

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МУРМАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГБОУ ВО «МГТУ»)  
«ММРК имени И.И. Месяцева» ФГБОУ ВО «МГТУ»

УТВЕРЖДАЮ  
Начальник ММРК им. И.И. Месяцева  
ФГБОУ ВО «МГТУ»

И.В. Артеменко  
(подпись)

«31» августа 2019 г.



**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРАКТИЧЕСКИМ И  
ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ОБУЧАЮЩИХСЯ**

учебной дисциплины ОП.03 Электроника и электротехника  
программы подготовки специалистов среднего звена (ППССЗ)  
специальности 26.02.05 Эксплуатация судовых энергетических установок  
по программе базовой подготовки  
форма обучения: очная, заочная

Мурманск  
2019

**Рассмотрено и одобрено на заседании**

Методической комиссии преподавателей дисциплин профессионального цикла специальностей отделения судовой энергетики

Председатель МК

Миронов В.И.

Протокол от «29» мая 2019 г.

**Разработано**

на основе ФГОС СПО по специальности 26.02.05 Эксплуатация судовых энергетических установок, утвержденного приказом Министерства образования и науки РФ от 07 мая 2014г. № 443 и Международной конвенции о подготовке и дипломированию моряков и несению вахты 1978 года и Кодекса по подготовке и дипломированию моряков и несению вахты (Кодекс ПДНВ-78) в редакции от 25 июня 2010 года (с учетом Манильских поправок) с поправками в части выполнения требований раздела А-III/1

Автор (составитель): Коробко А.Н., преподаватель «ММРК имени И.И. Месяцева» ФГБОУ ВО «МГТУ»

Ф. , ученая степень, звание, должность, квалиф. категория

Эксперт (рецензент) Антипин А.А., преподаватель первой категории «ММРК имени И.И. Месяцева» ФГБОУ ВО «МГТУ»

Ф. , ученая степень, звание, должность, квалиф. категория







## Содержание

Введение.....	7
Тематический план видов практических работы обучающихся.....	11
Порядок выполнения практической (лабораторной) работы обучающихся.....	13
Практическое занятие: Измерение электрической энергии. Измерение электрического сопротивления, измерительные механизмы .....	13
Практическое занятие: Коэффициент мощности и способы его повышения.....	16
Практическое занятие: Расчет цепей переменного тока.....	19
Практическое занятие: Законы Кирхгофа при постоянных токах. Баланс мощностей .....	22
Практическое занятие: Исследование электрической цепи с последовательным, параллельным и смешанным соединением приёмников электрической энергии.....	27
Практическое занятие: Расчёт сложных электрических цепей постоянного тока .....	31
Практическое занятие: Свойства P-N перехода. Определение параметров и характеристик полупроводникового диода .....	45
Практическое занятие: Выбор полупроводниковых диодов к схемам электронных выпрямителей. ....	49
Практическое занятие: Расчет выпрямителя с емкостным фильтром.....	58
Практическое занятие: Расчет рабочей точки электронного усилителя .....	64
Критерии и шкала оценивания .....	67

## Введение

**1.1 Методические указания по практическим работам обучающихся по учебной дисциплины** Электроника и электротехника в соответствии с ФГОС СПО по специальности 26.02.05 Эксплуатация судовых энергетических установок базовой подготовки, утвержденного приказом Министерства образования и науки РФ от 07 мая 2014г. № 443 и Международной конвенции о подготовке и дипломировании моряков и несению вахты 1978 года и Кодекса по подготовке и дипломированию моряков и несению вахты (Кодекс ПДНВ-78) в редакции от 25 июня 2010 года (с учетом Манильских поправок) с поправками в части выполнения требований раздела А-III/1; учебного плана очной и заочной форм обучения, утвержденного 31.05.2019г.

### **1.2 Цели и задачи практической (лабораторной) работы -**

#### **1.2 Требования к результатам освоения:**

В результате освоения учебной дисциплины обучающийся должен **уметь**:

У1 – проводить измерения электрических величин, включать электротехнические приборы, аппараты, машины, управлять ими и контролировать их эффективную и безопасную работу, устранять отказы и повреждения электрооборудования.

**знать:**

З1 – основные разделы электротехники и электроники, электрические измерения и приборы, микропроцессорные средства измерения.

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование компетенций в соответствии с ФГОС СПО (табл. 1) и компетентностей в соответствии с требованиями Конвенции ПДНВ (табл. 1.1).\*

Таблица 1 - Компетенции, формируемые дисциплиной Электроника и электротехника в соответствии с ФГОС СПО

<b>Код компетенции</b>	<b>Содержание компетенции</b>	<b>Требования к знаниям, умениям, практическому опыту</b>
ОК 1.	Понимать сущность и социальную значимость своей будущей профессии, проявлять к ней устойчивый интерес	У 1, З1
ОК 2.	Организовывать собственную деятельность, выбирать типовые методы и способы выполнения профессиональных задач, оценивать их эффективность и качество	У 1, З1
ОК 3.	Принимать решения в стандартных и нестандартных ситуациях и нести за них ответственность.	У 1, З1
ОК 4.	Осуществлять поиск и использование информации, необходимой для эффективного выполнения профессиональных задач, профессионального и личностного развития	У 1, З1

ОК 5.	Использовать информационно-коммуникационные технологии в профессиональной деятельности	У 1, 31
ОК 6.	Работать в команде, эффективно общаться с коллегами, руководством, потребителями.	У 1, 31
ОК 7.	Брать ответственность за работу членов команды (подчиненных), результат выполнения заданий.	У 1, 31
ОК 8.	Самостоятельно определять задачи профессионального и личностного развития, заниматься самообразованием, осознанно планировать повышение квалификации.	У 1, 31
ОК 9.	Ориентироваться в условиях частой смены технологий в профессиональной деятельности.	У 1, 31
ОК 10.	Владеть письменной и устной коммуникацией на государственном и (или) иностранном (английском) языке.	У 1, 31
ПК 1.1.	Обеспечивать техническую эксплуатацию главных энергетических установок, вспомогательных механизмов и связанных с ними систем управления.	У 1, 31
ПК 1.2.	Выполнять техническое обслуживание и ремонт судового оборудования.	У 1, 31
ПК 1.3.	Выполнять техническое обслуживание и ремонт судового оборудования.	У 1, 31
ПК 1.4.	Осуществлять выбор оборудования, элементов и систем оборудования для замены в процессе эксплуатации судов.	У 1, 31
ПК 1.5.	Осуществлять эксплуатацию технических средств в соответствии с установленными правилами и процедурами, обеспечивающими безопасность операций и отсутствие загрязнения окружающей среды.	У 1, 31
ПК 2.1.	Организовывать мероприятия по обеспечению транспортной безопасности.	У 1, 31
ПК 2.2.	Применять средства по борьбе за живучесть судна.	У 1, 31
ПК 2.3.	Организовывать и обеспечивать действия подчиненных членов экипажа судна при организации	У 1, 31



	учебных пожарных тревог, предупреждая возникновение пожара и при тушении пожара.	
ПК 3.1.	Планировать работу структурного подразделения.	У 1, 31
ПК 3.2.	Руководить работой структурного подразделения.	У 1, 31
ПК 3.3.	Анализировать процесс и результаты деятельности структурного подразделения.	У 1, 31

Таблица 1.1 Компетентности, формируемые дисциплиной Электроника и электротехника в соответствии с Конвенцией ПДНВ. Функция: Техническое обслуживание и ремонт на уровне эксплуатации

<b>Код компетентности</b>	<b>Компоненты компетентности, степень их реализации</b>	<b>Результаты обучения</b>	<b>Соответствующая тема дисциплины</b>
МК 3.1.	Компетентность «Правильное использование ручных инструментов, станков и измерительных инструментов для изготовления деталей и ремонта на судне » реализована полностью	<b>ЗНАНИЕ, ПОНИМАНИЕ И ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЕ НАВЫКИ</b> Характеристики и ограничения материалов, используемых при постройке и ремонте судов и оборудования Характеристики и ограничения процессов, используемых для изготовления и ремонта Свойства и параметры, учитываемые при изготовлении и ремонте систем и их компонентов Техника безопасности в условиях мастерских <b>МЕТОДЫ ДЕМОНСТРАЦИИ КОМПЕТЕНТНОСТИ</b> Оценка результатов подготовки, полученной в одной или нескольких из следующих форм: .1 Одобренная подготовка в мастерских .2 Одобренный практический опыт и проверки; .3 Одобренный стаж работы; .4 Одобренный стаж	Тема 1.2. Тема 1.3. Тема 1.4 Тема 1.5 Тема 1.9. Тема 1.10. Тема 2.1 Тема 2.2 Тема 2.3. Тема 2.6

		<p>подготовки на учебном судне</p> <p><b>КРИТЕРИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ КОМПЕТЕНТНОСТИ</b></p> <p>Определение важных параметров изготовления типовых компонентов судна является надлежащим.</p> <p>Выбор материала является надлежащим.</p> <p>При изготовлении соблюдаются установленные допуски.</p> <p>Оборудование и ручные инструменты, станки и измерительные инструменты используются надлежащим и безопасным образом.</p>	
--	--	--	--

## 2. Тематический план видов практической работы обучающихся

Наименование разделов и тем	Содержание учебного материала, лабораторные и практические занятия, самостоятельная работа обучающегося, курсовая работа (проект) (если предусмотрено)	Аудиторная учебная нагрузка, час	Практическая работа обучающегося, час
1	2	3	4
<b>Раздел 1 Электротехника.</b>			
<b>Тема 1.4.</b> Электрические измерения	<b>Практические занятия:</b> Измерение электрической энергии. Измерение электрического сопротивления, измерительные механизмы.	<b>18</b>	<b>2</b>
		2	2
<b>Тема 1.9.</b> Электрические цепи переменного тока	<b>Практические занятия:</b> Коэффициент мощности и способы его повышения. Расчет цепей переменного тока	<b>20</b>	<b>4</b>
		2	2
		2	2
<b>Тема 1.10.</b> Основные законы электротехники. Законы Кирхгофа.	<b>Практические занятия:</b> Законы Кирхгофа при постоянных токах. Баланс мощностей.	<b>14</b>	4
		2	2
		2	2
<b>Тема 1.12.</b> Разветвленные электрические цепи.	<b>Практические занятия:</b> Исследование электрической цепи с последовательным, параллельным и смешанным соединением приёмников электрической энергии.	<b>14</b>	2
		2	2
<b>Тема 1.13.</b> Методы свёртывания цепи.	<b>Практические занятия:</b> Расчёт сложных электрических цепей постоянного тока	<b>8</b>	2
		2	2
<b>Раздел 2. Электроника</b>			
<b>Тема 2.1.</b> Электронные и полупроводниковые приборы	<b>Практические занятия:</b> Свойства P-N перехода Определение параметров и характеристик полупроводникового диода	<b>22</b>	4
		2	2
		2	2
<b>Тема 2.2.</b> Выпрямители и стабилизаторы напряжения и тока	<b>Практические занятия:</b> Выбор полупроводниковых диодов к схемам электронных выпрямителей. Расчет выпрямителя с емкостным фильтром	<b>12</b>	4
		2	2
		2	2
<b>Тема 2.3.</b> Полупроводниковые	<b>Практические занятия:</b> Расчет рабочей точки электронного усилителя	<b>10</b>	2
		2	2

усилители			
Форма текущего контроля по разделу 2. Защита практических работ.			

## Порядок выполнения практической (лабораторной) работы обучающихся

### Практическое занятие: Измерение электрической энергии. Измерение электрического сопротивления, измерительные механизмы

#### Раздел 1 Электротехника.

#### Тема 1.4. Электрические измерения

**Цель:** сформировать знания и умения отличать технические средства, которые служат для измерения электрических величин; по каким признакам различают измерительные приборы, принципы их действия, погрешности измерений и различия между классами точности.

**Оснащение:**

1. Таблицы с результатами измерений и вычислений.
2. Формулы, необходимые для расчета.

**Задание:**

1. Амперметр с внутренним сопротивлением 0,28 Ом имеет шкалу на 50 дел. с ценой деления 0,01 А /дел. Определить цену деления и предельную величину измеряемого тока при подключении шунта с сопротивлением 0,02Ом.
2. Шкала ИМ с сопротивлением 50м разбита на 100дел. Цена деления 0,2 мА/дел. Из этого механизма необходимо сделать амперметр на 10А. Как это сделать? Какой ток в цепи измерит амперметр, если стрелка отклонилась на 35дел.
3. Определить значение сопротивления шунта, необходимого для расширения предела измерения амперметра с внутренним сопротивлением 50м, от номинального его значения 4мА до значения 15А.
4. Шкала ИМ с внутренним сопротивлением 20м разбита на 150дел. Цена деления 0,2мА/дел. Из этого механизма необходимо сделать амперметр на 15А. Как это сделать?
5. Какой ток измерит амперметр, если стрелка отклонилась на 20дел.
6. Определить значение сопротивления шунта для расширения предела измерения амперметра с внутренним сопротивлением 0,58Ом, от номинального значения 5А до значения 150А.
7. К амперметру, рассчитанному на 5А с внутренним сопротивлением 0,6Ом и шкалой на 10дел. подключен шунт с сопротивлением 0,025Ом. При измерении тока стрелка отклонилась на 8дел. Определить ток в цепи, измеренный амперметром.

**Порядок выполнения задания:**

1. Проработайте теоретический материал и ответьте на контрольные вопросы.
2. Ознакомьтесь с заданием и выполните его.
3. Оформите результаты работы.

**Методические указания:**

**Пример 1:**

При измерении тока было получено значение

$$I_1 = 25,5 \text{ А},$$

тогда как действительное его значение было  $I=25 \text{ А}$ .

Определить абсолютную и относительную погрешности измерения.

**Решение:**

Абсолютной погрешностью измерения называют разность между полученными при измерении и действительными значениями измеряемой величины:

$$\Delta I = I_1 - I = 25,5 - 25 = 0,5 \text{ А}$$

Относительная погрешность, оценивающая качество выполненного измерения, представляет собой отношение абсолютной погрешности измерения к действительному значению измеряемой величины (отношение, выраженное в процентах):

$$\psi_{\text{изм}} = \frac{\Delta I}{I} \cdot 100 = \frac{0,5}{25} \cdot 100 = 2\%.$$

### Пример 2.

Чтобы измерить э. д. с. генератора, к его зажимам при холостом ходе присоединили вольтметр, сопротивление которого 1200 Ом. Внутреннее сопротивление генератора 0,6 Ом. (Определить относительную погрешность, если показание вольтметра принимается равным э. д. с. генератора).

#### Решение:

На основании второго закона Кирхгофа для неразветвленного контура, состоящего из генератора и вольтметра, имеем

$$E = r_0 I + r_V I,$$

или, вынося  $I$  за скобку,

$$E = (r_0 + r_V) I = (1200 + 0,6) I = 1200,6 I.$$

Если же приближенное показание вольтметра принять равным э. д. с. генератора, то  $E_1 = r_V I$ , или  $E_1 = 1200 I$ .

Абсолютная погрешность — это разность между найденным ( $E_1$ ) и действительным ( $E$ ) значениями измеряемой величины:

$$\Delta E = E_1 - E = 1200 I - 1200,6 I = -0,6 I.$$

Отношение абсолютной погрешности ( $\Delta E$ ) к действительному значению измеряемой величины ( $E$ ), выраженное в процентах, представляет собой относительную погрешность измерения:

$$\psi_{\text{изм}} = \frac{\Delta E}{E} \cdot 100 = \frac{-0,6 I}{1200,6 I} \cdot 100 = -0,5\%.$$

Эта погрешность возникает от несовершенства метода измерения и относится к систематическим погрешностям, которые останутся при данном методе измерения и при повторных измерениях.

### Пример 3.

Номинальный ток амперметра равен 5 А. Класс точности его 1,5. Определить наибольшую возможную абсолютную погрешность прибора.

#### Решение:

Число 1,5, указывающее класс точности амперметра, обозначает основную приведенную его погрешность, т. е. выраженное в процентах отношение наибольшей возможной абсолютной погрешности прибора ( $\Delta I$ ), находящегося в нормальных условиях, к номинальной величине тока ( $I_{\text{ном}}$ ):

$$\psi_{\text{пр}} = \frac{\Delta I}{I_{\text{ном}}} \cdot 100.$$

Примечание. Условия нормальны, если прибор установлен в положении, указанном на его шкале, находится в среде с температурой 20°C и не подвержен действию внешних магнитных полей (кроме магнитного поля Земли).

Следовательно,

$$\psi_{\text{пр}} = 1,5\%, \quad I_{\text{ном}} = 5 \text{ А}.$$

Подставив числовые значения, получим

$$1,5\% = \frac{(\Delta I)_{\max}}{5} \cdot 100,$$

откуда

$$(\Delta I)_{\max} = \frac{1,5 \cdot 5}{100} = \frac{7,5}{100} = 0,075 \text{ A}$$

**Форма контроля** – защита практической работы.

**Вопросы для самоконтроля:**

1. Что такое абсолютная погрешность электроизмерительного прибора?
2. Что такое класс точности электроизмерительного прибора?
3. Какие условные обозначения имеются на шкале электроизмерительного прибора?
4. Какие виды погрешностей вы знаете?
5. Как классифицируются электроизмерительные приборы?

**Рекомендуемая литература:**

1. Клепча В.Ф. Электротехника. Лабораторный практикум [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.Ф. Клепча. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2016. — 180 с. — 978-985-503-553-5. <http://www.iprbookshop.ru/67802.html>
2. Дементьев Ю.Н. Электротехника и электроника. Электрический привод [Электронный ресурс] : учебное пособие для СПО / Ю.Н. Дементьев, А.Ю. Чернышев, И.А. Чернышев. — Электрон. текстовые данные. — Саратов: Профобразование, 2017. — 223 с. — 978-5-4488-0144-0. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66403.html>

## Практическое занятие: Коэффициент мощности и способы его повышения

### Раздел 1 Электротехника.

#### Тема 1.9. Электрические цепи переменного тока

**Цель:** Исследовать возможность повышения коэффициента мощности различными методами.

**Оснащение:**

1. Таблицы с результатами измерений и вычислений.
2. Формулы, необходимые для расчета.

**Задание:**

1. Какова активная мощность, которую отдает генератор однофазного переменного электрического тока в сеть потребителям, если вольтметр на щите генератора показывал 220 В, амперметр — 10 А, а фазометр — 0,6?
2. Вычислить напряжение ( $U$ ) и реактивную мощность цепи ( $S$ ), если известны:  $I=2$ А,  $r=1$  Ом, коэффициент мощности 0,5 и ток отстает от напряжения.

**Порядок выполнения задания:**

1. Проработайте теоретический материал и ответьте на контрольные вопросы.
2. Ознакомьтесь с заданием и выполните его.
3. Оформите результаты работы.

**Методические указания:**

Площади поперечного сечения приводов линий электропередачи и электрических сетей, обмоток электрических машин, трансформаторов, электротехнических аппаратов и приборов выбираются, исходя из нагревания, по значению тока в них, который при заданном напряжении переменного тока прямо пропорционален полной мощности  $S$ . А энергия, преобразуемая из электрической в другие виды (в механическую, тепловую и т. д.) и используемая в большей части для практических целей, пропорциональна активной энергии и соответствующей ей активной мощности  $P$ .

Как известно, между указанными мощностями и реактивной мощностью существуют соотношения

$$P = S \cos \varphi; S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Входящий в первое выражение  $\cos \varphi$  называется коэффициентом мощности и показывает, какую часть полной мощности составляет активная мощность:

$$\cos \varphi = P/S = P/\sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Считая, что активная мощность установки, значение которой зависит в основном от мощности приемников, остается постоянной, выясним, к чему приведет увеличение коэффициента мощности установки.

Как следует из приведенных формул, при увеличении  $\cos \varphi$  мощность  $S$  уменьшается. При  $P=\text{const}$  это может происходить лишь за счет уменьшения реактивной мощности  $Q$  установки. Снижение мощности  $S$  приводит к уменьшению линейного тока  $I_{\text{л}}$ . Последнее будет сопровождаться уменьшением потерь напряжения и мощности в сопротивлениях проводов сети, обмотках трансформаторов и генераторов.

Очевидно, при уменьшении тока площади поперечного сечения названных элементов могут быть также уменьшены. В отношении трансформаторов и генераторов это приводит к уменьшению габаритных размеров, расхода дефицитных материалов на изготовление, массы, номинальной мощности и стоимости.

В действующей установке повышение  $\cos \varphi$  при существующей площади поперечного сечения проводов позволит увеличить число приемников, которые могут быть подключены к данной сети.

Таким образом, повышение коэффициента мощности дает определенные выгоды во многих отношениях, а поэтому имеет большое народнохозяйственное значение.



Большая часть элементов электрических цепей переменного тока потребляет кроме активной мощности также индуктивную мощность. К ним относятся в первую очередь наиболее распространенные в народном хозяйстве асинхронные электродвигатели. Значительная часть индуктивной мощности потребляется трансформаторами, широко используемыми в различных установках. Индуктивная мощность потребляется также различными электромагнитными аппаратами, такими, например, как электромагниты, контакторы и магнитные пускатели, реле и т. д.

Для уменьшения индуктивной мощности и увеличения тем самым  $\cos \varphi$  необходимо прежде всего:

- выбирать правильно двигатели по мощности, так как необоснованное завышение мощности приведет к их работе с недогрузкой, а при этом, как правило,  $\cos \varphi$  понижается;
- заменять двигатели, работающие с недогрузкой, двигателями меньшей мощности;
- сокращать по возможности времена работы двигателей и трансформаторов холостую.

