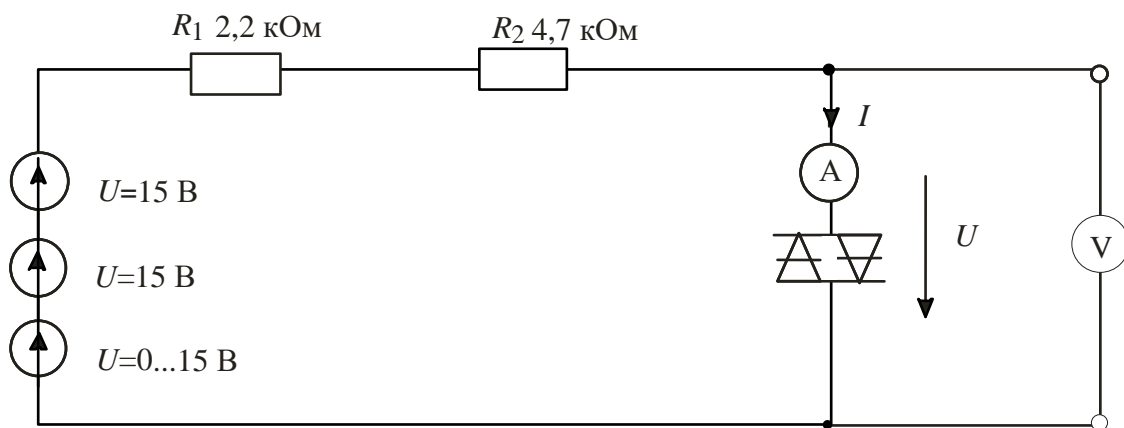


Рисунок 4 – Схема для снятия статической характеристики симистора

1.3. Плавно уменьшая напряжение регулируемого источника напряжения, определите ток удержания симистора (это наименьшее значение тока, при котором симистор еще остается включенным, при дальнейшем снижении напряжения источника ток скачком падает до нуля, а напряжение на симисторе скачком возрастает). Запишите значение $I_{уд.}$ в таблицу 1.

1.4. Изменяя напряжение регулируемого источника, поочередно установите значения тока, указанные в таблице 1 и запишите в нее соответствующие напряжения на симисторе.

1.5. Повторите измерения для обратной полярности симистора и результаты занесите в таблицу 2.

Таблица 1

+I, мА	$I_{уд} =$ мА	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	
+U, В	$U_{отп} =$ В							

Таблица 2

-I, мА	$I_{уд} =$ мА	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	
-U, В	$U_{отп} =$ В							

1.6. На графике (рис. 5) постройте кривую зависимости тока от напряжения.

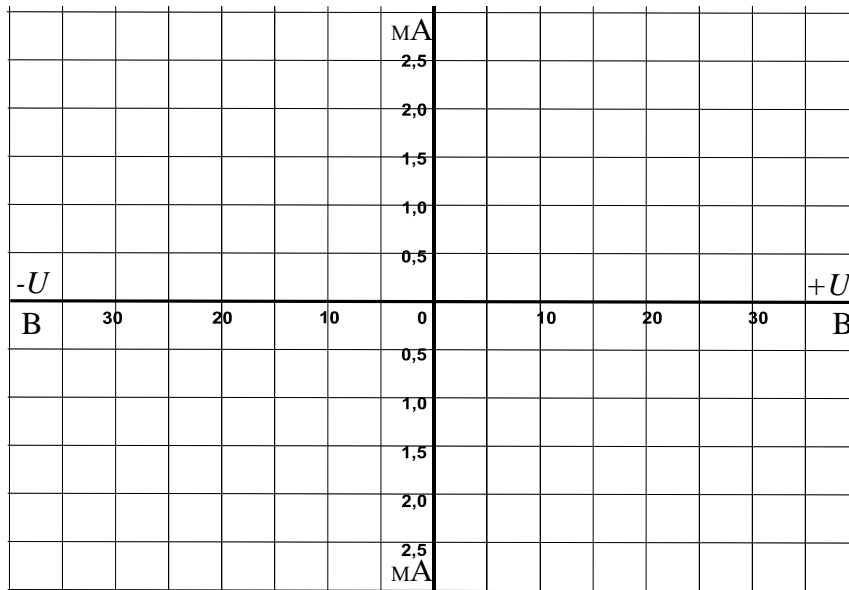


Рисунок 5

2 Снять динамическую характеристику симистора с использованием осциллографа.

2.1. Соберите цепь, схема которой показана на рис. 6.

2.2. Включите виртуальные приборы V0, A1 и «Осциллограф». На осциллографе включите режим XY (вход X – канал 3, вход Y – канал 1).

2.3. На графике (рис. 7) отобразите характеристику, полученную на мониторе осциллографа, и сравните ее со статической характеристикой.

