

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВИТЕБСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»**

**ЭЛЕКТРОНИКА**

***МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ***

**к лабораторным работам для студентов специальности  
1-54 01 01-04 “Метрология, стандартизация и сертификация  
(легкая промышленность)”**

**ВИТЕБСК  
2011**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВИТЕБСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»**

**СОГЛАСОВАНО**

**Зам. председателя  
редакционно-издательского совета  
ВГТУ**

\_\_\_\_\_ **В.В. Пятов**  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ **2011 г.**

**УТВЕРЖДАЮ**

**Первый проректор**

\_\_\_\_\_ **С.И. Малашенков**  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ **2011 г.**

**ЭЛЕКТРОНИКА**

***МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ***

**к лабораторным работам для студентов специальности  
1-54 01 01-04 “Метрология, стандартизация и сертификация  
(легкая промышленность)”**

**ВИТЕБСК  
2011**

УДК 621.83:681.51

Электроника: методические указания к лабораторным работам для студентов специальности 1-54 01 01 – 04 «Метрология, стандартизация и сертификация (легкая промышленность)»

Витебск: Министерство образования Республики Беларусь, УО «ВГТУ», 2011.

Составители: ст. препод. Букин Ю.А.  
асс. Шаркова М.Ф.  
доц. Ильющенко А.В.  
ст. препод. Куксевич В.Ф.

Методические указания содержат теоретический материал, необходимый для анализа работы схем и правильного снятия экспериментальных данных, а также лабораторные работы и перечень используемой литературы.

Одобрено кафедрой «АТПШ» УО «ВГТУ» «21» октября 2010 г., протокол № 5

Рецензент: доцент, к.т.н. Иванова Л.В.  
Редактор: доцент, к.т.н. Новиков Ю.В.

Рекомендовано к опубликованию редакционно-издательским советом УО «ВГТУ» «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г., протокол № \_\_\_\_\_

Ответственный за выпуск: Букин Ю.А.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»

Подписано к печати \_\_\_\_\_ Формат \_\_\_\_\_ Уч. - изд. лист \_\_\_\_\_  
Печать ризографическая. Тираж \_\_\_\_\_ экз. Заказ № \_\_\_\_\_ Цена \_\_\_\_\_ р.

Отпечатано на ризографе учреждения образования «Витебский государственный технологический университет».

Лицензия № 02330/0494384 от 16 марта 2009 г.

210035, Витебск, Московский проспект, 72.

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВИТЕБСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»**

**СОГЛАСОВАНО**

**Зам. председателя  
редакционно-издательского совета  
ВГТУ**

\_\_\_\_\_ **В.В. Пятов**  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ **2011 г.**

**УТВЕРЖДАЮ**

**Первый проректор**

\_\_\_\_\_ **С.И. Малашенков**  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ **2011 г.**

**ЭЛЕКТРОНИКА**

***МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ***

**к лабораторным работам для студентов специальности  
1-54 01 01 -04 “Метрология, стандартизация и сертификация  
(легкая промышленность)”**

**ВИТЕБСК**

**2011**

## Содержание

Краткое описание стенда УИЛС – 1.....	4
Лабораторная работа № 1.....	5
1.1 Теоретическая часть.....	5
1.2 Порядок выполнения работы.....	11
1.3 Контрольные вопросы .....	12
Лабораторная работа № 2.....	13
2.1 Теоретическая часть.....	13
2.2 Порядок выполнения работы.....	15
2.3 Контрольные вопросы .....	17
Лабораторная работа № 3.....	18
3.1 Теоретическая часть.....	18
3.2 Порядок выполнения работы.....	21
3.3 Контрольные вопросы .....	23
Лабораторная работа № 4.....	23
4.1 Теоретическая часть.....	23
4.2 Порядок выполнения работы.....	25
4.3 Контрольные вопросы .....	27
Лабораторная работа № 5.....	28
5.1 Теоретическая часть.....	28
5.2 Порядок выполнения работы.....	31
5.3 Контрольные вопросы .....	33
Лабораторная работа № 6.....	33
6.1 Теоретическая часть.....	33
6.2 Порядок выполнения работы.....	37
6.3 Контрольные вопросы .....	38
Лабораторная работа № 7.....	39
7.1 Теоретическая часть.....	39
7.2 Порядок выполнения работы.....	43
7.3 Контрольные вопросы .....	45
Лабораторная работа № 8.....	45
8.1 Теоретическая часть.....	45
8.2 Порядок выполнения работы.....	49
8.3 Контрольные вопросы .....	51
Лабораторная работа № 9.....	51
9.1 Теоретическая часть.....	51
9.2 Порядок выполнения работы.....	53
9.3 Контрольные вопросы .....	55
Лабораторная работа № 10.....	55
10.1 Теоретическая часть.....	55
10.2 Порядок выполнения работы.....	63
10.3 Контрольные вопросы .....	64
Лабораторная работа № 11.....	64
11.1 Теоретическая часть.....	64
11.2 Порядок выполнения работы.....	70
11.3 Контрольные вопросы .....	71
Литература .....	71

## Краткое описание стенда УИЛС – 1

Универсальный учебно-исследовательский лабораторный стенд УИЛС – 1, предназначенный для выполнения лабораторных работ по изучению электрических цепей, включает в себя пульт, набор элементов, соединительных проводов и специальный лабораторный стол.

Пульт состоит из источников энергии, электронного ключа, наборного поля и регулируемых пассивных элементов.

В источники энергии входят:

- блок постоянных напряжений, содержащий источник регулируемого стабилизированного напряжения ( $U = 0 \dots 25 \text{ В}$ ,  $I = 0 \dots 1 \text{ А}$ ) и источник нерегулируемого напряжения ( $U = 0 \dots 20 \text{ В}$ ,  $I = 0 \dots 1 \text{ А}$ ).

- блок переменного напряжения, представляющий собой регулируемый стабилизированный источник, обеспечивающий параметры  $U = 5 \dots 25 \text{ В}$  и  $I = 0 \dots 1 \text{ А}$  при  $f = 0,1 \dots 0,8 \text{ кГц}$ ;

- блок трехфазного напряжения – трехфазный источник с независимыми фазами, напряжение которых регулируется ступенчато от 0 до 40 В через 1 В при  $f = 50 \text{ Гц}$ . Допустимый ток – до 1 А.

При превышении током значения 1 А имеющаяся в каждом источнике защита отключает их от цепи.

Электронный ключ применяется при анализе переходных процессов и представляет собой замыкающий и размыкающий полупроводниковые ключи с внутренней либо внешней синхронизацией.

Наборное поле, расположенное в центре пульта, представляет собой панель с 67 парами гнезд, предназначенными для подключения элементов исследуемой цепи (сплошные линии на наборном поле между гнездами обозначают их электрическое соединение между собой).

Регулируемые пассивные элементы расположены справа от наборного поля и включают в себя:

- блок переменного сопротивления с возможностью получения на выходе  $R_4$  сопротивления в диапазоне  $1 \dots 999 \text{ Ом}$  при допустимой мощности рассеивания 5 Вт;

- блок переменной емкости, обеспечивающий на выходе  $C_4$  изменение емкости от 0,01 до 9,99 мкФ;

- блок переменной индуктивности, позволяющий получить на выходе  $L_4$  индуктивность в диапазоне  $0,1 \dots 99,9 \text{ мГн}$  при допустимом токе до 0,2 А.

К выходам  $R_1$ - $R_3$ ,  $C_1$ - $C_3$ ,  $L_1$ - $L_3$  блоков подключены пассивные элементы с нерегулируемыми параметрами.

В комплект стенда входят также элементы наборного поля (стандартные резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности), соединительные провода и перемычки. Имеющиеся в стенде измерительные приборы предназначены только для контроля работы источников.

## Лабораторная работа № 1

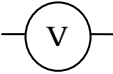

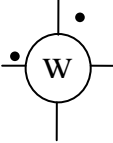

### Ознакомление с приборами и аппаратами лабораторного курса и порядком измерения основных электротехнических величин

Цель работы: изучение правил техники безопасности и внутреннего распорядка в лаборатории, ознакомление со стендом УИЛС – 1 и получение первоначальных навыков сборки электрических цепей, измерения токов, напряжений и сопротивлений.

#### 1.1 Теоретическая часть

К основным средствам электрических измерений, представленным на универсальных стендах, относятся амперметры, вольтметры, ваттметры и омметры. Эти приборы позволяют производить непосредственные измерения тока, напряжения, мощности и сопротивления, а также косвенным методом определить сопротивления, мощности, емкости, индуктивности и др. величины.

Таблица 1.1 – Основные электротехнические величины

Величина	Обозначение	Ед. измерения	Прибор для измерения	Подключение прибора
Напряжение	<b>U</b>	[В], [V] – вольт	 вольтметр	Параллельно нагрузке
Ток	<b>I</b>	[А] – ампер	 амперметр	Последовательно с нагрузкой
Мощность	<b>P</b>	[Вт], [W] – ватт	 ваттметр	Двумя выводами последовательно, двумя – параллельно нагрузке
Сопротивление	<b>R</b>	[Ω], [Ом] – ом	 омметр	Непосредственно к нагрузке, отключенной от цепи

Для непосредственного измерения силы тока используют амперметры (миллиамперметры) (рисунок 1.1). Их включают в электрическую цепь последовательно в той ветви цепи, где необходимо измерить величину тока. Как правило, сопротивление амперметра считается равным нулю. Для непосредственного измерения напряжения на каком-либо участке цепи измеряющий прибор – вольтметр – включают параллельно этому участку. Сопротивление вольтметра считается равным бесконечности. Экспериментальные определения мощности и сопротивления пассивного участка цепи могут быть произведены непосредственно – с помощью специальных приборов – ваттметров и омметров, а также рядом косвенных методов.

**Внимание:** при измерениях необходимо установить с помощью переключателей, расположенных на приборе, и затем проверить род тока (напряжения) – *постоянный* или *переменный*, а также **предел измерения**. При измерениях строго запрещается допускать превышение номинальных значений измеряемых приборами величин.

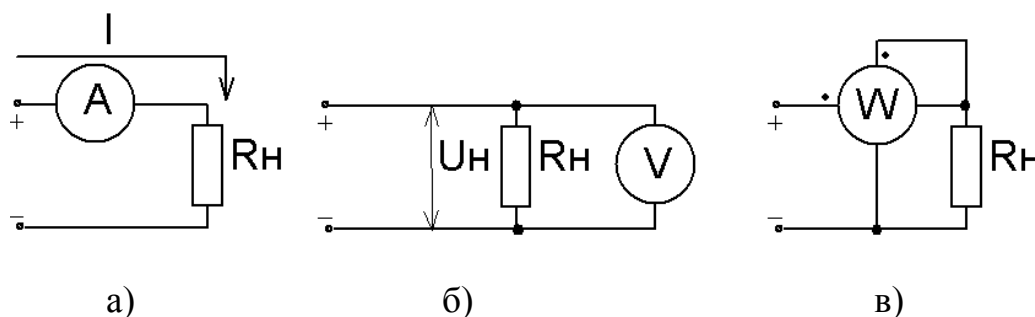


Рисунок 1.1 – Подключение приборов:  
а) амперметра, б) вольтметра, в) ваттметра

Таблица 1.2 – Единицы кратности

Наименование	Краткое обозначение	Степень	Пример
микро	[mk], [мк], [μ]	$1 \cdot 10^{-6}$	мкВ – микровольт
милли	[m], [м]	$1 \cdot 10^{-3}$	мА – миллиампер
кило	[k], [к]	$1 \cdot 10^3$	кВт – киловатт
мега	[M]	$1 \cdot 10^6$	Мом – мегаом

**Электрической цепью** называется совокупность устройств, предназначенных для генерирования (получения), передачи, преобразования и использования энергии электрического тока.

Составными частями электрической цепи (элементами цепи) являются:

- **источники** – устройства, преобразующие различные виды энергии (механическую, тепловую, ядерную, световую и др.) в электрическую энергию;
- **приемники** – устройства, преобразующие электрическую энергию в



другие виды энергии (механическую – в электродвигателях, тепловую – в электронагревательных элементах, электрохимическую – в электролизных ваннах);

- **передающие элементы** – оборудование, связывающее источники и приемники (соединительные провода).

Электрические цепи бывают разветвленными и неразветвленными, линейными и нелинейными.

### 1. Неразветвленная электрическая цепь

**Последовательное соединение** элементов. Это соединение, при котором все элементы расположены в одной ветви, т.е. между элементами нет узлов (разветвлений). Ток, протекающий в цепи, общий для всех последовательно соединенных в данной цепи элементов. При выходе из строя хотя бы одного из последовательно соединенных элементов цепь разрывается, и работа других элементов прекращается.

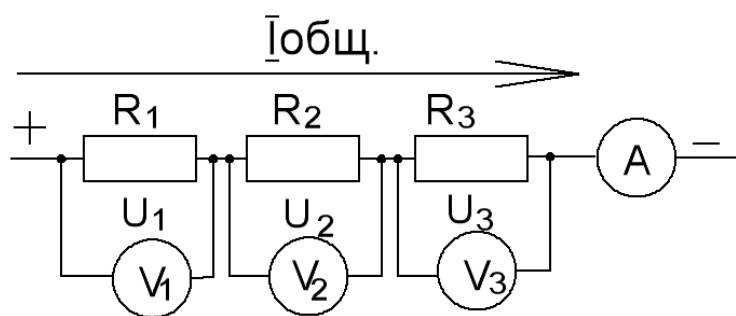


Рисунок 1.2 – Последовательное соединение резисторов

$$R_{\text{общ}} = R_1 + R_2 + R_3$$

$$I_{\text{общ}} = I_1 = I_2 = I_3 \quad (1.1)$$

$$U_{\text{общ}} = U_1 + U_2 + U_3$$

$$P = \sum_{i=1}^n P_i = P_1 + P_2 + P_3 = U_1 I + U_2 I + U_3 I = I^2 (R_1 + R_2 + R_3) \quad (1.2)$$

### 2. Разветвленная электрическая цепь

А. Одним из видов разветвленной электрической цепи является **параллельное соединение**. Это соединение, при котором элементы расположены в разных ветвях, причем данные ветви имеют две общие точки – узлы. Ток, вытекающий из источника, разветвляется в узле **а** на несколько токов, сумма которых равна общему току, а численное значение каждого из токов зависит от сопротивления элементов, расположенных в данной ветви. В узле **б** токи опять сходятся в общий (суммарный) ток. На рисунке 1.3 представлена схема из четырех параллельно соединенных ветвей, три из которых содержат резисторы –  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , а четвертая – источник постоянного напряжения  $U_{\text{и.п}}$ . При параллельном соединении элементов напряжения каждой отдельной ветви равны между собой.

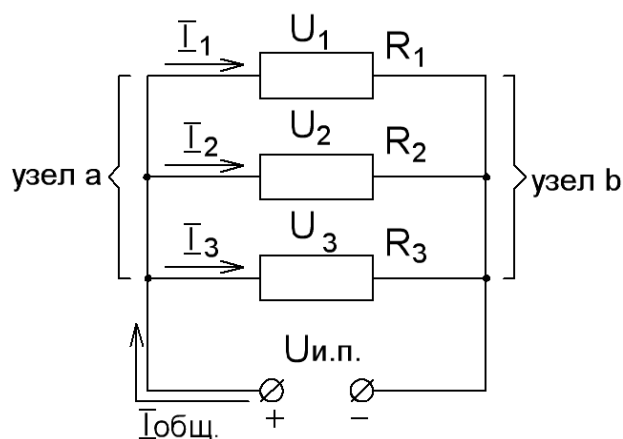


Рисунок 1.3 – Параллельное соединение резисторов

$$R_{\text{экв}} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

$$I_{\text{общ}} = I_1 + I_2 + I_3$$

$$U_{\text{общ}} = U_1 = U_2 = U_3$$
(1.3)

$$P = \sum_{i=1}^n P_i = P_1 + P_2 + P_3 = U_1 I_1 + U_2 I_2 + U_3 I_3 =$$

$$= I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3$$
(1.4)

Эквивалентное сопротивление двух параллельно соединенных проводников может быть выражено следующим образом:

$$R_{12} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$
(1.5)

**Б. Смешанное соединение** – соединение, представляющее собой комбинацию участков с последовательно и параллельно соединенными элементами (рисунок 1.4). К отдельным участкам такой цепи применимы соотношения между напряжениями, токами и сопротивлениями, действующими в параллельной и последовательной цепях.

Расчет электрической цепи со смешанным соединением проводников проводят путем преобразования ее в более простую – последовательную цепь – заменой параллельно соединенных элементов одним эквивалентным элементом и дальнейшей заменой всех последовательно включенных элементов одним эк-

вивалентным сопротивлением.

В этой цепи резисторы  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  подключены параллельно между собой, так как одним выводом все они подсоединены к узлу «а», другим – к узлу «b». Эти резисторы можно заменить одним эквивалентным  $R_{234}$ , сопротивление которого рассчитывается по формуле (1.3). Схема после преобразования содержит резисторы  $R_1$  и  $R_{234}$ , подсоединенные последовательно, так как ток,  $I_{\text{общ.}}$ , выходя из положительного полюса источника питания, последовательно проходит через резистор  $R_1$ , а затем через эквивалентный резистор  $R_{234}$  и возвращается через отрицательный полюс в источник. Расчет общего сопротивления полученной схемы ведется по формуле (1.1).

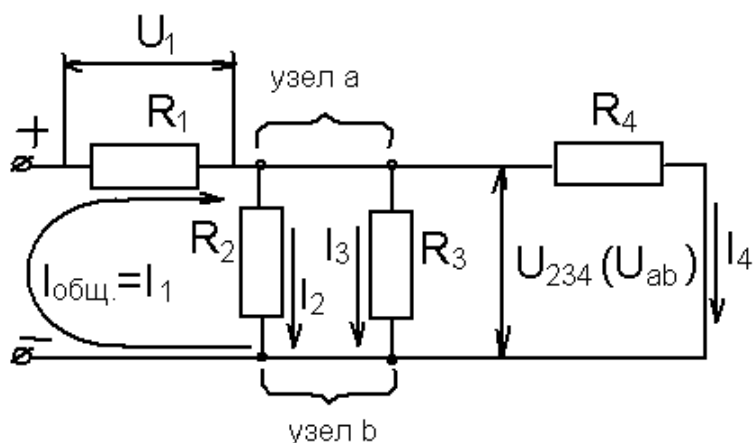


Рисунок 1.4 – Смешанное соединение резисторов

Для расчета схем необходимо знать основные формулы электротехники. Закон Ома для участка цепи:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (1.6)$$

Электрическая мощность:

$$P = U * I = I^2 R = \frac{U^2}{R}. \quad (1.7)$$

Экспериментальные определения мощности и сопротивления пассивного участка цепи (не имеющего в себе источника питания) могут быть произведены непосредственно с помощью специальных приборов – ваттметров и омметров, а также рядом косвенных методов:

**а) метод амперметра – вольтметра.**

Измерив ток, протекающий по данному участку цепи, и напряжение на этом же участке, можно, воспользовавшись формулами (1.6) и (1.7), рассчитать сопротивление участка по закону Ома:

$$R_x = \frac{U}{I} \quad (1.8)$$

и мощность, которая равна произведению напряжения и тока:

$$P_x = U * I. \quad (1.9)$$

При этом используют две схемы подключения измерительных приборов. Для измерения больших сопротивлений используют схему, представленную на рисунке 1.5 (а), а для измерения малых сопротивлений – схему, представленную на рисунке 1.5 (б).

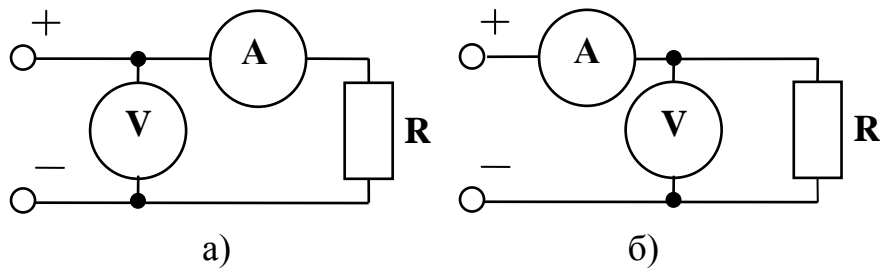


Рисунок 1.5 – Метод амперметра - вольтметра

**б) метод вольтметра.**

Он используется для измерения малых и средних сопротивлений путем сравнения падения напряжения на  $R_x$  с падением напряжения на последовательно включенном с  $R_x$  образцовом сопротивлении  $R_0$  (рисунок 1.6).

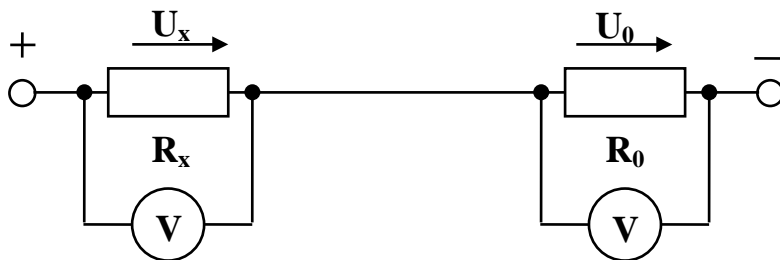


Рисунок 1.6 – Метод вольтметра

Измерив  $U_x$  и  $U_0$ , определяем сопротивление  $R_x$ :

$$R_x = \frac{R_0 * U_x}{U_0}. \quad (1.10)$$

**в) метод мостовой схемы.**

Для определения неизвестного сопротивления  $R_x$  *уравновешивают* мостовую схему (рисунок 1.7), изменяя сопротивление в одном из плеч моста. Признаком электрического равновесия моста является отсутствие тока в его диагонали  $ab$ .

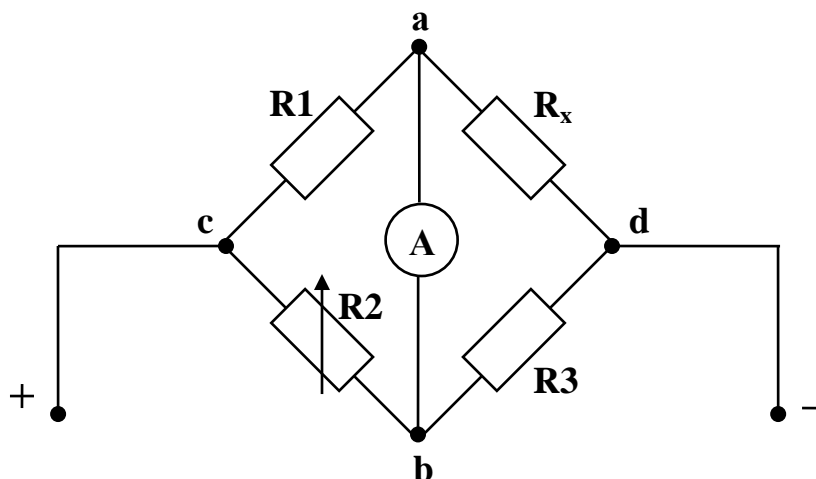


Рисунок 1.7 – Метод мостовой схемы

Если мост уравновешен (это достигается изменением сопротивления резистора  $R_2$ ), то амперметр  $A$  покажет отсутствие тока в измерительной диагонали  $ab$ , и  $R_x$  можно рассчитать по формуле

$$R_x = \frac{R1 * R3}{R2}. \quad (1.11)$$

## 1.2 Порядок выполнения работы

1. Произвольно выбрать из имеющихся элементов наборного поля резистор и при помощи омметра измерить его сопротивление  $R_x$ . Результат измерения занести в таблицу 1.3.
2. Измерить сопротивление выбранного резистора методом амперметра-вольтметра. Собрать схему по заданию преподавателя на стенде УИЛС-1 (рисунок 1.5 а), установив на входе системы напряжение 10 В, измерить ток и напряжение и рассчитать по закону Ома сопротивление  $R_x$ . Результат измерения занести в таблицу 1.3. Затем собрать цепь согласно рисунку 1.5 б, установив на входе системы напряжение 10 В, измерить ток и напряжение и рассчитать по закону Ома сопротивление  $R_x$ . Результат измерения занести в таблицу 1.3.
3. Измерить сопротивление выбранного резистора методом вольтметра, для чего собрать цепь согласно рисунку 1.6 и, установив на входе схемы напряжение 10 В, измерить напряжения  $U_x$  и  $U_0$ . Рассчитать по формуле (1.10) сопротивление  $R_x$ . Результат измерения занести в таблицу 1.3.