Если все же  $\cos \varphi$  оказывается недостаточно высоким, прибегают часто к его искусственному повышению. Для этой цели подключают к трехфазной сети компенсирующие устройства, к которым относятся батареи конденсаторов и трехфазные синхронные компенсаторы. Последние применяются реже. Батарея конденсаторов соединяется обычно треугольником, как показано на рис. 1а. Батарея конденсаторов потребляет емкостную мощность, которая частично компенсирует индуктивную мощность установки, в результате чего реактивная мощность уменьшается, а коэффициент мощности повышается. Естественно, что  $\cos \varphi$  самих приемников при этом остается прежним.

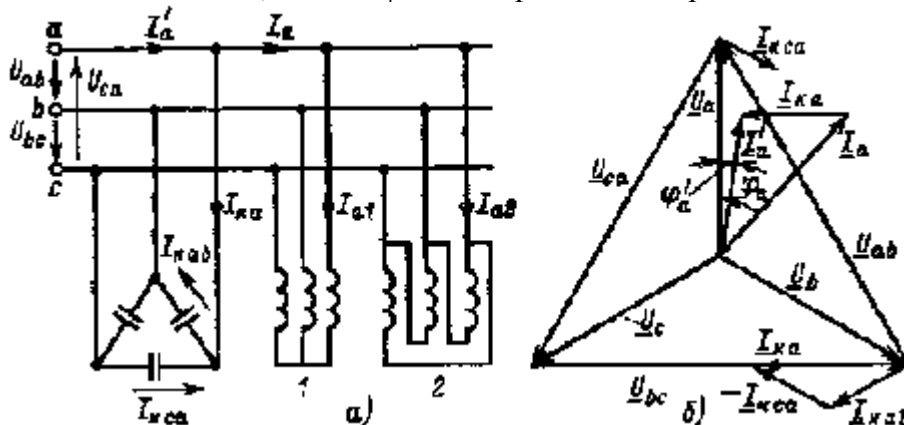


Рис. 1. Схема и векторная диаграмма

Чтобы уменьшить ток проводов сети, батарею конденсаторов устанавливают по возможности вблизи приемников.

### Пример.

К трехфазной сети рис. 1а с линейными напряжениями  $U_{л}=220\text{В}$  подключены два трехфазных приемника. Активная мощность и коэффициент мощности первого приемника  $P_1 = 10 \text{ кВт}$ ,  $\cos \varphi_1 = 0,7$ . Фазные сопротивления второго приемника  $r_{\phi} = 6 \text{ Ом}$ ,  $x_{L\phi} = 8 \text{ Ом}$ , нагрузка симметричная.

Определить токи, мощности и коэффициент мощности  $\cos \varphi$  установки из двух приемников. Найти мощность, токи и емкость батареи конденсаторов, если требуется повысить коэффициент мощности до  $\cos \varphi' = 0,95$ . Определить токи и мощности установки из двух приемников и батареи конденсаторов.

**Решение.** Полная и реактивная мощности первого приемника

$$S_1 = P_1 / \cos \varphi_1 = 14,3 \text{ кВ}\cdot\text{А}, Q_1 = \sqrt{S_1^2 - P_1^2} \approx 10,2 \text{ квар.}$$

Полное сопротивление и ток фазы второго приемника

$$z^2 = \sqrt{r_2^2 + x_{L2}^2} = 10 \text{ Ом}; I_{\phi 2} = U_{\phi} / z_2 = U_{л} / z_2 = 22 \text{ А.}$$

Активная и реактивная мощности второго приемника

$$P_2 = 3I_{\phi 2}^2 r_2 = 8,7 \text{ кВт}; Q_2 = 3I_{\phi 2}^2 x_{L\phi} \approx 11,6 \text{ квар.}$$

Активная, реактивная и полная мощности установки, состоящей из двух приемников.

$$P = P_1 + P_2 = 18,7 \text{ кВт}; Q = Q_1 + Q_2 = 21,8 \text{ квар};$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \approx 28,7 \text{ кВ}\cdot\text{А}.$$

Линейный ток и коэффициент мощности установки из двух приемников

$$I_{\text{л}} = I_a = S/\sqrt{3}U_{\text{л}} \approx 75,5 \text{ А}; \cos \varphi = P/S \approx 0,65.$$

Мощности установки из приемников и батареи конденсаторов

$$P' = P = 18,7 \text{ кВт}; S' = P/\cos \varphi' = 19,68 \text{ кВ}\cdot\text{А};$$

$$Q' = \sqrt{S'^2 - P^2} = 6,13 \text{ квар}.$$

Линейные токи установки из приемников и батареи конденсаторов, мощность и линейные токи батареи конденсаторов

$$I'_{\text{л}} = I'_a = S'\sqrt{3}U_{\text{л}} = 51,7 \text{ А}; Q_{\text{к}} = Q - Q' = 15,67 \text{ квар};$$

$$I_{\text{к.л}} = Q_{\text{к}}/\sqrt{3}U_{\text{л}} = 41,2 \text{ А}.$$

Фазные токи и сопротивление фазы батареи конденсаторов

$$I_{\text{к.л}}/\sqrt{3} = 20,8 \text{ А}; x_{\text{к.ф}} = U_{\text{ф}}/I_{\text{к.ф}} = U_{\text{л}}/I_{\text{к.л}} = 10,58 \text{ Ом}.$$

Емкость одной фазы и всей батареи конденсаторов

$$C_{\text{к.ф}} = 1/2\pi/x_{\text{к.ф}} = 30 \text{ мкФ}; C_{\text{к}} = 3C_{\text{к.ф}} = 90 \text{ мкФ}.$$

Векторная диаграмма цепи рис. 3.18, а приведена на рис. 3.18, б. На диаграмме показаны только те токи, которые определяют ток  $I'_a$  (т. е.  $I_a$  и  $I_{\text{ка}}$ ), а также токи, определяющие ток  $I_{\text{ка}}$

(т. е.  $I_{\text{каб}}$  и  $I_{\text{кса}}$ ).

**Форма контроля** – защита практической работы.

**Вопросы для самоконтроля:**

1. Практическое значение коэффициента мощности.
2. Способы расчета коэффициента мощности.

**Рекомендуемая литература:**

1. Клепча В.Ф. Электротехника. Лабораторный практикум [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.Ф. Клепча. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2016. — 180 с. — 978-985-503-553-5. <http://www.iprbookshop.ru/67802.html>
2. Дементьев Ю.Н. Электротехника и электроника. Электрический привод [Электронный ресурс] : учебное пособие для СПО / Ю.Н. Дементьев, А.Ю. Чернышев, И.А. Чернышев. — Электрон. текстовые данные. — Саратов: Профобразование, 2017. — 223 с. — 978-5-4488-0144-0. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66403.html>

## Практическое занятие: Расчет цепей переменного тока

### Раздел 1 Электротехника.

#### Тема 1.9. Электрические цепи переменного тока

Цель: получить Практические навыки расчета цепей переменного тока

#### Оснащение:

1. Таблицы с результатами измерений и вычислений.
2. Формулы, необходимые для расчета.

#### Задание:

1. Начертить схему цепи, включая только те элементы (резисторы, индуктивности, емкости), величины которых заданы в таблице для каждого варианта.
2. Определить следующие величины, относящиеся к данной цепи, если они не заданы, как дополнительный параметр в таблице:

Варианты	R1, Ом	R2, Ом	L1, мкГн	L2, мкГн	C1, мФ	C2, мФ	Дополнительный параметр
1	2	3	4	5	6	7	8
01	4	-	6	-	3	-	U=48 В
02	6	2	3	-	9	-	U=40 В
03	-	6	-	12	-	4	I=5 А
04	6	2	12	-	6	-	U=20 В
05	4	4	-	6	12	-	U=36 В
06	3	-	6	-	-	2	I=3 А
07	-	8	-	16	4	6	U=20 В
08	16	-	10	8	6	-	U=80 В
09	-	4	3	-	2	4	I=4 А
10	3	-	2	-	-	6	U=50 В
11	4	4	-	4	10	-	P=200 Вт
12	4	4	2	-	-	8	U=60 В
13	6	-	-	4	12	-	I=25 А
14	8	8	-	8	8	-	I=5 А
15	-	4	5	-	5	3	P=100 Вт
16	6	8	-	4	4	-	U=20
17	-	8	-	12	4	2	I=16
18	6	-	2	-	-	10	I=8
19	4	2	-	12	4	-	P=600
20	5	3	3	-	-	9	U=54
21	3	6	-	6	6	-	U=45
22	-	4	8	4	3	6	I=12
23	4	4	-	4	10	-	P=72
24	-	4	-	6	-	3	P=300
25	6	2	-	3	9	-	I=6
26	2	2	4	2	3	-	U=30
27	4	-	-	3	4	2	P=36
28	-	8	-	16	4	6	P=1000
29	-	3	6	-	2	-	I=10
30	3	-	7	-	3	-	U=50

**Порядок выполнения задания:**

1. Цепь переменного тока содержит различные элементы, включенные последовательно.  
Данные для своего варианта взять из таблицы.
2. Полное сопротивление цепи ( $Z$ )
3. Напряжение  $U$ , приложенное к цепи
4. Ток  $I$  Индуктивное ( $X_L$ ) и емкостное ( $X_C$ ) сопротивление:

3. Какое сопротивление называется реактивным?
4. Что называется амплитудой тока (напряжения)?
5. Какой ток называется переменным?

**Рекомендуемая литература:**

1. Клепча В.Ф. Электротехника. Лабораторный практикум [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.Ф. Клепча. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2016. — 180 с. — 978-985-503-553-5. <http://www.iprbookshop.ru/67802.html>
2. Дементьев Ю.Н. Электротехника и электроника. Электрический привод [Электронный ресурс] : учебное пособие для СПО / Ю.Н. Дементьев, А.Ю. Чернышев, И.А. Чернышев. — Электрон. текстовые данные. — Саратов: Профобразование, 2017. — 223 с. — 978-5-4488-0144-0. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66403.html>

## Практическое занятие: Законы Кирхгофа при постоянных токах. Баланс мощностей

### Раздел 1 Электротехника.

#### Тема 1.10. Основные законы электротехники. Законы Кирхгофа.

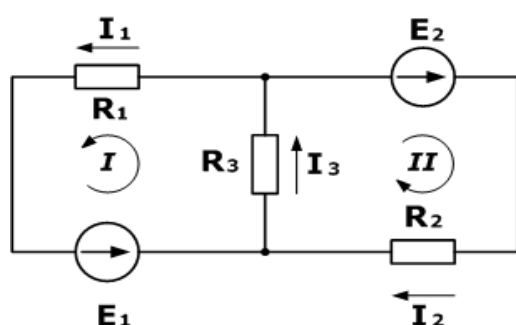
**Цель:** расчёт по законам Кирхгофа, экспериментальное исследование и моделирование разветвлённой электрической цепи постоянного тока.

**Оснащение:**

1. Таблицы с результатами измерений и вычислений.
2. Формулы, необходимые для расчета.

**Задание:**

1. Дана схема, и известны сопротивления резисторов и ЭДС источников. Требуется найти токи в ветвях, используя законы Кирхгофа.

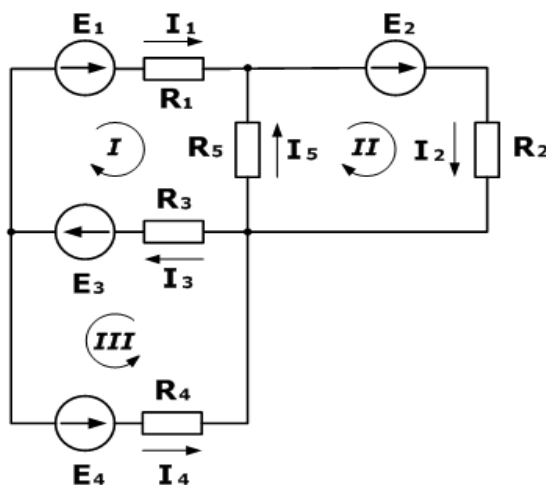


**Дано**

$R_1 = 100 \text{ Ом}$   
 $R_2 = 150 \text{ Ом}$   
 $R_3 = 150 \text{ Ом}$   
 $E_1 = 75 \text{ В}$   
 $E_2 = 100 \text{ В}$

$I_1, I_2, I_3 - ?$

2. Зная сопротивления резисторов и ЭДС трех источников найти ЭДС четвертого и токи в ветвях.



**Дано**

$R_1 = 130 \text{ Ом}$   
 $R_2 = 100 \text{ Ом}$   
 $R_3 = 150 \text{ Ом}$   
 $R_4 = 200 \text{ Ом}$   
 $R_5 = 80 \text{ Ом}$   
 $E_1 = 30 \text{ В}$   
 $E_2 = 60 \text{ В}$   
 $E_3 = 80 \text{ В}$   
 $I_5 = 0,206 \text{ А}$

$I_1, I_2, I_3, I_4 - ?$   
 $E_4 - ?$

**Порядок выполнения задания:**

1. Проработайте теоретический материал и ответьте на контрольные вопросы.
2. Ознакомьтесь с заданием и выполните его.
3. Оформите результаты работы.

**Методические указания:**

В электрических цепях, состоящих из последовательно соединенных источника и приемника энергии, соотношение между током, ЭДС и сопротивлением во всей цепи или на каком-либо ее участке определяется законом Ома. Однако на практике преимущественно

встречаются такие цепи, в которых токи могут идти по разным путям, т.е. в которых есть узлы (узловые точки), где сходятся несколько проводников. Сложные электрические цепи содержат два и более источников питания. Для расчета параметров таких цепей применяются первый и второй законы Кирхгофа.

Законы Кирхгофа устанавливают соотношения между токами и напряжениями в разветвленных электрических цепях произвольного типа. Законы Кирхгофа имеют особое значение в электротехнике из-за своей универсальности, так как пригодны для решения любых электротехнических задач. Законы Кирхгофа справедливы для линейных и нелинейных цепей при постоянных и переменных напряжениях и токах.

Первый закон Кирхгофа вытекает из закона сохранения заряда. Он состоит в том, что алгебраическая сумма токов, сходящихся в любом узле, равна нулю.

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0$$

где  $n$  – число токов, сходящихся в данном узле. Например, для узла электрической цепи (рис. 1) уравнение по первому закону Кирхгофа можно записать в виде  $I_1 - I_2 + I_3 - I_4 + I_5 = 0$

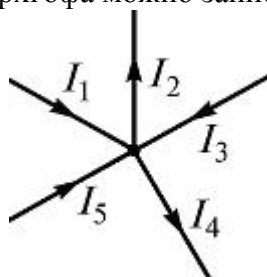


Рис. 1

В этом уравнении токи, направленные к узлу, приняты положительными.

Физически первый закон Кирхгофа – это закон непрерывности электрического тока.

Второй закон Кирхгофа: алгебраическая сумма падений напряжений на отдельных участках замкнутого контура, произвольно выделенного в сложной разветвленной цепи, равна алгебраической сумме ЭДС в этом контуре

$$\sum_{i=1}^k E_i = \sum_{i=1}^m I_i R_i$$

где  $k$  – число источников ЭДС;  $m$  – число ветвей в замкнутом контуре;  $I_i$ ,  $R_i$  – ток и сопротивление  $i$ -й ветви.

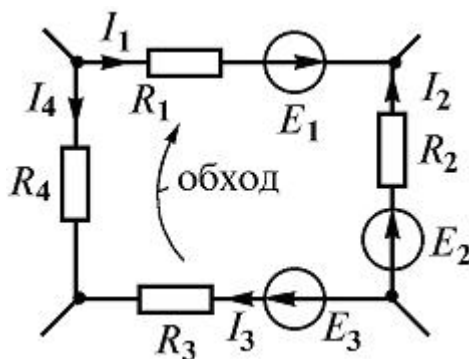


Рис. 2

Так, для замкнутого контура схемы (рис. 2)  $E_1 - E_2 + E_3 = I_1 R_1 - I_2 R_2 + I_3 R_3 - I_4 R_4$

Замечание о знаках полученного уравнения:

- 1) ЭДС положительна, если ее направление совпадает с направлением произвольно выбранного обхода контура;
- 2) падение напряжения на резисторе положительно, если направление тока в нем совпадает с направлением обхода.

Физически второй закон Кирхгофа характеризует равновесие напряжений в любом контуре цепи.

### Расчет разветвленной электрической цепи с помощью законов Кирхгофа

**Метод законов Кирхгофа** заключается в решении системы уравнений, составленных по первому и второму законам Кирхгофа.

Метод заключается в составлении уравнений по первому и второму законам Кирхгофа для узлов и контуров электрической цепи и решении этих уравнений с целью определения неизвестных токов в ветвях и по ним – напряжений. Поэтому число неизвестных равно числу ветвей  $b$ , следовательно, столько же независимых уравнений необходимо составить по первому и второму законам Кирхгофа.

Число уравнений, которые можно составить на основании первого закона, равно числу узлов цепи, причем только  $(y - 1)$  уравнений являются независимыми друг от друга.

Независимость уравнений обеспечивается выбором узлов. Узлы обычно выбирают так, чтобы каждый последующий узел отличался от смежных узлов хотя бы одной ветвью. Остальные уравнения составляются по второму закону Кирхгофа для независимых контуров, т.е. число уравнений  $b - (y - 1) = b - y + 1$ .

Контур называется независимым, если он содержит хотя бы одну ветвь, не входящую в другие контуры.

Составим систему уравнений Кирхгофа для электрической цепи (рис. 3). Схема содержит четыре узла и шесть ветвей.

Поэтому по первому закону Кирхгофа составим  $y - 1 = 4 - 1 = 3$  уравнения, а по второму  $b - y + 1 = 6 - 4 + 1 = 3$ , также три уравнения.

Произвольно выберем положительные направления токов во всех ветвях (рис. 4).

Направление обхода контуров выбираем по часовой стрелке.

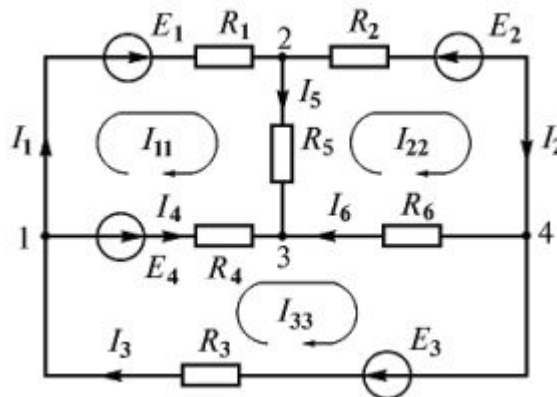


Рис. 3

Составляем необходимое число уравнений по первому и второму законам Кирхгофа

$$\begin{aligned}
 I_1 + I_4 - I_3 &= 0; \\
 E_1 - E_4 &= I_1 R_1 + I_5 R_5 - I_4 R_4 \\
 I_2 + I_5 - I_1 &= 0; \\
 -E_2 &= I_2 R_2 + I_6 R_6 - I_5 R_5; \\
 I_4 + I_5 + I_6 &= 0; \\
 E_4 + E_3 &= I_4 R_4 + I_3 R_3 - I_6 R_6.
 \end{aligned}$$

Полученная система уравнений решается относительно токов. Если при расчете ток в ветви получился с минусом, то его направление противоположно принятому направлению.

**Потенциальная диаграмма** – это графическое изображение второго закона Кирхгофа, которая применяется для проверки правильности расчетов в линейных резистивных цепях. Потенциальная диаграмма строится для контура без источников тока, причем потенциалы точек начала и конца диаграммы должны получиться одинаковыми.



Рассмотрим контур abcd схемы, изображенной на рис. 4. В ветке ab между резистором R1 и ЭДС E1 обозначим дополнительную точку k.

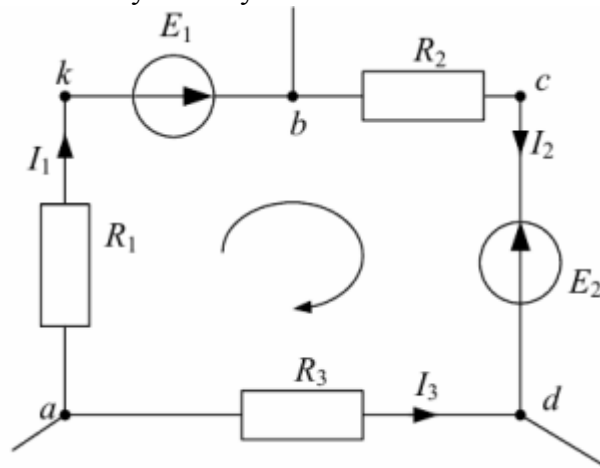


Рис. 4. Контур для построения потенциальной диаграммы

Потенциал любого узла принимаем равным нулю (например,  $\varphi_a=0$ ), выбираем обход контура и определяем потенциалы точек контура:  $\varphi_a = 0$ ,  $\varphi_k = \varphi_a - I_1 R_1$ ,  $\varphi_b = \varphi_k + E_1$ ,  $\varphi_c = \varphi_b - I_2 R_2$ ,  $\varphi_d = \varphi_c - E_2$ ,  $\varphi_a = \varphi_d + I_3 R_3 = 0$

При построении потенциальной диаграммы необходимо учитывать, что сопротивление ЭДС равно нулю (рис. 5).