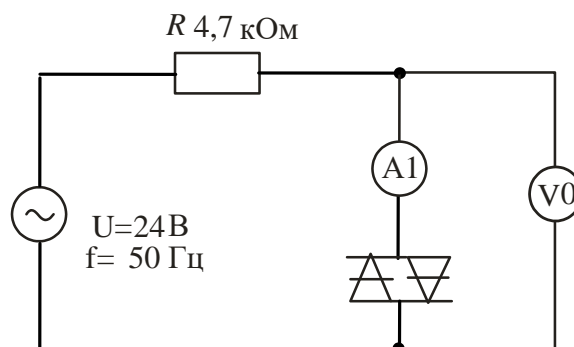


Рисунок 6 – Схема для снятия динамической характеристики симистора

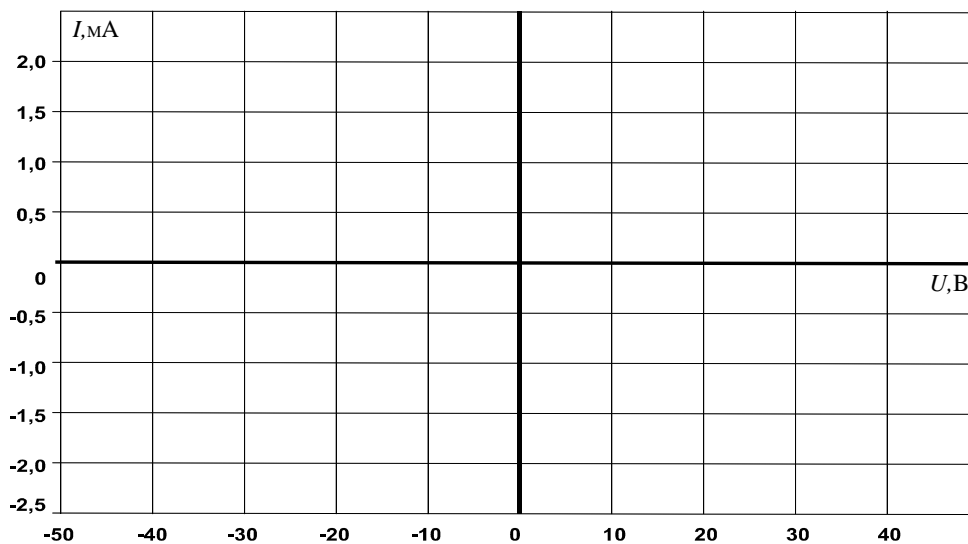


Рисунок 7

3 Исследовать влияние напряжения цепи управляющий электрод / катод тиристора на ток управления и анодный ток тиристора. Дополнительно изучить процесс запираания тиристора.

3.1. Соберите цепь, как показано на рисунке 8 и подайте на нее максимальное напряжение 15 В, при напряжении управляющий электрод/катод $U_{УК}=0$. Увеличивайте напряжение $U_{УК}$, и измеряйте соответствующие значения тока управления $I_{У}$ мультиметром. Занесите данные измерений в таблицу 3. Заметьте и запишите при каком напряжении $U_{УК}$ отпирается тиристор (загорается лампочка).

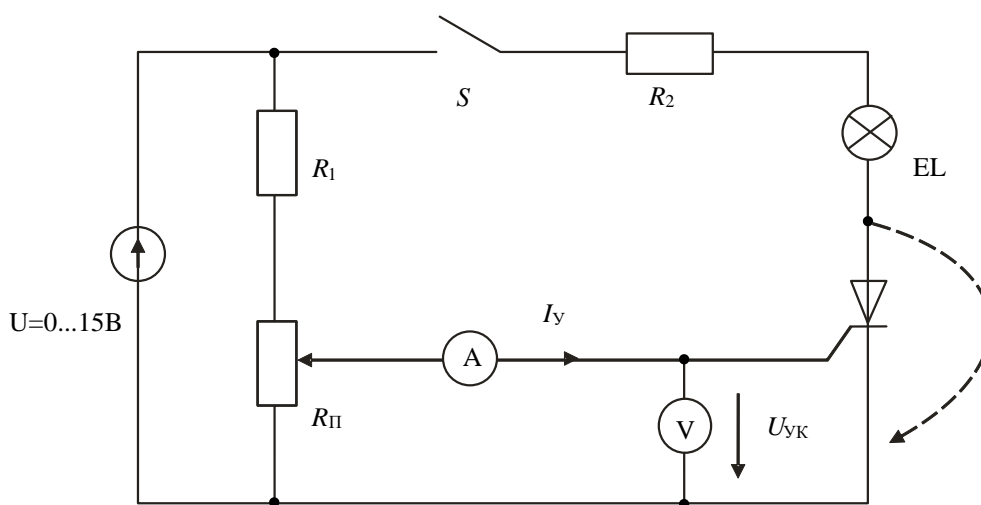


Рисунок 8 – Схема для исследования влияния управляющего напряжения на ток управления и анодный ток

3.2. Снижайте напряжение $U_{УК}$ до нуля и снова записывайте значения $I_{У}$ в таблицу 3.

3.3. На рис. 9 постройте графики $I_{У}(U_{УК})$ при увеличении и уменьшении напряжения. На графике отметьте напряжения $U_{ОТП}$ и ток $I_{ОТП}$.

Таблица 3

$U_{УК}, В$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8
$I_{У1}^*, мА$										
$I_{У2}^*, мА$										

$I_{У1}^*$ – при увеличении $U_{УК}$, $I_{У2}^*$ – при уменьшении.