4. Измерить сопротивление выбранного резистора с помощью мостовой схемы, для чего собрать цепь согласно рисунку 1.7. Резисторы  $R_1$  и  $R_3$  выбрать из элементов наборного поля, при этом сопротивление каждого не должно превышать 300 Ом. В качестве резистора  $R_2$  установить переменный резистор из блока переменного сопротивления. Подать на вход схемы напряжение 10 В и, изменяя сопротивление резистора  $R_2$ , получить в диагонали  $ab$  минимальный ток. Рассчитать по формуле (1.11) сопротивление  $R_x$ . Результат измерения занести в таблицу 1.3.

Таблица 1.3 – Экспериментальные данные

Параметр	Метод омметра	Метод амперметра-вольтметра		Метод вольтметра	Метод мостовой схемы
		По схеме Рисунок 1.5 (а)	По схеме Рисунок 1.5 (б)		
$R_x$ , Ом					
Относительная погрешность измерения, %					

5. Сделать вывод о точности измерения сопротивления различными методами, сравнив результаты измерений со значением сопротивления, измеренным с помощью омметра, и рассчитав для каждого случая величину относительной погрешности.

### 1.3 Контрольные вопросы

1. Какие основные средства измерений используются на универсальных стендах? Их назначение.
2. Какие бывают электрические цепи и соединения элементов? Формулы.
3. Что такое прямые и косвенные способы определения параметров? Дать сравнительную оценку всем методам измерения сопротивления.
4. Охарактеризовать способы непосредственного измерения  $U$ ,  $I$ ,  $R$ .
5. В чем заключается метод амперметра-вольтметра и метод вольтметра?
6. В чем разница между двумя схемами измерения сопротивления в методе амперметра-вольтметра?
7. Охарактеризовать метод измерения сопротивления с помощью мостовой схемы.

## Лабораторная работа № 2

### Исследование основных режимов работы простейшей электрической цепи постоянного тока

Цель работы: исследование распределения энергии на элементах простейшей электрической цепи постоянного тока при переходе от одного режима работы цепи к другому.

#### 2.1 Теоретическая часть

Наиболее широкое распространение получил *переменный ток*, вырабатываемый различного рода электростанциями, однако для некоторых приемников *постоянный ток* является единственно возможным родом тока, а иногда его применение позволяет существенно улучшить технические и эксплуатационные характеристики эксплуатационных установок. Электрическую энергию постоянного тока преимущественно получают из электрической энергии переменного тока с помощью полупроводниковых преобразователей. Реже для этой цели используют генераторы, приводимые во вращение электрическими и неэлектрическими двигателями, аккумуляторы, гальванические элементы и термогенераторы.

Постоянным называется ток, значение и направление которого при неизменных параметрах электротехнической установки остаются постоянными.

Рассмотрим простейшую неразветвленную линейную электрическую цепь постоянного тока (рисунок 2.1). Эта цепь содержит источник электрической энергии с параметрами  $E$  (эдс) и  $r_0$  (внутреннее сопротивление источника), приемник электрической энергии (активную нагрузку) с параметром  $R_H$  (сопротивление нагрузки) и линию электропередачи с сопротивлением  $R_{л}$ , соединяющую источник и приемник.

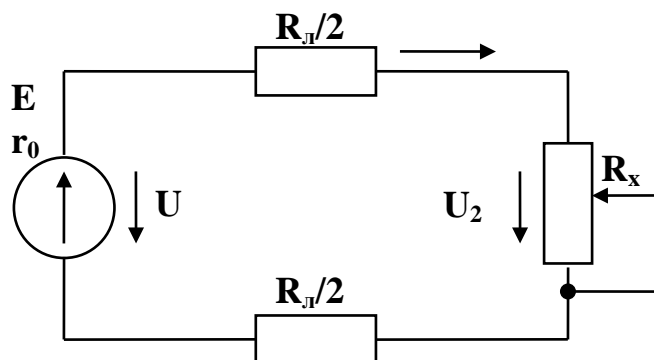


Рисунок 2.1 – Простейшая неразветвленная линейная электрическая цепь постоянного тока

Величины  $U$  и  $U_H$  на схеме (рисунок 2.1) обозначают напряжение в на-

чале линии и на нагрузке,  $I$  – ток в электрической цепи.

Т.к. для данной электрической цепи сопротивление внешнего участка

$$R = R_{\dot{\epsilon}} + R_{\dot{\iota}} , \quad (2.1)$$

то сила тока, протекающего в цепи, определяется согласно закону Ома для полной цепи:

$$I = \frac{E}{r_0 + R} . \quad (2.2)$$

Поскольку внутреннее сопротивление источника эдс  $r_0$  обычно во много раз меньше сопротивления внешнего участка цепи  $R$ , то в расчетах, не требующих большой точности, его принимают равным нулю, что позволяет считать напряжение  $U$  на зажимах источника не зависящим от тока нагрузки и равным эдс  $E$  источника.

Тогда ток в цепи можно определить по формуле

$$I = \frac{U}{R_{\dot{\epsilon}} + R_{\dot{\iota}}} . \quad (2.3)$$

Отсюда можно выразить соотношение между напряжениями в цепи:

$$U = I * (R_{\dot{\epsilon}} + R_{\dot{\iota}}) = I * R_{\dot{\epsilon}} + I * R_{\dot{\iota}} = U_{\dot{\epsilon}} + U_{\dot{\iota}} , \quad (2.4)$$

где  $U_{\text{л}} = I * R_{\text{л}}$  – падение напряжения на сопротивлении линии.

Умножив выражение (2.4) на ток  $I$ , получим уравнение баланса мощности в цепи:

$$U * I = I^2 * R_{\dot{\epsilon}} + I^2 * R_{\dot{\iota}} = U_{\dot{\epsilon}} * I + U_{\dot{\iota}} * I . \quad (2.5)$$

Или

$$P = P_{\dot{\epsilon}} + P_{\dot{\iota}} , \quad (2.6)$$

где  $P = U * I$  - мощность, отдаваемая источником в цепь,

$P_{\dot{\iota}} = U_{\dot{\iota}} * I$  - мощность, потребляемая приемником,

$P_{\dot{\epsilon}} = U_{\dot{\epsilon}} * I$  - потери мощности в линии.

Т.к. сопротивление нагрузки в цепи может быть как равным нулю, так и



бесконечно большим, то такие параметры, как  $I$ ,  $U_n$ , с изменением сопротивления  $R_n$  будут изменяться от минимальных до максимальных значений. Каждому режиму работы электрической цепи соответствуют определенные значения этих параметров. Из множества режимов работы характерными для любой электрической цепи являются следующие 4 режима:

**1. Режим холостого хода:** электрическая цепь разомкнута ( $R_n = \infty$ ). При этом  $I = 0$ ,  $U_n = U$ ,  $\eta = 100\%$ .

**2. Режим короткого замыкания** – режим работы, при котором электрическая цепь в точках 2 – 2' (рисунок 2.2) замкнута накоротко ( $R_n=0$ ). Тогда

$$I = \frac{U}{R_{\Sigma}} = I_{max}$$

$U_n=0$ , а ток имеет наибольшее значение,  $\eta = 0\%$ .

**3. Номинальный режим** – режим работы при определенных заводом-изготовителем значениях  $I$ ,  $U$ ,  $P$  для длительной работы данного устройства (цепи).

**4. Согласованный режим** – режим работы, при котором к нагрузке подводится наибольшая в сравнении с другими режимами мощность. Данный режим достигается, когда сопротивление нагрузки равно сопротивлению остальной части цепи, т.е.  $R_n=R_{л}$ ,  $\eta=50\%$ .

Величина мощности, потребляемой при этом нагрузкой, определяется выражением

$$P_i = I^2 * R_i = \left( \frac{U}{R_{\Sigma} + R_i} \right)^2 * R_i = \frac{U^2}{4 * R_i^2} * R_i = \frac{U^2}{4 * R_i} = P_{i \max} \quad (2.7)$$

Все вышеперечисленные режимы могут быть достигнуты путем изменения сопротивления нагрузки  $R_n$ .

Важной характеристикой любой электрической цепи является ее коэффициент полезного действия, оценивающий эффективность работы цепи и определяемый по формуле

$$\eta = \frac{P_i}{P} = \frac{U_i * I}{U * I} = \frac{U_i}{U} \quad (2.8)$$

Из (2.8) следует, что КПД электрической цепи изменяется от 1 в режиме холостого хода до 0 в режиме короткого замыкания. В согласованном режиме  $\eta = 0,5$ .

## 2.2 Порядок выполнения работы

1. Используя омметр, выбрать из комплекта элементов наборного поля два резистора  $R_1$  и  $R_2$  так, чтобы их суммарное сопротивление было примерно равно 500 Ом. Сопротивление данных резисторов, имитирующее сопротив-

- ление проводов линии электропередачи ( $R_1 + R_2 = R_{л}$ ), указать в отчете.
- Собрать схему по заданию преподавателя на стенде УИЛС-1 (рисунок 2.2 а) либо на экране монитора компьютера в программе Electronics Workbench (рисунок 2.2 б), состоящую из регулируемого источника постоянного напряжения, резисторов  $R_1$  и  $R_2$ , переменного резистора  $R_H$  (резистор  $R_4$  блока переменного сопротивления), являющегося нагрузкой, и измерительных приборов.
  - Исследовать схему в режиме холостого хода, для чего при отключенной нагрузке  $R_H$  в точках 2 – 2' установить заданное преподавателем значение напряжения источника  $U_1$ . Показания приборов для данного режима занести в таблицу 2.1.
  - Подключить нагрузку к линии. Установить значение сопротивления переменного резистора  $R_H = 100$  Ом и, дискретно через 100 Ом увеличивая его до 900 Ом, снять полученные данные и занести их в таблицу 2.1.
  - Рассчитать величины, содержащиеся в таблице 2.1 в графе «Вычислено».
  - По результатам измерений и вычислений построить графики зависимостей в четырёх осях координат:
    - 1-я ось:  $U_{вх.}, U_{л.}, U_{н.} = f(I)$ ;
    - 2-я ось:  $P, P_{л.}, P_{н.} = f(I)$ ;
    - 3-я ось:  $\eta = f(I)$ ;
    - 4-я ось:  $R = f(I)$ .

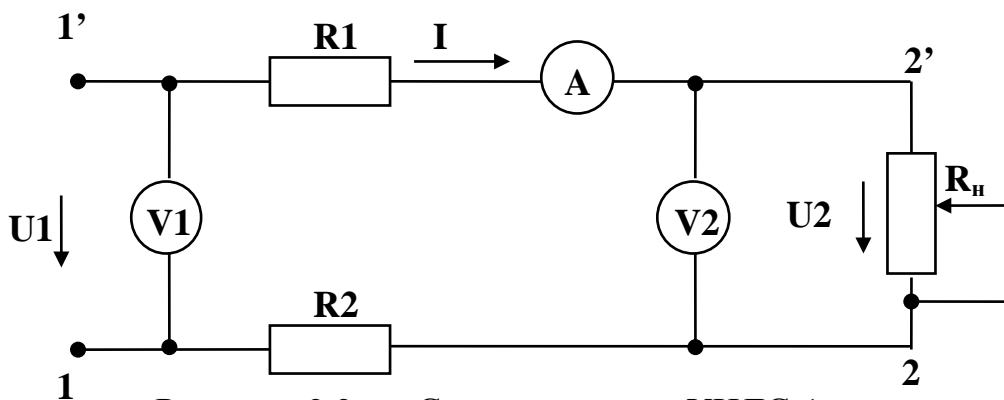


Рисунок 2.2 а – Схема на стенде УИЛС-1

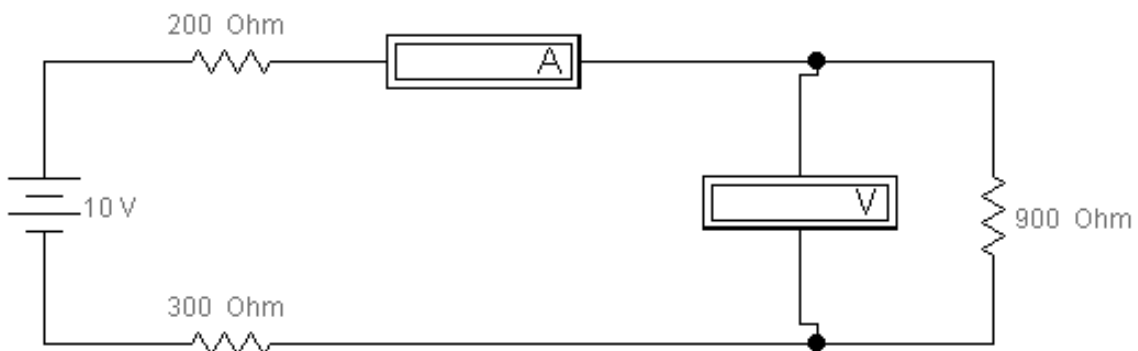


Рисунок 2.2 б – Схема в программе Electronics Workbench

Таблица 2.1 – Экспериментальные данные

№№ п/п	Режим работы	измерено			вычислено					
		$U_{вх}, В$	$U_{н}, В$	$I, мА$	$U_{л}, В$	$P, Вт$	$P_{н}, Вт$	$P_{л}, Вт$	$R, Ом$	$\eta, \%$
1	<b>К.З.</b>	10								
2	100	10								
3	200	10								
4	300	10								
5	400	10								
6	500	10								
7	600	10								
8	700	10								
9	800	10								
10	900	10								
11	<b>Х.Х.</b>	10								

### 2.3 Контрольные вопросы

1. Что такое постоянный ток? Как получают электрическую энергию постоянного тока?
2. Составьте и объясните уравнение баланса мощности для простейшей электрической цепи постоянного тока.
3. В чем заключается режим холостого хода? Какими параметрами характеризуется электрическая цепь в данном режиме?
4. В чем заключается режим короткого замыкания? Какими параметрами характеризуется электрическая цепь в данном режиме?
5. В чем заключается номинальный режим? Какими параметрами характеризуется электрическая цепь в данном режиме?
6. В чем заключается согласованный режим? Какими параметрами характеризуется электрическая цепь в данном режиме?
7. Опишите изменение указанного преподавателем параметра электрической цепи с увеличением тока в данной цепи.

## Лабораторная работа № 3

### Анализ разветвленной цепи постоянного тока с одним источником ЭДС

Цель работы: экспериментальное подтверждение аналитических расчетов основных электрических параметров разветвленной цепи постоянного тока с одним источником ЭДС

#### 3.1 Теоретическая часть

В практике наиболее часто приходится встречаться с задачами расчета разветвленных цепей постоянного тока с одним источником питания. Рассматривая схемы таких цепей, можно в них выделить характерные участки:

*ветвь* – это участок электрической цепи, по которому протекает один и тот же ток;

*узел* – место (точка) соединения трех и более ветвей электрической цепи;

*контур* – замкнутый путь протекания электрического тока по нескольким ветвям электрической цепи.

Ветвь, в которой находится источник ЭДС, называется *активной*, остальные ветви – *пассивными*.

Независимо от числа пассивных элементов схемы и способа их соединения расчет таких цепей, как правило, проводят методом преобразования схемы к простейшему виду (метод сворачивания схемы).

Рассмотрим разветвленную цепь постоянного тока с одним источником ЭДС (рисунок 3.1) и проведем расчет ее основных электрических параметров.

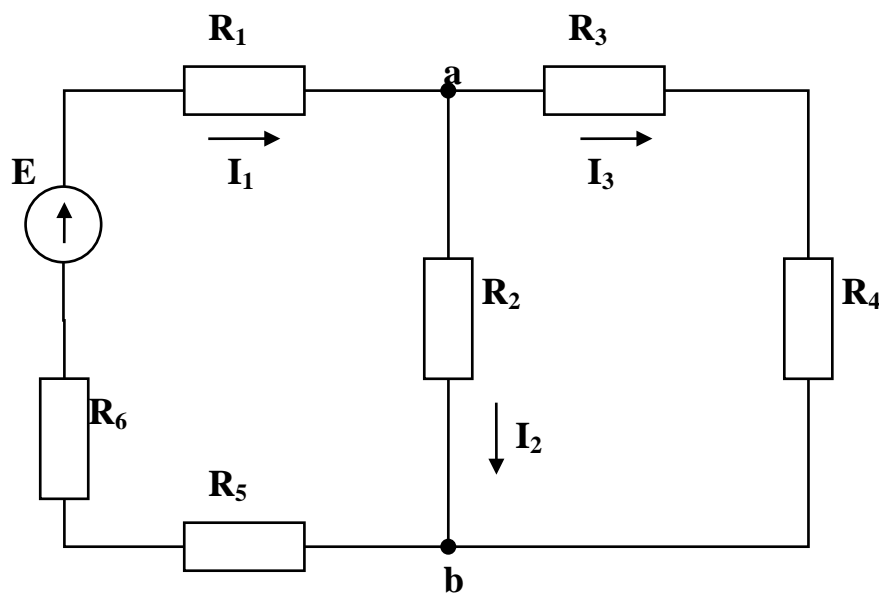


Рисунок 3.1 – Разветвленная цепь постоянного тока с одним источником ЭДС

Предположим, что для данной электрической цепи считаются известными сопротивления пассивных элементов цепи и эдс источника. Необходимо определить токи в ветвях схемы, напряжение и мощность каждого элемента и всей цепи.

В данном случае сворачивание схемы начинаем с третьей ветви, где находятся последовательно соединенные элементы  $R_3$  и  $R_4$ , заменив их одним пассивным элементом с сопротивлением

$$R_{34} = R_3 + R_4, \quad (3.1)$$

получим более простую схему (рисунок 3.2):

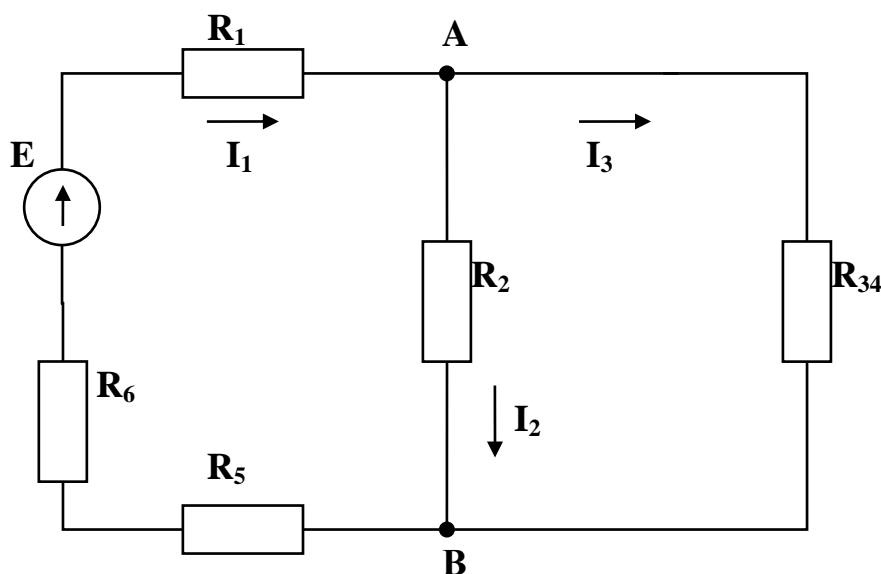


Рисунок 3.2 – Упрощение схемы. Шаг 1

В данной схеме элементы  $R_2$  и  $R_{34}$  соединены параллельно. Их также заменим одним элементом с сопротивлением

$$R_{234} = \frac{R_2 * R_{34}}{R_2 + R_{34}}. \quad (3.2)$$

Получим еще более простую схему (рисунок 3.3), в которой все элементы соединены последовательно.

Заменив теперь данное соединение одним элементом с сопротивлением

$$R = R_1 + R_{234} + R_5 + R_6, \quad (3.3)$$

которое является общим (эквивалентным) сопротивлением всей цепи, приходим к простейшей цепи постоянного тока с одним источником эдс (рисунок 3.4).

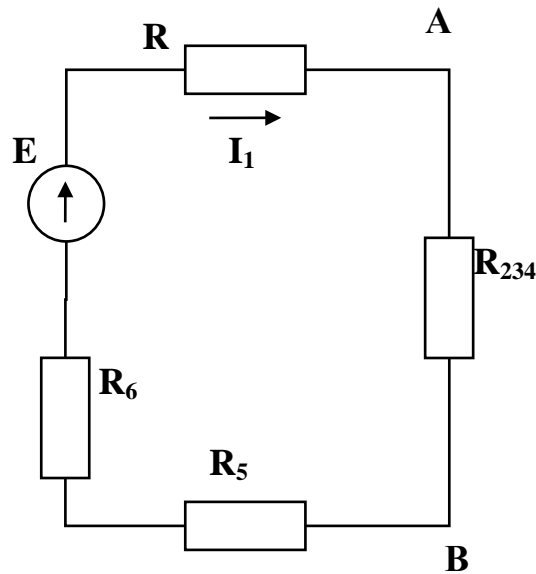


Рисунок 3.3 – Упрощение схемы. Шаг 2

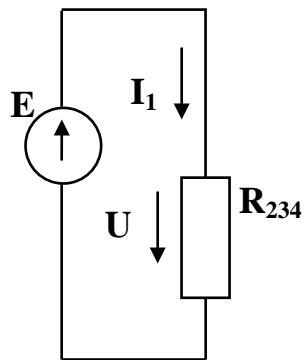


Рисунок 3.4 – Упрощение схемы. Шаг 3

Поскольку в такой цепи  $E = U$ , определяем общий ток цепи:

$$I_1 = \frac{U}{R} = \frac{E}{R}. \quad (3.4)$$

Из схемы, представленной на рисунке 3.3, следует, что ток  $I_1$  одинаков для всех элементов  $R_1$ ,  $R_{234}$ ,  $R_5$ ,  $R_6$ :

$$I_1 = I_{234} = I_5 = I_6. \quad (3.5)$$

Для определения токов в ветвях с сопротивлениями  $R_2$  и  $R_3$  вначале находим напряжение между узлами **A** и **B** (рисунок 3.3).

$$U_{ab} = I_1 * R_{234}. \quad (3.6)$$

В этом случае токи  $I_2$  и  $I_3$  определяются по закону Ома (рисунок 3.2).

$$I_2 = \frac{U_{ab}}{R_2}; \quad (3.7)$$

$$I_3 = \frac{U_{ab}}{R_{34}}. \quad (3.8)$$

Так как элементы  $R_3$  и  $R_4$  соединены последовательно, то сила тока, протекающего через них, будет иметь одно и то же значение:

$$I_3 = I_4. \quad (3.9)$$

Напряжения и мощности пассивных элементов находятся по выражениям:

$$U_i = I_i * R_i; \quad (3.10)$$

$$P_i = I_i^2 * R_i. \quad (3.11)$$

Мощность всей цепи равна сумме мощностей всех пассивных элементов, входящих в данную цепь:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6. \quad (3.12)$$

### 3.2 Порядок выполнения работы

1. Выбрать произвольно из комплекта элементов наборного поля пять резисторов  $R_1 \dots R_5$ . Используя омметр, определить сопротивления резисторов и записать их в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Сопротивления резисторов

$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$R_3$ , Ом	$R_4$ , Ом	$R_5$ , Ом

2. Из выбранных резисторов и блока постоянных напряжений собрать схему по заданию преподавателя на стенде УИЛС-1 (рисунок 3.5 а) либо на экране монитора компьютера в программе Electronics Workbench (рисунок 3.5 б).
3. Установив напряжение источника питания равным 10 В, измерить токи в ветвях и записать их значения в таблицу 3.2.
4. Считая известными значения напряжения источника питания и сопротивлений резисторов схемы, определить методом сворачивания значения то-

ков в ветвях и занести их в таблицу 3.2. Сравнить экспериментальные и расчетные данные.