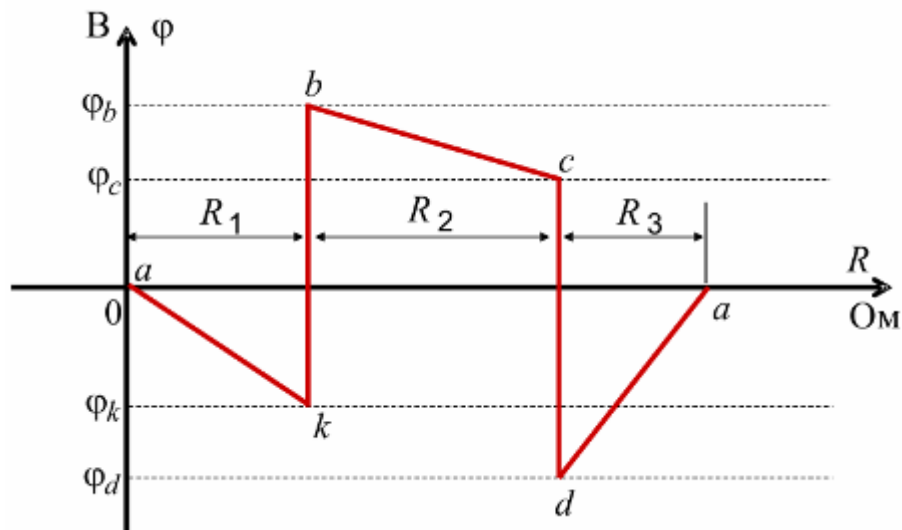


Рис. 5. Потенциальная диаграмма

### Законы Кирхгофа в комплексной форме

Для цепей синусоидального тока законы Кирхгофа формулируются так же, как и для цепей постоянного тока, но только для комплексных значений токов и напряжений.

**Первый закон Кирхгофа:** «алгебраическая сумма комплексных токов в узле электрической цепи равна нулю»

$$\sum_{k=1}^n \underline{I}_k = 0$$

**Второй закон Кирхгофа:** «в любом замкнутом контуре электрической цепи алгебраическая сумма комплексных ЭДС равна алгебраической сумме комплексных напряжений на всех пассивных элементах этого контура».

$$\sum_{k=1}^n \underline{E}_k = \sum_{k=1}^n \underline{I}_k \underline{Z}_k$$

**Баланс мощностей.** Из закона сохранения энергии следует, что мощность, отдаваемая источниками питания, должна равняться мощности, потребляемой

сопротивлениями ветвей или приемниками электроэнергии. Таким образом, алгебраическая сумма мощностей источников питания равна арифметической сумме мощностей приемников:

$$\sum_{k=1}^m E_k I_k = \sum_{k=1}^n I_k^2 \cdot R_k$$

где  $m$  – число источников энергии,  $n$  – число сопротивлений в цепи.

Если направления ЭДС и тока в ветви совпадают по результатам окончательного расчета, то источник отдает мощность в сеть и в уравнении баланса мощностей перед произведением  $E_k I_k$  ставится знак «плюс». Если ЭДС и ток в ветви направлены встречно, источник потребляет мощность (например, аккумуляторная батарея при зарядке) и произведение  $E_k I_k$  входит в левую часть уравнения со знаком «минус».

В правой части уравнения произведения  $I_k^2 R_k$  всегда положительны.

**Форма контроля** – защита практической работы.

**Вопросы для самоконтроля:**

1. Назовите количество уравнений по 1 закону Кирхгофа.
2. Назовите количество уравнений по 2 закону Кирхгофа.
3. Опишите 1 закон Кирхгофа в комплексной форме записи.
4. Опишите закон Кирхгофа в комплексной форме записи.

**Рекомендуемая литература:**

1. Клепча В.Ф. Электротехника. Лабораторный практикум [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.Ф. Клепча. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2016. — 180 с. — 978-985-503-553-5. <http://www.iprbookshop.ru/67802.html>
2. Дементьев Ю.Н. Электротехника и электроника. Электрический привод [Электронный ресурс] : учебное пособие для СПО / Ю.Н. Дементьев, А.Ю. Чернышев, И.А. Чернышев. — Электрон. текстовые данные. — Саратов: Профобразование, 2017. — 223 с. — 978-5-4488-0144-0. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66403.html>

**Практическое занятие: Исследование электрической цепи с последовательным, параллельным и смешанным соединением приёмников электрической энергии**

**Раздел 1 Электротехника.**

**Тема 1.12. Разветвленные электрические цепи.**

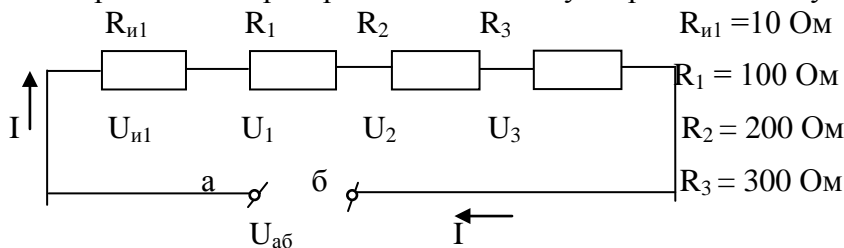
**Цель:** Исследовать электрические цепи при различных способах соединения резисторов. Определить эквивалентное сопротивление опытным путем и с помощью расчета по формулам.

**Оснащение:**

1. Лабораторный стенд
2. Вольтметр универсальный В7-26

**Задание:**

1. В лабораторной работе необходимо исследовать работу цепи постоянного тока при различных способах соединения приемников электрической энергии.
2. Собрать на лабораторном стенде данную принципиальную схему.



3. С помощью вольтметра В 7-26 измерить значение эквивалентного сопротивления цепи  $R_{э\text{кв}}$ .
4. С помощью вольтметра В 7-26 измерить значение ЭДС источника.
5. С помощью вольтметра В 7-26 измерить значения падений напряжения на элементах цепи  $R_{и1}$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и на зажимах источника.
6. Результаты измерений занести в таблицу.

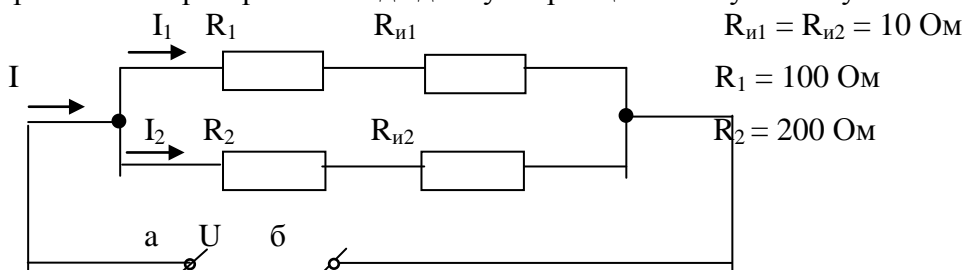
Измерить							Вычислить								
E	$R_{э\text{кв}}$	$U_{и1}$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_{аб}$	I	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_{и1}$	$P_{аб}$	$P_0$	$R_0$	$R_{э\text{кв}}$
В	Ом	В	В	В	В	В	А	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	Ом

7. По следующим формулам произвести вычисления:

$$I = U_{и1}/R_{и1} \quad P_1 = U_1 I \quad P_2 = U_2 I \quad P_3 = U_3 I \quad P_{и1} = U_{и1} I \quad P_{аб} = I U_{аб} \quad P_0 = I^2 R_0$$

$$R_0 = (E - U_{аб}) / I \quad R_{э\text{кв}} = R_{и1} + R_1 + R_2 + R_3 + R_0 \quad P_{аб} = P_{и1} + P_1 + P_2 + P_3 + P_0$$

8. Собрать на лабораторном стенде данную принципиальную схему.



9. С помощью вольтметра В7-26 измерить значение эквивалентного сопротивления цепи  $R_{э\text{кв}}$ .
10. С помощью вольтметра В7-26 измерить значения падений напряжения на элементах цепи  $R_{и1}$ ,  $R_1$ ,  $R_{и2}$ ,  $R_2$  и на зажимах источника.
11. Результаты измерений занести в таблицу.

Измерить	Вычислить

$R_{\text{ЭКВ}}$	$U_{\text{и1}}$	$U_1$	$U_{\text{и2}}$	$U_2$	$U_{\text{аб}}$	$I$	$I_1$	$I_2$	$P_1$	$P_{\text{и1}}$	$P_2$	$P_{\text{и2}}$	$P_{\text{аб}}$	$P_0$	$R_0$	$R_{\text{ЭКВ}}$
Ом	В	В	В	В	В	А	А	А	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	Ом	Ом

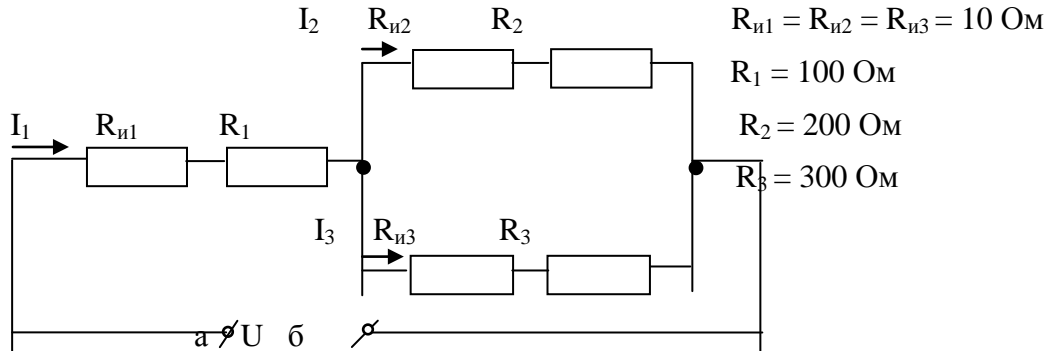
12. По следующим формулам произвести вычисления:

$$I_1 = U_{\text{и1}} / R_{\text{и1}} \quad I_2 = U_{\text{и2}} / R_{\text{и2}} \quad I = I_1 + I_2 \quad P_{\text{и1}} = I_1 U_{\text{и1}} \quad P_1 = I_1 U_1 \quad P_{\text{и2}} = I_2 U_{\text{и2}} \quad P_2 = I_2 U_2$$

$$P_{\text{аб}} = I U_{\text{аб}} \quad P_0 = I^2 R_0 \quad R_0 = (E - U_{\text{аб}}) / I \quad P_{\text{аб}} = P_1 + P_{\text{и1}} + P_2 + P_{\text{и2}} + P_0$$

$$R_{\text{ЭКВ}} = [(R_{\text{и1}} + R_1)(R_{\text{и2}} + R_2) / (R_{\text{и1}} + R_1 + R_{\text{и2}} + R_2)] + R_0$$

13. Собрать на лабораторном стенде данную принципиальную схему.



14. С помощью вольтметра В7-26 измерить значение эквивалентного сопротивления цепи  $R_{\text{ЭКВ}}$ .

15. С помощью вольтметра В7-26 измерить значения падений напряжения на элементах цепи  $R_{\text{и1}}$ ,  $R_1$ ,  $R_{\text{и2}}$ ,  $R_2$ ,  $R_{\text{и3}}$ ,  $R_3$  и на зажимах источника.

16. Результаты измерений занести в таблицу.

Измерить							
$R_{\text{ЭКВ}}$	$U_{\text{и1}}$	$U_1$	$U_{\text{и2}}$	$U_2$	$U_{\text{и3}}$	$U_3$	$U_{\text{аб}}$
Ом	В	В	В	В	В	В	В

Вычислить												
$I_1$	$I_2$	$I_3$	$P_1$	$P_{\text{и1}}$	$P_2$	$P_{\text{и2}}$	$P_3$	$P_{\text{и3}}$	$P_{\text{аб}}$	$P_0$	$R_0$	$R_{\text{ЭКВ}}$
А	А	А	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	Ом	Ом

17. По следующим формулам произвести вычисления:

$$I_1 = U_{\text{и1}} / R_{\text{и1}} \quad I_2 = U_{\text{и2}} / R_{\text{и2}} \quad I_3 = U_{\text{и3}} / R_{\text{и3}} \quad P_{\text{и1}} = I_1 U_{\text{и1}} \quad P_1 = I_1 U_1 \quad P_{\text{и2}} = I_2 U_{\text{и2}} \quad P_2 = I_2 U_2$$

$$P_{\text{и3}} = I_3 U_{\text{и3}} \quad P_3 = I_3 U_3 \quad P_{\text{аб}} = I U_{\text{аб}} \quad R_0 = (E - U_{\text{аб}}) / I \quad P_0 = I^2 R_0$$

$$P_{\text{аб}} = P_{\text{и1}} + P_1 + P_{\text{и2}} + P_2 + P_{\text{и3}} + P_3 + P_0$$

$$R_{\text{ЭКВ}} = [(R_{\text{и2}} + R_2)(R_{\text{и3}} + R_3) / (R_{\text{и2}} + R_2 + R_{\text{и3}} + R_3)] + R_{\text{и1}} + R_1 + R_0$$

18. Оформить отчет по проделанной работе.

19. Сделать соответствующие выводы по работе.

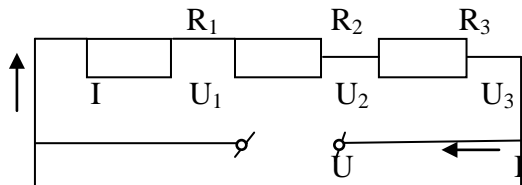
### Порядок выполнения задания:

1. С помощью вольтметра В7-26 измерить ЭДС источника.
2. В соответствии с принципиальной схемой собрать на лабораторном стенде неразветвленную электрическую цепь.
3. С помощью вольтметра В7-26 измерить падения напряжения на всех элементах цепи и эквивалентное сопротивление цепи.
4. В соответствии с принципиальной схемой собрать на лабораторном стенде разветвленную электрическую цепь.
5. С помощью вольтметра В7-26 измерить падения напряжения на всех элементах цепи и эквивалентное сопротивление цепи.

6. В соответствии с принципиальной схемой собрать на лабораторном стенде смешанную электрическую цепь.
7. С помощью вольтметра В7-26 измерить падения напряжения на всех элементах цепи и эквивалентное сопротивление цепи.
8. По окончании измерений – отключить источник питания, отключить измерительные приборы, разобрать электрическую цепь.

### Методические указания:

**Неразветвленная электрическая цепь** это последовательное соединение приемников электрической энергии.



**Последовательным** называется такое соединение приемников электрической энергии, при котором по всем элементам протекает один и тот же ток.

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

Эквивалентное сопротивление цепи равно сумме сопротивлений последовательно включенных резисторов :  $R_{\text{ЭКВ}} = R_1 + R_2 + R_3$

**Эквивалентным** называется такое сопротивление, которое будучи включенным вместо данных резисторов, не изменяет режима работы электрической цепи.

Закон Ома для всей замкнутой цепи имеет вид:

$$I = U / (R_1 + R_2 + R_3) \quad I = U / R_{\text{ЭКВ}}$$

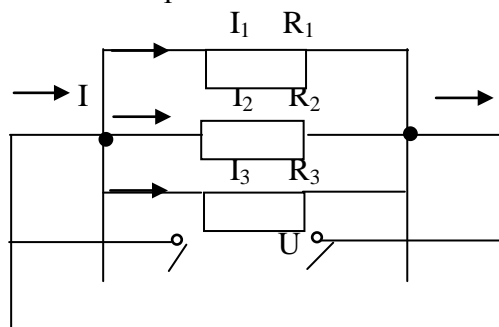
$P = P_1 + P_2 + P_3$  – уравнение баланса мощностей.

Общая мощность равна сумме мощностей последовательно включенных резисторов.

Мощности на последовательно включенных резисторах распределяются прямо пропорционально сопротивлениям резисторов.

Напряжение на последовательно включенных резисторах распределяется прямо пропорционально сопротивлениям резисторов.

**Разветвленная электрическая цепь** это параллельное соединение приемников электрической энергии.



**Параллельным** называется такое соединение приемников электрической энергии, при котором на зажимах всех элементов имеется одно и то же напряжение.

$$U = U_1 = U_2 = U_3$$

Согласно первого закона Кирхгофа:  $I = I_1 + I_2 + I_3$

Обратная величина эквивалентного сопротивления равна сумме обратных величин сопротивлений резисторов, включенных параллельно:  $1/R_{\text{ЭКВ}} = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3$

Величина обратная сопротивлению является проводимостью.

$$G_{\text{ЭКВ}} = 1/R_{\text{ЭКВ}} \quad G_{\text{ЭКВ}} = G_1 + G_2 + G_3$$

Эквивалентное сопротивление двух резисторов, включенных параллельно, определяется по формуле:  $R_{\text{экв}} = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$

**Смешанное соединение** – это такое соединение, при котором в электрической схеме имеются одновременно участки с последовательно и параллельно включенными элементами. К этим участкам применяются формулы последовательного и параллельного соединения приемников электрической энергии.

**Форма контроля** – защита практической работы.

**Вопросы для самоконтроля:**

1. Какое соединение элементов называют последовательным?
2. Какое соединение элементов называют параллельным?
3. Какое соединение элементов называют смешанным?
4. Какое сопротивление называется эквивалентным?
5. Записать основные соотношения электрических параметров цепи при последовательном и параллельном соединении резисторов.

**Рекомендуемая литература:**

1. Клепча В.Ф. Электротехника. Лабораторный практикум [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.Ф. Клепча. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2016. — 180 с. — 978-985-503-553-5. <http://www.iprbookshop.ru/67802.html>
2. Дементьев Ю.Н. Электротехника и электроника. Электрический привод [Электронный ресурс] : учебное пособие для СПО / Ю.Н. Дементьев, А.Ю. Чернышев, И.А. Чернышев. — Электрон. текстовые данные. — Саратов: Профобразование, 2017. — 223 с. — 978-5-4488-0144-0. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66403.html>

## Практическое занятие: Расчёт сложных электрических цепей постоянного тока

### Раздел 1 Электротехника.

#### Тема 1.13. Методы свёртывания цепи.

**Цель:** применять свойства последовательного и параллельного соединения резисторов при определении эквивалентного сопротивления.

**Оснащение:**

1. Таблицы с результатами измерений и вычислений.
2. Формулы, необходимые для расчета.

**Задание:**

**Задача 1.** На рисунке 1 приведена схема электрической цепи постоянного тока со смешанным соединением резисторов  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$ , к которым подведено напряжение  $U$ . Определить эквивалентное сопротивление  $R$  этой цепи, ток  $I$  и мощность  $P$ , потребляемые цепью, а также токи  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_4$ , напряжение  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ ,  $U_4$ , и мощность  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$  на каждом из резисторов. Проверить, что  $P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$ . Данные для своего варианта взять из таблицы 3.

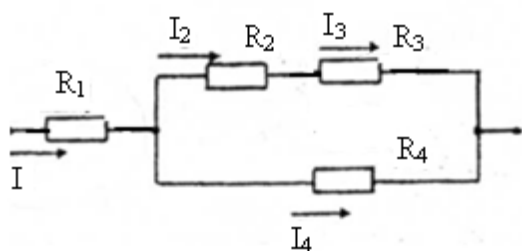


Рис. 1

Таблица 1 - Исходные данные к задаче 1

Известная величина	Номер варианта					
	1	2	3	4	5	6
$U$ , В	120	125	150	160	180	200
$R_1$ , Ом	8	28	6	24	25	16
$R_2$ , Ом	20	60	110	140	120	25
$R_3$ , Ом	16	120	100	60	180	35
$R_4$ , Ом	18	120	15	50	60	40

**Задача 2.** На рисунке 2 приведена схема электрической цепи постоянного тока со смешанным соединением резисторов  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$ , к которым подведено напряжение  $U$ . Определить эквивалентное сопротивление  $R$  этой цепи, ток  $I$  и мощность  $P$ , потребляемые цепью, а также токи  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_4$ , напряжение  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ ,  $U_4$ , и мощность  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$  на каждом из резисторов. Проверить, что  $P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$ . Данные для своего варианта взять из таблицы 4.

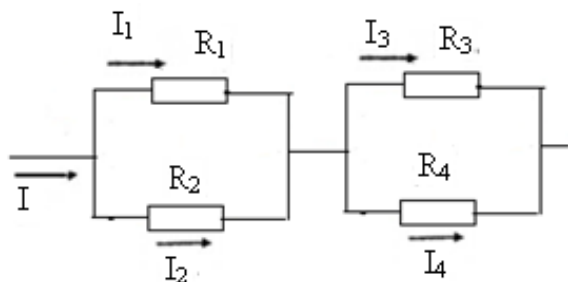


Рис. 2

Таблица 2 - Исходные данные к задаче 2

Известная величина	Номер варианта					
	7	8	9	10	11	12
U, В	90	130	156	180	210	234
R <sub>1</sub> , Ом	36	100	30	24	300	24
R <sub>2</sub> , Ом	18	25	45	12	60	36
R <sub>3</sub> , Ом	45	10	300	30	60	240
R <sub>4</sub> , Ом	30	15	75	20	30	60

**Задача 3.** На рисунке 13 приведена схема электрической цепи постоянного тока со смешанным соединением резисторов R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub> и R<sub>4</sub>, к которым подведено напряжение U. Определить эквивалентное сопротивление R этой цепи, ток I и мощность P, потребляемые цепью, а также токи I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub>, I<sub>3</sub>, I<sub>4</sub>, напряжение U<sub>1</sub>, U<sub>2</sub>, U<sub>3</sub>, U<sub>4</sub>, и мощность P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>, P<sub>4</sub> на каждом из резисторов. Проверить, что P = P<sub>1</sub> + P<sub>2</sub> + P<sub>3</sub> + P<sub>4</sub>. Данные для своего варианта взять из таблицы 5.