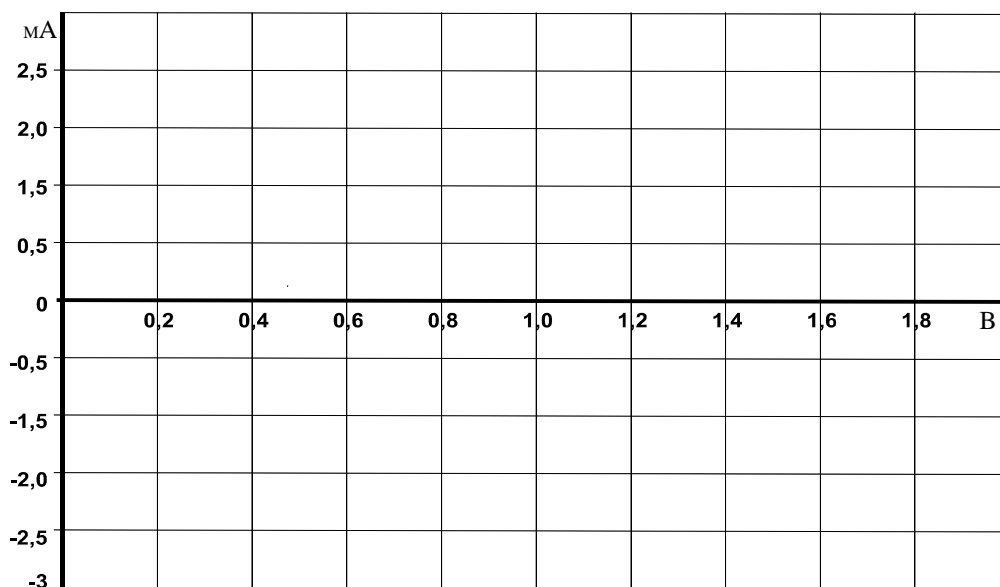


Рисунок 9

Убедитесь, что снижение напряжения управления до нуля не приводит к выключению тиристора и что для его запираания необходимо либо кратковременно прервать цепь (выключить выключатель S), либо зашунтировать тиристор (показано на схеме пунктиром), либо снизить ток до значения меньше тока удержания.

3.4. Определите ток удержания $I_{Уд}$. Для этого переключите миллиамперметр в цепь нагрузки и при нулевом токе управления плавно

снижайте напряжение питания до тех пор, пока ток нагрузки скачком не упадет до нуля. Последнее значение тока перед этим скачком и есть ток удержания:

$$I_{yд} = \dots\dots \text{ мА.}$$

3.5. Соберите цепь (рис. 10) для снятия вольтамперной характеристики $I_A(U_{AK})$ тиристора с помощью осциллографа (виртуального или электронного). Установите максимальную амплитуду синусоидального напряжения и максимальное значение постоянного напряжения 15 В.

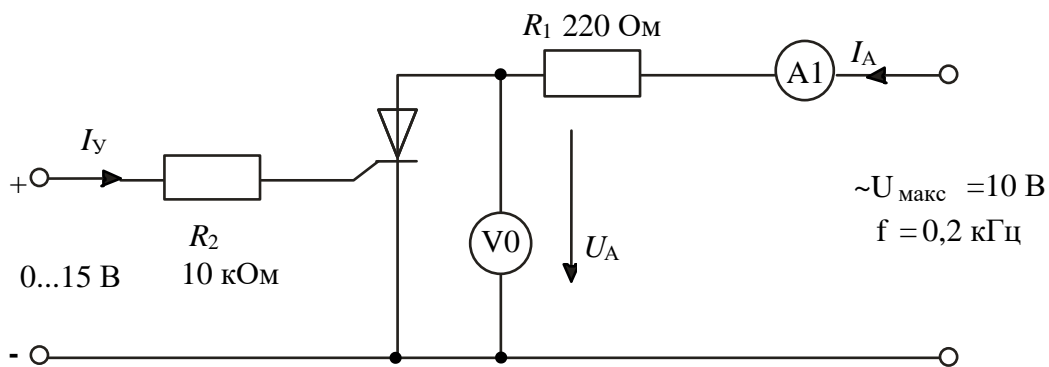
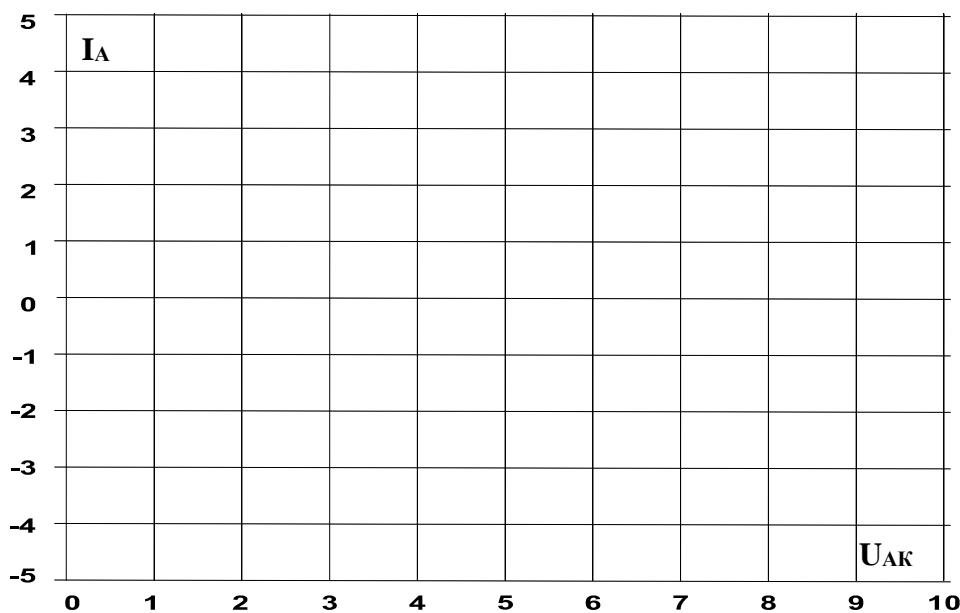