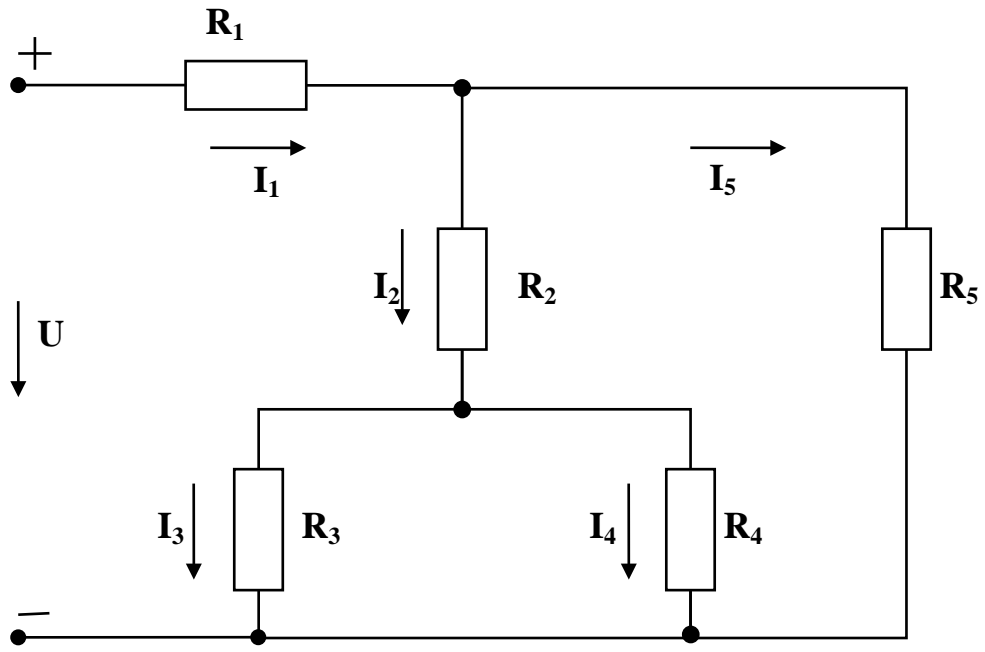


Рисунок 3.5а – Схема на стенде УИЛС-1

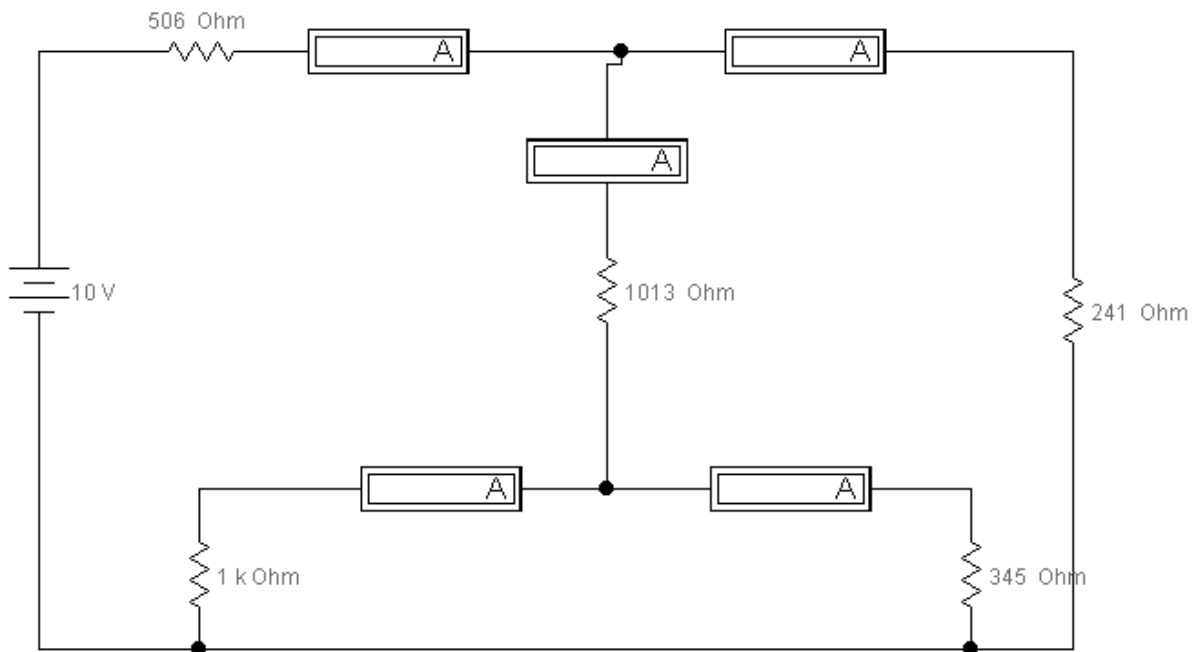


Рисунок 3.5б – Схема в программе Electronics Workbench



Таблица 3.2 – Значения токов в ветвях схемы

Наименование	$I_1, \text{мА}$	$I_2, \text{мА}$	$I_3, \text{мА}$	$I_4, \text{мА}$	$I_5, \text{мА}$
Экспериментальные данные					
Расчетные данные	X	X			

### 3.3 Контрольные вопросы

1. Дать определения ветви, узла, контура электрической цепи. Пояснить ответ с помощью примера.
2. В чем заключается метод сворачивания схемы?
3. Пояснить расчет параметров элементов разветвленной электрической цепи методом сворачивания схемы.
4. Каким образом, используя величину активной мощности, провести проверку правильности расчета токов?
5. Проанализировать изменения электрических величин при внесенном преподавателем каком-либо изменении в схему лабораторной работы.

## Лабораторная работа № 4

### Экспериментальная проверка для расчета сложной электрической цепи постоянного тока

Цель работы: изучение правил расчета сложной электрической цепи постоянного тока методом контурных токов и ее экспериментальное исследование.

#### 4.1 Теоретическая часть

Метод контурных токов наиболее часто применяют на практике для расчета разветвленных сложных цепей постоянного тока, т.к. он позволяет, составив количество уравнений меньше количества, находить все неизвестные величины. Данный метод заключается в том, что вместо действительных токов ветвей в уравнения, составленные по 2-му закону Кирхгофа, включают т.н. контурные токи, действующие в независимых контурах схемы.

**Контурным** называется такой условно принятый ток, который замыкается только по своему контуру, оставаясь в пределах данного контура неизменным.

В этом случае количество уравнений, составляемых по 2-му закону Кирхгофа, будет равно числу независимых контуров схемы и определится из уравнения  $K = m - (n - 1)$ , где  $m$  – количество ветвей схемы;  $n$  – количество узлов схемы.

**Независимым** называют контур, включающий в себя хотя бы одну ветвь, не принадлежащую остальным контурам.

Расчет сложной электрической цепи методом контурных токов проводят следующим образом.

По возможности упростив расчетную схему, указывают на ней заданные направления эдс и произвольно положительные направления токов в ветвях. Разбивают схему на  $K$  независимых контуров. Произвольно выбирают направление контура тока в каждом независимом контуре. Выбирают направление обхода каждого контура, принимая его, как правило, совпадающим с положительным направлением контурного тока.

Составляют систему из  $K$  уравнений по 2-му закону Кирхгофа, включая в эти уравнения контурные, но не действительные токи. Значения эдс в этих уравнениях со знаком «+», если направление обхода контура совпадает с направлением эдс, и со знаком «-», если они не совпадают. Падение напряжения при прохождении контурного тока по сопротивлениям собственного контура оказывается положительным, если направление контурного тока совпадает с направлением обхода данного контура, и отрицательным, если не совпадает. Падение напряжения при прохождении контурного тока смежного контура по общему для двух контуров сопротивлению будет положительным, если направление контурного тока смежного контура будет при этом совпадать с направлением контурного тока данного контура, и отрицательным, если они совпадать не будут.

Решая полученную систему уравнений, определяют значения контурных токов. Используя их, находят с помощью 1-го закона Кирхгофа значения действительных токов в ветвях системы.

Ток ветви, принадлежащей только одному контуру, равен по величине контурному току данного контура. При этом, если направление контурного тока не совпадает с первоначально выбранным направлением действительного тока ветви, в равенство он входит со знаком «-».

Ток ветви, принадлежащей смежным контурам, равен алгебраической сумме контурных токов смежных контуров. При этом со знаком «+» в данное равенство входят те контурные токи, направление которых совпадает с первоначально выбранным направлением тока в данной ветви, и со знаком «-» – направление которых не совпадает.

В качестве примера расчета сложной электрической цепи постоянного тока методом контурных токов рассмотрим расчет электрической цепи, представленной на рисунке 4.1. Разобьем ее на три независимых контура, в каждом из которых будет протекать свой контурный ток  $I_{k1}$ ,  $I_{k2}$ ,  $I_{k3}$ . Направления этих токов выберем во всех контурах одинаковым – по часовой стрелке. Такими же примем и направления обхода каждого из контуров.

Составляем систему из трех уравнений по 1-му закону Кирхгофа:

$$\text{для 1-го контура} \quad E_1 + E_2 = I_{k1} * (R_1 + R_2 + R_5) - I_{k2} * R_2 - I_{k3} * R_3;$$

$$\text{для 2-го контура} \quad -E_2 - E_3 = I_{k2} * (R_3 + R_2 + R_6) - I_{k1} * R_2 - I_{k3} * R_3;$$

для 3-го контура  $E_3 - E_4 = I_{k3} * (R_3 + R_4 + R_5) - I_{k1} * R_5 - I_{k2} * R_3$ .

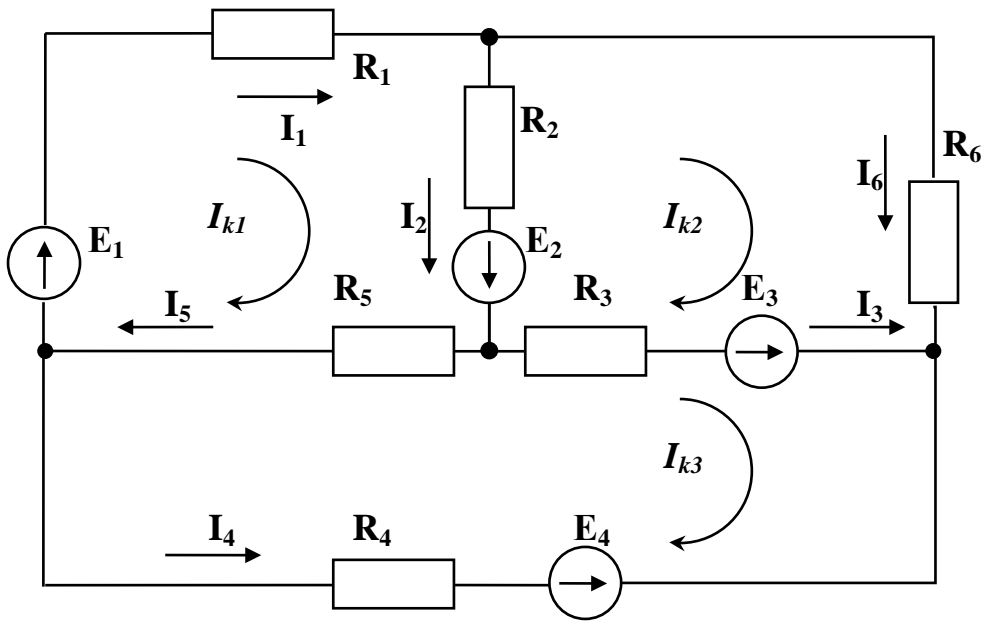


Рисунок 4.1 – Контурные токи в сложной схеме

Решив данную систему, можно найти значения контурных токов  $I_{k1}$ ,  $I_{k2}$ ,  $I_{k3}$ , используя которые легко определить действительные токи в ветвях схемы:

$$I_1 = I_{k1}; I_6 = -I_{k2}; I_4 = -I_{k3}; I_2 = I_{k1} - I_{k2}; I_3 = I_{k3} - I_{k2}; I_5 = I_{k1} - I_{k3}.$$

Если в результате значение какого-либо тока окажется отрицательным, то это значит, что действительное направление данного тока противоположно выбранному. Проверку правильности расчета сложной цепи проводят составлением уравнения баланса мощностей.

## 4.2 Порядок выполнения работы

1. Выбрать произвольно из комплекта элементов наборного поля шесть резисторов  $R_1 \dots R_6$ .
2. Собрать схему по заданию преподавателя на стенде УИЛС-1 (рисунок 4.2 а) либо на экране монитора компьютера в программе Electronics Workbench (рисунок 4.2 б), состоящую из источников нерегулируемого постоянного напряжения  $U_1$  и регулируемого  $U_2$ , резисторов  $R_1 \dots R_6$ , вольтметров  $V_1$  и  $V_2$  и амперметров  $A_1 \dots A_6$ .
3. Установив значение напряжения регулируемого источника  $U_2$  в пределах 10...20 В и измерив напряжение  $U_1$ , записать данные в таблицу 4.1.
4. Измерить значения токов и занести в таблицу 4.1. При занесении данных в таблицу 4.1 учесть направление токов.

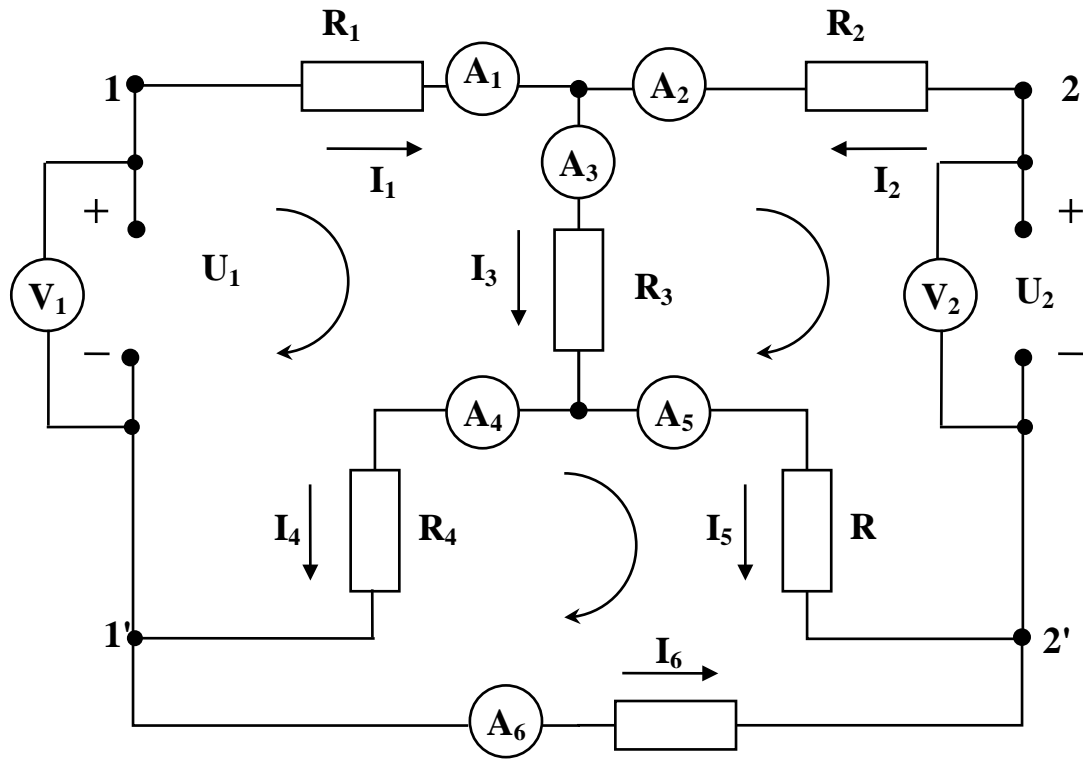


Рисунок 4.2а – Схема на стенде УИЛС-1

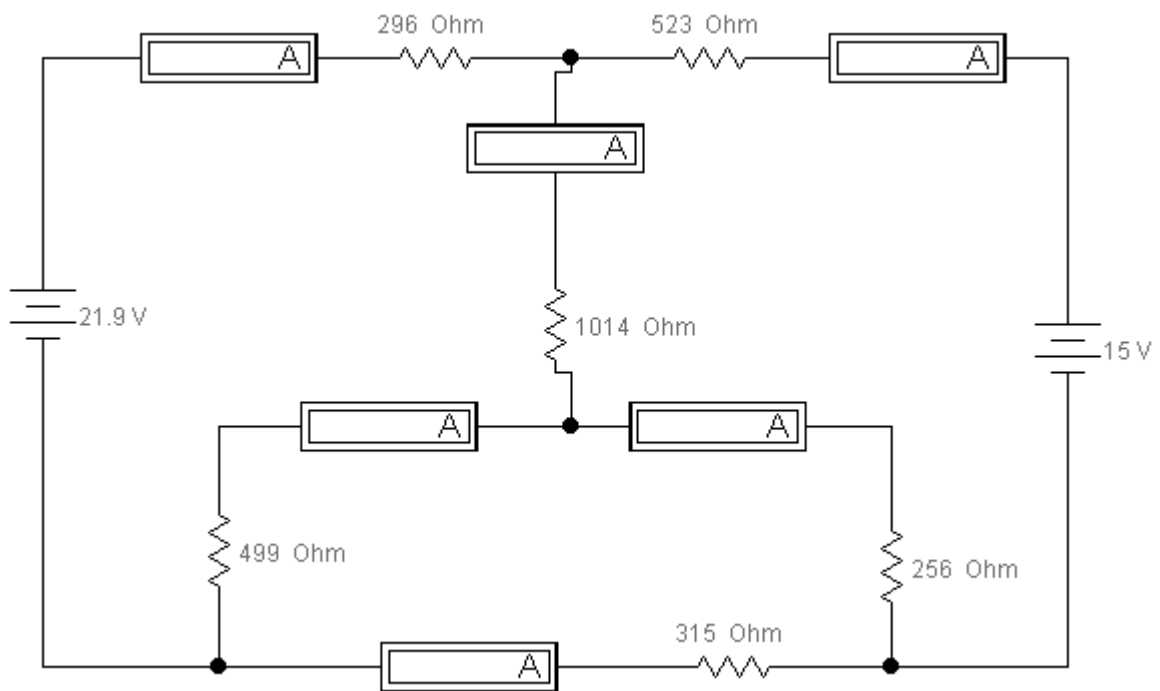


Рисунок 4.2б – Схема в программе Electronics Workbench

Таблица 4.1 – Значение токов в ветвях схемы

Наименование	$U_1, В$	$U_2, В$	$I_1, мА$	$I_2, мА$	$I_3, мА$	$I_4, мА$	$I_5, мА$	$I_6, мА$
Экспериментальные данные								
Расчетные данные	X	X						

5. При помощи омметра измерить сопротивление резисторов  $R_1 \dots R_6$ . Данные занести в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Сопротивления резисторов

$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$R_3, Ом$	$R_4, Ом$	$R_5, Ом$	$R_6, Ом$

6. Считая эдс источников равными их напряжениям  $U_1$  и  $U_2$  и используя данные таблицы 4.2, рассчитать значения токов в ветвях цепи (рисунок 4.2 а) методом контурных токов. Результаты расчета занести в таблицу 4.1.
7. Сравнить расчетные и экспериментальные данные. Составить уравнение баланса мощностей для электрической цепи, используя формулы  $P_i = I_i^2 * R_i$  и  $P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6$ .

### 4.3 Контрольные вопросы

1. Какова необходимость применения метода контурных токов?
2. Какой ток называется контурным? Сколько контурных токов необходимо определить для расчета электрической цепи данным методом?
3. Охарактеризуйте порядок расчета сложных электрических цепей методом контурных токов.
4. Каким образом определяются действительные токи ветви используемой схемы по значениям контурных токов?
5. Опишите порядок расчета токов в ветвях электрической цепи, предложенной преподавателем.

## Лабораторная работа № 5

### Экспериментальная проверка метода непосредственного применения законов Кирхгофа для расчета сложной электрической цепи постоянного тока

Цель работы: изучение правил расчета сложной электрической цепи постоянного тока методом непосредственного применения законов Кирхгофа и ее экспериментальное исследование.

#### 5.1 Теоретическая часть

Любая ветвь электрической цепи постоянного тока, из каких бы элементов она ни состояла, может быть приведена путем преобразования к ветви, содержащей только два элемента: активный, с параметром  $E$  (эдс), и пассивный с сопротивлением  $R$ .

Сложной электрической цепью называется цепь, содержащая две и более ветвей с активными элементами (источниками электрической энергии).

Анализ сложной электрической цепи, при известной конфигурации цепи и параметрах составляющих ее элементов ( $E$  и  $R$ ), сводится к нахождению токов и напряжений во всех ветвях, а также мощностей, подводимых к отдельным участкам цепи. Он может быть проведен экспериментально или решением уравнений электрического состояния цепи, составленных на основании 1-го и 2-го законов Кирхгофа.

Уравнение электрического состояния токов для узла – 1-ый закон Кирхгофа – является следствием закона сохранения заряда, согласно которому в узле заряд одного знака в любой момент времени не может ни накапливаться, ни убывать. Данный закон формулируется следующим образом: сумма токов, входящих в узел электрической цепи, равна сумме токов, выходящих из этого узла, или – алгебраическая сумма токов в узле равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0. \quad (5.1)$$

В этом уравнении токи, входящие в узел, берутся с одним знаком, выходящие из узла – с противоположным.

Уравнение электрического состояния контура – 2-й закон Кирхгофа – является следствием закона сохранения энергии, согласно которому изменение потенциала в замкнутом контуре равно нулю. Определяется оно путем суммирования напряжений на отдельных участках контура с учетом их знаков. Формулируется 2-й закон Кирхгофа следующим образом: алгебраическая сумма падений напряжений на сопротивлениях контура равна алгебраической сумме эдс

источников, входящих в данный контур:

$$\sum_{k=1}^n U_k = \sum_{i=1}^m E_i, \quad (5.2)$$

где  $n$  – число пассивных элементов контура,  
 $m$  – число источников ЭДС в контуре.

В этом уравнении напряжения и эдс берут со знаком «+», если их направление совпадает с произвольно выбранным направлением обхода контура, и со знаком «-», если их направления противоположны направлению обхода. Если падение напряжения на каждом участке выразить произведением  $U = I \cdot R$ , то (5.2) можно записать в виде

$$\sum_{k=1}^n I_k \cdot R_k = \sum_{i=1}^m E_i. \quad (5.3)$$

Используем схему (рисунок 5.1) контура сложной электрической цепи постоянного тока для составления уравнений по законам Кирхгофа.

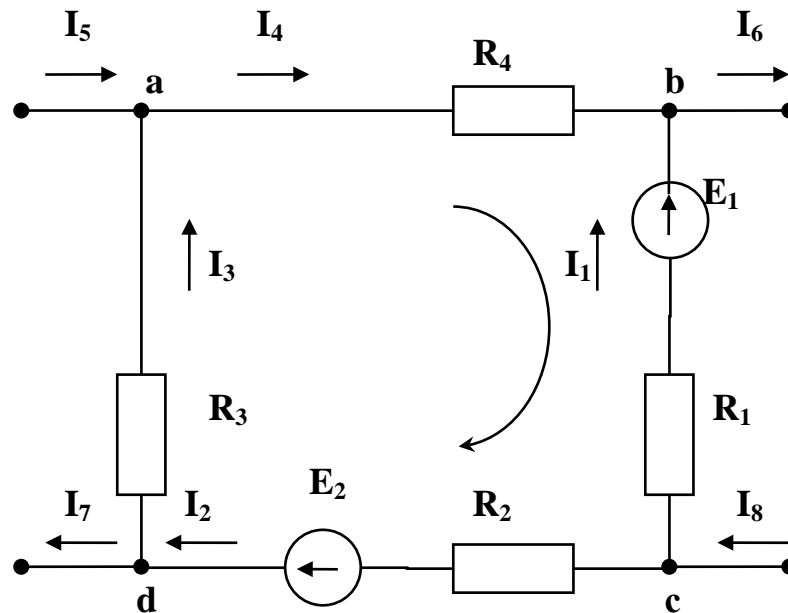


Рисунок 5.1 – Контур сложной электрической цепи

Запишем уравнение по 1-му закону Кирхгофа для узла  $a$ :

$$I_5 + I_3 - I_4 = 0;$$

уравнение по 2-му закону Кирхгофа для контура  $abcd$ , приняв направление об-

хода контура совпадающим с направлением вращения часовой стрелки:

$$-E_1 + E_2 = -I_1 * R_1 + I_2 * R_2 + I_3 * R_3 + I_4 * R_4.$$

Для сложной цепи постоянного тока используется несколько методов, каждый из которых основан на применении законов Кирхгофа. Рассмотрим один из методов – метод непосредственного применения законов Кирхгофа.