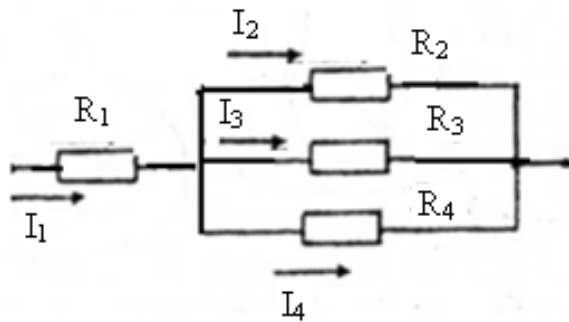


Рис. 3

Таблица 3 - Исходные данные к задаче 3

Известная величина	Номер варианта					
	13	14	15	16	17	18
U, В	60	90	120	150	165	195
R <sub>1</sub> , Ом	3,2	4	8	5,6	2	32
R <sub>2</sub> , Ом	12	60	200	40	30	100
R <sub>3</sub> , Ом	40	24	50	60	15	150
R <sub>4</sub> , Ом	10	240	60	36	40	30

**Задача 4.** На рисунке 14 приведена схема электрической цепи постоянного тока со смешанным соединением резисторов R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub> и R<sub>4</sub>, к которым подведено напряжение U. Определить эквивалентное сопротивление R этой цепи, ток I и мощность P, потребляемые цепью, а также токи I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub>, I<sub>3</sub>, I<sub>4</sub>, напряжение U<sub>1</sub>, U<sub>2</sub>, U<sub>3</sub>, U<sub>4</sub>, и мощность P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>, P<sub>4</sub> на каждом из резисторов. Проверить, что P = P<sub>1</sub> + P<sub>2</sub> + P<sub>3</sub> + P<sub>4</sub>. Данные для своего варианта взять из таблицы 6.

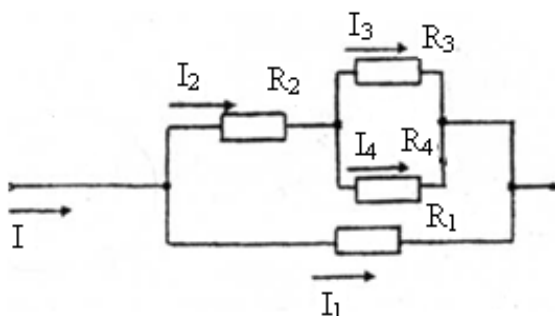




Рис. 4 - Схема электрической цепи постоянного тока со смешанным соединением резисторов

Таблица 4 - Исходные данные к задаче 4

Известная величина	Номер варианта					
	19	20	21	22	23	24
U, В	48	75	90	120	180	240
R <sub>1</sub> , Ом	8	10	45	20	15	48
R <sub>2</sub> , Ом	4	12,6	12	24	22	24
R <sub>3</sub> , Ом	10	4	40	10	24	180
R <sub>4</sub> , Ом	40	6	60	15	12	120

**Задача 5** На рисунке 15 приведена схема электрической цепи постоянного тока со смешанным соединением резисторов R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub> и R<sub>4</sub> к которым подведено напряжение U. Определить эквивалентное сопротивление R этой цепи, ток I и мощность P, потребляемые цепью, а также токи I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub>, I<sub>3</sub>, I<sub>4</sub>, напряжения, U<sub>1</sub>, U<sub>2</sub>, U<sub>3</sub>, U<sub>4</sub> и мощности P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>, P<sub>4</sub> на каждом из резисторов. Проверить, что P = P<sub>1</sub> + P<sub>2</sub> + P<sub>3</sub> + P<sub>4</sub>. Данные для своего варианта взять из таблицы 7.

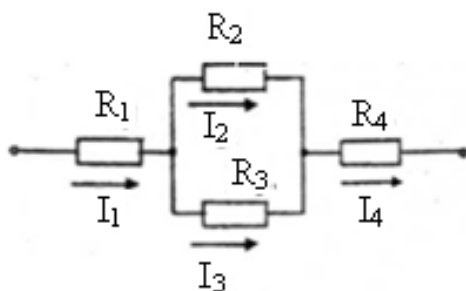


Рис. 5 - Схема электрической цепи постоянного тока со смешанным соединением резисторов

Таблица 5 - Исходные данные к задаче 5

Известная величина	Номер варианта					
	25	26	27	28	29	30
U, В	90	120	156	220	195	200
R <sub>1</sub> , Ом	8	10	20	12	14	8
R <sub>2</sub> , Ом	40	15	45	40	60	150
R <sub>3</sub> , Ом	60	10	30	60	30	100
R <sub>4</sub> , Ом	4	14	40	8	18	12

**Порядок выполнения задания:**

1. Приступая к решению задачи, обучающийся должен изучить ее условие; уяснить, какие величины являются заданными и какие искомыми; кратко записать условие задачи; вычертить электрическую схему, соответствующую условию задачи, и показать на ней заданные и искомые величины, а также направление токов. Графическая часть задания (схемы, кривые, векторные диаграммы) – карандашом с применением чертежных инструментов.
2. При выполнении схем необходимо пользоваться условными графическими обозначениями, установленными ГОСТами.

3. Выполнение заданий должно сопровождаться краткими пояснениями.
4. При выполнении заданий следует принимать Международную систему единиц измерения - СИ. Буквенные обозначения единиц измерения ставятся только возле окончательного результата и в скобки не заключаются, например, 120 В; 13 А; 100 Вт.

### Методические указания:

Метод наложения (суперпозиции).

Метод наложения основан на применении принципа наложения, который формулируется следующим образом:

Ток в любой ветви электрической цепи равен сумме токов, обусловленных действием каждого источника в отдельности, при отсутствии других источников.

Рассматриваемый принцип называют принципом независимого действия.

При действии только одного из источников напряжения предполагается, что э.д.с. всех остальных источников равны нулю, так же как равны нулю и токи всех источников тока. Отсутствие напряжения на зажимах источников напряжения равносильно короткому замыканию их зажимов. Отсутствие тока в ветви с источником тока равносильно разрыву этой ветви.

Если источник э.д.с. содержит внутреннее сопротивление, то, полагая э.д.с. равной нулю, следует оставлять в его ветви внутреннее сопротивление. Аналогично в случае источника тока с параллельной внутренней проводимостью, следует, разрывая ветвь источника (т.е. полагая  $J=0$ ), оставлять включенной параллельную ветвь с внутренним сопротивлением.

Пусть в цепи действуют источники с параметрами  $E$  и  $J$ ,  $I''_n$  и  $I'_n$  – токи  $n$ -ой ветви, создаваемые каждым из этих источников в отдельности. Искомый ток

$$I_x = I'_x + I''_x.$$

Принцип суперпозиции применим к напряжениям, т.к. между током и напряжением рассматривается линейная зависимость (закон Ома); но не применим к мощности:

$$P_x \neq P'_x + P''_x,$$

т.к. мощности – это квадратичные функции токов.

Пример.

Дано:  $E=60\text{В}$ ;  $J=2\text{А}$ ;  $R_1=5\text{Ом}$ ;  $R_2=20\text{Ом}$ ;  $R_3=10\text{Ом}$ ;  $R_4=15\text{Ом}$

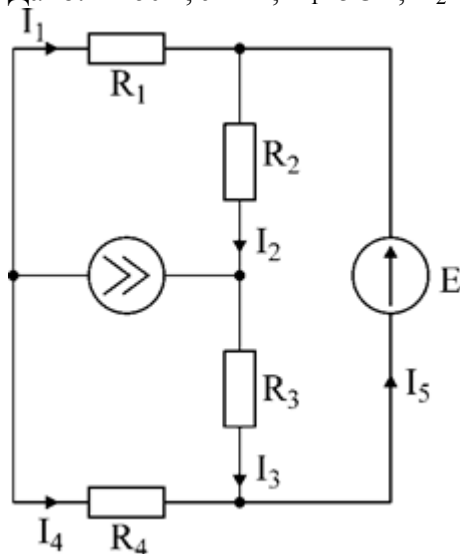


Рис.6

Определить все токи методом наложения.

Решение:

1. Заменяем источник э.д.с.  $E$  короткозамкнутым участком (т.к. его  $r_{вн}=0$ ) (схема рис.2).

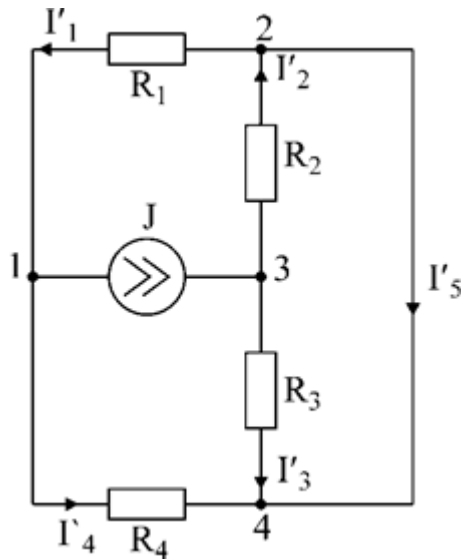


Рис.7

Т.к. конфигурация цепи изменилась, то в цепи рис.2 протекают токи отличные от токов цепи рис.1. Их называют первые частичные токи и обозначают со штрихом.

Т.к. схема упростилась, то токи можно рассчитать, применяя правило плеч. Схему цепи рис.2 более наглядно представим на рис.3.

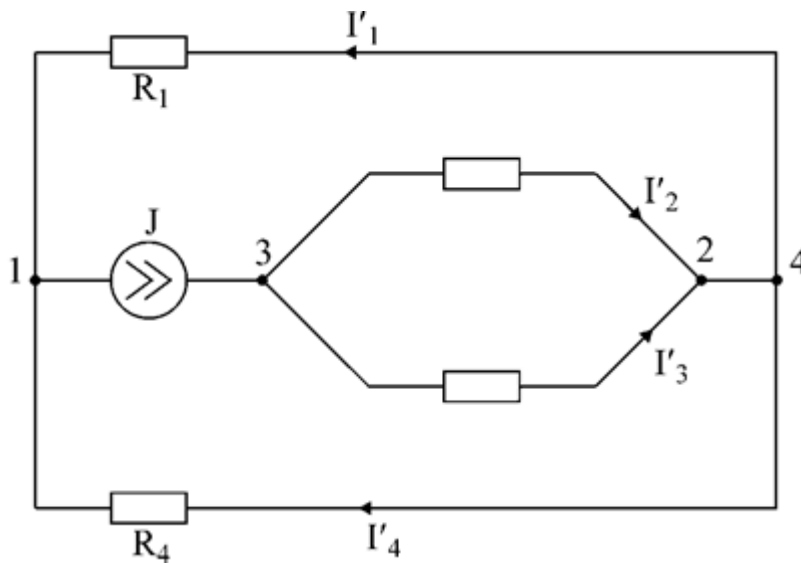


Рис.8

$$I_4' = J \frac{R_1}{R_1 + R_3} = 2 \cdot \frac{5}{5 + 15} = 0,5 A$$

$$I_1' = J - I_4' = 2 - 0,5 = 1,5 A$$

$$I_2' = J \frac{R_3}{R_2 + R_3} = 2 \cdot \frac{10}{20 + 10} = 0,66 A$$

$$I_3' = 2 - 0,66 = 1,34 A$$

$$I_3' = I_2' - I_1' = 0,66 - 1,5 = -0,84 A$$

2. Разорвем ветвь с источником тока  $J$ . Токи, протекающие в цепи рис.4 называют вторыми частичными токами и обозначают с двумя штрихами.

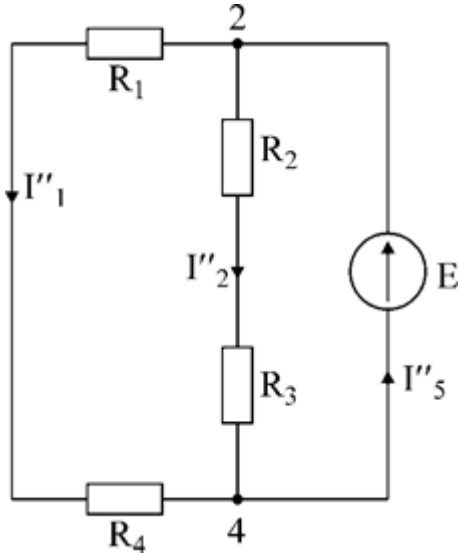


Рис.9

$$I_2'' = \frac{E_1}{R_2 + R_3} = \frac{60}{20 + 10} = 2.4;$$

$$I_1'' = \frac{E_1}{R_1 + R_3} = \frac{60}{5 + 15} = 3.4;$$

$$I_3'' = I_1'' + I_2'' = 5.4.$$

3. Искомые токи найдем как алгебраическую (т.е. с учетом направлений) сумму частичных токов:

$$I_1 = -I_1' - I_1'' = -1.5 - 3 = -4.5 A$$

$$I_2 = -I_2' + I_2'' = -0.66 + 2 = 1.34 A$$

$$I_3 = I_3' + I_2'' = 1.34 + 2 = 3.33 A$$

$$I_4 = -I_4' + I_1'' = -0.5 + 3 = 2.5 A$$

$$I_5 = I_4 + I_3 = 2.5 + 3.33 = 5.83 A$$

#### Входные и передаточные проводимости.

Решение системы уравнений по законам Кирхгофа для линейной цепи, содержащей источники тока и источники э.д.с., имеет вид

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= y_{11}E_1 + y_{12}E_2 + \dots + y_{1n}E_n \\ I_2 &= y_{21}E_1 + y_{22}E_2 + \dots + y_{2n}E_n \\ &\dots \\ I_n &= y_{n1}E_1 + y_{n2}E_2 + \dots + y_{nk}E_k \end{aligned} \right\} (27)$$

где  $y_{nk}$  - коэффициенты, не зависящие от тока.

Структура уравнений (27) соответствует принципу суперпозиций: ток в n-ой ветви равен сумме токов от действия каждого отдельного источника:

$$I_n = I_n^{(1)} + I_n^{(2)} + \dots,$$

$$\text{где } I_n^{(1)} = y_{n1} E_1; \quad I_n^{(2)} = y_{n2} E_2 \quad \text{и т.д.}$$

Коэффициенты  $y_{nk}$  при э.д.с. имеют размерность проводимости.

Коэффициенты с одинаковыми индексами ( $y_{11}, y_{22}, \dots$ ) называют собственными или входными проводимостями.

Их физический смысл очевиден: они численно равны току ветви при действии единственной э.д.с. в 1 Вольт, включенной в эту самую ветвь.

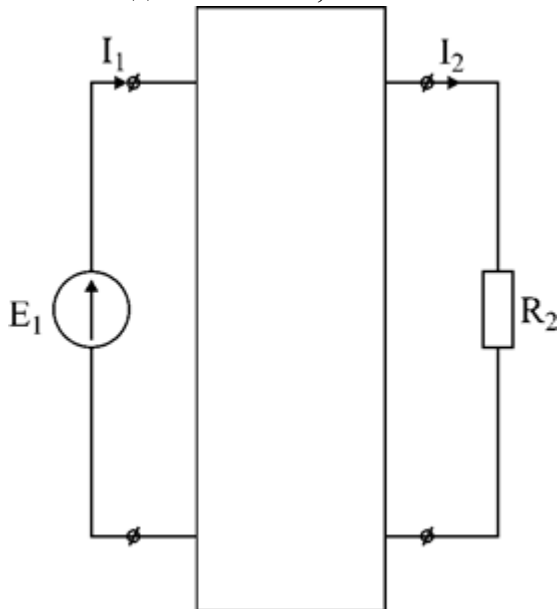


Рис.10

Входная (собственная) проводимость цепи.

$$y_{11} = \frac{I_1}{E_1} \quad (27,а)$$

Величину, обратную входной проводимости, называют входным сопротивлением.

$$R_{1вх} = \frac{1}{y_{11}}$$

Для цепи рис. 5

Только для неразветвленной цепи понятие входная проводимость (сопротивление) совпадает с элементарным понятием проводимости (сопротивления).

Коэффициенты с разными индексами ( $y_{12}, y_{13}$  и т.д.) называют передаточными или взаимными проводимостями.

Их физический смысл: передаточная проводимость между ветвью 2 и ветвью 1, т.е.  $y_{21}$ , равна току в ветви 2 при действии в ветви 1 э.д.с. равной 1 В.

$$y_{21} = \frac{I_2}{E_1}$$

Для цепи.

Из приведенного определения коэффициентов  $y_{nk}$  в сочетании с принципом суперпозиции возможна такая характеристика:

возрастание тока в ветви 2 (или 1) при возрастании э.д.с.  $E_1$  в ветви 1 равно проводимости  $y_{21}$  (или  $y_{11}$ ), умноженной на приращение э.д.с.  $E_1$ :

$$y_{21} = \frac{\partial I_2}{\partial E_1}; \quad y_{11} = \frac{\partial I_1}{\partial E_1} \quad (28)$$

Очевидно, что  $y_{21}=y_{12}$

## Метод контурных токов.

Метод контурных токов – один из основных и широко применяемых на практике методов. Он заключается в определении по второму закону Кирхгофа контурных токов. Для каждого контура цепи задают ток, который остается неизменным. В цепи протекает столько контурных токов, сколько независимых контуров в ней содержится. Направление контурного тока выбирают произвольно.

Контурные токи, проходя через узел, остаются непрерывными. Следовательно, первый закон Кирхгофа выполняется автоматически. Уравнения с контурными токами записываются только для второго закона Кирхгофа. Число уравнений, составленных по методу контурных токов, меньше чем по методу законов Кирхгофа.

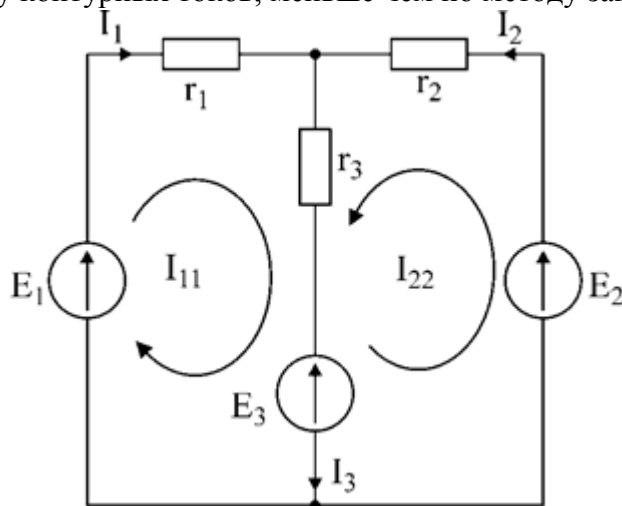


Рис.11. Иллюстрация к методу контурных токов.

На рис.6 показана цепь с двумя независимыми контурами, следовательно, и с двумя контурными токами  $I_{11}$  и  $I_{22}$ .

Токи в ветвях  $I_1$  и  $I_2$  равны контурным токам:

$$I_1 = I_{11}, \quad I_2 = I_{22}$$

Ток  $I_3$  равен сумме этих двух контурных токов:

$$I_3 = I_{11} + I_{22}$$

По второму закону Кирхгофа для первого контура цепи:

$$I_1 r_1 + I_3 r_3 = E_1 - E_3$$

$$\text{Или: } I_{11} r_1 + (I_{11} + I_{22}) r_3 = E_1 - E_3;$$

$$I_{11} (r_1 + r_2) + I_{22} r_3 = E_1 - E_3$$

$$\text{Обозначим } r_1 + r_2 = r_{11}$$

$$r_3 = r_{12}; \quad E_1 - E_3$$

$$\text{Тогда: } I_{11} r_{11} + I_2 r_{12} = E_{11}$$

$r_{11}$  – сумма всех сопротивлений, входящих в контур I, называется собственным сопротивлением контура.

$r_{12}$  – сопротивление ветви, общей для контура I и II;

$E_{11} = E_1 - E_2$  – алгебраическая сумма всех э.д.с., содержащихся в первом контуре; со знаком «-» берется э.д.с., действующая навстречу контурному току рассматриваемого контура.

$E_{11}$  называется контурной э.д.с.

Аналогично для второго контура рис.28.

$$I_{11} r_{21} + I_{22} r_{22} = E_{22},$$

$$\text{где } r_{21} = r_3; \quad r_{22} = r_2 + r_3;$$

$$E_{22} = E_2 - E_3$$

Уравнения, составленные по методу контурных токов, всегда записывают в виде системы. Для схемы рис.28:

$$\begin{cases} I_{11}r_{11} + I_{22}r_{12} = E_{11} \\ I_{11}r_{21} + I_{22}r_{22} = E_{22} \end{cases}$$

В результате решения системы находят контурные токи, а затем токи ветвей.

Если заданная электрическая цепь содержит  $n$  независимых контуров, то на основании второго закона Кирхгофа получается  $n$  контурных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} I_{11}r_{11} + I_{22}r_{12} + \dots + I_{nn}r_{1n} &= E_{11} \\ I_{11}r_{21} + I_{22}r_{22} + \dots + I_{nn}r_{2n} &= E_{22} \\ \dots &\dots \\ I_{11}r_{n1} + I_{22}r_{n2} + \dots + I_{nn}r_{nn} &= E_{nn} \end{aligned} \right\}$$

Собственные сопротивления  $r_{ii}$  входят в уравнения со знаком «+», поскольку обход контура принимается совпадающим с положительным направлением контурного тока  $I_{ii}$ . Общие сопротивления  $r_{ik}$  войдут в уравнения со знаком «-», когда токи  $I_i$  и  $I_k$  направлены в них встречно.

Число уравнений, составляемых по методу контурных токов, определяется по формуле:

$$N_{ур} = N_b - N_y + 1 - N_{и.т.}$$

где  $N_b$  – число ветвей электрической цепи;

$N_y$  – число узлов;

$N_{и.т.}$  – число идеальных источников тока.