Рисунок 10 – Схема для снятия вольтамперной характеристики тиристора

3.6. Включите виртуальный осциллограф и получите на экране изображение одного-двух периодов тока и напряжения на тиристоре. Снижая и увеличивая напряжение управления, убедитесь, что тиристор выключается (ток становится равным нулю, а напряжение на тиристоре синусоидальное) и включается (появляется положительная полуволна тока, а напряжение имеет только отрицательную полуволну). При необходимости замените резистор 10 кОм на 4,7 кОм. При токе управления близком к минимальному току отпирания, можно заметить включение тиристора при нарастании анодного напряжения.

3.7. Включите режим XY осциллографа (канал V0 по входу X и канал A1 по входу Y), получите на экране изображение вольтамперной характеристики $I_A(U_{AK})$. Проследите за ее изменением при увеличении и уменьшении тока управления и перерисуйте на график (рис. 11) при $I_y > I_{отп}$ и $I_y < I_{отп}$. Не забудьте указать масштабы.



Масштабы:
 $m_U = \dots$ В/дел
 $m_I = \dots$ В/дел

Рисунок 11

Содержание отчета

1. Фамилия, имя, отчество студента, номер группы, дата выполнения работы.
2. Наименование и цель работы.
3. Программа работы.
4. Принципиальные схемы исследуемых цепей.
5. Таблицы измерений и вычислений, примеры расчетов.
6. Графики и диаграммы.
7. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой динистор?
2. В чем заключается отличие симистора от динистора?
3. Дайте определение напряжению отпирания и току удержания симистора.
4. Сколько p - n переходов содержит тиристор?
5. Как влияет управляющее напряжение на ток управления и анодный ток тиристора?
6. Для каких целей используют тиристоры в электронных схемах?

Лабораторная работа № 9 «Исследование логических элементов»

Цель работы: Изучить работу логических элементов.

Программа работы

1. Исследование работы логического элемента AND (И).
2. Исследование работы логического элемента OR (ИЛИ).
3. Исследование работы логического элемента NOT (НЕ).
4. Исследование работы логического элемента NOT – AND (И – НЕ).
5. Исследование работы логического элемента NOT – OR (ИЛИ – НЕ).

Элементы теории

Элемент **И** имеет несколько входов и один выход. Выход приобретает значение 1 только тогда, когда все входы данного логического элемента имеют значение 1. Его условное обозначение показано на рисунке 1, а.

Элемент **ИЛИ** имеет несколько входов и один выход. Выход приобретает значение 1, когда хотя бы один вход данного логического элемента имеет значение 1. Его условное обозначение показано на рисунке 2, а.

Логические элементы **НЕ** отрицают входной сигнал, т.е. они преобразуют сигналы 1 в сигналы 0 и наоборот. Они всегда имеют по одному входу и одному выходу. Используются наряду с другими элементами в цифровых инверторах и логических устройствах. Условное обозначение элемента **НЕ** показано на рисунке 3, а.

Элемент **И – НЕ** состоит из элемента **И**, сопровождаемого элементом **НЕ**. Элементы **И – НЕ** предпочтительны для использования в цифровых цепях, так как все основные цепи (**И**, **ИЛИ** и **НЕ**) можно смоделировать с помощью этого элемента. Условное обозначение элемента **И – НЕ** и его функциональный эквивалент показаны на рисунках 4, а и 4, б.

Элемент **ИЛИ – НЕ** состоит из элемента **ИЛИ**, сопровождаемого элементом **НЕ**. Как и элемент **И – НЕ**, элемент **ИЛИ – НЕ** предпочтителен к

использованию в цифровых цепях, поскольку с его помощью можно строить основные элементы **И**, **ИЛИ** и **НЕ**. Условное обозначение элемента **ИЛИ – НЕ** и его функциональный эквивалент показаны на рисунках 5, а и 5, б.

Методические указания к выполнению работы

1 Исследование работы логического элемента AND (И).

Исследовать свойства элемента **И** с тремя входами со следующим соответствием сигналов: 0В ≡ сигнал 0 ≡ уровень низкого потенциала, +15 В ≡ сигнал 1 ≡ уровень высокого потенциала.