При использовании данного метода применяют следующий порядок расчета:

1. По возможности упрощают рассчитываемую схему, заменяя имеющиеся последовательно или параллельно соединенные резисторы одним эквивалентным.

2. Указывают на схеме известные направления эдс источников.

3. Т.к. токи неизвестны, предварительно произвольно выбирают их положительные направления и указывают их на схеме.

4. Составляют уравнения по 1-му и 2-му законам Кирхгофа. Общее число уравнений должно быть равно количеству неизвестных, т.е. количеству токов в ветвях схемы. Если цепь содержит  $m$  ветвей, то для решения задачи необходимо составить систему из  $m$  уравнений. Эти уравнения должны быть независимыми, т.е. ни одно из них не должно быть следствием других.

По 1-му закону Кирхгофа составляют  $(n-1)$  уравнение, где  $n$  – количество узлов в схеме (в случае составления  $n$  уравнений одно из них будет являться следствием суммирования остальных).

По 2-му закону Кирхгофа составляют  $m-(n-1)$  уравнений для независимых контуров схемы. Независимым считается контур, включающий в себя хотя бы одну ветвь, не принадлежащую другим контурам.

5. Решая полученную систему уравнений известными математическими методами, находят неизвестные токи ветвей.

Если в результате какие-то токи получились со знаком « - », то это значит, что их действительные направления противоположны выбранным.

Проверкой правильности расчета является составление уравнения баланса мощностей, выделяемых источниками эдс и потребляемых приемниками:

$$\sum_{i=1}^k E_i * I_i = \sum_{i=1}^p I_i^2 * R_i. \quad (5.4)$$

В данном уравнении, если направления эдс и тока, действующих в ветви, совпадают, их произведение берут со знаком « + » (источник работает в режиме генератора), а если не совпадают, то источник эдс потребляет энергию (работает в режиме приемника), и в этом уравнении будет знак « - ».

Например, для электрической цепи при указанных положительных направлениях эдс, токов и направлениях обходов контуров независимые уравнения получим следующим образом (рисунок 5.2):



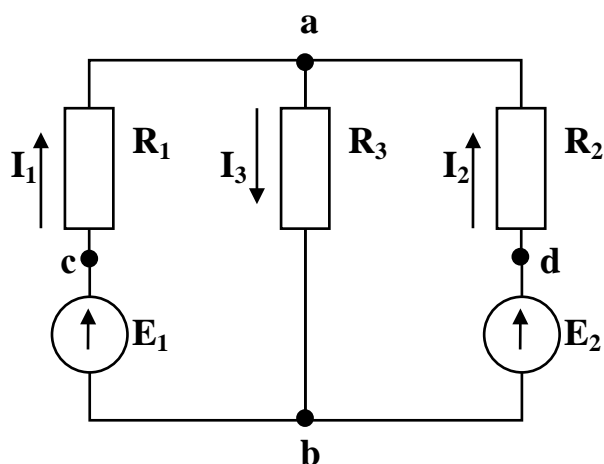


Рисунок 5.2 – Сложная электрическая цепь

Т.к. схема содержит  $m = 3$  ветвей и  $n = 2$  узлов, то составим систему из 3-х уравнений, состоящую из 1-го уравнения по 1-му закону Кирхгофа и 2-х уравнений по 2-му закону Кирхгофа:

- 1) узел а  $I_1 + I_2 = I_3$ ;
- 2) контур abc  $E_1 = I_1 * R_1 + I_3 * R_3$ ;
- 3) контур adb  $E_2 = I_2 * R_2 + I_3 * R_3$ .

Решая совместно эти уравнения, можно определить величины и направления токов в ветвях схемы.

### 5.2 Порядок выполнения работы

1. Выбрать произвольно из комплекта элементов наборного поля пять резисторов  $R_1 \dots R_5$ .
2. Собрать схему по заданию преподавателя на стенде УИЛС-1 (рисунок 5.3 а) либо на экране монитора компьютера в программе Electronics Workbench (рисунок 5.3 б), состоящую из источников нерегулируемого постоянного напряжения  $U_1$  и регулируемого  $U_2$ , резисторов  $R_1 \dots R_5$ , вольтметров  $V_1$  и  $V_2$  и амперметров  $A_1 \dots A_5$ .
3. Установив значение напряжения регулируемого источника  $U_2$  в пределах 10...20 В и измерив напряжение  $U_1$ , записать данные в таблицу 5.1.

Таблица 5.1 – Значение токов в ветвях схемы

Наименование	$U_1, В$	$U_2, В$	$I_1, мА$	$I_2, мА$	$I_3, мА$	$I_4, мА$	$I_5, мА$
Экспериментальные данные		15					
Расчетные данные	X	X					

- Измерить значения токов и занести в таблицу 5.1. При занесении данных в таблицу 5.1 учесть направление токов (рисунок 5.3 а).
- При помощи омметра измерить сопротивление резисторов  $R_1 \dots R_5$ . Данные занести в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 – Сопротивления резисторов

$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$R_3, \text{ Ом}$	$R_4, \text{ Ом}$	$R_5, \text{ Ом}$

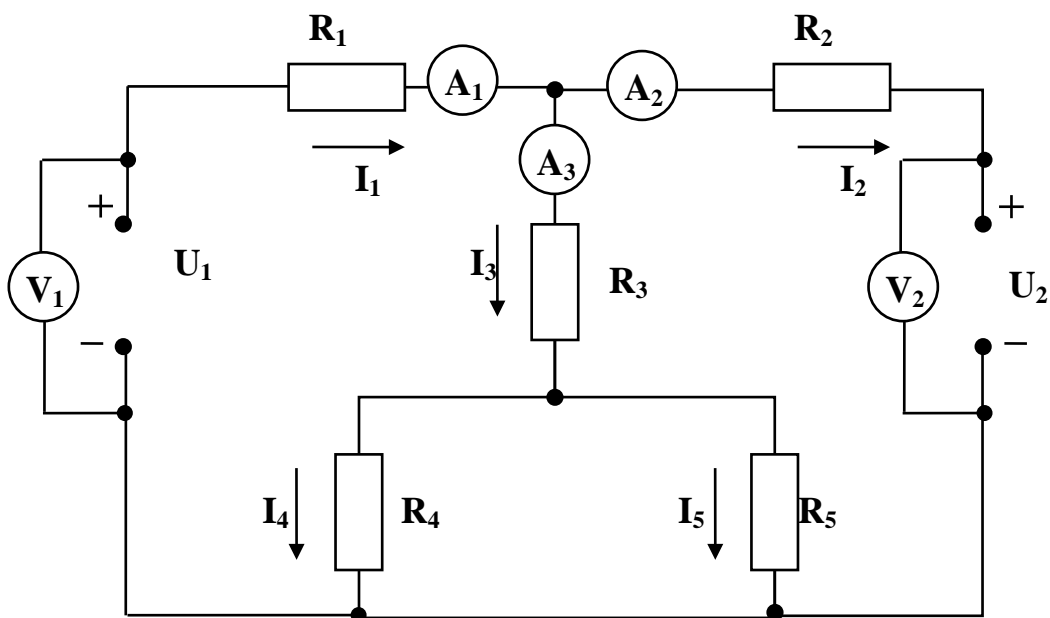


Рисунок 5.3 а – Схема на стенде УИЛС-1

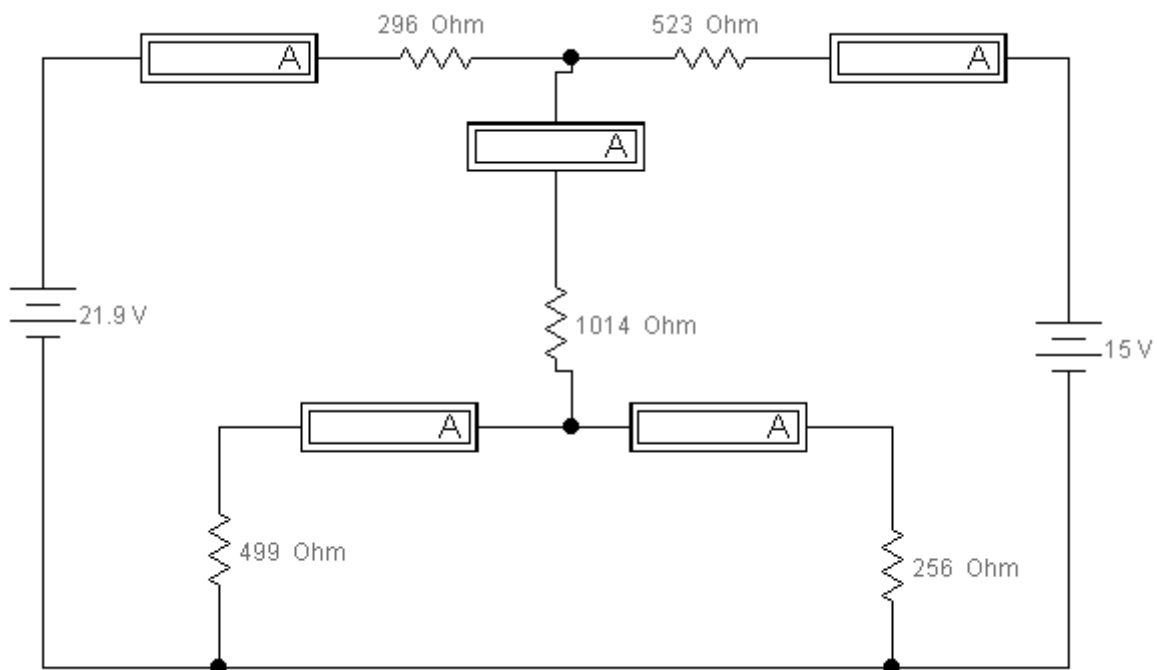


Рисунок 5.3 б – Схема в программе Electronics Workbench

6. Считая ЭДС источников равными их напряжениям  $U_1$  и  $U_2$  и используя данные таблицы 5.2, рассчитать значения токов в ветвях цепи (рисунок 5.3) методом непосредственного применения законов Кирхгофа. Результаты расчета занести в таблицу 5.1.
7. Сравнить расчетные и экспериментальные данные. Составить уравнение баланса мощностей для электрической цепи, представленной на рисунке 5.3.

### 5.3 Контрольные вопросы

1. Какая электрическая цепь называется сложной? Из каких элементов и частей она состоит?
2. В чем заключается и как проводится расчет сложной электрической цепи?
3. Сформулируйте 1-й и 2-й законы Кирхгофа. Приведите пример их использования в расчетах электрических цепей.
4. Опишите порядок расчета сложной электрической цепи методом непосредственного применения законов Кирхгофа.
5. В чем заключается независимость уравнений, составляемых для расчета сложной электрической цепи? Что такое независимый контур схемы?
6. Что такое баланс мощностей электрической цепи? Как составляется уравнение баланса мощностей?
7. Составьте уравнения по законам Кирхгофа для предложенной преподавателем схемы электрической цепи.

## Лабораторная работа № 6

### Исследование явления резонанса напряжений

Цель работы: исследование режимов работы цепи переменного тока, содержащей последовательное соединение резистивного, индуктивного и емкостного элементов.

#### 6.1 Теоретическая часть

Рассмотрим цепь, в которой последовательно включены *активное сопротивление*  $r$ , *индуктивность*  $L$  и *емкость*  $C$  (рисунок 6.1). Такую цепь называют последовательным колебательным контуром. Пусть она подключена к источнику синусоидального напряжения, тогда в ней будет протекать синусоидальный ток  $i = I_m \sin \omega t$ , одинаковый на всех участках цепи. При этом мгновенное значение напряжения всей цепи согласно второму закону Кирхгофа рав-

но алгебраической сумме мгновенных значений напряжений на отдельных элементах цепи:

$$\begin{aligned}
 u &= u_r + u_L + u_C = r \cdot i + L \frac{\partial i}{\partial t} + \frac{1}{C} \int i \cdot dt = r \cdot I_m \cdot \sin \omega t + \\
 &+ \omega L \cdot I_m \cdot \sin(\omega t + 90^\circ) + \frac{1}{\omega C} \cdot I_m \cdot \sin(\omega t - 90^\circ) = \quad (6.1) \\
 &= U_{mr} \cdot \sin \omega t + U_{mL} \cdot \sin(\omega t + 90^\circ) + U_{mC} \cdot \sin(\omega t - 90^\circ)
 \end{aligned}$$

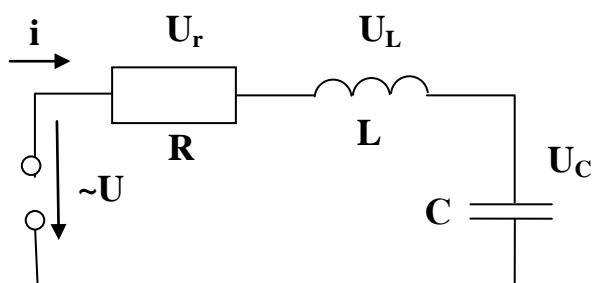


Рисунок 6.1 – Схема резонанса напряжений

В соответствии с уравнением (6.1) построим векторную диаграмму. За исходный вектор (ось абсцисс) возьмём вектор *амплитуды тока*  $I_m$  (рисунок 6.2). Вектор *амплитуды напряжения на индуктивном элементе*  $U_{mL} = \omega L I_m$  будет опережать вектор тока на  $90^\circ$ , а вектор *амплитуды напряжения на емкостном элементе*  $U_{mC} = I_m / \omega C$  – отстает от вектора тока на  $90^\circ$ , т.е. векторы  $U_{mL}$  и  $U_{mC}$  будут направлены противоположно (ось ординат).

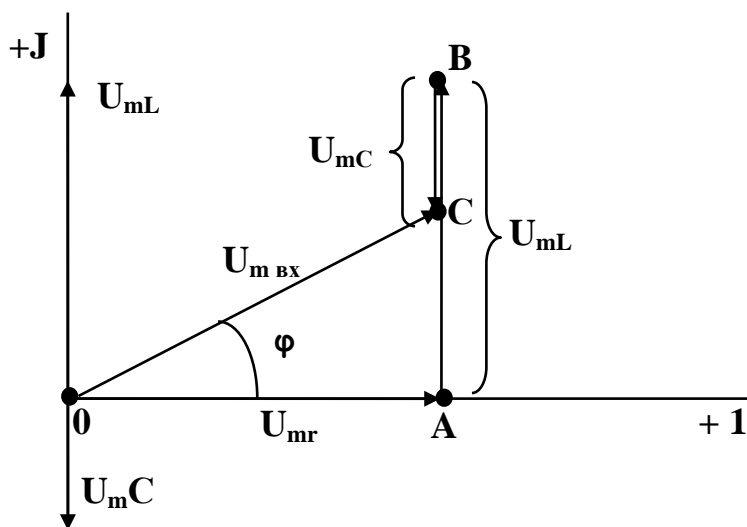


Рисунок 6.2 – Векторная диаграмма

Вектор *амплитуды напряжения на активном сопротивлении*  $U_{mr} = r \cdot I_m$  будет сонаправлен с вектором тока (вектор OA). Длина вектора OA соответствует величине напряжения на активном элементе – резисторе  $r$  (рисунок 6.1). От точки A откладывают в направлении оси  $U_{mL}$  (вверх) вектор  $U_{mL}$  (вектор AB), длина которого соответствует величине напряжения на реактивном элементе – индуктивности  $L$ . От точки B откладывают в направлении оси  $U_{mC}$  (вниз) вектор  $U_{mC}$  (вектор BC), длина которого соответствует величине напряжения на другом реактивном элементе – емкости  $C$ . Таким образом, построены три вектора напряжения для элементов цепи. Соединив начало первого вектора с концом последнего, получим результирующий вектор  $U_m$  (вектор OC), характеризующий напряжение на источнике  $\sim U$ . Угол  $\varphi$  показывает, на сколько вектор результирующего напряжения  $U_m$  отстает или опережает вектор тока  $I_m$  (*угол сдвига фаз* между током и напряжением) и определяется по формулам:

$$\varphi = \arccos \frac{r}{Z} = \arcsin \frac{X}{Z} = \operatorname{arctg} \frac{X}{r} = \operatorname{arctg} \frac{U_L - U_C}{U_r} \quad (6.2)$$

Из векторной диаграммы следует, что  $\vec{U}_m = \vec{U}_{mr} + \vec{U}_{mL} + \vec{U}_{mC}$ .

Амплитуда общего напряжения  $U_m$  в соответствии с векторной диаграммой будет равна:

$$U_m = \sqrt{U_{mr}^2 + (U_{mL} - U_{mC})^2}, \quad (6.3)$$

откуда

$$U_m = \sqrt{(I_m \cdot r)^2 + (\omega L I_m - \frac{1}{\omega C} \cdot I_m)^2} = I_m \sqrt{r^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}. \quad (6.4)$$

Величины  $\omega L$  и  $1/\omega C$ , имеющие размерность сопротивления (Ом), получили название *индуктивного*  $X_L$  и *емкостного*  $X_C$  *сопротивлений* соответственно,  $X = X_L - X_C$  – расчётная величина, получившая название *реактивного сопротивления цепи*.

$$X_L = \omega L = 2\pi f L; \quad X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (6.5)$$

Т.к. действующие значения синусоидального тока  $I$  и напряжения  $U$  в  $\sqrt{2}$  раз меньше амплитудных, то из выражения (6.4) для действующих значений тока и напряжения следует:

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}} = \frac{U}{Z}. \quad (6.6)$$

Это выражение аналогично закону Ома для цепи постоянного тока. Оно даёт возможность узнать модуль тока, но не определяет величину сдвига фаз между напряжением и током. Знаменатель

$$Z = \sqrt{r^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (6.7)$$

представляет собой *модуль полного сопротивления цепи*.

**При равенстве индуктивного сопротивления ёмкостному ( $X_L = X_C$ ) возникает резкое возрастание амплитуды тока – резонанс напряжений:**

$$X_L = X_C; \quad \text{èèè} \quad \omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (6.8)$$

Следовательно:

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{U}{r}. \quad (6.9)$$

т.е. сопротивление цепи минимально, модуль тока достигает максимального значения. При этом  $\cos\varphi = 1$ , ток совпадает по фазе с напряжением, а нагрузка цепи имеет активный характер.

При резонансе на ёмкостном и индуктивном элементах напряжения окажутся равными по величине и противоположными по фазе, и каждое из них может превышать подведенное напряжение. Напряжение на конденсаторе и катушке индуктивности во столько раз больше подведенного напряжения, во сколько раз реактивные сопротивления элементов  $L$  и  $C$  больше активного:

$$\begin{aligned} U_r &= r \cdot I = r \cdot (U/r) = U \\ U_L &= X_L \cdot I = X_L \cdot (U/r) = (X_L/r) \cdot U \\ U_C &= X_C \cdot I = X_C \cdot (U/r) = (X_C/r) \cdot U \end{aligned} \quad (6.10)$$

Так как условием резонанса является равенство  $\omega L = 1/\omega C$ , то для заданных двух величин из трёх ( $\omega$ ,  $L$ ,  $C$ ) резонанс может быть получен подбором третьей.

Таким образом, условие резонанса напряжений:  $X_L = X_C$ ; следствие:

- 1)  $|U_{mL}| = |U_{mC}|$ ; 2)  $U_{mr} = U_m$ ; 3)  $Z = r$ ; 4)  $\cos \varphi = 1$ ;
- 5)  $\varphi = 0^\circ$ ; 6)  $|I_m| \rightarrow \max$ .

## 6.2 Порядок выполнения работы

1. По заданным преподавателем значениям емкости  $C$  (индуктивности  $L$ ) рассчитать значение индуктивности  $L$  (емкости  $C$ ), необходимой для выполнения условия резонанса напряжений на частоте  $f = 4$  кГц, а также значение активного сопротивления, необходимое для выполнения следующего условия  $U_L = U_C > U_r$ , используя формулы (6.5) и (6.8).

2. Собрать на наборном поле стенда схему, представленную на рисунке 6.3., используя элементы с требуемыми номиналами из блоков переменного сопротивления, индуктивности, емкости ( $R_4, L_4, C_4$ ).

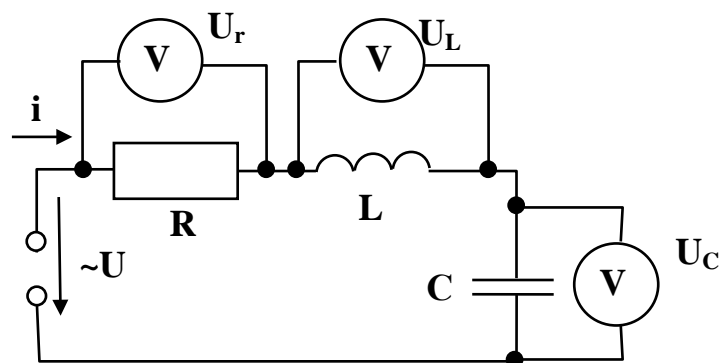


Рисунок 6.3а – Схема на стенде УИЛС-1

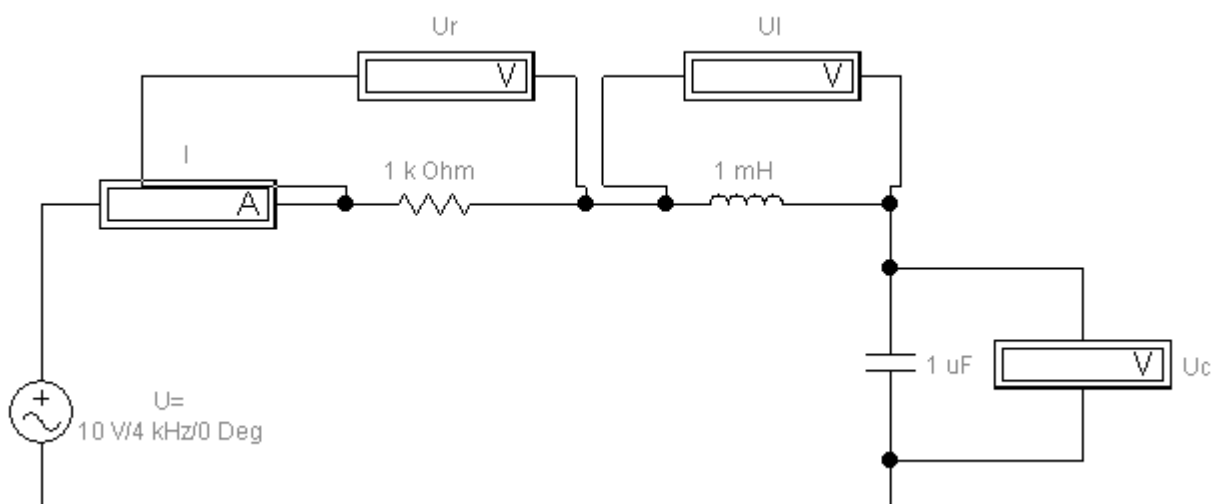


Рисунок 6.3б – Схема для сборки в программе Electronics Workbench

3. Включить питание стенда, установить на входе цепи напряжение 10-15 В и поддерживать его постоянным при выполнении работы. Ручку регулировки частоты «плавно» вывести в крайнее правое положение.

4. Изменяя с помощью переключателя частоту напряжения от нуля до 8 кГц (с интервалом 1 кГц), записать в таблицу 6.1 значения всех измеряемых величин ( $U$ ,  $U_r$ ,  $U_L$ ,  $U_C$ ,  $I$ ) для каждого нового значения частоты.

5. Используя экспериментальные данные, определить для каждого опыта:

- величину полного сопротивления цепи  $Z$ ,
- емкостное сопротивление  $X_C$ ,
- индуктивное сопротивление  $X_L$ ,
- $\cos \varphi$ .

6. По результатам измерений и вычислений построить в масштабе:

- три векторные диаграммы токов и напряжений для случаев

$$X_L > X_C; \quad X_L < X_C; \quad X_L = X_C;$$

- зависимости:

- 1)  $I = f(f)$ ; 2)  $U = f(f)$ ; 3)  $U_L = f(f)$ ; 4)  $U_C = f(f)$ ;
- 5)  $U_r = f(f)$ ; 6)  $Z = f(f)$ ; 7)  $X_C = f(f)$ ; 8)  $X_L = f(f)$ ;
- 9)  $\cos \varphi = f(f)$ .