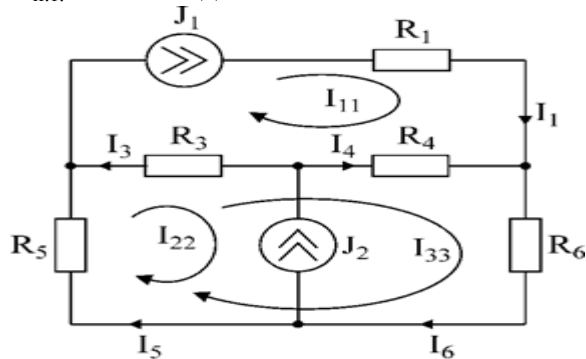


Рис. 1

Если в цепи отсутствуют источники тока, число уравнений равно числу контурных токов и, соответственно, числу независимых контуров рассматриваемой электрической цепи.

**Пример.**

Решим пример, используя метод контурных токов.

Цепь содержит три контура, через которые протекают контурные токи.

При наличии источников тока надо так направлять контурные токи, чтобы они протекали через данные источники. Но через один источник тока не может протекать два контурных тока.

На рис.1 обозначены положительные направления контурных токов. Очевидно, что  $I_{11}=J_1$ ;  $I_{22}=-J_2$

Контурный ток  $I_{33}$  – неизвестен, для него составляем уравнение:

$$I_{33}(R_3+R_4+R_5+R_6) - I_{11}(R_3+R_4) + I_{22}(R_5+R_3) = 0$$

В правой части уравнения стоит «0», т.к. отсутствует контурная э.д.с.

В результате решения определяем  $I_{33}=16,25$  мА

Итак:  $I_1=I_{11}=20$  мА;  $I_3=I_{11}-I_{22}-I_{33}=20-(-10)-16,25=13,75$  мА.

$I_4=-I_{11}+I_{33}=-20+16,25=-3,75$  мА;

$$I_5 = I_{22} + I_{33} = -10 + 16,25 = 6,25 \text{ мА};$$

$$I_6 = I_{33} = 16,25 \text{ мА}.$$

### Метод узловых напряжений.

Метод узловых напряжений заключается в определении на основании первого закона Кирхгофа потенциалов в узлах электрической цепи относительно некоторого базисного узла. Базисный узел в общем случае выбирается произвольно, потенциал этого узла принимается равным нулю. Разности потенциалов рассматриваемого и базисного узлов называется узловым напряжением.

На рис.29 представлена схема электрической цепи, содержащая пять ветвей и три узла. За базисный принят узел с индексом «0».

Узловое напряжение  $U_{10} = \varphi_1 - \varphi_0$ . Положительное направление узловых напряжений указывается стрелкой от рассматриваемого узла к базисному.

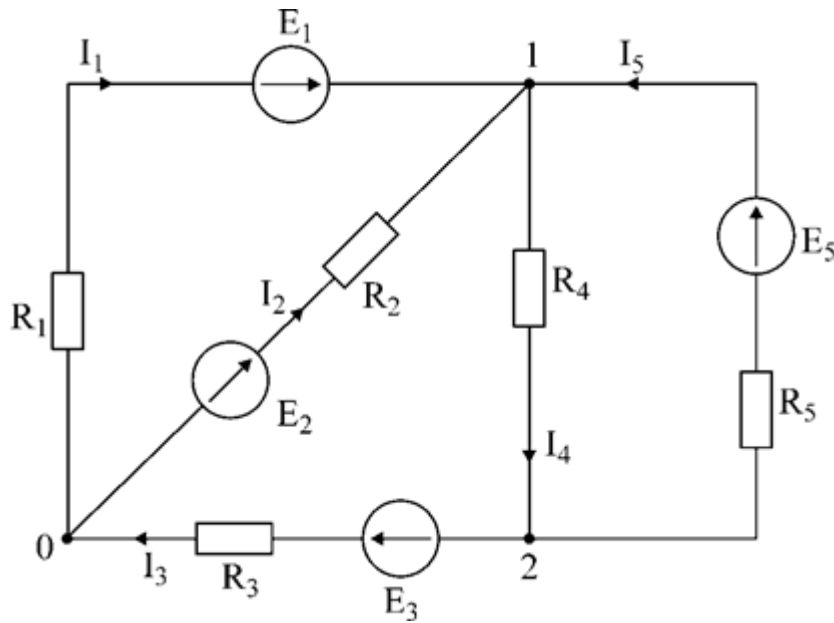


Рис.7. Иллюстрация к методу узловых напряжений.

Напряжение на ветвях цепи равно, очевидно, разности узловых напряжений концов данной ветви. Например, напряжение ветви 4 равно:  $U_4 = I_4 R_4 = U_{10} - U_{20}$

Из формулы видно, что, зная узловые напряжения, можно найти ток ветви.

Структуру уравнений получим, рассматривая схему.

Т.к. узел с индексом «0» принят за базисный, то его потенциал равен нулю. Узловые напряжения (потенциалы) узлов 1 и 2 – неизвестны.

Уравнения по первому закону Кирхгофа для 1 и 2 узлов соответственно записываются:

$$\left. \begin{aligned} I_1 + I_2 - I_4 + I_5 &= 0 \\ -I_3 + I_4 - I_5 &= 0 \end{aligned} \right\} (31)$$

$$\left. \begin{aligned} U_{10} &= \varphi_0 - I_1 R_1 + E_1 \\ U_{10} &= \varphi_0 - I_2 R_2 + E_2 \end{aligned} \right\}$$

Узловое напряжение





Пример: (общий случай)

Пример: (с идеальными э.д.с.)

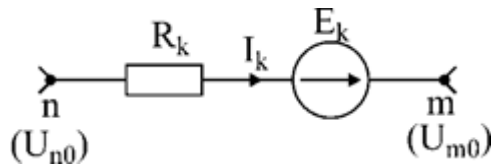
Порядок расчета электрических цепей по методу узловых напряжений:

1. Выбираем произвольно базисный узел. Желательно нулевой потенциал представить тому узлу, где сходится большее количество ветвей. Если имеется ветвь, содержащая идеальную э.д.с., то базисный узел должен быть концом или началом этой ветви.

2. Составляется система уравнений для неизвестных узловых напряжений в соответствии с общей структурой этих уравнений.

3. Решая данную систему, находят напряжения узлов относительно базиса.

4. Токи ветвей определяют по обобщенному закону Ома:



$$I_k = \frac{U_{n0} - U_{m0} + E_k}{R_k}$$

Следствие: Если схема содержит только два узла, то в соответствии с методом узловых напряжений (в отсутствие идеальных э.д.с.) составляется только одно уравнение.

Например, для схемы рис 8:

$$U_{10}q_{11} = E_1q_1 - E_3q_4 + J_2$$

Формула (39) носит название метода двух узлов.

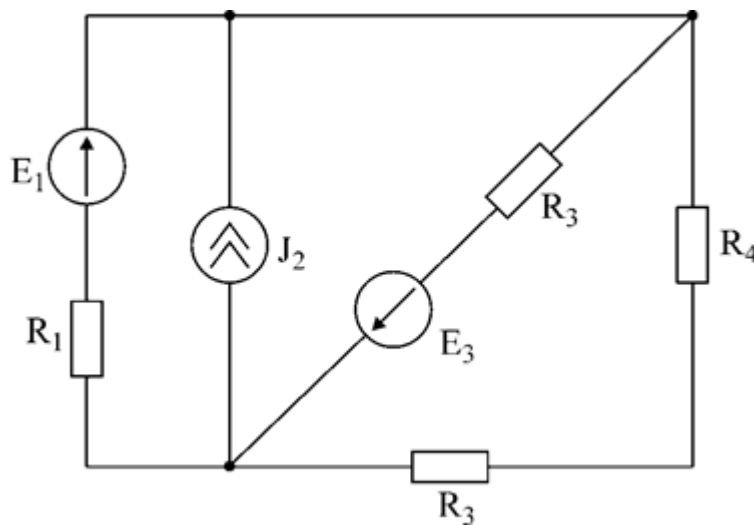


Рис.8. Иллюстрация к методу двух узлов.

Узловое напряжение по методу двух узлов равно:

$$U_{10} = \frac{\sum E_i q_i + \sum J_{\tilde{z}}}{q_{11}} \quad (40)$$

**Пример.**

Дано:  $E_1=8\text{В}$ ;  $E_5=12\text{В}$ ;  $R_1=R_3=1\text{ Ом}$ ;  $R_2=R_4=2\text{ Ом}$ ;  $R_5=3\text{ Ом}$ .

Определить все токи методом узловых напряжений.

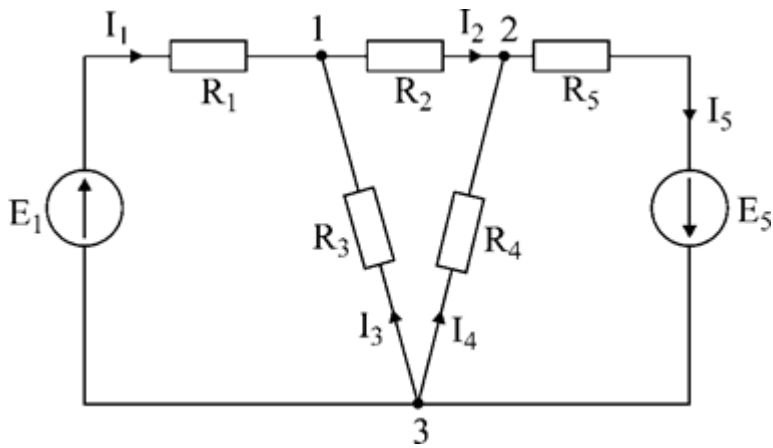


Рис.9

**Решение:**

Т.к. электрическая цепь содержит три узла и не содержит ветвей с идеальными источниками э.д.с., то число уравнений, составляемых по методу узловых напряжений равно 2.

Узел 3 будем считать базисным.

Тогда 
$$\begin{cases} U_{13}q_{11} - U_{23}q_{12} = I_{y1} \\ -U_{13}q_{21} + U_{23}q_{22} = I_{y2} \end{cases}$$

$$q_{11} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = 1 + 0,5 + 1 = 2,5$$

$$q_{22} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} = 0,5 + 0,5 + 0,33 = 1,33$$

$$q_{12} = q_{21} = \frac{1}{R_2} = 0,5$$

$$I_{y1} = \frac{E_1}{R_1} = 8; \quad I_{y2} = -\frac{E_5}{R_5} = -4$$

Где

В результате решения системы определяем  $U_{13}=2,8 \text{ В}$ ;  $U_{23}=-1,95 \text{ В}$ .

Токи в ветвях определяем по закону Ома:

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{13}}{R_1} = 5,19 \text{ А} \quad I_3 = \frac{-U_{13}}{R_3} = -2,81 \text{ А} \quad I_5 = \frac{U_{23} + E_5}{R_5} = 3,35 \text{ А}$$

$$I_2 = \frac{U_{12} - U_{23}}{R_2} = 2,38 \text{ А} \quad I_4 = \frac{-U_{23}}{R_4} = 0,97 \text{ А}$$

**Форма контроля** – защита практической работы.

**Вопросы для самоконтроля:**

1. Сформулировать принцип наложения. Почему он называется принципом независимого действия?
2. Можно ли находить потребляемую мощность, используя метод наложения?
3. Что представляют из себя входные и взаимные проводимости. Физический смысл этих коэффициентов.
4. Изложить суть метода контурных токов, записать систему уравнений для произвольной схемы. Объяснить знаки в уравнениях.
5. Как определяется число уравнений, составляемых по методу контурных токов?

6. Изложить суть метода узловых напряжений. На каком законе основан данный метод?
7. Что означает понятие «узловое напряжение»?
8. Записать систему уравнений по методу узловых напряжений для произвольной схемы, объяснить знаки.
9. Как определить количество уравнений по этому методу?
10. Как учитывается наличие идеальных источников э.д.с. при составлении уравнений?
11. Изложить порядок расчета цепей по методу узловых напряжений.

**Рекомендуемая литература:**

1. Клепча В.Ф. Электротехника. Лабораторный практикум [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.Ф. Клепча. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2016. — 180 с. — 978-985-503-553-5. <http://www.iprbookshop.ru/67802.html>
2. Дементьев Ю.Н. Электротехника и электроника. Электрический привод [Электронный ресурс] : учебное пособие для СПО / Ю.Н. Дементьев, А.Ю. Чернышев, И.А. Чернышев. — Электрон. текстовые данные. — Саратов: Профобразование, 2017. — 223 с. — 978-5-4488-0144-0. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66403.html>

## Практическое занятие: Свойства P-N перехода. Определение параметров и характеристик полупроводникового диода

### Раздел 2. Электроника

#### Тема 2.1. Электронные и полупроводниковые приборы

**Цель:** изучение характеристик и параметров диодов, экспериментальное исследование их вольтамперных характеристик (ВАХ).

**Оснащение:**

1. Таблицы с результатами измерений и вычислений.
2. Формулы, необходимые для расчета.

**Задание:**

1. Собрать схему для исследования выпрямительного диода на постоянном токе в соответствии с принципиальной схемой (рис. 2). Для измерения анодного тока включить миллиамперметр постоянного тока с пределом 100 мА. Для измерения анодного напряжения использовать мультиметр. Последовательно с диодом включить токоограничивающий резистор  $R_n$  (RP2 на стенде).

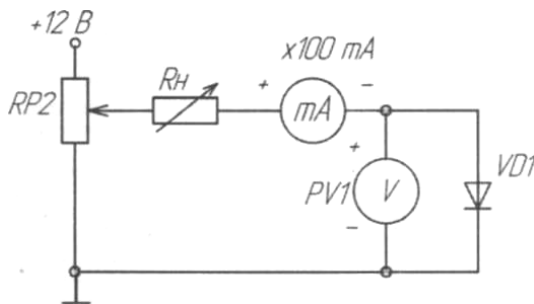


Рис.1

2. После проверки схемы преподавателем включить источник питания.
3. Снять вольтамперную характеристику выпрямительного диода на постоянном токе для прямой ветви. Для снятия характеристики регулировать напряжение на выходе потенциометра. Результаты измерений занести в таблицу 1. Выключить источник питания.

Таблица 1

I, мА	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
U, В										

4. Собрать схему для исследования диода Шоттки на постоянном токе в соответствии с принципиальной схемой рис. 3 заменив диод VD1 на диод VD2. Для измерения анодного тока включить миллиамперметр постоянного тока с пределом 100 мА. Для измерения анодного напряжения использовать мультиметр. Последовательно с диодом включить токоограничивающий резистор  $R_n$  (RP2 на стенде)
5. После проверки схемы преподавателем включить источник питания.
6. Снять вольтамперную характеристику диода Шоттки на постоянном токе для прямой ветви. Для снятия характеристики регулировать напряжение на выходе потенциометра. Результаты измерений занести в таблицу 2. Выключить источник питания.

Таблица 2

I, мА	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
U, В										

7. Собрать схему для снятия обратной ветви ВАХ VD1, подключив к RP2 источник -12В и заменив миллиамперметр, поменяв также его полярность подключения (рис.3).

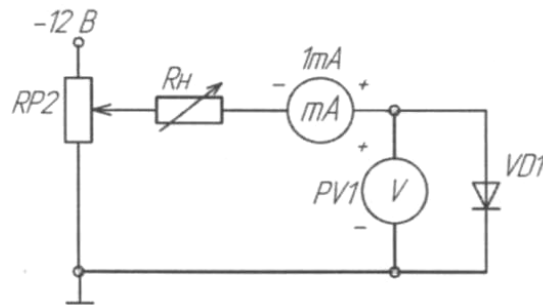


Рис.2

8. После проверки схемы преподавателем включить источник питания.  
 9. Снять обратную ветвь ВАХ выпрямительного диода на постоянном токе. Для снятия характеристики регулировать напряжение на выходе потенциометра. Результаты измерений занести в таблицу 3. Выключить источник питания.

Таблица 3

I, мА					
U, В					

10. Собрать схему для снятия обратной ветви ВАХ диода Шотки, заменив VD1 на VD2 (рис.2).  
 11. После проверки схемы преподавателем включить источник питания.  
 12. Снять обратную ветвь ВАХ выпрямительного диода на постоянном токе. Для снятия характеристики регулировать напряжение на выходе потенциометра. Результаты измерений занести в таблицу 4. Выключить источник питания.

Таблица 4

I, мА					
U, В					

13. Построить для каждого диода вольтамперную характеристику (прямую и обратную ветвь совместить на одном графике (смотри теоретический материал)).  
 14. Разобрать электрическую цепь и сдать стенд преподавателю.  
 15. Сделать вывод по работе.

**Порядок выполнения задания:**

1. Проработайте теоретический материал и ответьте на контрольные вопросы.
2. Ознакомьтесь с заданием и выполните его.
3. Оформите результаты работы.

**Методические указания:**

Полупроводниковым диодом называют электропреобразовательный полупроводниковый прибор с одним *p-n*-переходом.

В зависимости от основного назначения и вида используемого явления в *p-n*-переходе различают шесть основных функциональных типов полупроводниковых диодов: выпрямительные, высокочастотные, импульсные, туннельные, стабилитроны, варикапы.

Одним из свойств *p-n*-перехода является способность изменять свое сопротивление в зависимости от полярности напряжения внешнего источника. Причем разница сопротивлений при прямом и обратном направлениях тока через *p-n*-переход может быть настолько велика, что в ряде случаев, например, для силовых диодов, можно считать, что ток протекает через диод только в одном направлении – прямом, а в обратном направлении ток настолько мал, что им можно пренебречь. Прямое направление – это когда электрическое поле внешнего источника направлено навстречу электрическому полю *p-n*-перехода, а обратное – когда направления этих электрических полей совпадают. Полупроводниковые диоды, использующие вентильное свойство *p-n*-перехода, называются выпрямительными диодами и широко используются в различных устройствах для выпрямления переменного тока.

Основной характеристикой полупроводниковых диодов служит вольт-амперная характеристика (рис.3)

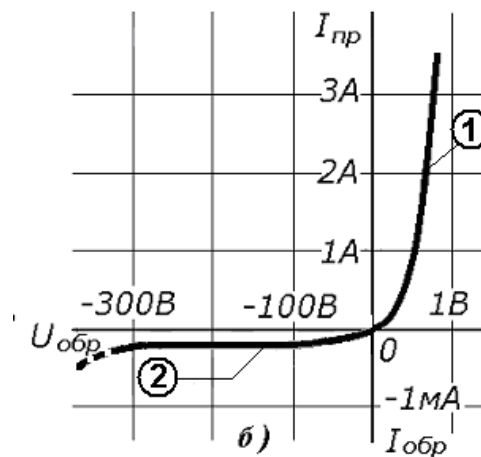


Рис.3

В области обратных напряжений можно пренебречь падением напряжения в объеме полупроводника. При достижении обратным напряжением определённого критического значения ток диода начинает резко возрастать. Это явление называют пробоем диода.

Различают два основных вида пробоя электронно-дырочного перехода: электрический и тепловой. В обоих случаях резкий рост тока связан с увеличением числа носителей заряда в переходе. Электрический пробой бывает двух видов - лавинный и туннельный.

Основными параметрами выпрямительных диодов являются:

- Максимально допустимое обратное напряжение  $U_{обр. max}$  – наибольшее постоянное (или импульсное) обратное напряжение, при котором диод может длительно и надежно работать обычно  $U_{обр max} \leq U_{проб}$ ;
- Максимально допустимый выпрямленный ток  $I_{ен. ср max}$  — средний за период ток через диод (постоянная составляющая), при котором обеспечивается его надежная длительная работа
- Прямое и обратное сопротивления диода постоянному току, определяемые по его ВАХ с использованием следующих соотношений:  

$$R_{д пр} = U_{пр} / I_{пр}; \quad R_{д обр} = U_{обр} / I_{обр};$$
- Максимальная частота  $f_{max}$  — наибольшая частота подводимого напряжения, при которой выпрямитель на данном диоде работает достаточно эффективно, а нагрев диода не превышает допустимой величины.
- Постоянное прямое напряжение  $U_{пр}$  – падение напряжения на диоде при протекании через него постоянного прямого тока  $I_{пр}$  – заданного ТУ.

- Постоянный обратный ток  $I_{обр}$  — ток через диод при постоянном обратном напряжении ( $U_{обр.max}$ ). Чем меньше  $I_{обр}$ , тем качественнее диод.

Превышение максимально допустимых величин ведет к резкому сокращению срока службы или пробую диода.

При коротких импульсах необходимо учитывать инерционность процессов включения и выключения диода, что характеризуется следующими параметрами:

1) Время установления прямого напряжения на диоде ( $t_{уст}$ ) – время, за которое напряжение на диоде при включении прямого тока достигает своего стационарного значения с заданной точностью.

2) Время восстановления обратного сопротивления диода ( $t_{восст.}$ ) определяется как время, в течение которого обратный ток диода после переключения полярности приложенного напряжения с прямого на обратное достигает своего стационарного значения с заданной точностью, обычно 10% от максимального обратного тока.

Там, где требуется малое время переключения, используют диоды Шотки. Они имеют переход металл — полупроводник, который обладает выпрямительным эффектом. Накопление заряда в переходе этого типа выражено слабо. Поэтому время переключения может быть уменьшено до значения порядка 100 пс. Другой особенностью этих диодов является малое (по сравнению с обычными кремниевыми диодами) прямое напряжение, составляющее около 0,3 В.