1.1. Соберите цепь согласно схеме (рис. 1, б). Подайте последовательно к входам x_1 , x_2 и x_3 , как указано в таблице 1: 0 В ≡ сигнал 0 ≡ уровень низкого потенциала, +15 В ≡ сигнал 1 ≡ уровень высокого потенциала.

Занесите соответствующие значения выходного сигнала (0/1) в таблицу 1.

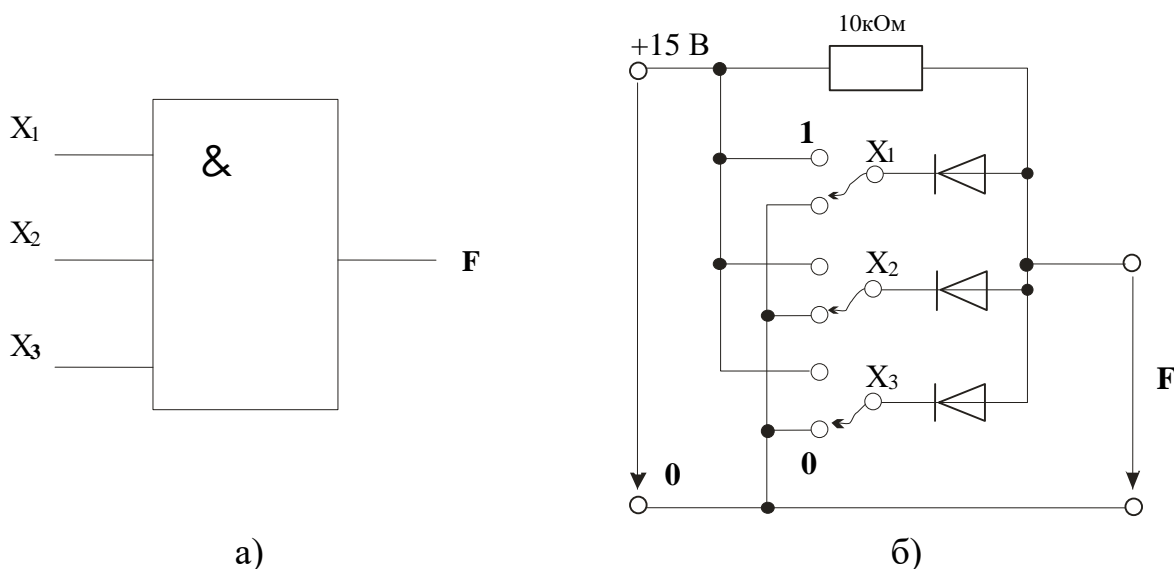


Рисунок 1 – Логический элемент AND с тремя входами

Таблица 1

Входные сигналы			Выходные сигналы
x_1	x_2	x_3	F
0	0	0	
0	0	1	
0	1	0	
0	1	1	
1	0	0	
1	0	1	
1	1	0	

1	1	1	
---	---	---	--

Примечание: Разомкнутые входы логического элемента не имеют состояния определенного сигнала. Поэтому состояния выходной переменной при разомкнутых входах не несут какой-либо определенной информации.

2. Исследование работы логического элемента OR (ИЛИ).

Исследовать свойства элемента **ИЛИ** с тремя входами со следующим соответствием сигналов: $0V \equiv \text{сигнал } 0 \equiv \text{уровень низкого потенциала}$, $+15V \equiv \text{сигнал } 1 \equiv \text{уровень высокого потенциала}$.

2.1. Соберите цепь согласно схеме (рис. 2, б). Подайте последовательно $0V \equiv \text{сигнал } 0 \equiv \text{уровень низкого потенциала}$, $+15V \equiv \text{сигнал } 1 \equiv \text{уровень высокого потенциала}$, к входам x_1 , x_2 и x_3 , как указано в таблице 2. Занесите соответствующие значения выходного сигнала (0/1) в таблицу.