Зависимости четырех разных напряжений от частоты строятся в одних осях координат.

Масштаб выбрать таким образом, чтобы каждая векторная диаграмма и каждый график занимали минимум половину тетрадного листа.

Полученные результаты объяснить.

Таблица 6.1.

№ п/п	Экспериментальные данные						Расчётные данные			
	$f$ , кГц	$U$ , В	$U_r$ , В	$U_L$ , В	$U_C$ , В	$I$ , мА	$Z$ , Ом	$X_L$ , Ом	$X_C$ , Ом	$\cos \varphi$
1.										
...										
...										
8.										

### 6.3 Контрольные вопросы

1. Что такое  $L$ ,  $C$ ,  $r$ ? Как находятся их сопротивления? Какие реактивные элементы Вы знаете?

2. Как построить диаграмму напряжений для цепи с последовательным соединением  $r$ ,  $L$  и  $C$ ?

3. По каким данным электрической цепи можно вычислить  $\cos \varphi$ ?

4. В каких цепях и при каком условии наблюдается резонанс напряжений? Каковы признаки наличия резонанса напряжений в цепи?



5. Как получить резонанс напряжений при постоянной частоте тока?
6. Почему в цепи с последовательным соединением  $r$ ,  $L$  и  $C$  напряжение на входе цепи не равно арифметической сумме напряжений на отдельных элементах цепи?
7. Чему равен  $\cos \varphi$  при резонансе напряжений?

## Лабораторная работа № 7

### Исследование трехфазной цепи при соединении фаз источника и приемника звездой

Цель работы: изучить особенности работы и свойства трехфазной цепи при соединении звездой фаз источника и приемника.

#### 7.1 Теоретическая часть

Трехфазная электрическая цепь может быть представлена как *совокупность трех однофазных цепей, в которых действуют э.д.с. одной и той же частоты, сдвинутые относительно друг друга на угол  $120^\circ$* . Эти однофазные составляющие называются фазами. *Начала фаз генератора* обозначаются буквами  $A, B, C$ , *нагрузки* –  $a, b, c$ . *Концы фаз генератора* обозначаются буквами  $X, Y, Z$ , *нагрузки* –  $x, y, z$ .

При соединении звездой концы фаз генератора соединяются в общую точку  $O$ , концы фаз нагрузки – в общую точку  $O'$ . Эти точки получили название нулевых (нейтральных) точек. Провода, соединяющие начала фаз генератора и нагрузки ( $A-a$ ), ( $B-b$ ), ( $C-c$ ) называются линейными, а провод, соединяющий точки  $O$  и  $O'$  – нулевым (нейтральным) проводом.

Схема соединения имеет вид (рисунок 7.1) :

Напряжение на фазах генератора  $U_A, U_B, U_C$  и нагрузки  $U_a, U_b, U_c$ , а также токи в них принято называть фазными. Напряжения между линейными проводами  $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$  и токи в линейных проводах называются линейными.

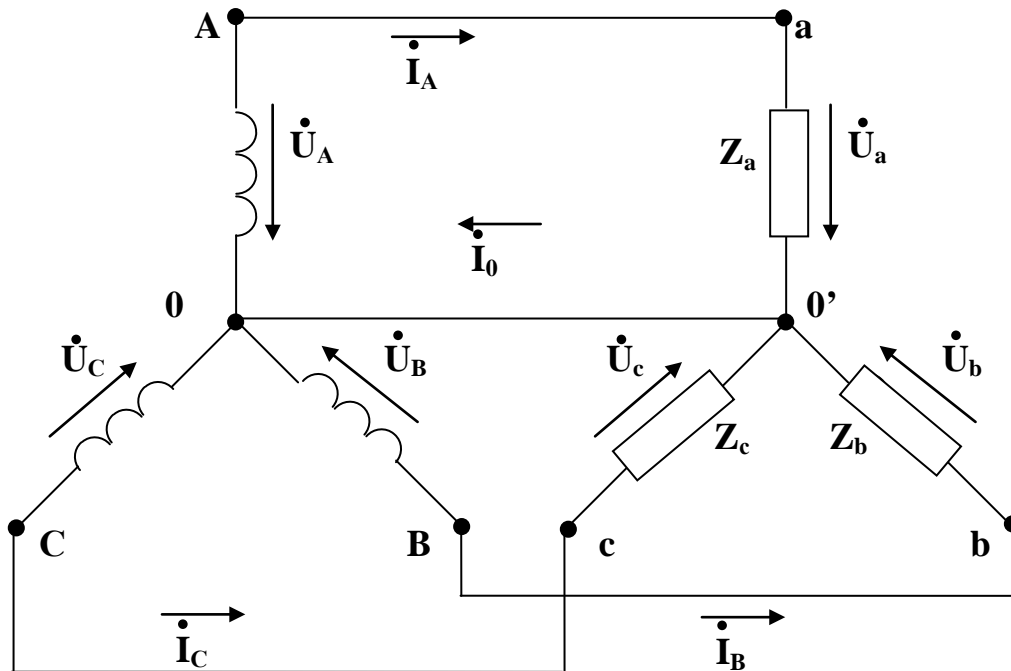


Рисунок 7.1 – Схема соединения звездой

Из схемы (рисунок 7.1) следует, что :

$$I_{\dot{E}} = I_{\dot{O}} \quad (7.1)$$

По первому закону Кирхгофа для узла 0' можем записать:

$$\dot{I}_O = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C \quad (7.2)$$

Если принять сопротивление проводов равным нулю, то фазные напряжения нагрузки будут равны фазным напряжениям генератора:

$$\dot{U}_A = \dot{U}_a; \quad \dot{U}_B = \dot{U}_b; \quad \dot{U}_C = \dot{U}_c. \quad (7.3)$$

Отсюда фазные токи будут определяться фазными напряжениями генератора и, в общем случае, полным сопротивлением фаз приемника:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_a}{Z_a}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_b}{Z_b}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_c}{Z_c}. \quad (7.4)$$

где  $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$  - комплексные действующие значения фазных напряжений;

$Z_a, Z_b, Z_c$  - полные сопротивления фаз в комплексной форме.

Соединение по рисунку 7.1 обеспечивает независимую работу фаз, т.е. изменение нагрузки в одной из фаз не оказывает влияния на режим работы других фаз. Система в этом случае называется *четырёхпроводной* и векторные диаграммы для различных режимов нагрузки имеют следующий вид:

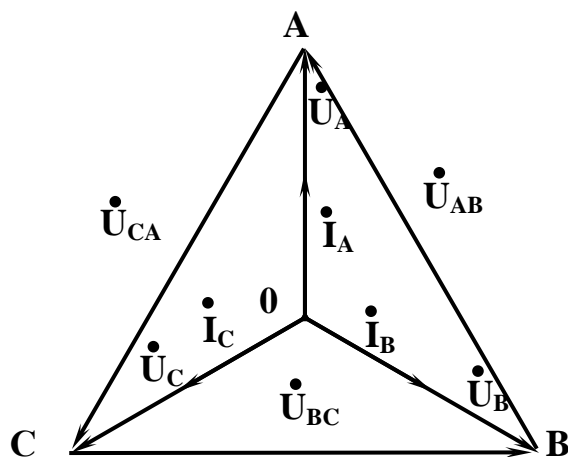


Рисунок 7.2 – Векторная диаграмма трех-, четырехпроводной схемы подключения с одинаковой нагрузкой фаз

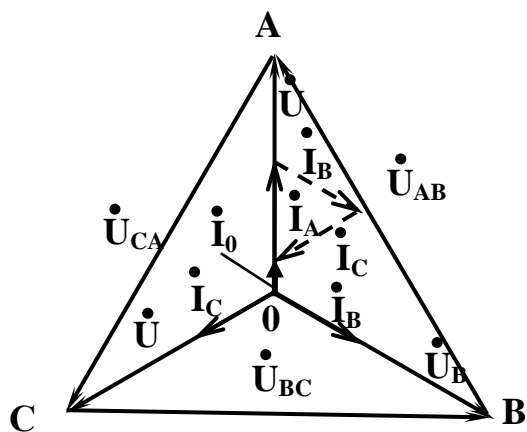


Рисунок 7.3 – Векторная диаграмма четырехпроводной схемы подключения с неодинаковой нагрузкой фаз

Для построения векторных диаграмм использованы выражения (7.1) – (7.4).

Векторы линейных напряжений связаны с векторами фазных напряжений следующими соотношениями:

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_a - \dot{U}_b; \quad \dot{U}_{bc} = \dot{U}_b - \dot{U}_c; \quad \dot{U}_{ca} = \dot{U}_c - \dot{U}_a. \quad (7.5)$$

Из равнобедренного треугольника, образованного двумя фазными и одним линейным напряжениями следует, что

$$U_{\dot{E}} = \sqrt{3} \cdot U_{\dot{\delta}} \quad (7.6)$$

При изменении нагрузок изменяются токи только тех фаз, где произошло изменение. При этом появляется ток в нулевом проводе. При равномерной нагрузке ток  $I_0 = 0$ . Следовательно, в этом режиме отпадает необходимость в нулевом проводе и система будет являться трехпроводной.

Эта система может использоваться только при симметричной нагрузке. При изменении сопротивления хотя бы в одной фазе, между точками  $O - O'$  появляется напряжение, определяемое по методу 2-х узлов.

$$\dot{U}_{oo'} = \frac{\dot{U}_a \cdot Y_a + \dot{U}_b \cdot Y_b + \dot{U}_c \cdot Y_c}{Y_a + Y_b + Y_c} \quad (7.7)$$

где  $Y_a, Y_b, Y_c$  - полные проводимости отдельных фаз в комплексной форме.

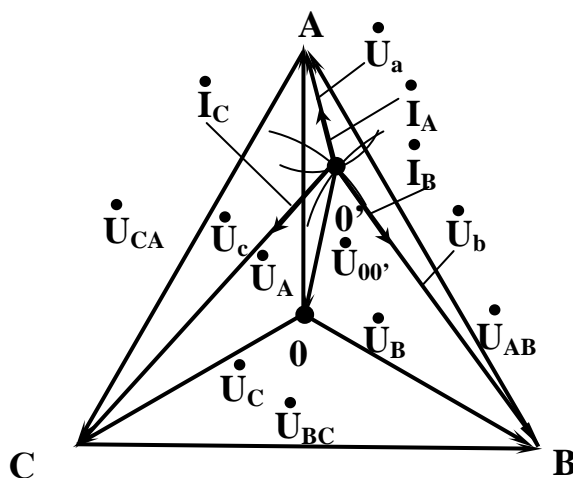


Рисунок 7.4 – Векторная диаграмма трехпроводной схемы подключения с неодинаковой нагрузкой фаз

Вследствие этого фазные напряжения нагрузки не будут равны фазным напряжениям генератора. Они будут определяться выражениями:

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{oo'} ; \quad \dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{oo'} ; \quad \dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{oo'}$$

Векторная диаграмма для трехпроводной системы при неравномерной нагрузке имеет вид изображённый на рисунке 7.4.

Несимметрия нагрузки в фазах ведет к различию фазных напряжений нагрузки, и оно может быть значительным. В случае короткого замыкания одной из фаз (например, фазы C) фазные напряжения  $\dot{U}_a$  и  $\dot{U}_b$  достигают наибольших значений, равных линейным напряжениям.

## 7.2 Порядок выполнения работы

1. Собрать схему (рисунок 7.5). В качестве нагрузок фаз  $R_a$ ,  $R_b$ ,  $R_c$  использовать имеющиеся в наборах резисторы от  $R_{01}$  до  $R_{10}$  и при необходимости блок переменных сопротивлений.

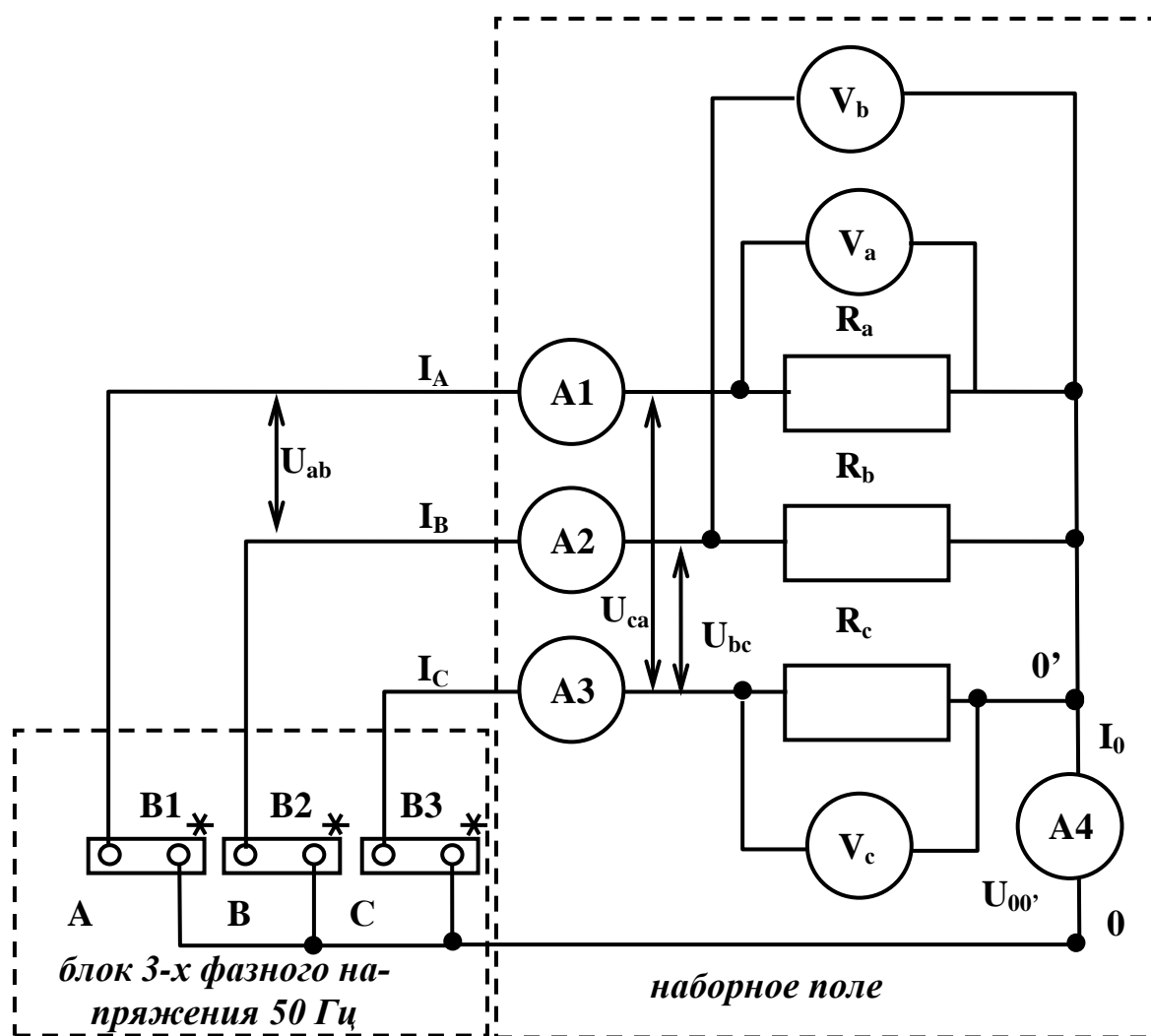


Рисунок 7.5 – Схема на стенде УИЛС-1

$B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  - переключатели напряжения.

2. Для записанных в таблицу 7.1 режимов измерить в указанных на схеме пунктиром участках цепи все обозначенные электрические величины:

$I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  – фазные (они же линейные токи),

$U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$  – линейные напряжения,

$U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$  – фазные напряжения (на резисторах  $R_a$ ,  $R_b$ ,  $R_c$ ),

$I_0$  – ток в нулевом проводе,

$U_{oo'}$  – напряжение между нулевыми точками генератора и нагрузки.

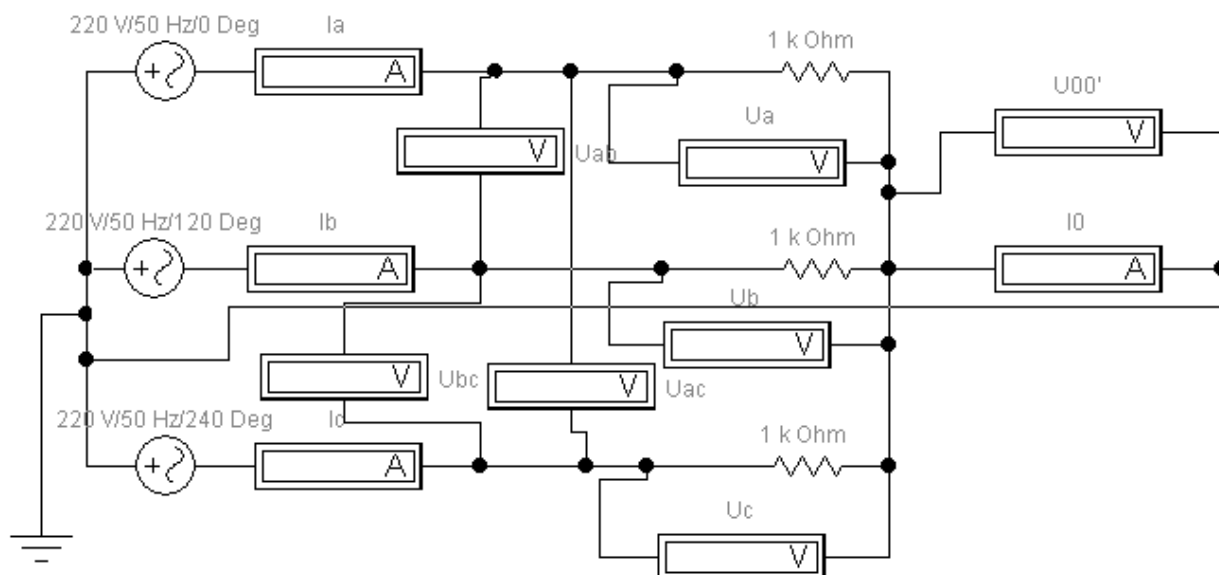


Рисунок 7.5а – Схема для сборки в программе Electronics Workbench

3. По результатам опытов построить векторные диаграммы для 3-х режимов, указанных преподавателем.

Таблица 7.1 – Экспериментальные данные

Схема	Режим	$I_A$ , mA	$I_B$ , mA	$I_C$ , mA	$I_0$ , mA	$U_a$ , В	$U_b$ , В	$U_c$ , В	$U_{ab}$ , В	$U_{bc}$ , В	$U_{ca}$ , В	$U_{00'}$ , В
4-проводная	одинаковая нагрузка											
	неодинаковая нагрузка											
	разгрузка фазы А											
3-проводная	одинаковая нагрузка				-							
	неодинаковая нагрузка				-							
	разгрузка фазы А				-							
	короткое замыкание фазы А				-							

### 7.3 Контрольные вопросы

1. Что такое трех-, четырехпроводная схема подключения?
2. Объясните назначение нулевого провода.
3. Область применения трех-, четырехпроводной схемы подключения
4. Объяснить особенности режима неравномерной нагрузки при обрыве нулевого провода.
5. Как связаны фазные и линейные токи и напряжения? Для каких рассмотренных режимов справедливо соотношение (7.1).
6. Показать на схеме фазные и линейные токи и напряжения.
7. Пояснить векторные диаграммы.

## Лабораторная работа № 8

### Исследование фильтра низких частот

Цель работы: исследовать экспериментально работу двух схем ФНЧ, снять экспериментально АЧХ фильтров, установить влияние параметров элементов фильтров на форму АЧХ, дать оценку эффективности Т- и П-образных схем.

#### 8.1 Теоретическая часть

В установках автоматики, радиотехники, телемеханики и др. часто ставится задача: из электрических сигналов, занимающих широкую полосу частот, выделить сигналы с более узкой полосой частот. Эти задачи решаются с помощью электрических частотных фильтров.

Простейшие фильтры представляют собой последовательный или параллельный колебательный контур. Однако в качестве пассивных фильтров чаще применяются четырёхполюсники, содержащие индуктивности и емкости – LC-фильтры или емкости и резисторы – RC-фильтры, а также каскадное соединение четырёхполюсников.

К электрическим фильтрам предъявляются различные, и даже противоречивые требования. В одной части полосы частот, называемой *полосой пропускания* (ПП), ослабление сигнала не должно быть меньше заданного определенного уровня. В другой части полосы частот, называемой *полосой задерживания* (ПЗ), уменьшение сигнала должно быть не меньше заданного значения.

Фильтр считается идеальным, если в пределах полосы пропускания отсутствует ослабление сигнала и фазочастотная характеристика линейная, то есть отсутствует искажение формы сигнала, а вне полосы пропускания сигналы на выходе фильтра отсутствуют.

В зависимости от диапазона частот, относящихся к полосе пропускания, различают *низкочастотные* (ФНЧ), *высокочастотные* (ФВЧ), *полосовые* (ПФ) и *заграждающие* (режекторные, ЗФ) фильтры.

Коэффициент затухания  $\alpha$  сигнала, прошедшего через фильтр, определяется выражением

$$\alpha = 20 \lg \frac{U_{\hat{A}\hat{\omega}}}{U_{\hat{A}\hat{\omega}}} (db), \quad (8.1)$$

где  $U_{ВХ}$  и  $U_{ВЫХ}$  либо амплитудные, либо действующие значения входного и выходного сигналов соответственно. Тогда для указанных идеальных фильтров частотные характеристики коэффициента затухания имеют следующий вид (рисунок 8.1).

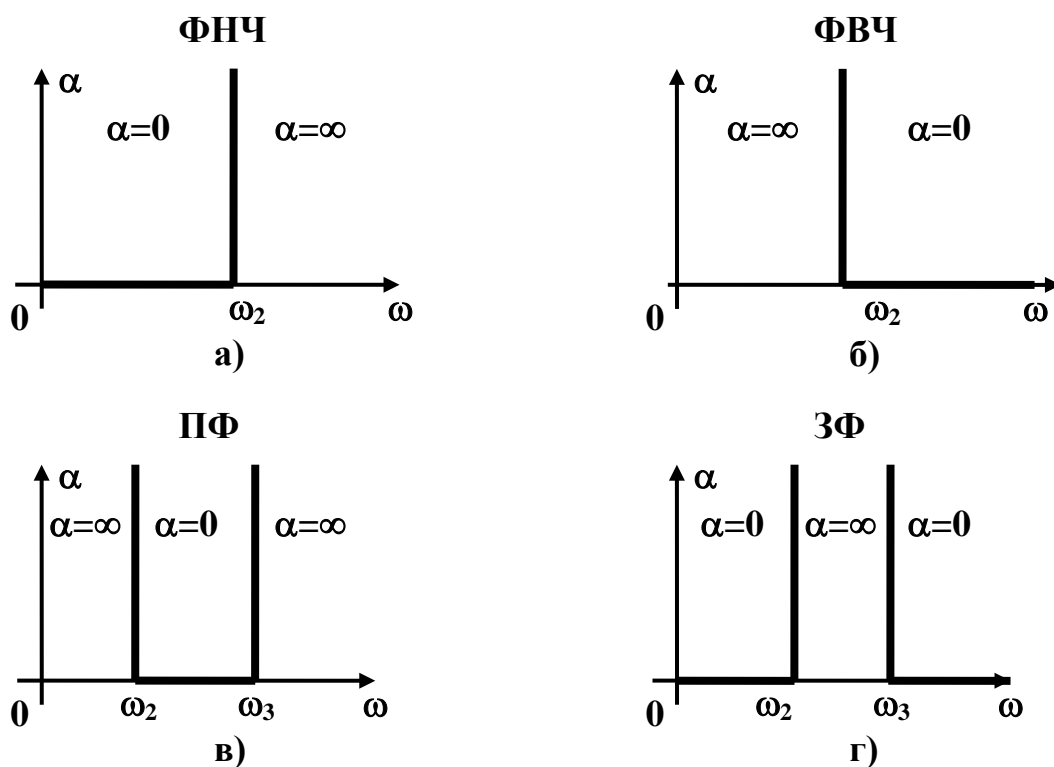


Рисунок 8.1 – Частотные характеристики коэффициента затухания

Полоса пропускания ФНЧ – от  $\omega_1 = 0$  до граничной частоты  $\omega_2 = \omega_{г}$ ; ФВЧ – от граничной частоты  $\omega_2 = \omega_{г}$  до  $\omega = \infty$ ; ПФ – от  $\omega_2 = \omega_{2г} \neq 0$  до  $\omega_3 = \omega_{3г} \neq \infty$ ; ЗФ – от  $\omega_1 = 0$  до  $\omega_2 = \omega_{2г}$  и от  $\omega_3 = \omega_{3г}$  до  $\omega \rightarrow \infty$ .