**Форма контроля** – защита практической работы.

**Вопросы для самоконтроля:**

1. Сколько выводов имеет диод?
2. Что называют прямым включением диода?
3. Какой ток протекает через диод при его обратном включении, и чем он вызван?
4. Какое явление называется пробоем диода?
5. В чем особенность диодов Шотки, их достоинства и область применения.

**Рекомендуемая литература:**

1. Клепча В.Ф. Электротехника. Лабораторный практикум [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.Ф. Клепча. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2016. — 180 с. — 978-985-503-553-5. <http://www.iprbookshop.ru/67802.html>
2. Дементьев Ю.Н. Электротехника и электроника. Электрический привод [Электронный ресурс] : учебное пособие для СПО / Ю.Н. Дементьев, А.Ю. Чернышев, И.А. Чернышев. — Электрон. текстовые данные. — Саратов: Профобразование, 2017. — 223 с. — 978-5-4488-0144-0. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66403.html>
3. Легостаев Н.С. Материалы электронной техники [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н.С. Легостаев. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2014. — 239 с.



## Практическое занятие: Выбор полупроводниковых диодов к схемам электронных выпрямителей.

### Раздел 2. Электроника

#### Тема 2.2. Выпрямители и стабилизаторы напряжения и тока

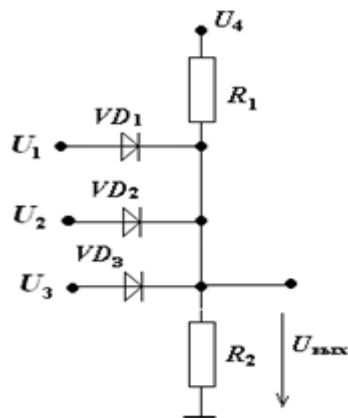
**Цель:** получить практические навыки выбора полупроводниковых диодов к схемам электронных выпрямителей.

**Оснащение:**

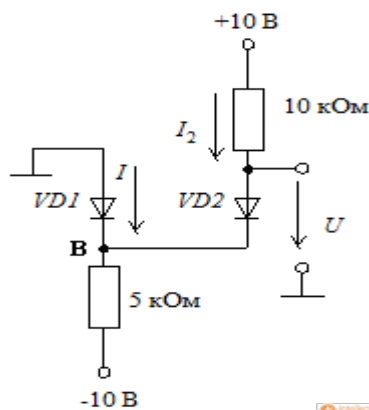
1. Таблицы с результатами измерений и вычислений.
2. Формулы, необходимые для расчета.

**Задание:**

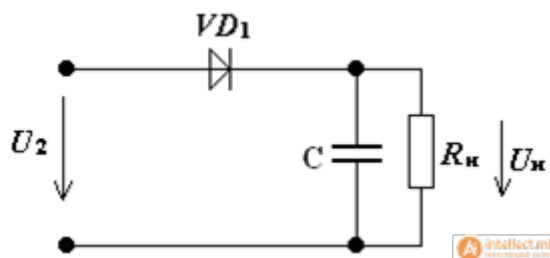
1. Дано: схема (рис.1),  $U_1 = 10 \text{ В}$ ,  $U_2 = 13 \text{ В}$ ,  $U_3 = 15 \text{ В}$ ,  $U_4 = 22 \text{ В}$ ,  $R_1 = R_2 = 1 \text{ кОм}$ .  
Определить  $U_{\text{вых}}$



2. Считая диоды идеальными, найти величину тока и напряжения для цепей, показанных на схеме.



3. В однополупериодном выпрямителе с емкостным фильтром рис 21, рассчитать  $U_{\text{нср}}$  и  $U_{\text{обрмакс}}$ , если  $C_{\text{ф}} = \infty$ ,  $U_2 = 150 \text{ В}$ , частота напряжения сети 50 Гц,  $R_{\text{н}} = 2 \text{ кОм}$ , построить временную диаграмму выпрямителя.



**Порядок выполнения задания:**

1. Проработайте теоретический материал и ответьте на контрольные вопросы.

2. Ознакомьтесь с заданием и выполните его.

3. Оформите результаты работы.

### Методические указания:

**Виды выпрямителей и их характеристики.** Выпрямителем называется устройство для преобразования переменного напряжения в постоянное. Основное назначение выпрямителя заключается в сохранении направления тока в нагрузке при изменении полярности приложенного напряжения. Выпрямитель можно рассматривать как один из типов инверторов напряжения. Обобщенная структурная схема выпрямителя приведена на рис.1. В состав выпрямителя могут входить: силовой трансформатор СТ, вентиляльный блок ВБ, фильтрующее устройство ФУ и стабилизатор напряжения СН. Трансформатор СТ выполняет следующие функции: преобразует значение напряжения сети, обеспечивает гальваническую изоляцию нагрузки от силовой сети, преобразует количество

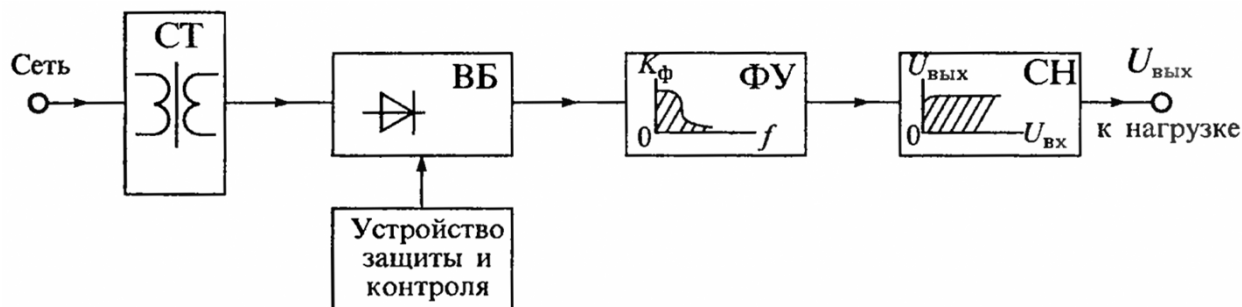


Рис.1. Обобщенная структурная схема выпрямителя

фаз силовой сети. В импульсных источниках питания трансформатор обычно отсутствует, так как его функции выполняет высокочастотный инвертор.

Вентильный блок ВБ является основным звеном выпрямителя, обеспечивая однонаправленное протекание тока в нагрузке. В качестве вентилялей могут использоваться электровакуумные, газоразрядные или полупроводниковые приборы, обладающие односторонней электропроводностью, например, диоды, тиристоры, транзисторы и др. Идеальные вентиляльные элементы должны пропускать ток только в одном (прямом) направлении и совсем не пропускать его в другом (обратном) направлении. Реальные вентиляльные элементы отличаются от идеальных прежде всего тем, что они пропускают некоторый ток в обратном направлении и имеют падение напряжения при протекании прямого тока. Это сказывается на снижении КПД вентиляльного блока и снижении эффективности выпрямителя в целом.

Фильтрующее устройство ФУ используется для ослабления пульсаций выходного напряжения. В качестве фильтрующего устройства обычно используются фильтры нижних частот (ФНЧ), выполненные на пассивных  $R$ ,  $L$ ,  $C$  элементах или, иногда, с применением активных элементов — транзисторов, операционных усилителей и пр. Качество ФУ оценивают по его способности увеличивать коэффициент фильтрации  $q$ , равный отношению коэффициентов пульсации на входе и выходе фильтра.

Стабилизатор напряжения СН предназначен для уменьшения влияния внешних воздействий: изменения напряжения питающей сети, температуры окружающей среды, изменения нагрузки и др., — на выходное напряжение выпрямителя. Стабилизатор напряжения можно установить не только на выходе выпрямителя, но и на его входе. Если к стабильности выходного напряжения не предъявляется особых требований, то стабилизатор может быть или совсем исключен или его функции переданы другим узлам. Например, в импульсных источниках питания функции стабилизатора может выполнять регулируемый инвертор (РИ) или регулируемый вентиляльный блок.

Кроме основных узлов в состав выпрямителя могут входить различные вспомогательные элементы и узлы, предназначенные для повышения его надежности: узлы контроля и автоматики, узлы защиты и др., например, узлы автоматического переключения напряжения питающей сети 110-220 В.

**Классификация выпрямителей.** Для классификации выпрямителей используют различные признаки: количество выпрямленных полувольт (полупериодов) напряжения, число фаз силовой сети, схему вентильного блока, тип сглаживающего фильтра, наличие трансформатора и др.

По количеству выпрямленных полувольт различают однополупериодные и двухполупериодные выпрямители. По числу фаз питающего напряжения различают однофазные, двухфазные, трехфазные и шестифазные выпрямители. При этом под числом фаз питающего напряжения понимают число питающих напряжений с отличными друг от друга начальными фазами. Так, например, если для работы выпрямителя требуется одноединственное питающее напряжение, то такой выпрямитель будет однофазным. Если же для работы выпрямителя требуются два питающих напряжения, сдвинутых друг относительно друга на какой-либо угол (чаще всего на  $180^\circ$ ), то такой выпрямитель называют двухфазным. Аналогично, если для работы выпрямителя требуются три питающих напряжения, сдвинутые друг относительно друга на угол, равный  $120^\circ$ , то такой выпрямитель называют трехфазным. Шестифазные выпрямители состоят из двух групп трехфазных выпрямителей, питаемых противофазными напряжениями трехфазной сети.

По схеме вентильного блока различают выпрямители с параллельным, последовательным и мостовым включением однофазных выпрямителей. Схемы таких выпрямителей приведены на рис.2.

*Однофазный однополупериодный выпрямитель*, схема которого приведена на рис.17.2,а, является простейшим.

Такой выпрямитель пропускает на выход только одну полувольту питающего напряжения, как показано на рис.17.3а. Такие выпрямители находят ограниченное применение в маломощных устройствах, так как они характеризуются плохим использованием трансформатора и сглаживающего фильтра.

*Двухфазный двухполупериодный выпрямитель*, приведенный на рис.17.2,б, представляет собой параллельное соединение двух одно-

фазных выпрямителей, питаемых от двух половин вторичной обмотки  $w_2$  и  $w_2'$ . С помощью этих полуобмоток создаются два противофаз-

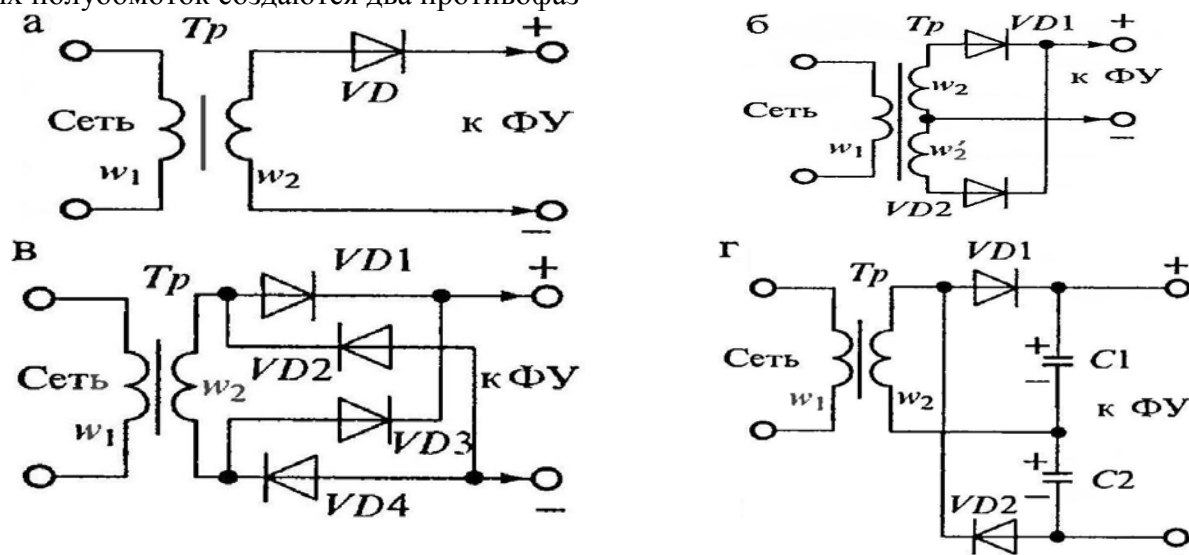


Рис.2. Схемы выпрямителей, питаемых от однофазной сети: однополупериодный (а), двухфазный двухполупериодный (б), однофазный мостовой (в) и однофазный с последовательным включением (схема удвоения) (г)

ных питающих выпрямитель напряжения. Форма выходного напряжения такого выпрямителя приведена на рис.3,б. Этот выпрямитель характеризуется лучшим использованием трансформатора и фильтра. Его часто называют выпрямителем со средней точкой вторичной обмотки трансформатора.

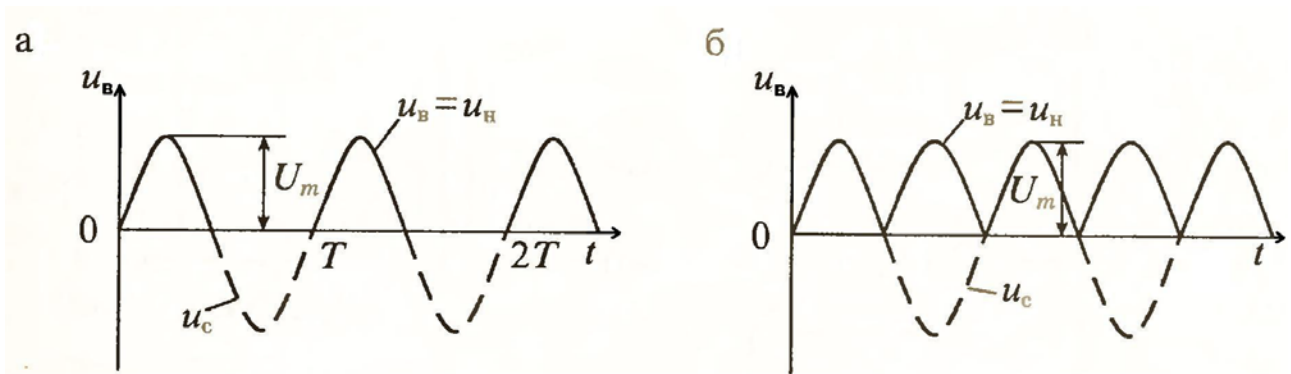


Рис.3. Формы напряжений на входе и выходе выпрямителей, питаемых от однофазной сети, при резистивной нагрузке без фильтра: однополупериодного (а) и двухполупериодного (б)

Однофазный мостовой выпрямитель (рис.2,в) является двухполупериодным выпрямителем, питаемым от однофазной сети. В отличие от предыдущей схемы его можно использовать для выпрямления напряжения сети и без трансформатора. К его недостаткам относится удвоенное число выпрямительных диодов, однако трансформатор в таком выпрямителе используется наиболее полно, так как нет подмагничивания магнитопровода постоянным током, и ток во вторичной обмотке протекает в течение обоих полупериодов. Из-за увеличенного падения напряжения на выпрямительных диодах такие выпрямители редко используются при выпрямлении низких напряжений (меньше 5 В).

Однофазный выпрямитель с удвоением напряжения (рис.17.2,г) представляет собой последовательное соединение двух однофазных однополупериодных выпрямителей. В первом полупериоде при положительном напряжении на аноде диода VD<sub>1</sub> заряжается конденсатор C<sub>1</sub>, а во втором полупериоде проводит диод VD<sub>2</sub> и конденсатор C<sub>2</sub> заряжается напряжением противоположной полярности. Так как эти конденсаторы включены последовательно, то выходное напряжение почти удваивается. Конденсаторы C<sub>1</sub> и C<sub>2</sub> могут использоваться как элементы фильтра. Трансформатор в этой схеме используется так же полно, как и в мостовой. Эту схему можно получить из мостовой схемы, изображенной на рис.17.2,в, если заменить диоды VD<sub>3</sub> и VD<sub>4</sub> конденсаторами C<sub>1</sub> и C<sub>2</sub>. В связи с этим такой выпрямитель часто называют полумостовым. К достоинствам схемы можно отнести уменьшение вдвое выходного напряжения трансформатора, а к недостаткам наличие двух конденсаторов C<sub>1</sub> и C<sub>2</sub>.

Схемы трехфазных выпрямителей, получивших наиболее широкое распространение в ИВЭП, приведены на рис.4. Первичные обмотки трансформаторов Tr могут включаться по схеме звезды или треугольника, а вторичные обмотки включены по схеме звезды. На рис.17.4,а приведена схема трехфазного выпрямителя с отводом от нулевой точки O' вторичных обмоток. На рис.17.5,а приведены временные диаграммы напряжений и токов для этой схемы при резистивной нагрузке без фильтра. Коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения составляет  $K_{\Pi} = 25\%$ , в то время как для двухполупериодного однофазного выпрямителя он составляет 67%, при этом частота пульсаций в три раза выше частоты питающей сети.

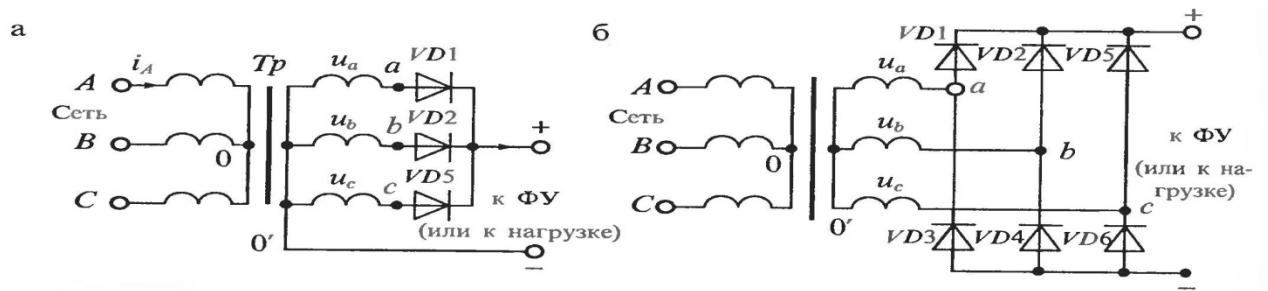


Рис.4. Схема трехфазного выпрямителя с отводом от нулевой точки (а) и мостового трехфазного выпрямителя (б)

Все это значительно облегчает фильтрацию выпрямленного напряжения, а в ряде случаев позволяет вообще обойтись без фильтра.

К недостаткам схемы относится плохое использование трансформатора, работающий с подмагничиванием постоянным током, и повышенное обратное напряжение на выпрямительных диодах.

Мостовая схема трехфазного выпрямителя (схема Ларионова) приведена на рис.4,б. В этой схеме включены 6 диодов, которые выпрямляют как положительные, так и отрицательные полуволны трехфазного напряжения. При этом в любой произвольный момент времени ток проводят два диода, у которых на аноде наибольшее положительное напряжение, а на катоде — наибольшее отрицательное. Графики токов и напряжений для трехфазной мостовой схемы приведены на рис.17.5,б. К достоинствам схемы Ларионова относятся: отсутствие подмагничивания сердечника трансформатора постоянным током, вдвое меньшее (по сравнению с предыдущей схемой) обратное напряжение, малый коэффициент пульсаций (равный 5,7%) и вдвое увеличенная частота пульсаций  $f_{\Pi} = 6f_c$ . Все это позволяет во многих случаях не использовать выходной фильтр.