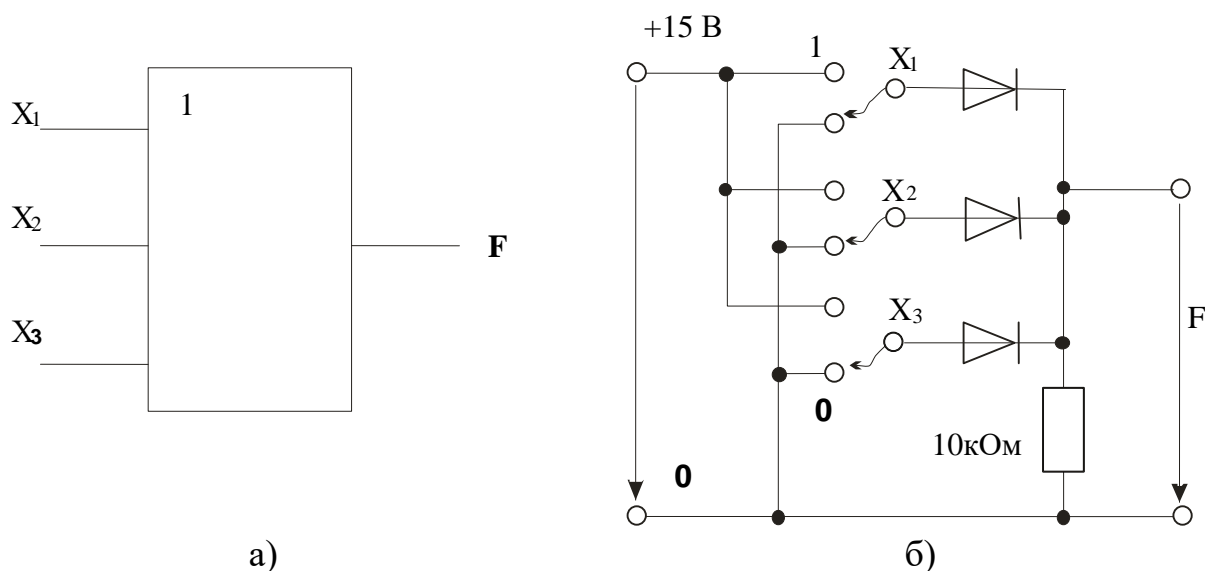


Рисунок 2 – Логический элемент OR с тремя входами

Таблица 2

Входные сигналы			Выходные сигналы
x_1	x_2	x_3	F
0	0	0	
0	0	1	
0	1	0	
0	1	1	
1	0	0	
1	0	1	
1	1	0	
1	1	1	

Примечание: Разомкнутые входы логического элемента не имеют состояния определенного сигнала. Поэтому состояния выходной переменной при разомкнутых входах не несут какой-либо определенной информации.

3 Исследование работы логического элемента NOT (НЕ).

Проведя необходимые измерения, исследовать свойства элемента НЕ.

Соберите цепь согласно схеме (рис. 3, б). Подайте на вход сначала 0 В (сигнал 0), а затем +15 В (сигнал 1). Занесите соответствующие значения выходного сигнала (1/0) в таблицу 3.

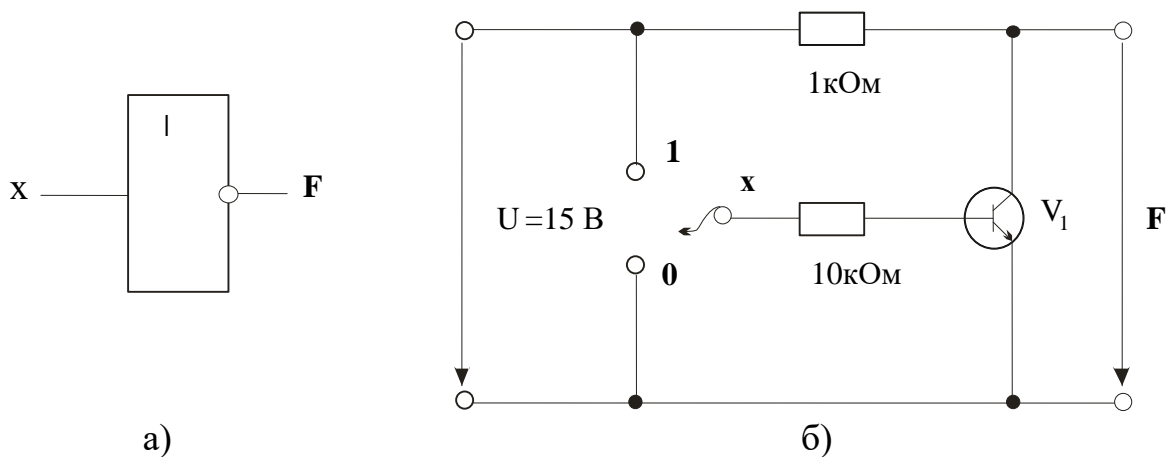


Рисунок 3 – Логический элемент NOT

Таблица 3

Входной сигнал	Выходной сигнал
x	F
0	
1	

4 Исследование работы логического элемента NOT – AND (И – НЕ).

Производя измерения, исследовать свойства элемента И – НЕ с тремя входами со следующим соответствием сигналов: 0В ≡ сигнал 0 ≡ уровень низкого потенциала, +15 В ≡ сигнал 1 ≡ уровень высокого потенциала.

Соберите цепь согласно схеме (рис. 4, в). Подайте последовательно 0 В ≡ сигнал 0 ≡ уровень низкого потенциала, +15 В ≡ сигнал 1 ≡ уровень высокого потенциала, к входам x_1 , x_2 и x_3 , как указано в таблице 4. Занесите соответствующие значения выходного сигнала (0/1) в эту таблицу.