#### **Фильтр низких частот**

Возьмем фильтр, в горизонтальных плечах которого содержатся индуктивности, в вертикальных плечах – емкости (рисунок 8.2 ).



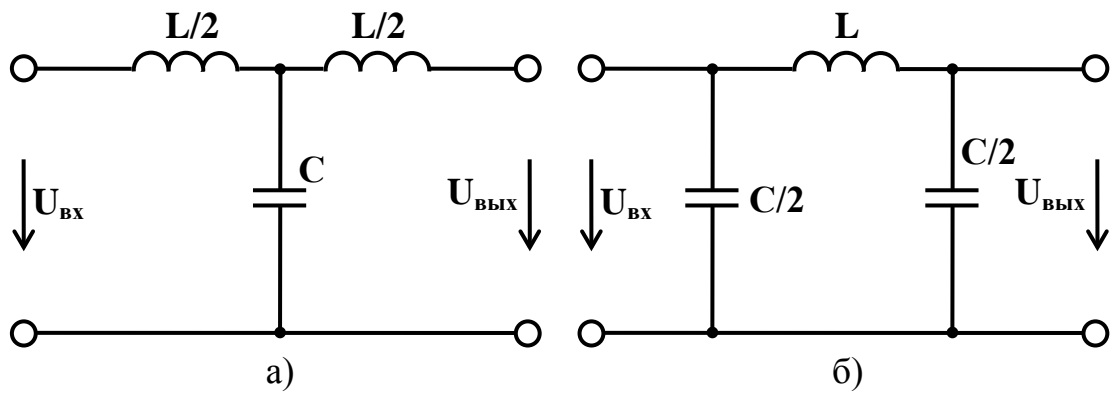


Рисунок 8.2 – Схемы фильтров низких частот:  
а) Т-образного, б) П-образного

Для Т- или П-образной схемы имеем  $x_1 \cdot x_2 = \frac{L}{C}$ . Т.е.

$$k = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (8.2)$$

Рассмотрим качественно АЧХ фильтра. На низких частотах, начиная с  $\omega = 0$ , где  $\omega = 2\pi f$ , сопротивление горизонтального плеча мало, сопротивления вертикальных плеч велики. Поэтому проходящий через фильтр сигнал будет ослабляться незначительно.

С ростом частоты входного сигнала индуктивные сопротивления увеличиваются, а емкостные – уменьшаются. Рост индуктивного сопротивления и шунтирующее действие емкостного сопротивления приводят к резкому ослаблению сигнала на выходе фильтра.

Определим полосу пропускания фильтра.

$$ch \alpha \cdot \cos \beta + j sh \alpha \cdot \sin \beta = 1 - \frac{\omega^2 LC}{2}. \quad (8.3)$$

Поскольку справа в (8.3) величина действительная, то  $ch \alpha \cdot \sin \beta = 0$ . В полосе пропускания  $\alpha = 0$ , в полосе задерживания  $\alpha \neq 0$ . поэтому в полосе пропускания  $ch \alpha = 1$  и

$$\cos \beta = 1 - \frac{\omega^2 LC}{2}. \quad (8.4)$$

Косинус изменяется в пределах от +1 до -1. Тогда нижняя граничная частота полосы пропускания  $\omega_1 = 0$ . Из (8.4)

$$\frac{\omega_2^2 LC}{2} = 2 \quad (8.5)$$

и верхняя граничная частота  $\omega_2$  (частота среза)

$$\omega_2 = \omega_{\tilde{H}\tilde{D}} = \frac{2}{\sqrt{LC}}. \quad (8.6)$$

Следовательно, полоса пропускания ФНЧ находится в пределах  
 $0 \leq \omega \leq \omega_{CP}$ .

Определим коэффициент затухания в полосе задерживания для  $\omega > \omega_{CP}$ . В ней  $\alpha \neq 0$ , тогда  $sh \alpha \neq 0$  и  $sin \beta = 0$ .  $cos \beta = +1$  или  $cos \beta = -1$ .

В первом случае  $ch \alpha = 1 - \frac{\omega^2 LC}{2}$  и для  $ch \alpha$  получается невыполнимое условие  $ch \alpha < 1$ .

Во втором случае  $ch \alpha = \frac{\omega^2 LC}{2} - 1 = \frac{2\omega^2}{\omega_{CP}^2} - 1$ , или  $ch \frac{\alpha}{2} = \frac{\omega^2}{\omega_{CP}^2}$ .

Зависимости  $\alpha$  и  $\beta$  от частоты  $\omega$  для ФНЧ представлены на рисунке 8.3.

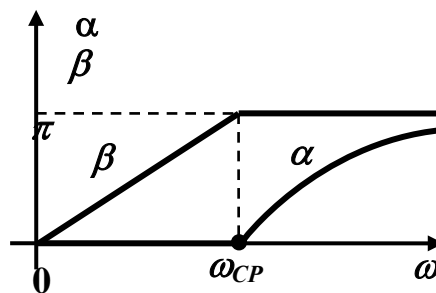


Рисунок 8.3 – Зависимости  $\alpha$  и  $\beta$  от частоты  $\omega$  для ФНЧ

Характеристическое сопротивление симметричного четырехполюсника

$$Z_C = \sqrt{\frac{\dot{A}_{12}}{\dot{A}_{21}}}. \quad (8.7)$$

Для Т-образной схемы после подстановки получаем

$$Z_{CT} = \sqrt{\dot{Z}_1 \cdot \dot{Z}_2} \cdot \sqrt{1 + \frac{Z_1}{4Z_2}}. \quad (8.8)$$

Аналогично для П-образной схемы

$$Z_{C\dot{i}} = \frac{\sqrt{\dot{Z}_1 \cdot \dot{Z}_2}}{\sqrt{1 + \frac{Z_1}{4Z_2}}}. \quad (8.9)$$

Заменяв  $Z_1$  и  $Z_2$  их значениями, получим

$$Z_{CT} = K \sqrt{1 - \frac{\omega^2}{\omega_{ND}^2}};$$

$$Z_{C\dot{i}} = \frac{K}{\sqrt{1 - \frac{\omega^2}{\omega_{ND}^2}}}. \quad (8.10)$$

Таким образом, из полученных выражений следует, что характеристические сопротивления ФНЧ зависят от частоты.

При  $\omega < \omega_{CP}$ , т.е. в пределах полосы пропускания,  $Z_{CT}$  и  $Z_{СП}$  – активные сопротивления. Они изменяются с ростом частоты от значения  $K$  до 0 у Т-образного и до  $\infty$  у П-образного фильтров. При  $\omega > \omega_{CP}$   $Z_{CT}$  и  $Z_{СП}$  – реактивные сопротивления, изменяющиеся с увеличением частоты от 0 до  $\infty$  у Т-образного и от  $\infty$  до 0 у П-образного фильтров.

Из рассмотренного следует, что добиться работы фильтра на согласованную нагрузку в широком диапазоне частот невозможно.

## 8.2 Порядок выполнения работы

1. Принять частоту среза фильтров  $f_{CP} = 4$  кГц.
2. Выбрать индуктивности номиналов  $L$  5; 10; 20; 50 мГн.
3. Для выбранных величин индуктивностей по формуле (8.6) рассчитать необходимую величину емкости  $C$  для указанной частоты среза.
4. Собрать схему Т-образного фильтра (рисунок 8.4), рассчитав величину характеристического сопротивления по формуле (8.2) и выбрав резистор номиналом  $R_H = k$ .

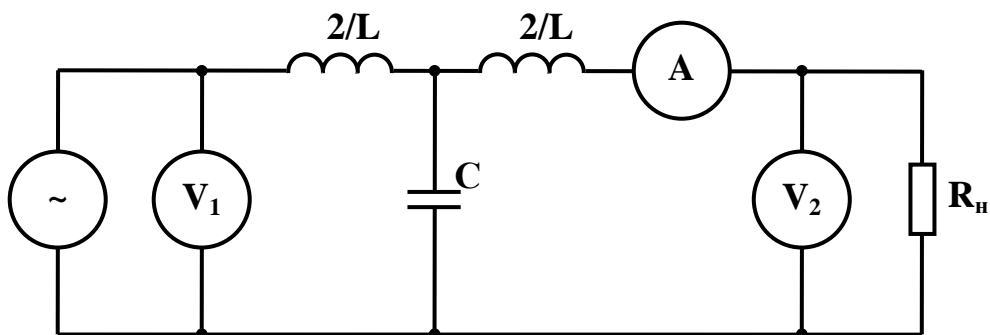


Рисунок 8.4а – Схема исследуемой цепи

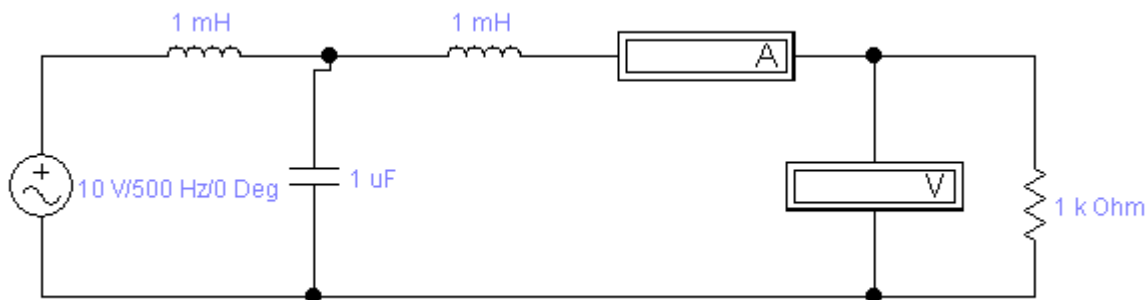


Рисунок 8.46 – Схема фильтра НЧ для сборки в программе Electronics Workbench

5. Включить стенд. Из блока переменного синусоидального напряжения подать на вход цепи напряжение 10 В частотой 0,5 кГц.

6. Изменяя частоту входного напряжения через 1 кГц от 0,5 до 8,5 кГц и поддерживая постоянную величину  $U_{вх} = 10$  В, получить значения  $U_{вых}$  и тока  $I$ , измеряемых  $V_2$  и А. Полученные данные занести в верхние строчки таблицы 8.1.

7. По полученным данным рассчитать АЧХ фильтра, используя  $A(f) = U_{вых} / U_{вх}$ .

8. Повторить опыт, изменив величину  $L$ . Данные занести в нижние строчки таблицы.

Таблица 8.1 – Экспериментальные данные

$f$ , кГц	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5
$U_{вх}$ , В									
$U_{вых}$ , В									
$I$ , мА									
$A(f)$									

9. По экспериментальным данным на одной координатной сетке построить графики зависимостей  $A(f)$  и  $I(f)$  для различных параметров фильтра, сделать выводы из полученных результатов.

10. Собрать схему П-образного ФНЧ. Емкости  $C_1$  и  $C_2$  выбрать по 0,25 мкФ. По формуле (8.6) рассчитать для  $f_{ср} = 4$  кГц необходимую величину индуктивности  $L$ , взяв ее из блока переменных индуктивностей.

11. Повторить опыт, используя емкости по 0,5 мкФ. Данные занести в таблицу, аналогичную таблице 8.1. Выполнить пункт 9.

12. По полученным результатам дать оценку эффективности работы обеих схем ФНЧ.

### 8.3 Контрольные вопросы

1. Сформулируйте определение ФНЧ.
2. Объяснить причины выбора элементов плеч фильтра.
3. Как рассчитывается частота среза?
4. Объяснить форму АЧХ ФНЧ.
5. Как влияют величины параметров плеч на форму АЧХ?
6. Объяснить причины несовпадения теоретических и экспериментальных параметров элементов плеч для заданной частоты среза.

### Лабораторная работа № 9

#### Исследование фильтра высоких частот

Цель работы: исследовать экспериментально работу двух схем ФВЧ, снять экспериментально АЧХ фильтров, установить влияние параметров элементов фильтров на форму АЧХ, дать оценку эффективности Т- и П-образных схем.

#### 9.1 Теоретическая часть

##### **Фильтр высоких частот**

Рассмотрим фильтр, содержащий в горизонтальных плечах конденсаторы, а в вертикальных – индуктивности (рисунок 9.1 а, б).

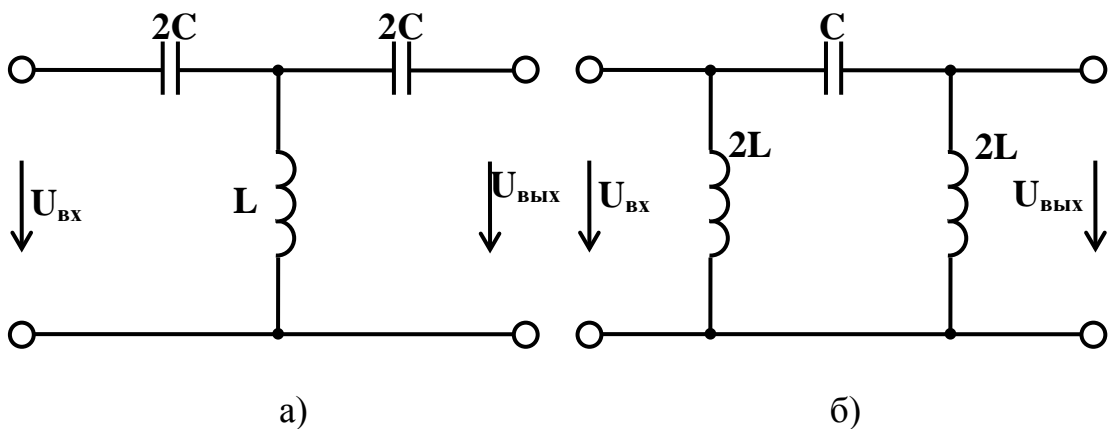


Рисунок 9.1 – Схемы фильтров низких частот:  
а) Т-образного, б) П-образного

Согласно обозначениям  $Z_1 = \frac{1}{j\omega C}$  и  $Z_2 = j\omega L$ , тогда

$$\frac{Z_1}{4Z_2} = -\frac{\frac{1}{\omega C}}{4\omega L} = -\frac{1}{4\omega^2 LC}. \quad (9.1)$$

Используя (9.1), получим значения граничных частот полосы пропускания.

$$-\frac{1}{4\omega^2 LC} = -1, \quad (9.2)$$

$$\omega_1 = \omega_{CP} = \frac{1}{2\sqrt{LC}}. \quad (9.3)$$

$$-\frac{1}{4\omega^2 LC} = 0; \quad \omega_2 = \infty. \quad (9.4)$$

Таким образом, четырехполюсники, собранные по схемам (рисунок 9.1 а, б) имеют полосу пропускания от  $\omega_1 = \frac{1}{2\sqrt{LC}}$  до  $\omega_2 = \infty$ , т.е. функционируют как высокочастотный фильтр.

Рассмотрим качественно работу ФВЧ. На низких частотах сопротивление горизонтального плеча велико, а вертикального – мало, поэтому сигнал на выходе фильтра будет значительно ослаблен. На высоких частотах  $\omega > \omega_{CP}$  вследствие уменьшения емкостного и увеличения индуктивного сопротивлений ослабление сигнала фильтром будет незначительным.

Определим границы изменения постоянной фазы в полосе пропускания

$$\cos \beta = 1 + \frac{Z_1}{2Z_2} = 1 - \frac{1}{2\omega^2 LC}. \quad (9.5)$$

$$\omega_1 = \frac{1}{2\sqrt{LC}}; \quad \cos \beta = -1; \quad (9.6)$$

$$\omega_2 = \infty. \quad \cos \beta = 1. \quad (9.7)$$

Таким образом, постоянная фаза высокочастотного фильтра в полосе пропускания изменяется в пределах  $\beta = -\pi \div 0$ .

Зависимости  $\alpha$  и  $\beta$  от частоты  $\omega$  для ФВЧ имеют следующий вид:

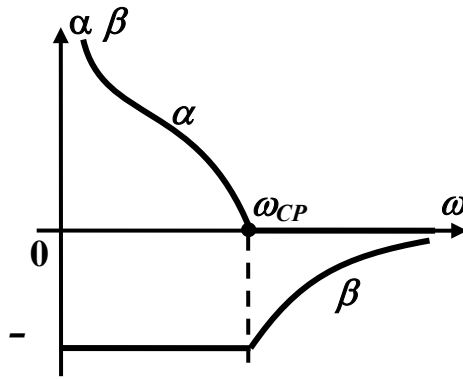


Рисунок 9.2 – Зависимости  $\alpha$  и  $\beta$  от частоты  $\omega$  для ФВЧ

Полученные частотные характеристики относятся к фильтрам, составленным из *идеальных* реактивных элементов и при идеальном согласовании с нагрузкой. Но даже в этом случае фильтры не обеспечивают резкого перехода от полосы пропускания к полосе задерживания. С учетом же таких *реальных* факторов, как наличие активных сопротивлений элементов фильтра и несогласованность фильтра с нагрузкой, характеристики фильтра отличаются от идеальных. На рисунке 9.3 представлены зависимости постоянной затухания ФВЧ от частоты при согласованной и несогласованной нагрузке.

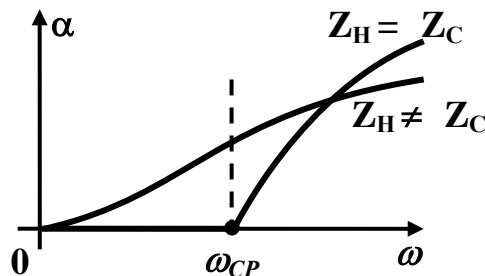


Рисунок 9.3 – Зависимости постоянной затухания ФВЧ от частоты при согласованной и несогласованной нагрузке

## 9.2 Порядок выполнения работы

1. Частота среза фильтров  $f_{ср} = 4$  кГц.
2. Выбрать  $C$  0,5 мкФ.
3. Для выбранной величины емкости по формуле (9.3) рассчитать необходимую величину индуктивности  $L$  для указанной частоты среза.
4. По полученным значениям  $L$  и  $C$  рассчитать характеристическое сопротивление фильтра.
5. Собрать схему в соответствии с рисунком 9.4а либо 9.4б. Необходимая величина  $L$  берется из блока переменных индуктивностей, а величина  $R_H$  – из блока переменных резисторов.

6. Включить стенд. Из блока переменного синусоидального напряжения подать на вход цепи напряжение 10 В частотой 0,5 кГц. Записать показания приборов.

7. Изменяя частоту входного напряжения через 1 кГц до частоты 8,5 кГц, поддерживая при этом постоянную величину  $U_{вх} = 10$  В, получить значения  $U_{вых}$  и тока  $I$ , измеряемые  $V_2$  и А. Полученные данные занести в таблицу 9.1 в верхние строчки.

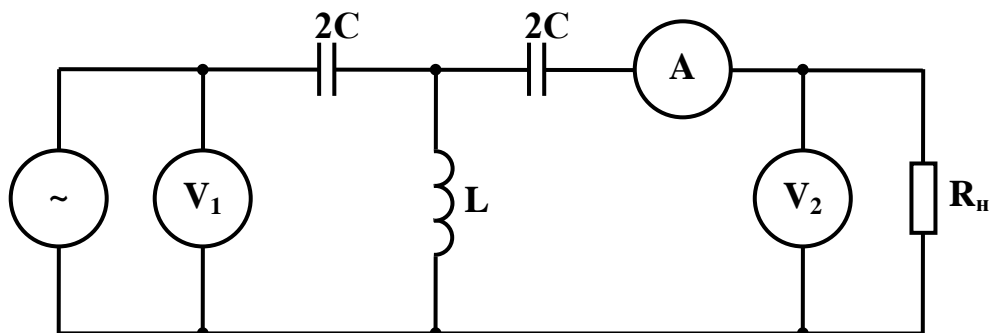


Рисунок 9.4а – Схема исследуемой цепи

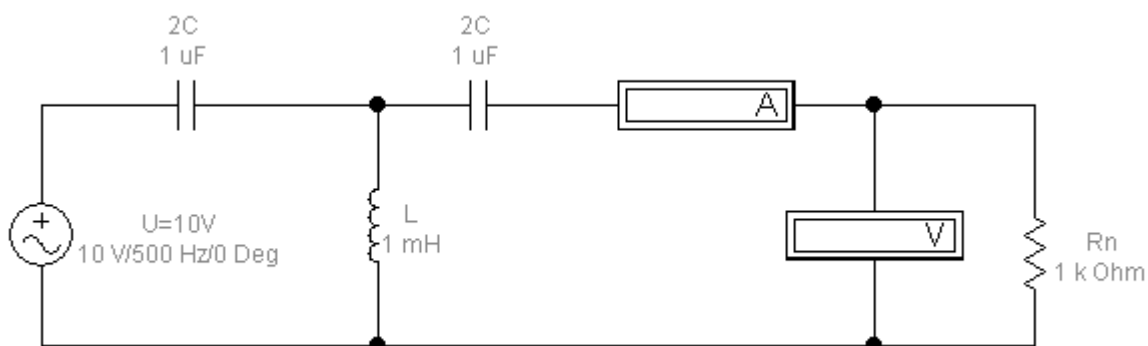


Рисунок 9.4б –Схема фильтра для сборки в программе Electronics Workbench

Таблица 9.1 – Экспериментальные данные

$f, \text{кГц}$	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5
$U_{вх}, \text{В}$									
$U_{вых}, \text{В}$									
$I, \text{мА}$									
$A(f)$									



8. По полученным данным рассчитать АЧХ фильтра, используя  $A(f) = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$ .

9. Повторить опыт, изменив величину  $C$ . Выполнить пункты 3÷8. Данные занести в нижние строчки таблицы.

10. По экспериментальным данным на одной координатной сетке построить графики зависимостей  $A(f)$  и  $I(f)$  для различных параметров фильтра, сделать выводы из полученных результатов.

11. Собрать схему П-образного ФВЧ. Величину емкости взять 0,25 мкФ. Рассчитать индуктивности.

12. Выполнить пункты 3÷8. Данные занести в таблицу, аналогичную таблице 1. Выполнить пункт 10.

13. По полученным результатам дать оценку эффективности работы обеих схем ФВЧ.

### **9.3 Контрольные вопросы**

1. Сформулируйте определение ФВЧ.
2. Объяснить причины выбора элементов плеч фильтра.
3. Как рассчитывается частота среза?
4. Объяснить форму АЧХ ФВЧ.
5. Как влияют величины параметров плеч на форму АЧХ?
6. Объяснить причины несовпадения теоретических и экспериментальных параметров элементов плеч для заданной частоты среза.

## **Лабораторная работа № 10**

### Исследование однофазных схем выпрямления

Цель работы: изучение принципа действия однофазных одно- и двух-полупериодных схем выпрямления

#### **10.1 Теоретическая часть**

Статический преобразователь электрической энергии переменного тока в энергию постоянного тока называют выпрямительным устройством (выпрямителем), выпрямительное устройство может состоять из трех основных элементов (рисунок 10.1): трансформатора 1, схемы выпрямления 2 и сглаживающего фильтра 3.

**Трансформатор** в выпрямительном устройстве предназначен для получения заданного напряжения, а также для устранения непосредственной электрической связи (гальванической связи) цепи выпрямленного тока с питающей сетью.

**Схема выпрямления** преобразует переменное напряжение в пульсирующее.



Рисунок 10.1 – Выпрямительное устройство

**Сглаживающий фильтр** служит для получения постоянного напряжения из пульсирующего, т.е. для ослабления переменных составляющих, содержащихся в пульсирующем напряжении.

**Режим работы** выпрямителя и **параметры** образующих его элементов в значительной степени зависят от характера его нагрузки (активная, активно-емкостная, активно-индуктивная и др.). В электронных устройствах автоматики наиболее распространенной является работа выпрямителя на нагрузку активного или активно-емкостного характера. В последнем случае емкостная составляющая образуется конденсатором, устанавливаемым параллельно нагрузке с целью снижения пульсаций выпрямленного напряжения.