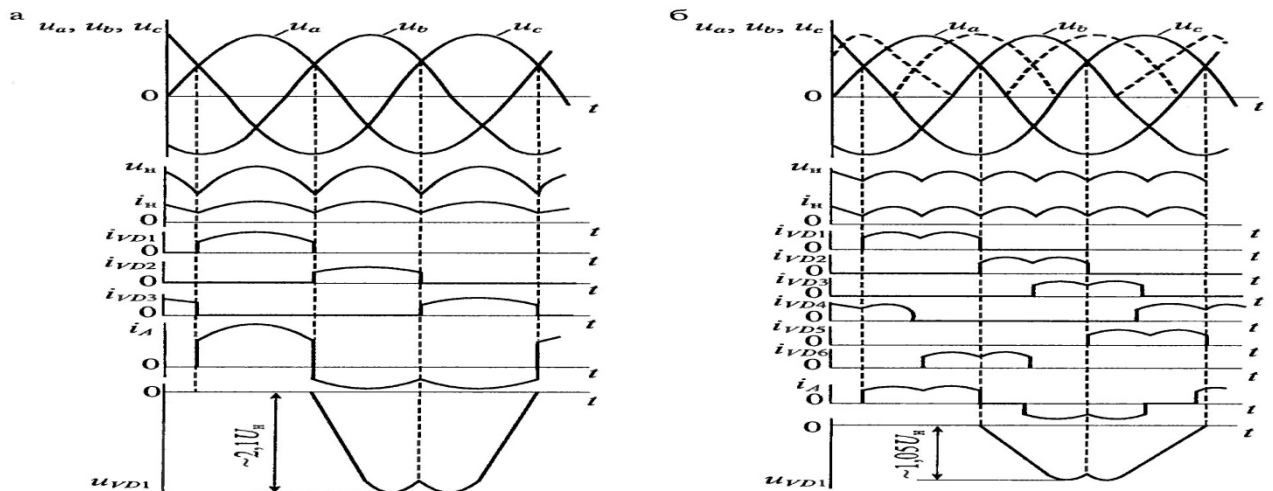


Рис.5. Формы напряжений и токов в трехфазном выпрямителе с нулевой точкой (а) и в трехфазном мостовом выпрямителе (б)

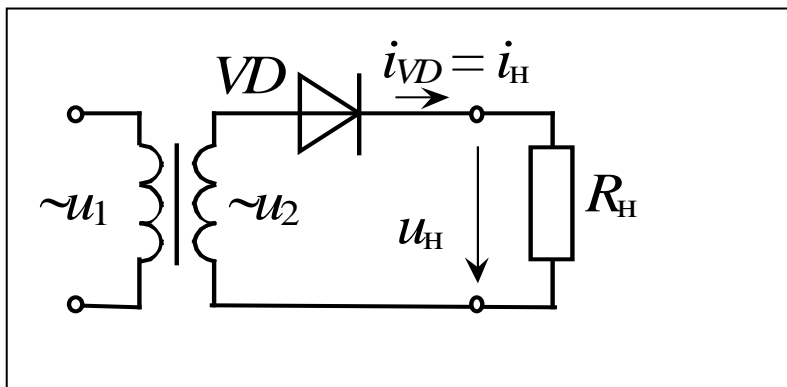
Для сравнения рассмотренных схем выпрямителей в табл.1 приведены их основные параметры при работе на резистивную нагрузку без фильтра. В этой таблице приняты следующие обозначения основных характеристик:  $n = U_1 / U_2 = w_1 / w_2$  - коэффициент трансформации,  $U_1$  - действующее значение напряжения на первичной обмотке,  $U_2$  - действующее значение напряжения на вторичной обмотке,  $w_1$  и  $w_2$  - число витков первичной и вторичной обмоток соответственно,  $U_{\text{н}} = n_{\text{д}} U_{\text{пр}} + U_{\text{в}}$  - расчетное значение напряжения на нагрузке,  $n_{\text{д}}$  - число последовательно включенных диодов,  $U_{\text{в}}$  - среднее

Таблица 1 – Основные характеристики схем выпрямителей

Характеристика	Тип выпрямителя			
	Однофазный со средней точкой	Однофазный мостовой	Трехфазный с нулевой точкой	Трехфазный мостовой
Действующее напряжение вторичной обмотки (фазное), $U_2$	$2 \times 1,11 U_H$	$1,11 U_H$	$0,855 U_H$	$0,43 U_H$
Действующий ток вторичной обмотки, $I_2$	$0,785 I_H$	$1,11 I_H$	$0,58 I_H$	$0,82 I_H$
Действующий ток первичной обмотки, $I_1$	$1,11 I_H/n$	$1,11 I_H/n$	$0,48 I_H/n$	$0,82 I_H/n$
Расчетная мощность трансформатора, $P_{тр}$	$1,48 P_H$	$1,23 P_H$	$1,35 P_H$	$1,045 P_H$
Обратное напряжение на диоде, $U_{обр}$	$3,14 U_H$	$1,57 U_H$	$2,1 U_H$	$1,05 U_H$
Среднее значение тока диода, $I_{д,ср}$	$0,5 I_H$	$0,5 I_H$	$0,33 I_H$	$0,33 I_H$
Действующее значение тока диода, $I_d$	$0,785 I_H$	$0,785 I_H$	$0,587 I_H$	$0,58 I_H$
Амплитудное значение тока диода, $I_{дм}$	$1,57 I_H$	$1,57 I_H$	$1,21 I_H$	$1,05 I_H$
Частота основной гармоники пульсации	$2f_c$	$2f_c$	$3f_c$	$6f_c$
Коэффициент пульсаций выходного напряжения, $K_p$	$0,67$	$0,67$	$0,25$	$0,057$

значение выпрямленного напряжения;  $U_{пр}$  - прямое падение напряжения на диоде,  $f_c$  - частота питающей сети,  $K_p = U_{пм} / U_H$  - коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения,  $U_{пм}$  - амплитуда напряжения с частотой пульсаций на выходе выпрямителя.

**Пример 1.** Расчет однополупериодного выпрямителя



Диод - идеальный:

$$R_{пр} = 0; V_{пр} = 0; I_{обр} = 0$$

Дано:  $R_H = 3 \text{ кОМ}$

$$V_H = 180 \text{ В}$$

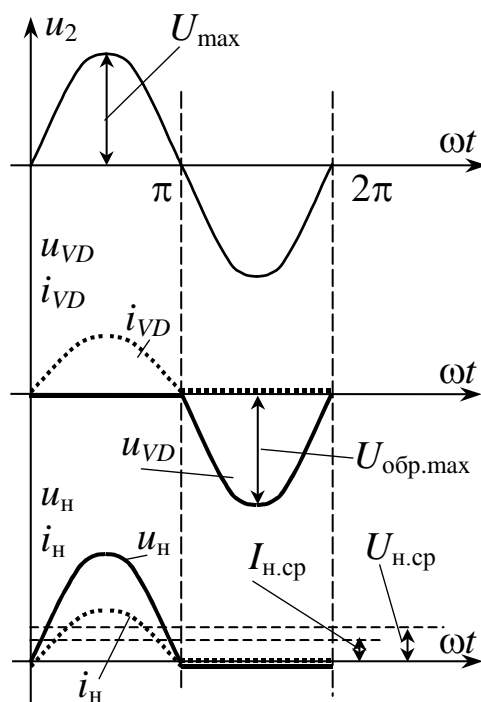
$$V_1 = 220 \text{ В}$$

Найти:  $I_{пр,ср} = ?$   $I_{пр,макс} = ?$

$$V_{обр,макс} = ? K_{тр} = ?$$

**Решение:**

Предварительно рассмотрим токи и напряжения в зависимости от времени на разных участках схемы



Ток нагрузки это среднее значение тока

$$I_H = I_{\text{пр.ср}} = V_H / R_H = 180 / 3000 = 60 \cdot 10^{-3} \text{ [A]} = 60 \text{ [мА]}$$

Максимальное или амплитудное значение тока через диод

$$I_{\text{прmax}} = \pi \cdot I_{\text{пр.ср}} = \pi \cdot 60 = 188 \text{ мА}$$

Максимальное напряжение действующее на закрытый диод

$$V_{\text{обрmax}} = \pi \cdot V_H = \pi \cdot 180 = 565 \text{ В}$$

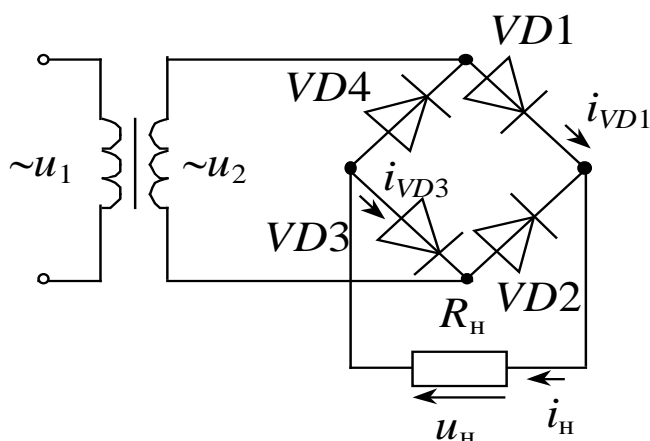
Для определения к-та трансформации нужно перейти к действующим значениям – действующее значение напряжения  $U_2$ .

$$V_2 = V_{\text{обрmax}} / \sqrt{2} = 565 / \sqrt{2} = 400 \text{ [В]}$$

Коэффициент трансформации трансформатора

$$K_{\text{тр}} = V_1 / V_2 = 220 / 400 \approx 0,55$$

**Пример 2.** Расчет мостовой схемы



Диоды идеальные:

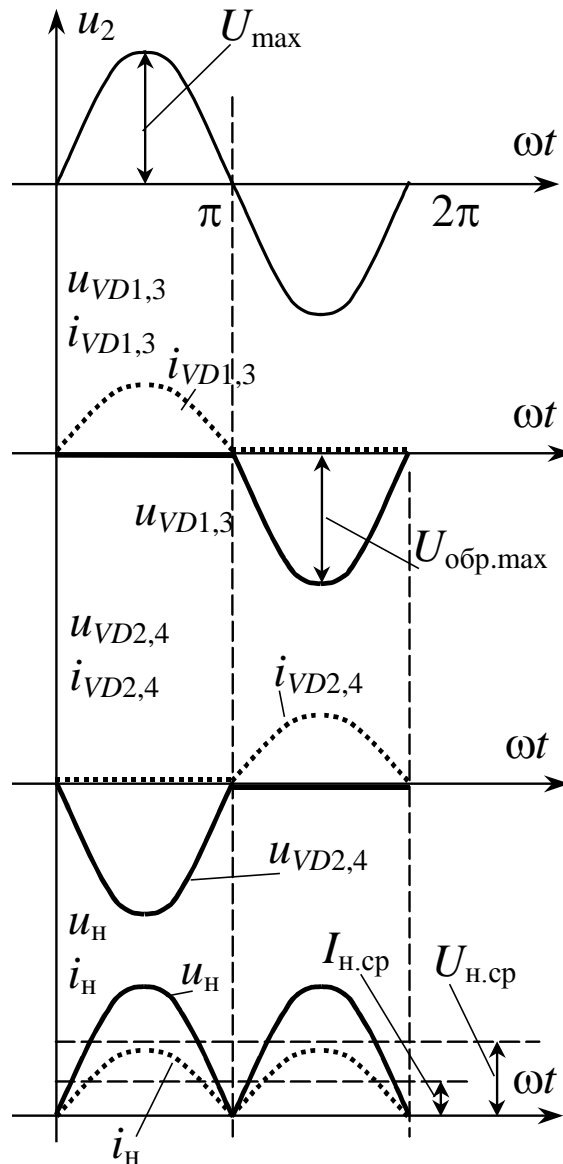
Дано:  $R_H = 600 \text{ Ом}$   $I_H = 300 \text{ мА}$ ,

$V_1 = 220 \text{ В}$

Выбрать диоды и рассчитать коэффициент трансформации  $K_{\text{тр}} = ?$

**Решение:**

Также как и в предыдущей задаче предварительно рассмотрим токи и напряжения на отдельных участках схемы



Напряжение на нагрузке

$$V_H = R_H I_H = 600 * 0,3 = 180 \text{ В}$$

Ветви VD1- VD3 и VD2- VD4 работают поочередно и ток в ветвях поровну делится между диодами, поэтому:

$$V_{\text{обр.max}} = (\pi/2) * V_H = (\pi/2) * 180 = 282 \text{ В};$$

$$I_{\text{пр.ср}} = I_H / 2 = 300 / 2 = 150 \text{ мА}$$

Подбор диода осуществляется по  $V_{\text{обр.max}}$  и  $I_{\text{пр.ср.max}}$

$$I_{\text{пр.ср.max}} = \pi * I_{\text{пр.ср}} = 3,14 * 150 = 471 \text{ мА} \approx 0,5 \text{ А}$$

Полученным значениям удовлетворяет диод КД 205 В.

Для определения  $K_{\text{тр}}$  необходимо определить действующее напряжение вторичной обмотки трансформатора  $V_2$

$$V_2 = V_{\text{обр.max}} / \sqrt{2} = 282 / \sqrt{2} = 200 \text{ В};$$

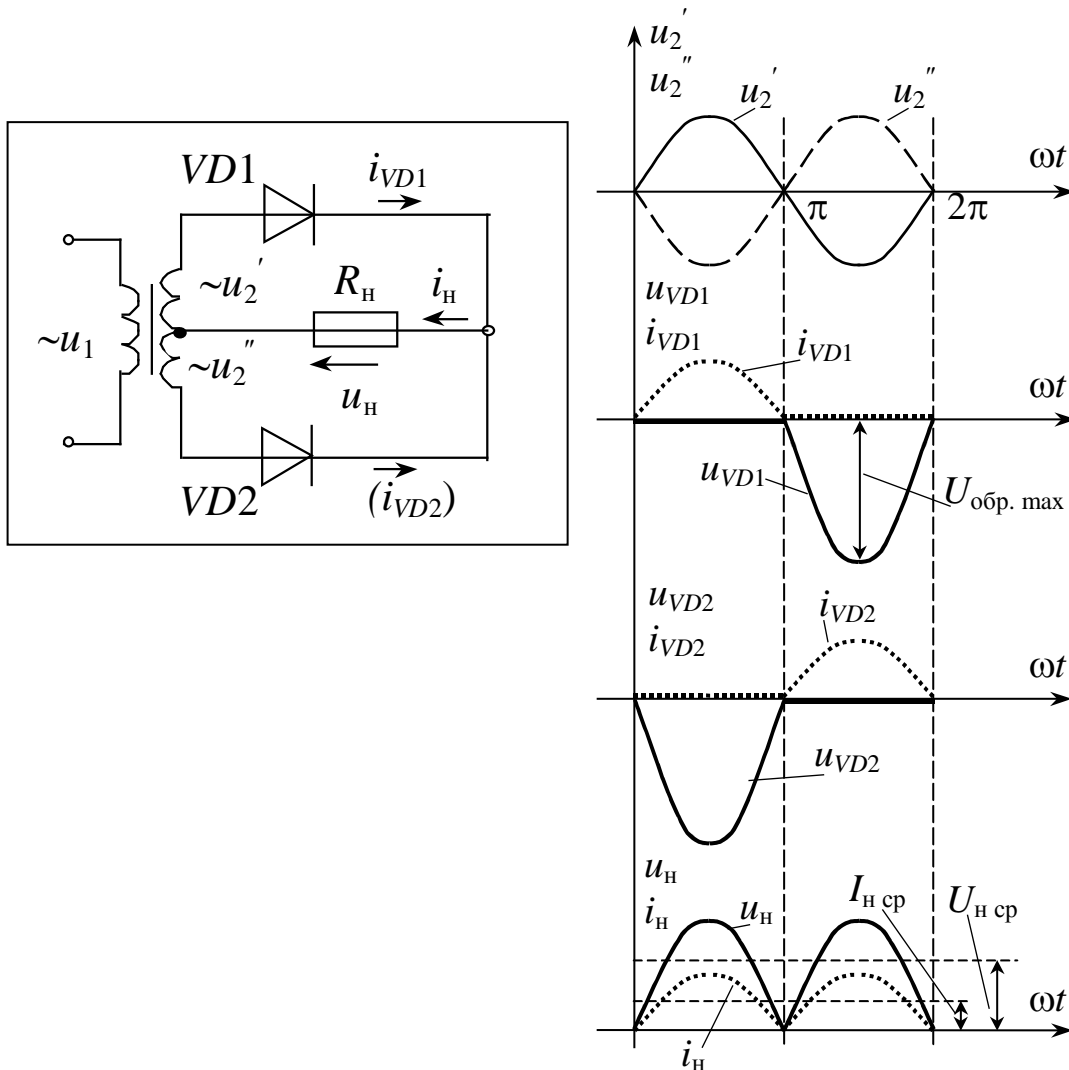
$$K_{\text{тр}} = V_1 / V_2 = 220 / 200 = 1,1$$

Как видно из расчета вторичная обмотка содержит вдвое меньше витков, следовательно он немного легче и имеет несколько меньшие габариты.

**Пример 3.** Расчет двухполупериодного выпрямителя с выводом средней точки трансформатора



Расчет этой схемы отличается от расчета мостовой схемы только тем, что на диодах действует вдвое большее обратное напряжение  $U_{\text{обр. max}} = 2U_{2\text{ max}}$ .



**Форма контроля** – защита практической работы.

**Вопросы для самоконтроля:**

1. Виды выпрямителей и их характеристики, классификация выпрямителей? Схемы одно-, двух-, трёхфазных выпрямителей – временные диаграммы, сравнительные характеристики, мостовые схемы?
2. Как определить амплитудное значение напряжения переменного тока по показаниям прибора, измеряющего действующее его значение?
3. В чём преимущества трёхфазной мостовой схемы выпрямления переменного тока (схемы Ларионова) перед всеми остальными?

**Рекомендуемая литература:**

1. Дементьев Ю.Н. Электротехника и электроника. Электрический привод [Электронный ресурс] : учебное пособие для СПО / Ю.Н. Дементьев, А.Ю. Чернышев, И.А. Чернышев. — Электрон. текстовые данные. — Саратов: Профобразование, 2017. — 223 с. — 978-5-4488-0144-0. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66403.html>
2. Легостаев Н.С. Материалы электронной техники [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н.С. Легостаев. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2014. — 239 с.

## Практическое занятие: Расчет выпрямителя с емкостным фильтром

### Раздел 2. Электроника

#### Тема 2.2. Выпрямители и стабилизаторы напряжения и тока

**Цель:** приобретение навыков расчёта мостового выпрямителя и сглаживающего фильтра.

**Оснащение:**

1. Таблицы с результатами измерений и вычислений.
2. Формулы, необходимые для расчета.

**Задание:**

1. Рассчитать однофазный выпрямитель, создающий на нагрузке постоянное напряжение  $U_d = 5$  В при токе  $I_d = 0,1$  А. Напряжение питающей сети переменного тока  $U_1 = 220$  В, частота сети  $f_1 = 50$  Гц. Заданный коэффициент пульсаций выпрямителя по первой гармонике  $k_{П1} = 0,01$ .
2. Рассчитать выпрямитель, создающий на нагрузке постоянное напряжение  $U_d = 50$  В при токе  $I_d = 1,0$  А. Параметры сети: трехфазная с «0», напряжение питающей сети переменного тока 220/380 В, частота сети  $f_1 = 50$  Гц. Коэффициент пульсаций выпрямителя по первой гармонике  $k_{П1} = 0,025$ .

**Порядок выполнения задания:**

1. Проработайте теоретический материал и ответьте на контрольные вопросы.
2. Ознакомьтесь с заданием и выполните его.
3. Оформите результаты работы.

**Методические указания:**

Исходными данными для расчета выпрямителя при нагрузке, начинающейся с емкостного элемента, являются: напряжение питающей сети  $U_1$ ; число фаз питающей сети ( $m$ ); частота питающей сети  $f_1$ ; выпрямленное напряжение  $U_d$ ; выпрямленный ток  $I_d$ .

**Пример 1.** Рассчитать однофазный выпрямитель, создающий на нагрузке постоянное напряжение  $U_d = 5$  В при токе  $I_d = 0,1$  А. Напряжение питающей сети переменного тока  $U_1 = 220$  В, частота сети  $f_1 = 50$  Гц. Заданный коэффициент пульсаций выпрямителя по первой гармонике  $k_{П1} = 0,01$ .

**Решение:**

1. Найдем сопротивление нагрузки выпрямителя

$$R_d = U_d / I_d = 5 / 0,1 = 50 \text{ (Ом)}$$

При этом полезная мощность в нагрузке

$$P_d = U_d I_d = 5 \cdot 0,1 = 0,5 \text{ (Вт)}$$

2. В качестве схемы выпрямления выбираем однофазную двухполупериодную схему со средней точкой (схема Миткевича), которая может быть рекомендована для использования в низковольтных устройствах малой мощности, когда напряжение на нагрузке сравнимо с падением напряжения на диоде.

3. Для выбранной схемы выпрямления определяем средний ток вентиля, значение обратного напряжения на вентиле и максимальное значение тока через вентиль по приближенным формулам (см. таблицу 2.1)

$$I_{\text{ПР.СР}} = \frac{I_d}{2} = \frac{0,1}{2} = 0,05 \text{ (A)},$$

$$U_{\text{ОБР.И}} \approx 3U_d = 3 \cdot 5 = 15 \text{ (В)},$$

$$I_{\text{ПР.И}} \approx 3,5I_d = 3,5 \cdot 0,1 = 0,35 \text{ (A)}.$$

Выбираем в качестве вентиля диоды BAS116 [22]:  $I_{\text{VD ПР.СР.макс}} = 0,25 \text{ А}$ ,  $U_{\text{VD ОБР}} = 80 \text{ В}$ ,  $U_{\text{VD ОБР.И}} = 85 \text{ В}$ , в этом случае имеем хороший запас по обратному напряжению. Вольт-амперная характеристика диода BAS116 приведена на рис. 2.11 (приводится из технических данных на диод [22]).

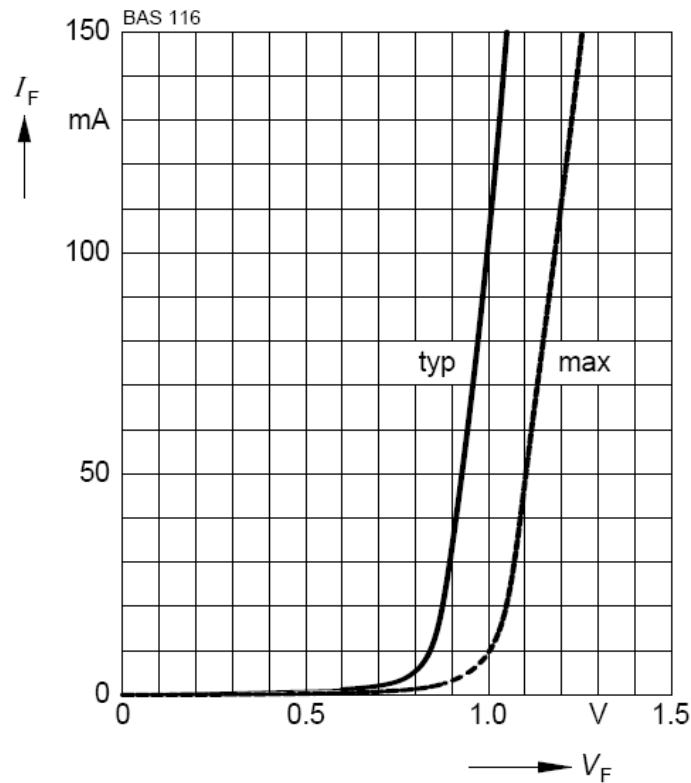


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика диода BAS116.