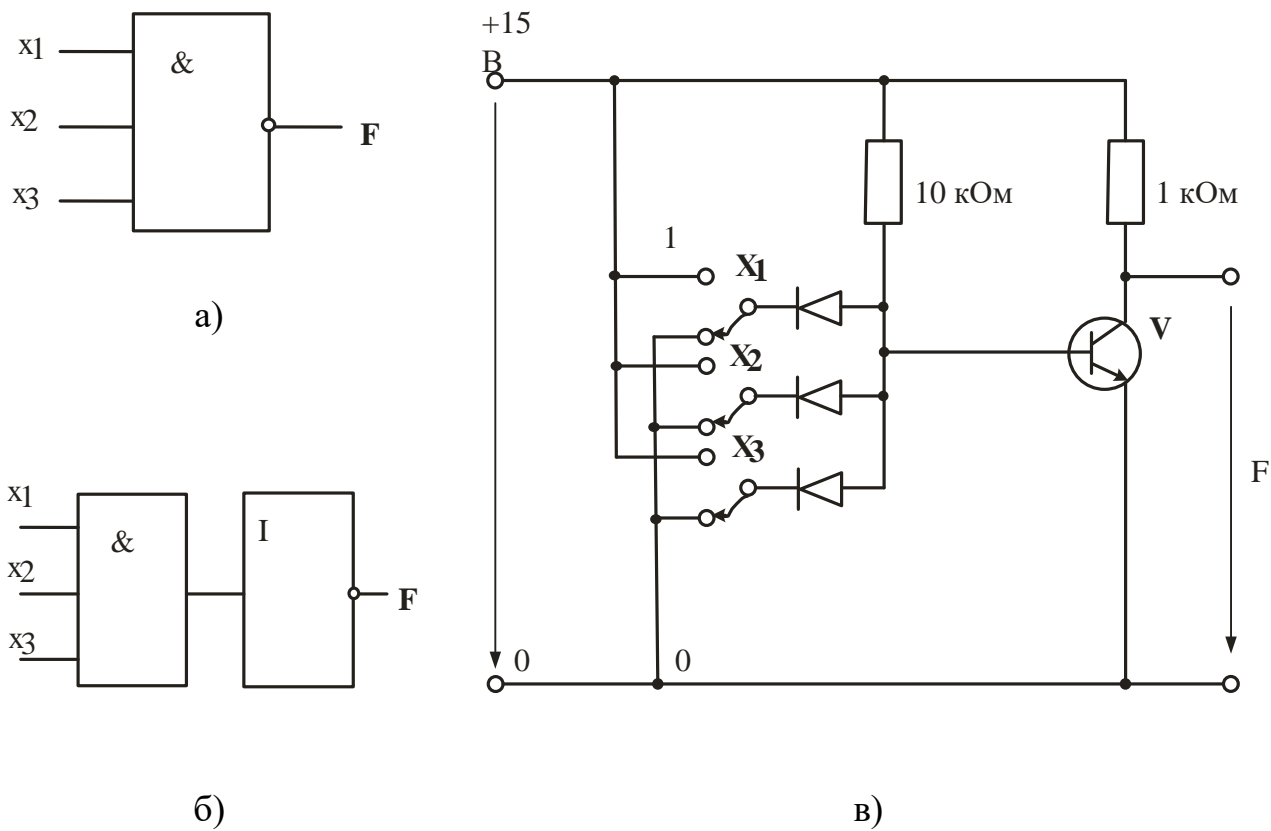


Рисунок 4 – Логический элемент NOT – AND

Таблица 4

Входные сигналы			Выходные сигналы
x1	x2	x3	F
0	0	0	
0	0	1	
0	1	0	
0	1	1	
1	0	0	
1	0	1	
1	1	0	
1	1	1	

Примечание: Разомкнутые входы логического элемента не имеют состояния определенного сигнала. Поэтому состояния выходной переменной при разомкнутых входах не несут какой-либо определенной информации.

5 Исследование работы логического элемента NOT – OR (ИЛИ – НЕ).

Производя измерения, исследовать свойства элемента **ИЛИ – НЕ** с тремя входами со следующим соответствием сигналов: 0 В \equiv сигнал 0 \equiv уровень низкого потенциала, +15 В \equiv сигнал 1 \equiv уровень высокого потенциала.

Соберите цепь согласно схеме (рис. 5, в). Подайте последовательно 0В \equiv сигнал 0 \equiv уровень низкого потенциала, +15 В \equiv сигнал 1 \equiv уровень высокого потенциала к входам **а**, **б** и **с**, как указано в таблице 5. Занесите соответствующие значения выходного сигнала (0/1) в таблицу 5.