**Выходными параметрами выпрямителя являются** следующие величины:

$U_0$  – среднее значение выпрямленного напряжения,

$I_0$  – среднее значение выпрямленного тока,

$f_{п1}$  – частота основной гармоники выпрямленного напряжения,

$K_{п}$  – коэффициент пульсации выпрямленного напряжения. Коэффициентом пульсации называют отношение амплитуды основной (первой) гармоники выпрямленного напряжения к его среднему значению  $K_{п} = U_{мп} / U_0$ .

**Внешняя характеристика выпрямителя** – зависимость выпрямленного напряжения  $U_0$  от тока нагрузки  $I_0$  при неизменном напряжении на входе выпрямителя. По этой характеристике можно определить выходное напряжение выпрямителя при заданной нагрузке и его внутреннее сопротивление  $R_0 = \Delta U_0 / \Delta I_0$ .

Вентили (диоды) в схемах выпрямления характеризуют следующими параметрами:

- средним выпрямленным током  $I_{пр.ср.}$ ,
- действующим значением тока  $I_{пр.}$ ,
- амплитудой тока  $I_m$  пр.,
- амплитудой обратного напряжения  $U_m$  обр.,
- средней мощностью  $P_{ср.}$

При проектировании выпрямителей выбор вентиля осуществляют так, чтобы значения указанных их параметров не превышали предельно допустимых значений.

При питании от однофазной сети используют следующие схемы вы-

прявления: однополупериодную, двухполупериодную с выводом нулевой точки и двухполупериодную мостовую (схема Греча).

1) **Однополупериодная схема выпрямления** отличается простотой, небольшим числом элементов, невысокой стоимостью, возможностью работы без трансформатора непосредственно от питающей сети (рисунок 10.2).

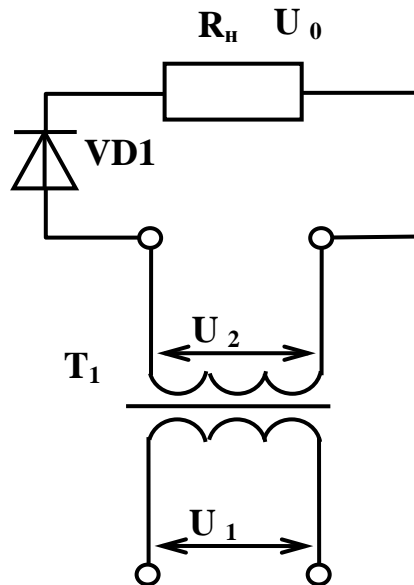


Рисунок 10.2 – Однополупериодная схема выпрямления

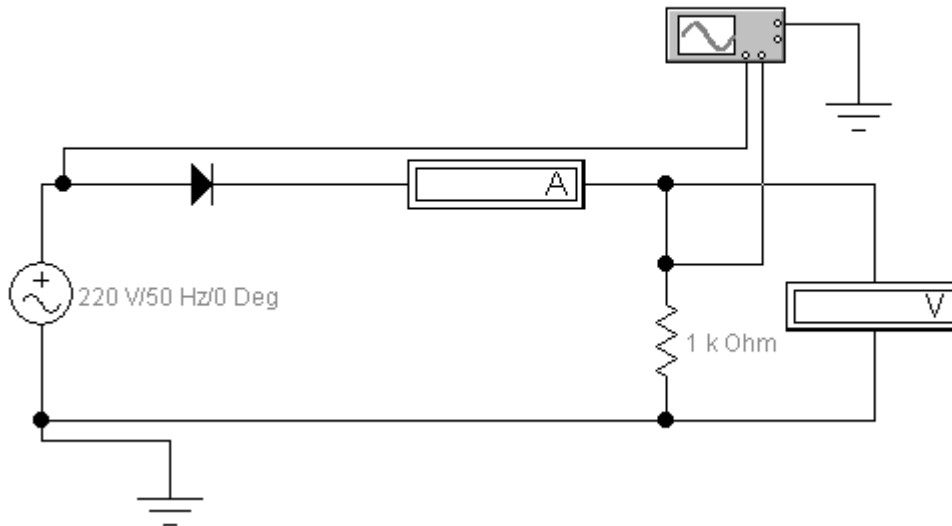


Рисунок 10.3 – Однополупериодная схема выпрямления для сборки в программе Electronics Workbench

На рисунке 10.3 представлены временные диаграммы, характеризующие работу этой схемы на активную нагрузку при питании синусоидальным напряжением.

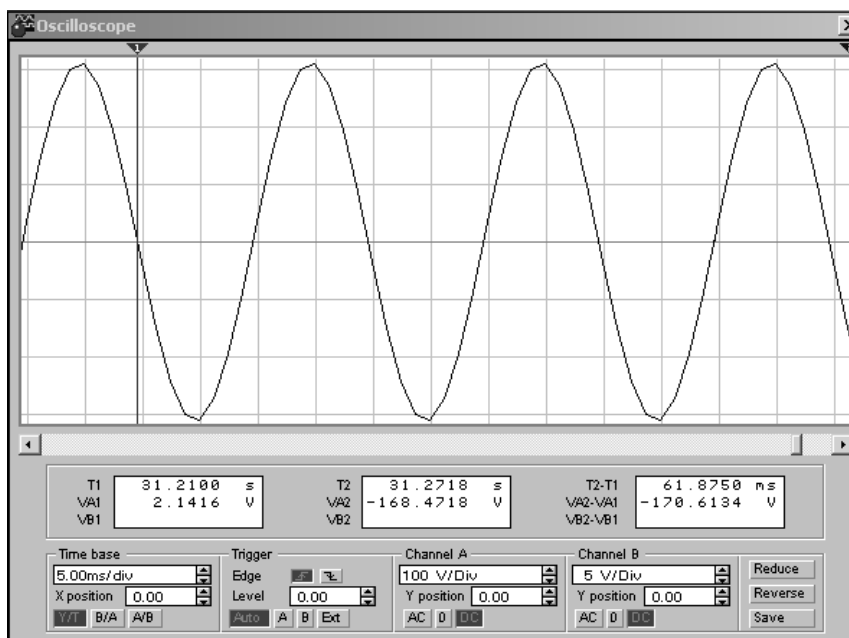


Рисунок 10.4 – Временные диаграммы однополупериодной схемы выпрямления по каналу А

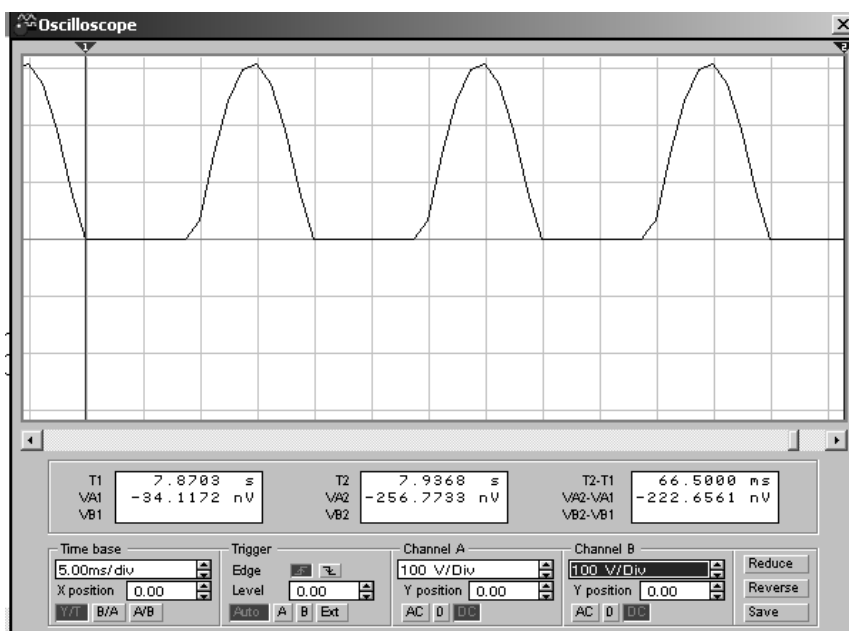


Рисунок 10.5 – Временные диаграммы однополупериодной схемы выпрямления по каналу В

Если принять сопротивление вторичной обмотки трансформатора и прямое сопротивление вентиля равными нулю, то во время положительной полуволны  $U_2$  (вентиль  $VD_1$  открыт) напряжение на нагрузке повторяет форму напряжения на вторичной обмотке трансформатора. Во время отрицательной полуволны  $U_2$  (вентиль  $VD_1$  закрыт) напряжение  $U_0$  на нагрузке равно нулю, а поскольку обратное сопротивление вентиля  $R_{обр} \gg R_n$ , то напряжение вторичной

обмотки полностью приложено к вентилю (потенциал анода вентиля становится отрицательным). Как следует из рисунков 10.2 и 10.3, для однополупериодной схемы выпрямления характерны следующие недостатки: низкая частота пульсации, высокое обратное напряжение на вентиле, плохое использование трансформатора (используется энергия одной полувольты напряжения вторичной обмотки), вынужденное намагничивание сердечника трансформатора (по вторичной обмотке протекает постоянная составляющая выпрямленного тока).

2. **Схема выпрямления с нулевой точкой** образована двумя вентилями  $VD_1$  и  $VD_2$ , трансформатором  $T_1$ , имеющим две одинаковые вторичные обмотки, включенные последовательно и согласно. Во время положительной полувольты  $U_2$  (полярность указана без скобок) открыт вентиль  $VD_1$ . Во время отрицательной полувольты (полярность указана в скобках) открыт вентиль  $VD_2$ . Ток обоих вентилях протекает через нагрузку в одном направлении. Временные диаграммы напряжений для этой схемы выпрямления представлены на рисунке 10.6.

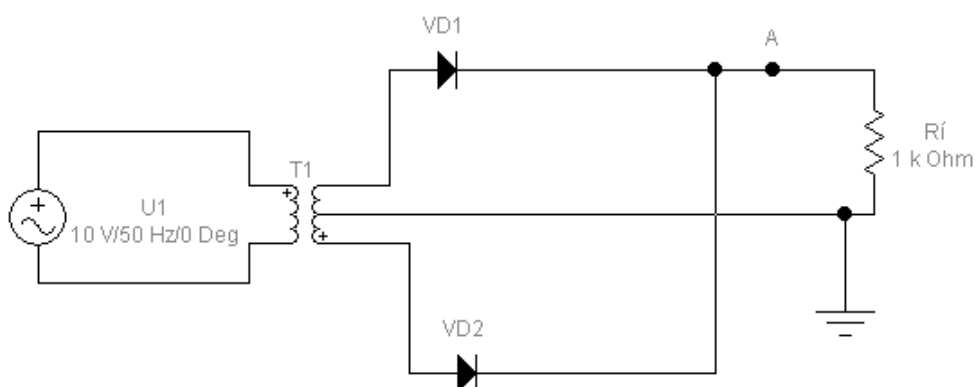


Рисунок 10.6 – Двухполупериодная схема выпрямления с выводом нулевой точки для сборки в программе Electronics Workbench

Фактически эта схема представляет собой две однополупериодные схемы выпрямления, работающие поочередно (через  $T/2$ ) на общую нагрузку, что и предопределяет ее достоинства и недостатки. К достоинствам схемы выпрямления с нулевой точкой можно отнести следующее: частота пульсации в два раза выше, чем в однополупериодной схеме, в два раза выше среднее значение выпрямленного напряжения, хороший КПД, отсутствие вынужденного намагничивания трансформатора. Основная область применения этой схемы – низковольтные выпрямители. Поскольку в любой момент времени в ней последовательно с нагрузкой оказывается включенным только один вентиль, то при больших выпрямленных токах и малых напряжениях это позволяет получить хороший к. п. д. К недостаткам схемы с нулевой точкой следует отнести плохое использование трансформатора (две вторичные обмотки, работающие в течение  $T/2$  каждая), высокое обратное напряжение на вентилях, невозможность работы без трансформатора.

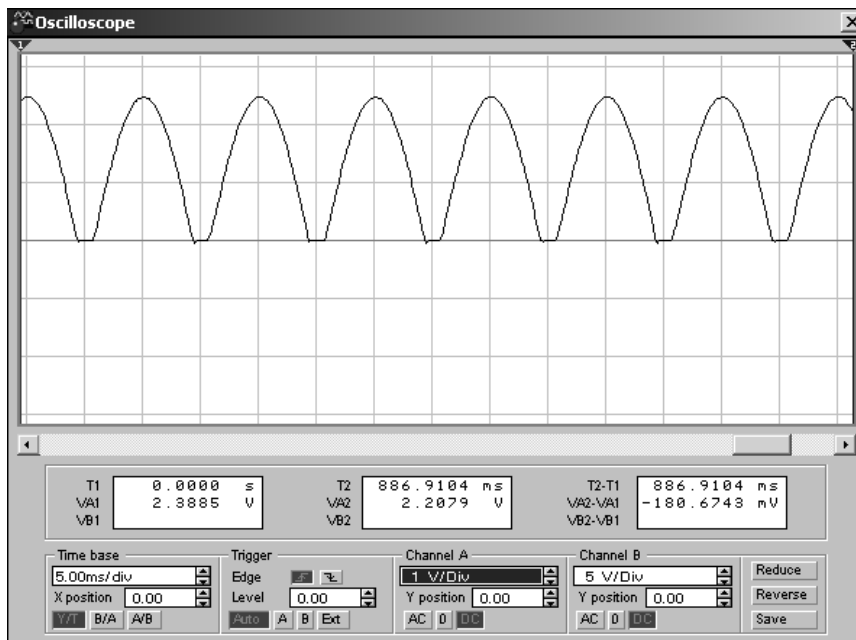


Рисунок 10.7 – Временные диаграммы напряжений для точки А

3. **Мостовая схема выпрямления** содержит четыре вентиля и трансформатор с одной вторичной обмоткой (рисунок 10.7).

Во время положительной полуволны напряжения  $U_2$  на вторичной обмотке трансформатора Т1 проводят ток вентили VD1, VD3, а во время отрицательной – вентили VD2, VD4. При этом ток в нагрузке протекает в одном направлении, указанном стрелкой, а ток во вторичной обмотке трансформатора через каждые  $T/2$  изменяет свое направление на противоположное. К закрытым вентилям прикладывается обратное напряжение, повторяющее по форме напряжение вторичной обмотки трансформатора. Максимальное значение обратного напряжения равно  $U_{m2}$ , т. е. амплитуде напряжения вторичной обмотки трансформатора, поскольку в течение  $T/2$  проводят ток два вентиля, а два находятся в непроводящем состоянии, то к каждому из закрытых вентилях оказывается приложенным  $U_{обр} = U_{m2}/2$  (при равенстве их обратных сопротивлений). Временные диаграммы выходного напряжения мостовой схемы выпрямления приведены на рисунке 10.10, 10.11, 10.12.

При работе на активно-индуктивную нагрузку форма тока в вентилях становится более сглаженной, а при работе на активно-емкостную нагрузку в данной схеме, как и в других, появляется угол отсечки  $\theta_{vd} < \pi$ . При этом ток вентилях имеет форму синусоидальных импульсов. При включении схемы выпрямления (конденсатор нагрузки разряжен) амплитуда тока вентилях может значительно превысить величину среднего значения выпрямленного тока, наиболее благоприятным для вентилях является режим работы на активно-индуктивную нагрузку, наименее благоприятным – работа на активно-емкостную нагрузку.

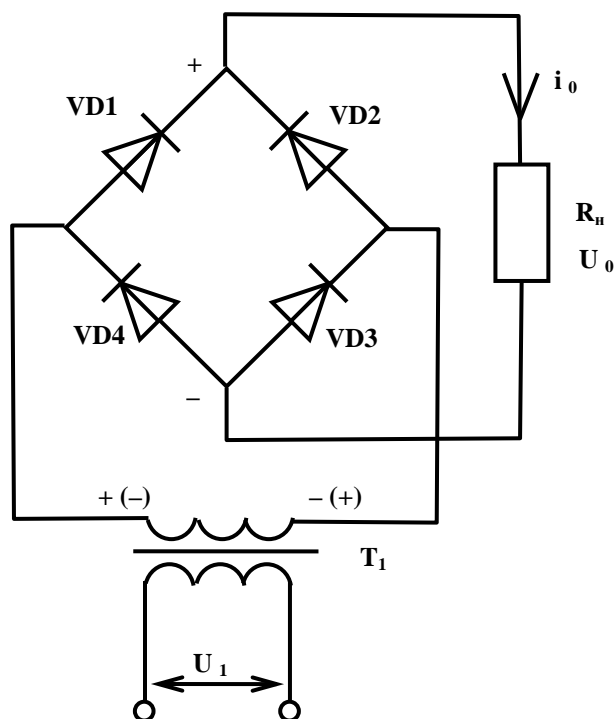


Рисунок 10.8 – Двухполупериодная мостовая схема выпрямления

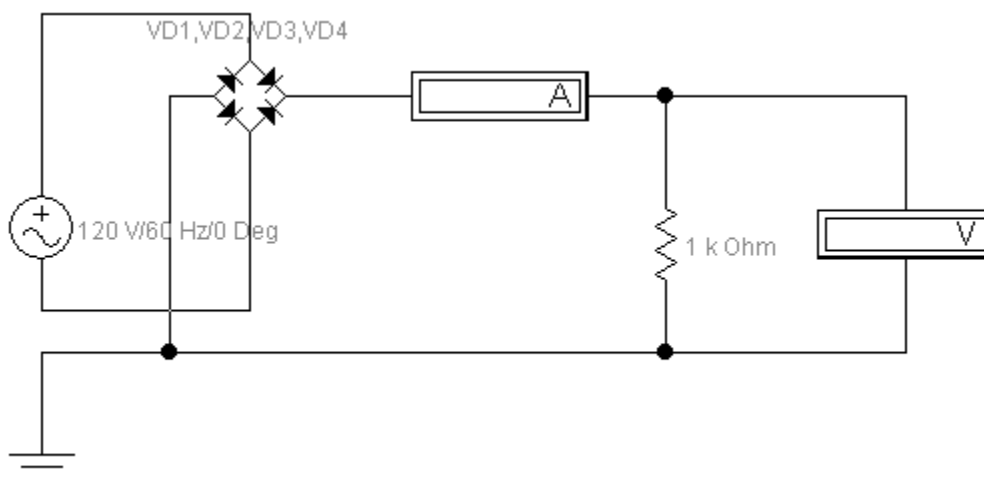


Рисунок 10.9 – Двухполупериодная мостовая схема выпрямления для сборки в программе Electronics Workbench

Основными преимуществами мостовой схемы являются: выше частота пульсаций, чем в однополупериодной схеме, небольшое обратное напряжение, хорошее использование трансформатора, отсутствие вынужденного намагничивания, возможность работы без трансформатора.

Недостатки мостовой схемы следующие: большое количество вентиляей, повышенное падение напряжения на вентиляях.

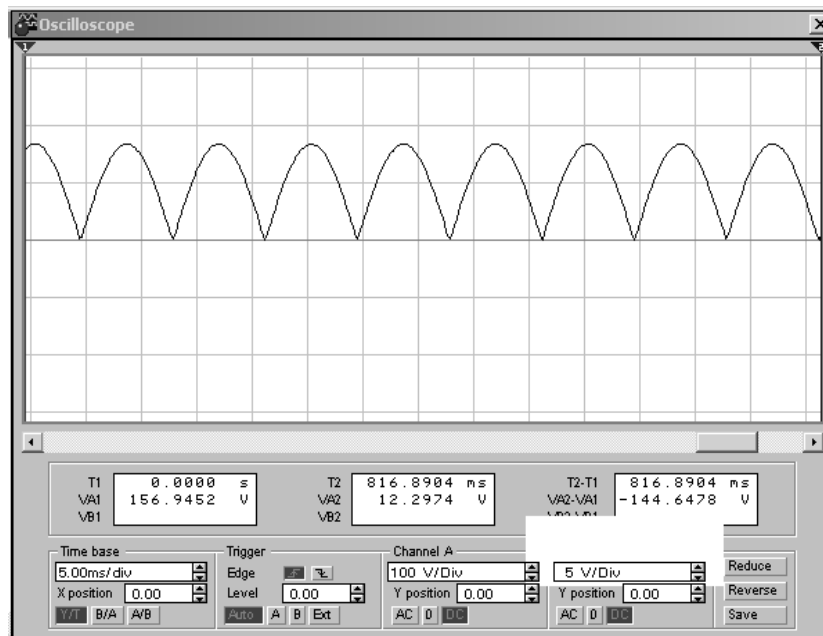


Рисунок 10.10 – Временные диаграммы мостовой схемы выпрямления с активной нагрузкой

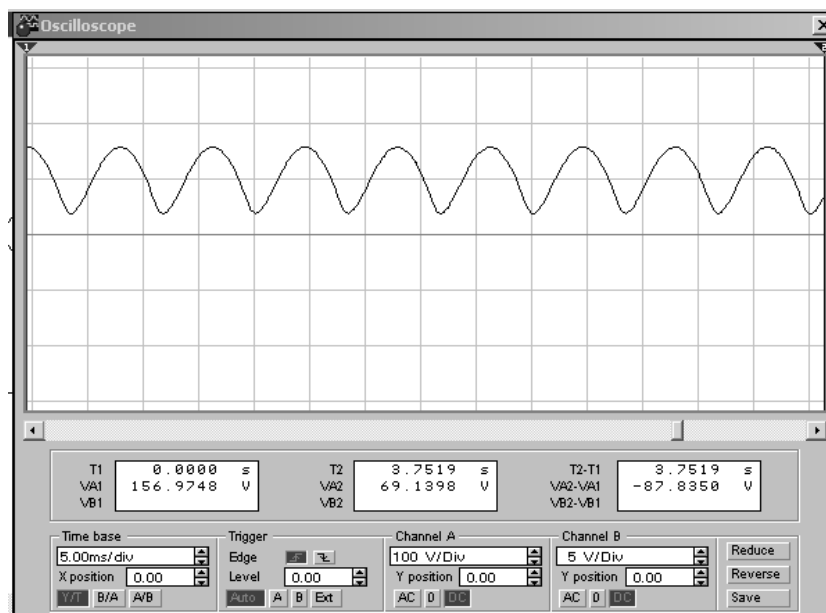


Рисунок 10.11 – Временные диаграммы мостовой схемы выпрямления с активно-индуктивной нагрузкой ( $L = 1\text{мГн}$ )



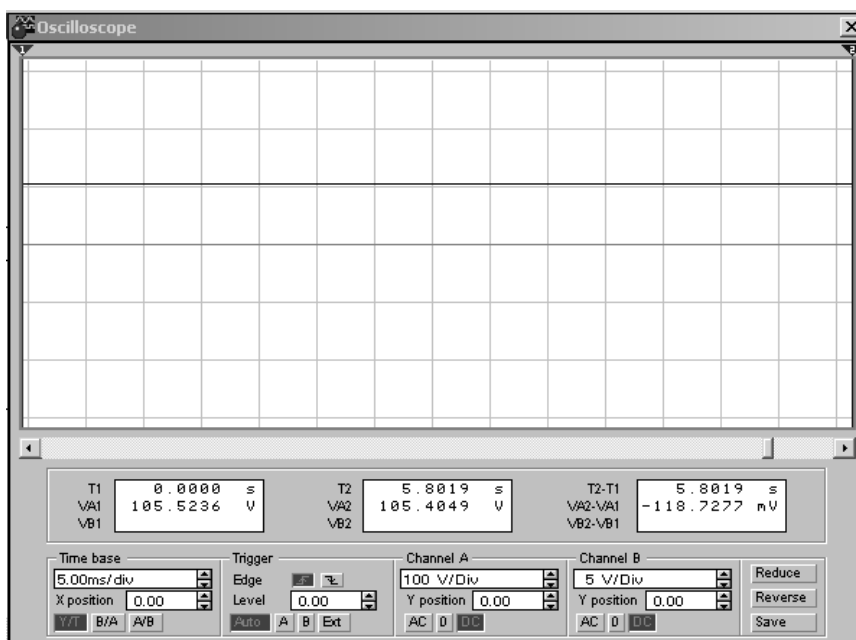


Рисунок 10.12 – Временные диаграммы мостовой схемы выпрямления с активно-индуктивной нагрузкой ( $L = 1 \text{ Гн}$ )

## 10.2 Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством лабораторной установки.
2. Нарисовать схемы исследования однополупериодной и однофазной мостовой схем выпрямления при работе на активную и активно-емкостную нагрузки.
3. Собрать схемы выпрямления в программе Electronic Workbench или на стендах УИЛС. Для питания схем выпрямления использовать один из источников (А, В или С) блока переменных напряжений. Входное переменное напряжение схем выпрямления принять одинаковым для обеих схем. В качестве сопротивлений и емкостей нагрузки использовать нерегулируемые резисторы и конденсаторы блоков сопротивлений и конденсаторов.
4. Снять и построить внешние характеристики  $U_o = f(i_o)$  однополупериодной и мостовой схем выпрямления. Для этого нужно снять при различных значениях  $R_H$  показания амперметра ( $I_o$ ) и вольтметра ( $U_o$ ), подключенных в цепь нагрузки.