Аппроксимируем типовую ВАХ диода до кривой вида 3 (см. рис. 1.10, б), определив  $U_{\text{нор}} = 0,8 \text{ В}$ ,  $U_{\text{нр}}(I_{\text{ПР}}) = 1,05 \text{ В}$ ,  $I_{\text{ПР}} = 0,15 \text{ А}$ . Тогда внутреннее сопротивление вентиля согласно формуле (1.5):

$$r_{\text{VD}} = \frac{U_{\text{нр}}(I_{\text{ПР}}) - U_{\text{нор}}}{I_{\text{ПР}}} = \frac{1,05 - 0,8}{0,15} = 1,667 \text{ (Ом)}$$

4. Ориентировочные значения активного сопротивления обмоток и индуктивности рассеяния трансформатора, приведенные к фазе вторичной обмотки, определяем согласно (1.2) и (1.3):

$$r_{\text{TP}} \approx k_r \frac{U_d}{I_d f_1 B_m} \sqrt[4]{\frac{sf_1 B_m}{I_d U_d}} = 4,7 \frac{5}{0,1 \cdot 50 \cdot 1} \sqrt[4]{\frac{1 \cdot 50 \cdot 1}{0,1 \cdot 5}} = 14,863 \text{ (Ом)},$$

$$L_S \approx k_L \frac{sU_d}{(p-1)^2 I_d f_1 B_m} \sqrt{\frac{U_d I_d}{s f_1 B_m}} = 4,3 \cdot 10^{-3} \frac{1 \cdot 5}{(2-1)^2 \cdot 0,1 \cdot 50 \cdot 1} \sqrt{\frac{5 \cdot 0,1}{1 \cdot 50 \cdot 1}} = 1,36 \text{ (мГн)}$$

Принято: амплитуда магнитной индукции  $B_m$  в магнитопроводе - 1 Тл, число стержней трансформатора  $s = 1$ ,  $p = 2$ .

5. Активное сопротивление фазы выпрямителя  $r$  (таблица 2.1)

$$r = r_{VD} + r_{TP} = 1,667 + 14,863 = 16,53 \text{ (Ом)}$$

6. Для правильного расчета выпрямителя необходимо учесть пороговое напряжение диода  $E_{nop} = 0,8$  В, для чего следует пересчитать напряжение на нагрузке согласно формуле (2.28):

$$U_d^p = U_d + k_{vd} E_{nop} = 5 + 1 \cdot 0,8 = 5,8 \text{ (В)}$$

Коэффициент  $k_{vd}$  для схемы со средней точкой равен - 1, так как за каждый период питающего напряжения проводит только один вентиль.

Определяем значение параметра режима А по (2.13)

$$A(\theta) = \frac{\pi r I_d}{m U_d^p} = \frac{3,1416 \cdot 16,53 \cdot 0,1}{2 \cdot 5,8} = 0,4477,$$

$$A_0 = A(\theta) / \pi = 0,4477 / \pi = 0,1425.$$

Воспользуемся возможностями пакета MathCAD для нахождения угла отсечки  $\theta$  [23]:

$$c := 0$$

Given

$$0.4477 = \tan(c) - c$$

$$\theta := \text{Find}(c) \quad \theta = 0.95 \text{ рад} \quad \theta \cdot \frac{180}{\pi} = 54.4 \text{ град}$$

Таким образом, в градусах  $\theta$  составляет  $54,4^\circ$ .

7. Относительное реактивное сопротивление фазы согласно (2.21)

$$\text{tg } \varphi = x = \frac{2\pi f_1 L_S}{r} = \frac{2 \cdot 3,142 \cdot 50 \cdot 1,36 \cdot 10^{-3}}{16,53} = \frac{0,427}{16,53} \cong 0,026,$$

при этом угол  $\varphi$  порядка  $1,5^\circ$ .

Реактивным сопротивлением фазы в данном случае можно пренебречь и провести дальнейший расчет по аналитическим выражениям, считая  $x = 0$ .

8. Действующее значение ЭДС вторичной обмотки трансформатора найдем с учетом выражения (2.14)

$$E_2 = U_d^p B_0 = U_d^p \frac{1}{\sqrt{2} \cos(\theta)} = 5,8 \cdot \frac{1}{\sqrt{2} \cos(0,95)} = 5,8 \cdot 1,215 = 7,05 \text{ (В)}$$

Амплитудное значение ЭДС вторичной обмотки трансформатора:

$$E_{2m} = \sqrt{2} E_2 = \sqrt{2} \cdot 7,05 = 9,97 \text{ (В)}$$

9. Уточняем значение обратного напряжения диода (см. табл. 2.1):

$$U_{OBR.II} = 2\sqrt{2} E_2 = 2\sqrt{2} \cdot 7,05 \cong 20 \text{ (В)}$$

10. Вычисляем действующее значение тока вторичной обмотки (2.15):

$$I_2 = \frac{I_d}{m} D_0 = \frac{I_d}{m} \frac{\sqrt{\pi[(0,95)(1 + 0,5 \cos(2 \cdot 0,95)) - 0,75 \sin(2 \cdot 0,95)]}}{\sin(0,95) - 0,95 \cos(0,95)} = \frac{0,1}{2} \cdot 2 = 0,1 \text{ (А)}$$

11. Эффективное значение тока через вентиль равно действующему значению тока вторичной обмотки в выбранной схеме со средней точкой (см. табл. 2.1):

$$I_{IP.D} = I_2 = 0,1 \text{ (А)}$$

12. Уточняем значение импульса тока через вентиль (2.16):

$$I_{VDm} = \frac{I_d}{m} F_0 = \frac{I_d}{m} \cdot \frac{\pi(1 - \cos(0,95))}{\sin(0,95) - 0,95 \cos(0,95)} = \frac{0,1}{2} \cdot 5,04 = 0,252 \text{ (А)}$$

13. Находим коэффициент трансформации (2.22):

$$n \cong E_2 / U_1 = 7,05 / 220 = 0,032$$

14. Вычисляем действующее значение тока первичной обмотки (см. табл. 2.1):

$$I_1 = n I_2 \sqrt{2} = 0,032 \cdot 0,1 \sqrt{2} = 0,00453 \text{ (А)}$$

15. Определяем мощности вторичной и первичной сторон трансформатора

$$S_2 = 2 E_2 I_2 = 2 \cdot 7,05 \cdot 0,1 = 1,41 \text{ (ВА)}$$

$$S_1 = U_1 I_1 = 220 \cdot 0,00453 \cong 1,0 \text{ (ВА)}$$

16. Вычисляем точное значение габаритной мощности трансформатора (см. табл. 2.2):

$$S_{ca6} = 0,5 \cdot (S_1 + S_2) = 0,5 \cdot (1,0 + 1,41) \cong 1,2 \text{ (ВА)}$$

17. Коэффициента использования трансформатора по мощности:

$$K_{\alpha} = \frac{P_d}{S_{\text{заб}}} = \frac{0,5}{1,2} \cong 0,417$$

18. Определяем емкость конденсатора исходя из обеспечения требуемого коэффициента пульсаций по первой гармонике из (2.19):

$$C = \left[ \frac{\sin(m\theta)\cos\theta - m\sin\theta\cos(m\theta)}{m\pi^2(m^2 - 1)\cos\theta} \right] \frac{1}{f_1 r k_{\text{П1}}} = \frac{H(\theta)}{f_1 r k_{\text{П1}}} = \frac{0,03125}{50 \cdot 16,53 \cdot 0,01} = 3780 \text{ (мкФ)}$$

Требуемая емкость конденсатора с учетом допустимого отклонения емкости в пределах  $\pm 20\%$ :  $C \geq 4\,540$  (мкФ).

19. Для приближенного расчета переменной составляющей тока всех вентилях, проходящей через выходной конденсатор выпрямителя, воспользуемся формулой (2.17). Действующее значение первой гармоники тока через конденсатор на частоте  $f_C = mf_1 = 2 \cdot 50 = 100$  Гц:

$$I_C = \frac{I_{m1}}{\sqrt{2}} = \frac{U_d^p}{r} \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{\sin(m\theta)\cos\theta - m\sin\theta\cos(m\theta)}{(m^2 - 1)\cos\theta} = \frac{5,8}{16,53} \cdot 0,278 = 0,0975 \cong I_d \text{ (А)}$$

Следовательно, допустимое действующее значение тока пульсации  $I_{\sim RMS}$  для выбранного типа ЭК должно составлять не менее 0,1 А при максимальной рабочей температуре ЭК и частоте 100 Гц.

20. Напряжение холостого хода выпрямителя (2.25) с учетом порогового напряжения диода  $E_{\text{нор}}$ :

$$U_{\text{ХХ}} = \sqrt{2}E_2 - E_{\text{нор}} = \sqrt{2} \cdot 7,05 - 0,8 = 9,97 - 0,8 \cong 9,2 \text{ (В)}$$

По данным таблицы 1.2 выбираем стандартный номинал рабочего напряжения ЭК  $U_{\text{РАБ.НОМ}} = 10$  В.

21. Решение задачи выбора типа ЭК удовлетворяющего заданным параметрам на практике довольно часто оказывается неоднозначным, поскольку при ее решении необходимо учитывать множество аспектов.

**Форма контроля** – защита практической работы.

**Вопросы для самоконтроля:**

1. Поясните работу выпрямителя на фильтр с емкостной реакцией.
2. Запишите выражение для коэффициента пульсации на выходе емкостного фильтра.
3. Поясните работу выпрямителя на фильтр с индуктивной реакцией.
4. Запишите коэффициент сглаживания для выпрямителя с индуктивной реакцией.

**Рекомендуемая литература:**

1. Клепча В.Ф. Электротехника. Лабораторный практикум [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.Ф. Клепча. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2016. — 180 с. — 978-985-503-553-5. <http://www.iprbookshop.ru/67802.html>

2. Дементьев Ю.Н. Электротехника и электроника. Электрический привод [Электронный ресурс] : учебное пособие для СПО / Ю.Н. Дементьев, А.Ю. Чернышев, И.А. Чернышев. — Электрон. текстовые данные. — Саратов: Профобразование, 2017. — 223 с. — 978-5-4488-0144-0. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66403.html>
3. Легостаев Н.С. Материалы электронной техники [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н.С. Легостаев. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2014. — 239 с.

## Практическое занятие: Расчет рабочей точки электронного усилителя

### Раздел 2. Электроника

#### Тема 2.3. Полупроводниковые усилители

**Цель:** приобретение навыков расчёта рабочей точки электронного усилителя.

**Оснащение:**

1. Таблицы с результатами измерений и вычислений.
2. Формулы, необходимые для расчета.

**Задание:**

На основе заданного операционного усилителя разработать схему инвертирующего усилителя низкой частоты с коэффициентом усиления  $K_u$  и минимальным входным напряжением  $U_{вхmin}=(5 \text{ мВ} - \text{группа №1}; 10 \text{ мВ} - \text{группа №2}; 15 \text{ мВ} - \text{группа №3}; 20 \text{ мВ} - \text{группа №4})$ . Определить максимальное входное напряжение синусоидального сигнала  $U_{вхmax}$ , при котором не будет значительных искажений выходного сигнала. Описать работу схемы, осуществить моделирование её работы при  $U_{вхmin} < U_{вх1} < U_{вхmax}$  и  $U_{вх2} > U_{вхmax}$ .

**Порядок выполнения задания:**

1. Проработайте теоретический материал и ответьте на контрольные вопросы.
2. Ознакомьтесь с заданием и выполните его.
3. Оформите результаты работы.

**Методические указания:**

Параметры операционного усилителя КР140УД11 (аналог LM318N8) (приложение Е):

- номинальное напряжение питания  $U_{пит ном} = \pm 15 \text{ В}$ ;
- коэффициент усиления  $K_{u ОУ} = 30000$ ;
- максимально допустимое выходное напряжение  $U_{выхmax} = 12 \text{ В}$ ;
- разность входных токов  $\Delta I_{вх} = 0,2 \text{ мкА}$ ;
- входное сопротивление  $R_{вх} = 0,4 \text{ МОм}$ ;
- минимальное сопротивление нагрузки  $R_{H min} = 2 \text{ кОм}$ .

Для инвертирующего усилителя на ОУ входное сопротивление  $R_{вх} = R_1$ . Чтобы не загружать источники сигнала, величину  $R_1$  желательно иметь большой. Но падение напряжения на  $R_1$  от разностного тока  $\Delta I_{вх}$  воспринимается усилителем как сигнал. Чтобы отстроить эту помеху от полезного сигнала, надо иметь  $\Delta I_{вх} \cdot R_1$  значительно меньше, чем  $U_{вхmin}$ .

$$\frac{U_{вхmin}}{\Delta I_{вх}} = \frac{10}{0,2} = 50 \text{ кОм} \gg R_1.$$

Принимаем из стандартного ряда Е24 (приложение В)  $R_1 = 5,1 \text{ кОм}$ , тогда

$$\Delta I_{вх} \cdot R_1 = 0,2 \cdot 5,1 = 1 \text{ мВ} \ll U_{вхmin} = 10 \text{ мВ}.$$

Сопротивление обратной связи

$$R_2 = K_u \cdot R_1 = 20 \cdot 5,1 = 102 \text{ кОм}.$$

Принимаем  $R_2 = 100 \text{ кОм}$ .

Для уравнивания входных токов ОУ по обоим входам в цепь неинвертирующего входа включают резистор  $R_3$ :

$$R_3 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{5,1 \cdot 100}{5,1 + 100} = 4,85 \text{ кОм}.$$

Принимаем  $R_3 = 4,7 \text{ кОм}$ .

Амплитуда выходного сигнала не может быть больше максимального выходного напряжения (для данного типа ОУ – 12 В). Поэтому действующее значение максимального входного синусоидального сигнала составит:



$$U_{ср. макс} = \frac{U_{вх макс}}{\sqrt{2} \cdot K_{г}} = \frac{12}{\sqrt{2} \cdot 20} = 0,42 \text{ В.}$$

Модель инвертирующего усилителя на ОУ в среде Multisim (файл «Усилитель на ОУ.ms11») приведена на рисунке 1. Результаты моделирования при напряжении, не превышающем  $U_{вх макс}$ :  $U_{вх}=0,2 \text{ В}$ ;  $U_{вых}=3,92 \text{ В}$ .

Коэффициент усиления

$$K_{г} = \frac{U_{ср макс}}{U_{ср}} = \frac{3,92}{0,2} = 19,6 \approx 20, \text{ что соответствует заданию.}$$

Временные диаграммы работы усилителя при различных уровнях входного сигнала представлены на рисунке 1. Выходное напряжение  $U_{вых}$  смещено относительно входного  $U_{вх}$  на  $180^\circ$  (инвертирующий усилитель). При входном напряжении  $U_{вх}=1 \text{ В}$ , превышающем  $U_{вх макс}$ , наблюдается ограничение выходного напряжения на уровне  $U_{вых макс}=12 \text{ В}$  (рисунок 1 б).

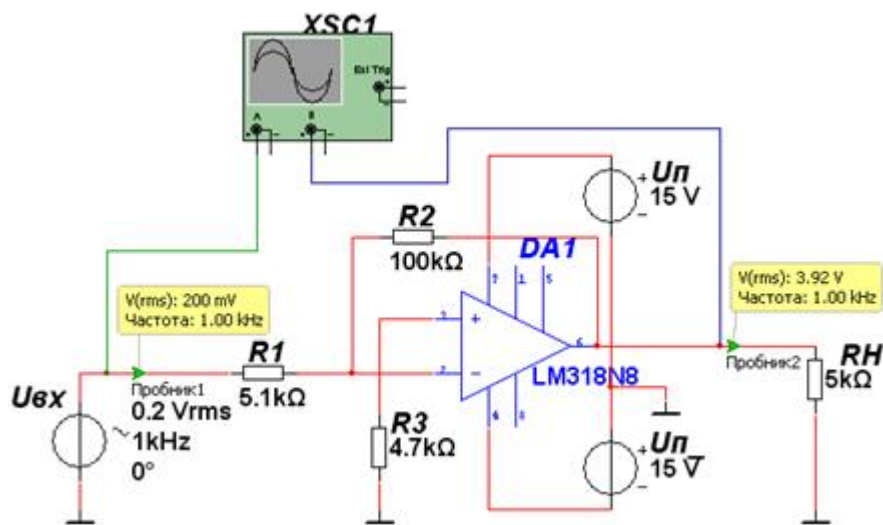
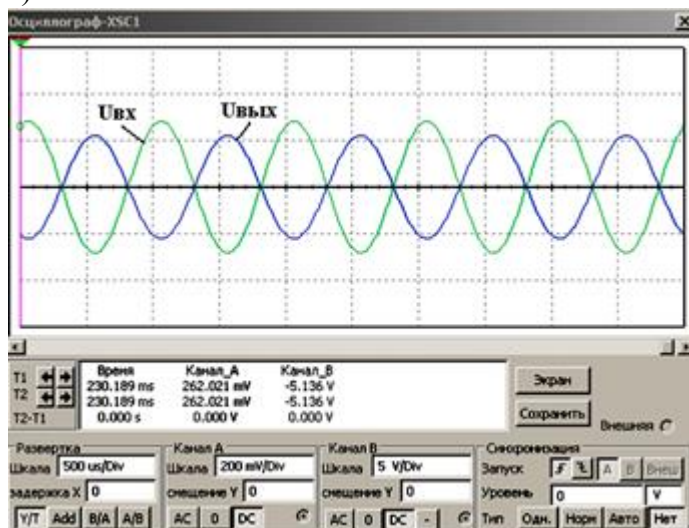


Рис.1 – Модель инвертирующего усилителя на ОУ а)



б)

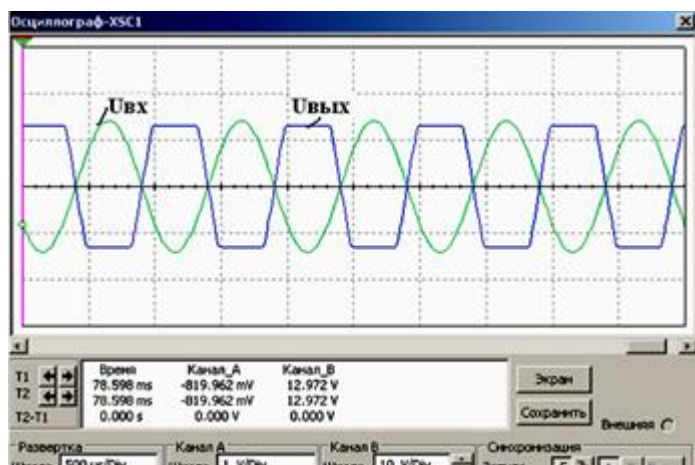


Рис. 2 – Временные диаграммы работы инвертирующего усилителя на ОУ при входном напряжении  $U_{вхmax}=0,2$  В (а) и  $U_{вхmax}=1$  В (б)

**Форма контроля** – защита практической работы.

**Вопросы для самоконтроля:**

- 1 Основные схемы включения транзистора в усилителях.
- 2 Принцип действия простейшего усилителя низкой частота.
- 3 Принцип действия многокаскадного усилителя низкой частоты.
- 4 Реализация и принцип действия обратных связей.
- 5 Назначение различных элементов усилителя.

**Рекомендуемая литература:**

1. Клепча В.Ф. Электротехника. Лабораторный практикум [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.Ф. Клепча. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2016. — 180 с. — 978-985-503-553-5. <http://www.iprbookshop.ru/67802.html>
2. Дементьев Ю.Н. Электротехника и электроника. Электрический привод [Электронный ресурс] : учебное пособие для СПО / Ю.Н. Дементьев, А.Ю. Чернышев, И.А. Чернышев. — Электрон. текстовые данные. — Саратов: Профобразование, 2017. — 223 с. — 978-5-4488-0144-0. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/66403.html>
3. Легостаев Н.С. Материалы электронной техники [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н.С. Легостаев. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2014. — 239 с.

### Критерии и шкала оценивания

Оценка	Критерии оценки
Отлично	студент обнаруживает систематическое и глубокое знание программного материала по дисциплине, умеет свободно ориентироваться в вопросе. Ответ полный и правильный на основании изученного материала. Выдвинутые положения аргументированы и иллюстрированы примерами. Материал изложен в определенной логической последовательности, осознанно, литературным языком, с использованием современных научных терминов; ответ самостоятельный. Студент уверенно отвечает на дополнительные вопросы.
Хорошо	студент обнаруживает полное знание учебного материала, демонстрирует систематический характер знаний по дисциплине. Ответ полный и правильный, подтвержден примерами; но их обоснование не аргументировано, отсутствует собственная точка зрения. Материал изложен в определенной логической последовательности, при этом допущены 2-3 несущественные погрешности, исправленные по требованию экзаменатора. Студент испытывает незначительные трудности в ответах на дополнительные вопросы. Материал изложен осознанно, самостоятельно, с использованием современных научных терминов, литературным языком.
Удовлетворительно	студент обнаруживает знание основного программного материала по дисциплине, но допускает погрешности в ответе. Ответ недостаточно логически выстроен, самостоятелен. Основные понятия употреблены правильно, но обнаруживается недостаточное раскрытие теоретического материала. Выдвигаемые положения недостаточно аргументированы и не подтверждены примерами; ответ носит преимущественно описательный характер. Студент испытывает достаточные трудности в ответах на вопросы. Научная терминология используется недостаточно.
Неудовлетворительно	выставляется студенту, обнаружившему пробелы в знаниях основного учебного материала по дисциплине. При ответе обнаружено непонимание студентом основного содержания теоретического материала или допущен ряд существенных ошибок, которые студент не может исправить при наводящих вопросах экзаменатора, затрудняется в ответах на вопросы. Студент подменил научное обоснование проблем рассуждением бытового плана. Ответ носит поверхностный характер; наблюдаются неточности в использовании научной терминологии.