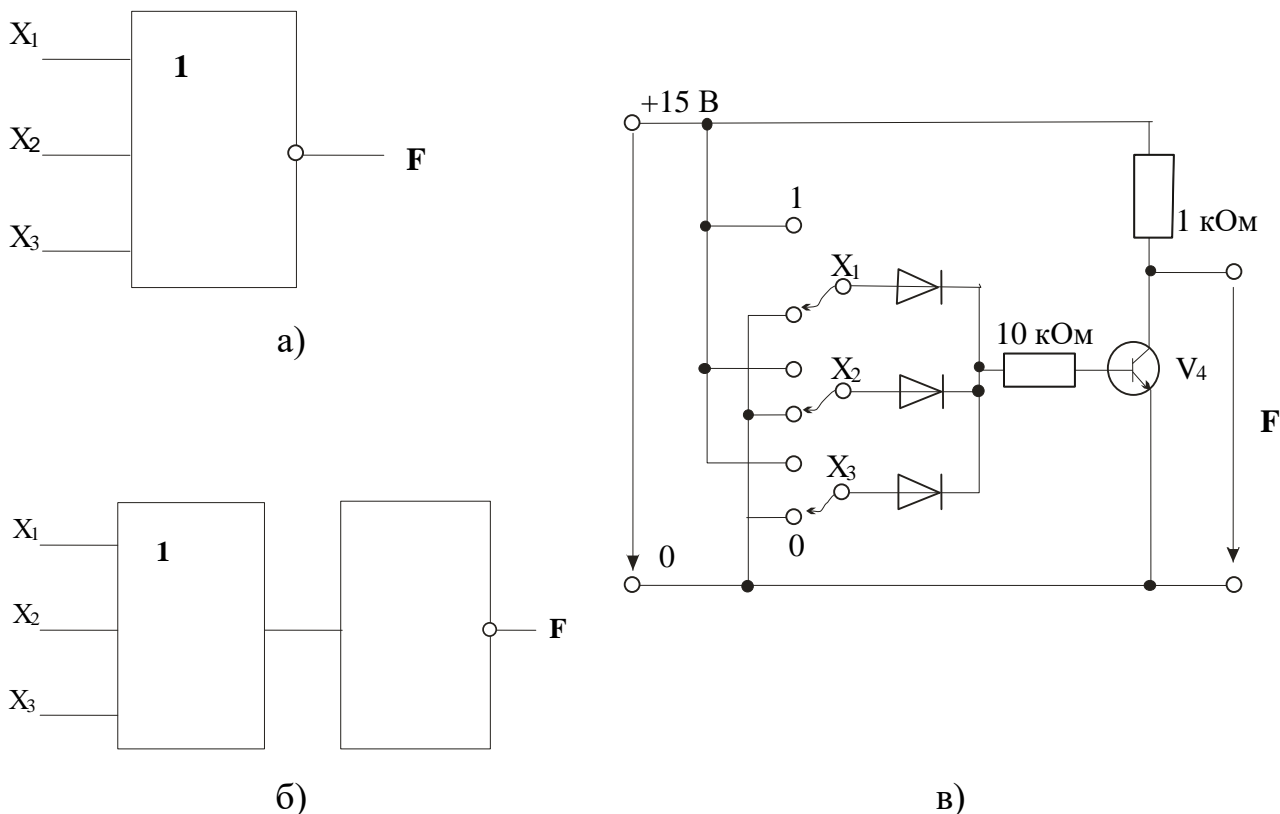


Рисунок 5 – Логический элемент NOT – OR

Таблица 5

Входные сигналы			Выходные сигналы
X ₁	X ₂	X ₃	F
0	0	0	
0	0	1	
0	1	0	
0	1	1	
1	0	0	
1	0	1	
1	1	0	
1	1	1	

Примечание: Разомкнутые входы логического элемента не имеют состояния определенного сигнала. Поэтому состояния выходной переменной при разомкнутых входах не несут какой-либо определенной информации.

Содержание отчета

1. Фамилия, имя, отчество студента, номер группы, дата выполнения работы.
2. Наименование и цель работы.
3. Программа работы.
4. Принципиальные схемы исследуемых цепей.
5. Таблицы измерений и вычислений, примеры расчетов.
6. Графики и диаграммы.
7. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Какова формула операции элемента **И**?
2. Когда выходной сигнал элемента **И** имеет величину 1?
3. Какова формула операции элемента **ИЛИ**?
4. При каких условиях на входах выходной сигнал элемента **ИЛИ** имеет величину 1?
5. Какова формула операции элемента **НЕ**?
6. Какова формула операции элемента **И – НЕ**?
7. При каких входных сигналах выходной сигнал элемента **И – НЕ** имеет величину 0?
8. Какова формула операции элемента **ИЛИ – НЕ**?
9. При каких условиях на входах выходной сигнал элемента **ИЛИ – НЕ** имеет величину 0?

ЛИТЕРАТУРА

1. Батура, М. П. Теория электрических цепей : учебник / М. П. Батура, А. П. Кузнецов, А. П. Курулев ; под редакцией А. П. Курулев. — Минск : Вышэйшая школа, 2015. — 607 с. — ISBN 978-985-06-2562-5. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/52136.html>
2. Крайний, В. И. Основы электроники. Цифровая электроника : учебное пособие / В. И. Крайний, А. Н. Семенов. — Москва : Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2019. — 72 с. — ISBN 978-5-7038-5270-5. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/110693.html>
3. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник для бакалавров / Л.А. Бессонов. - 11-е изд., перераб. и доп. - М. : Юрайт, 2013. - 701 с. - (Бакалавр. Углубленный курс). - На учебнике гриф: Доп.МО. - Библиогр.: с. 605-606. - ISBN 978-5-9916-2562-3
4. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле : учебник / Л. А. Бессонов. - 11-е изд., перераб. и доп. - М. : Юрайт, 2014. - 317 с. - (Бакалавр. Углубленный курс). - Доп. Мин. обр. и науки РФ. - Прил.: с. 277. - Библиогр.: с. 275. - ISBN 978-5-9916-3176-1
5. Физические основы электроники и электротехники : учебное пособие / А. Н. Ларионов, Ю. И. Кураков, В. С. Воищев [и др.]. — Воронеж : Воронежский Государственный Аграрный Университет им. Императора Петра Первого, 2015. — 434 с. — ISBN 978-5-7267-0802-7. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/72782.html>