Таблица 10.1 – Данные для построения внешних характеристик

$R_H$	100	200	300	400	500	600	700	800	900	$\infty$
$I_o$										
$U_o$										

5. Зарисовать осциллограммы входного и выпрямленного напряжений, напряжения на диоде, тока диода, тока нагрузки, входного тока схемы выпрямления при работе обеих схем на активную и активно-емкостную нагрузки.

Осциллограммы рисовать в масштабе в соответствии с их временным положением друг относительно друга.

6. Определить внутренние сопротивления обеих схем выпрямления.
7. Определить коэффициенты пульсации напряжения на выходах обеих схем выпрямления при работе их на активную и активно-емкостную нагрузки.
8. Определить расчетным путем основные параметры схем выпрямления и сопоставить с экспериментальными данными. Полученные результаты объяснить.

### **10.3 Контрольные вопросы**

1. Объясните принцип действия однополупериодной схемы выпрямления, ее достоинства и недостатки.
2. Объясните принцип действия двухполупериодной мостовой схемы выпрямления, ее достоинства и недостатки.
3. Что такое внешняя характеристика выпрямителя? От чего зависит ее наклон?
4. От чего зависит КПД выпрямителя?
5. В чем особенность работы выпрямителя на активную нагрузку?
  - на индуктивную нагрузку?
  - на емкостную нагрузку?
  - на активно-индуктивную нагрузку?
  - на активно-емкостную нагрузку?
6. Что такое угол отсечки и от чего зависит его величина?
7. Как зависит максимальное значение тока вентиля от характера нагрузки при одной и той же мощности в нагрузке?

## **Лабораторная работа № 11**

### Исследование трехфазных схем выпрямления

Цель работы: изучение принципа действия основных трехфазных схем выпрямления, экспериментальное определение их основных параметров и характеристик.

#### **11.1 Теоретическая часть**

Трехфазные выпрямители используют для получения выпрямленного напряжения при средних и больших мощностях в нагрузке. Наибольшее распространение получили две трехфазные схемы выпрямления: трехфазная схема выпрямления с нулевым выводом (схема Миткевича) и трехфазная мостовая схема (схема Ларионова).

1. **Трехфазная схема выпрямления с нулевым выводом.** Ее образуют

трансформатор и три вентиля (диоды VD1-VD3) (рисунок 11.1).

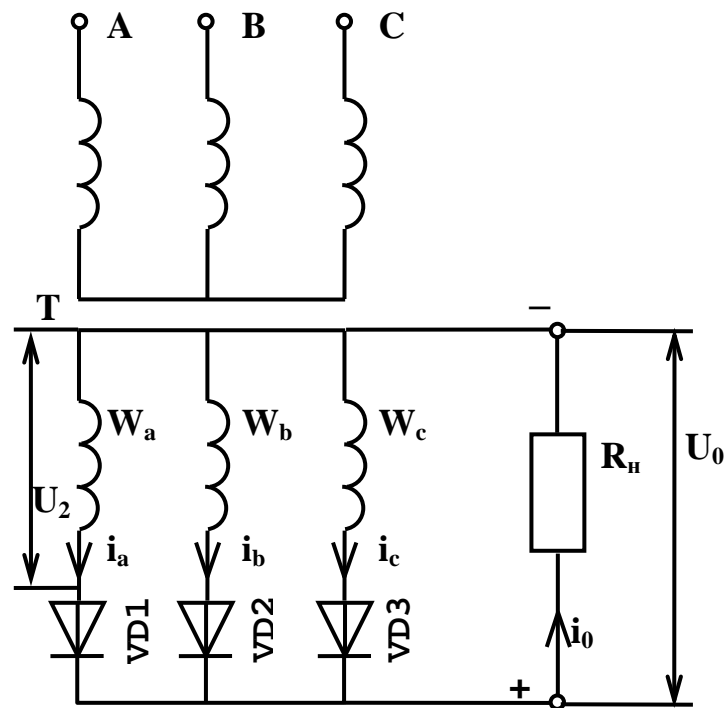


Рисунок 11.1 – Трехфазная схема выпрямления с нулевым выводом

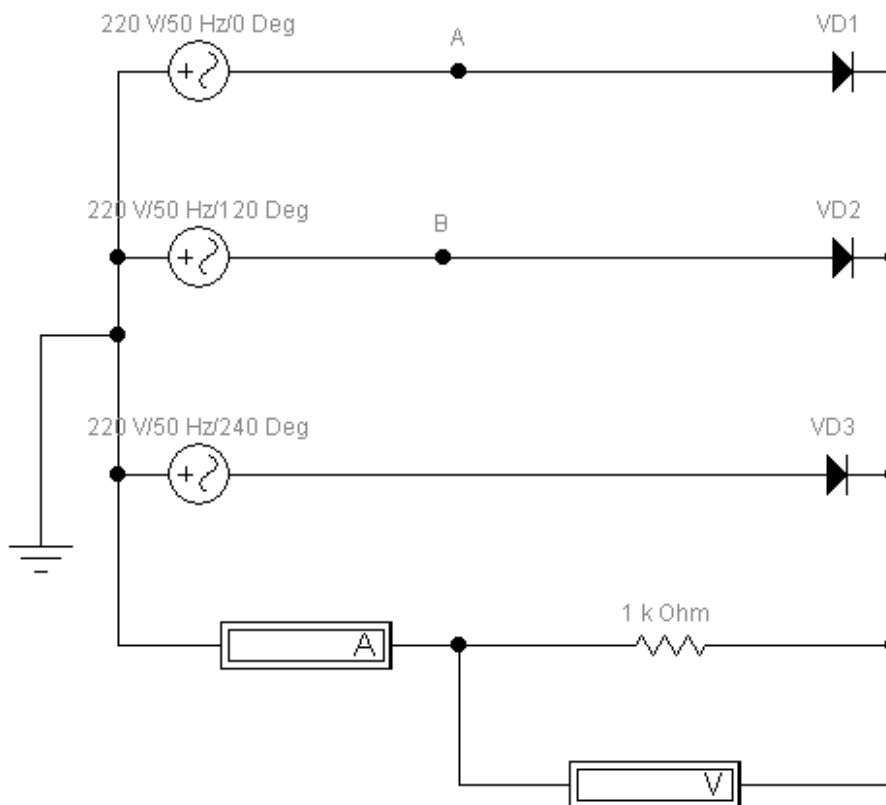


Рисунок 11.2 – Трехфазная схема выпрямления с нулевым выводом для сборки в программе Electronics Workbench

Первичные обмотки трансформатора могут быть соединены звездой или треугольником. Вторичные обмотки должны быть соединены звездой. Свободные выводы вторичных обмоток подключены к анодам (+) вентилях, катоды (–) которых соединены в узел. Сопротивление нагрузки подключают между точкой соединения катодов и нулевой точкой вторичных обмоток. Временные диаграммы, поясняющие работу схемы, приведены на рисунке 11.3, 11.4.

Рассмотрим работу этой схемы выпрямления при активной нагрузке.

Поскольку сопротивление нагрузки выпрямителя включено между нулевым выводом обмоток и точкой соединения катодов вентилях, они будут открываться только при положительной полярности соответствующего фазного напряжения. Кроме того, открытым может быть только тот вентиль, мгновенное значение напряжения на аноде которого в данный момент времени выше, чем у других. Каждый из непроводящих вентилях будет смещен в обратном направлении разностью напряжений его обмотки и обмотки проводящего вентиля, т.е. соответствующим линейным напряжением. Из рисунка 11.4 видно, что каждый из вентилях проводит ток в течение  $T/3$ .

Поскольку направление тока через нагрузку не изменяется, ток в нагрузке имеет однополярный пульсирующий характер; частота пульсаций в три раза выше частоты питающей сети. Следует отметить, что направление тока во вторичных обмотках трансформатора также остается постоянным, что вызывает вынужденное намагничивание сердечника трансформатора.

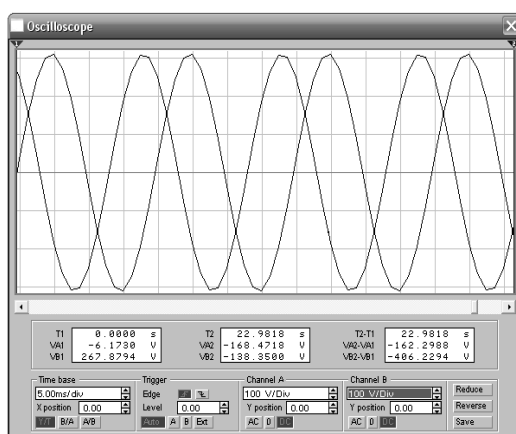


Рисунок 11.3 – Временные диаграммы трехфазной схемы выпрямления с нулевой точкой снятые с фаз А и В генератора

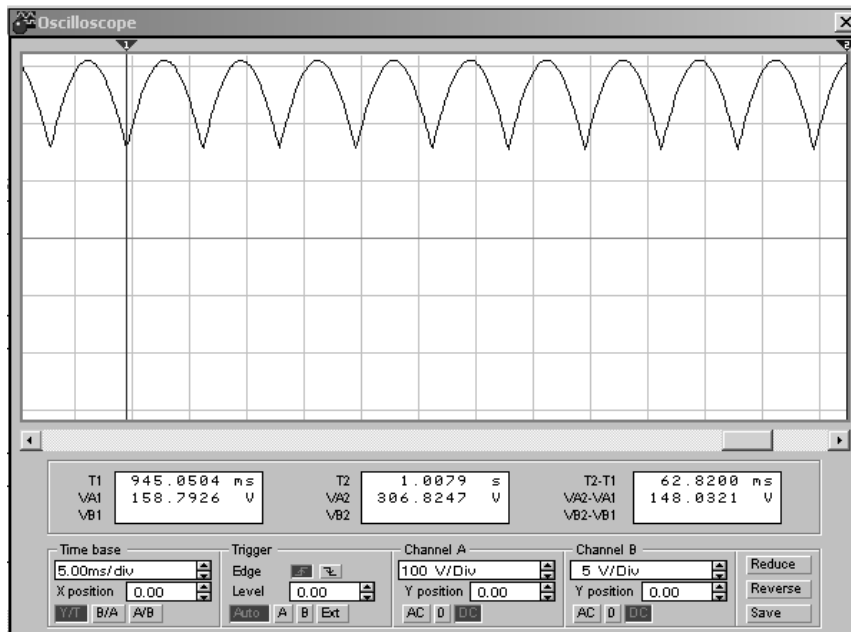


Рисунок 11.4 – Временная диаграмма трехфазной схемы выпрямления, снятая с активной нагрузки

2. **Трехфазная мостовая схема выпрямления** образована трехфазным трансформатором и шестью вентилями (рисунок 11.3).

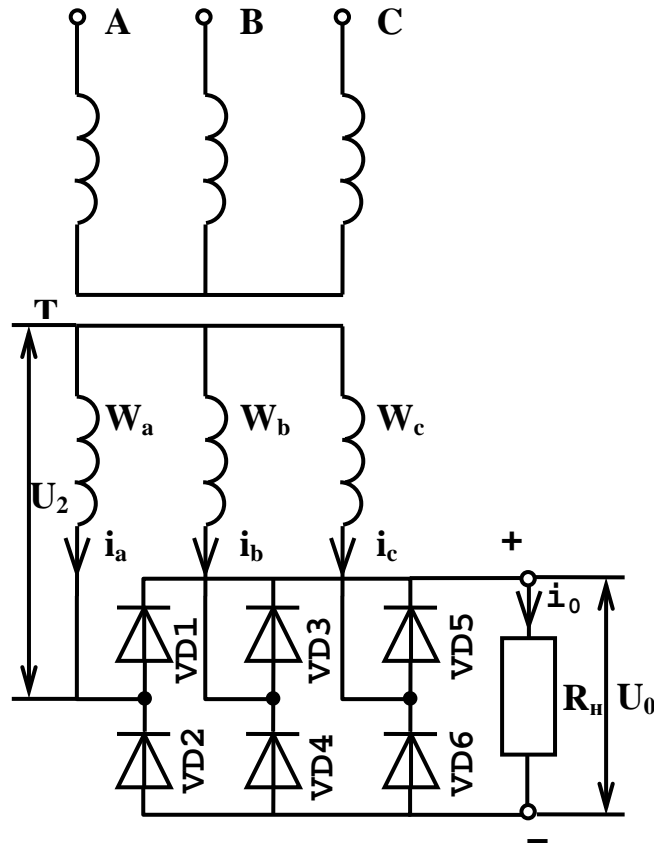


Рисунок 11.5 – Трехфазная мостовая схема выпрямления

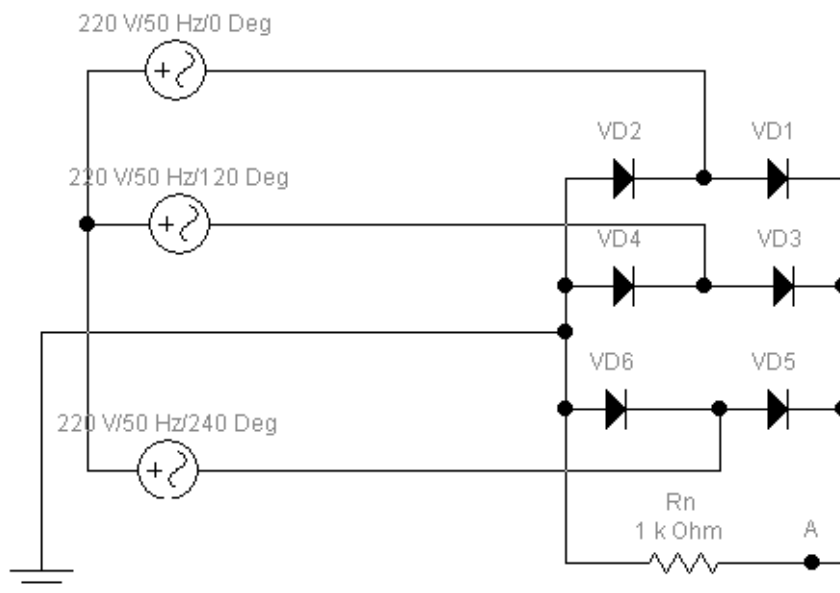


Рисунок 11.6 – Трехфазная мостовая схема выпрямления для сборки в программе Electronics Workbench

Вентили VD1, VD3, VD5 образуют так называемую катодную группу, поскольку их катоды соединены в узел, а вентили VD2, VD4, VD6 – анодную группу - их аноды сведены в узел. Временные диаграммы, поясняющие работу схемы при активной нагрузке, приведены на рисунке 11.7, 11.8, 11.9.

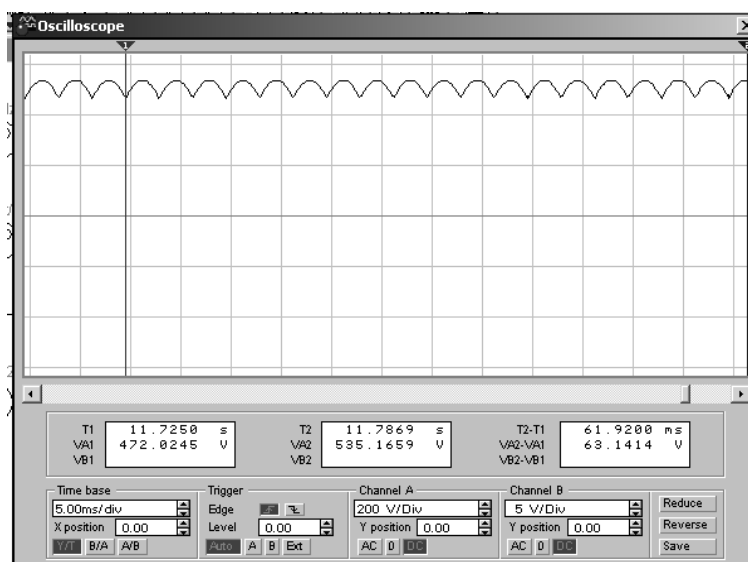


Рисунок 11.7 – Временные диаграммы трехфазной мостовой схемы выпрямления

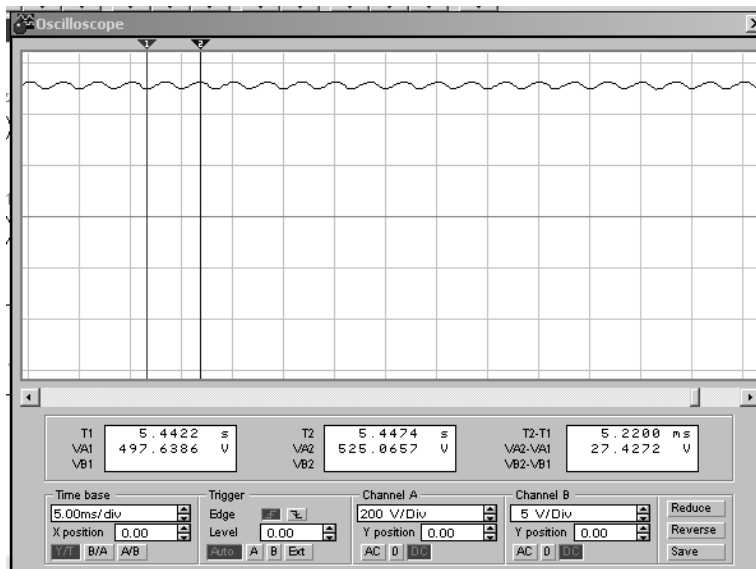


Рисунок 11.8 – Временные диаграммы трехфазной мостовой схемы выпрямления с активно-индуктивной нагрузкой ( $L = 1\text{ мГн}$ )

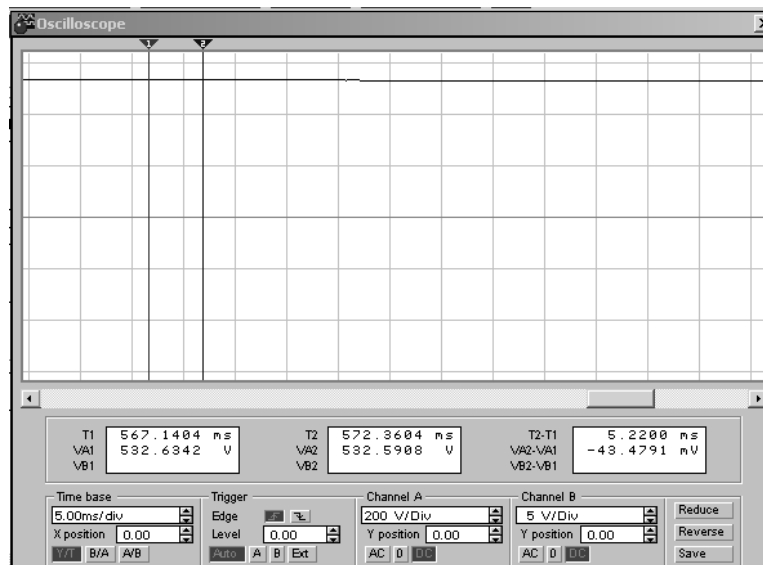


Рисунок 11.9 – Временные диаграммы трехфазной мостовой схемы выпрямления с активно-индуктивной нагрузкой ( $L = 3\text{ мГн}$ )

Каждый вентиль выпрямителя проводит ток в течение  $T/3$ . В анодной группе в данный момент будет работать тот вентиль, напряжение на катоде которого имеет наибольшее отрицательное мгновенное значение, а в катодной группе проводит вентиль, имеющий на аноде наибольшее мгновенное положительное значение напряжения. Например, в течение интервала времени  $t_1-t_2$  ток проходит по контуру:  $W_a-VD1-R_n-VD4-W_b-W_a$ ; в течение  $t_2-t_3$ :  $W_a-VD1-R_n-VD6-W_c-W_a$ .

В *схеме Ларионова* одновременно пропускают ток (как и в однофазной мостовой схеме) два вентиля: один из катодной, а второй из анодной группы.

Выпрямленное напряжение определяется в любой момент времени разностью напряжений фаз с наиболее положительным и наиболее отрицательным напряжениями, т.е. линейным напряжением. Поскольку каждая вторичная обмотка связана с двумя вентилями, по ней за период входного напряжения протекает ток этих вентилях дважды в противоположных направлениях. К неработающей в данный момент паре вентилях приложено обратное напряжение, равное амплитуде линейного. Из этого следует, что обратное напряжение на вентиле в схеме Ларионова в два раза меньше (при равенстве обратных сопротивлений вентилях), чем в схеме с нулевой точкой.

Несмотря на большее в два раза количество вентилях, схема Ларионова гораздо предпочтительнее схемы с нулевым выводом благодаря следующим достоинствам: небольшое значение максимального обратного напряжения на вентиле, хорошее использование трансформатора по мощности и отсутствие вынужденного подмагничивания, малый коэффициент пульсации выпрямленного напряжения, повышенная частота пульсаций выпрямленного напряжения, возможность работы от трансформатора с соединением вторичных обмоток как звездой, так и треугольником, а также непосредственно от трехфазной питающей сети.

## ***11.2 Порядок выполнения работы***

1. Ознакомиться с лабораторной установкой.

2. Нарисовать схемы исследуемых выпрямительных схем (с нулевой точкой и мостовой) с подключенными измерительными приборами.

Для питания выпрямительных схем использовать источники А, В и С блока переменных напряжений. При исследовании обеих схем выпрямления установить одинаковые значения входных переменных напряжений. Источники А, В и С соединить звездой. Для исследования токов использовать образцовые резисторы, включенные в разрыв соответствующих цепей.

3. Снять и построить внешне характеристики выпрямителей при работе на активную нагрузку. Зарисовать осциллограммы выпрямленного напряжения, напряжения на диоде, одного из входных токов выпрямительной схемы при работе схем выпрямления на активную и активно-емкостную нагрузки.

Осциллограммы рисовать в соответствии с их временным положением относительно друг друга.

В качестве сопротивлений и емкостей нагрузки использовать нерегулируемые резисторы и конденсаторы блоков сопротивлений и конденсаторов.

4. Определить средние значения выходных напряжений, амплитуду пульсаций и коэффициенты пульсаций для обеих исследуемых схем выпрямления при их работе на активную и активно-емкостную нагрузки.



### **11.3 Контрольные вопросы**

1. Объясните принцип действия трехфазной схемы выпрямления с нулевой точкой. Каковы ее достоинства и недостатки?
2. Объясните принцип действия трехфазной мостовой схемы выпрямления. Каковы ее достоинства и недостатки?
3. Дайте сравнительную оценку трехфазных систем выпрямления с нулевой точкой и мостовой.
4. Дайте сравнительную оценку однофазных и трехфазных систем выпрямления.
5. От чего зависит КПД выпрямителя?
6. Что такое внешняя характеристика выпрямителя и от чего зависит ее наклон?
7. Почему максимальное значение тока вентиль выпрямителя различно для разных видов нагрузки при одной и той же мощности в нагрузке?
8. При какой нагрузке вентиль работает в наиболее тяжелом режиме и почему?
9. Чему равна длительность работы фазы и длительность работы вентиль в схеме Ларионова?

### **Литература**

1. Забродин, Ю. С. Промышленная электроника./Ю. С. Забродин. – Москва : Высшая школа, 1982.
2. Китаев, В. Е. Расчет источников электропитания устройств связи / В. Е. Китаев, А. А. Бокуняев, М. Ф. Колканов. – Москва : Радио и связь, 1993.