

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Теоретические основы электротехники»

**А. Н. Вершинин**

## **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ  
по одноименному курсу для студентов  
специальности 1-36 12 01 «Проектирование  
и производство сельскохозяйственной техники»  
дневной и заочной форм обучения**

**Электронный аналог печатного издания**

**Гомель 2013**

УДК 621.3+621.38(075.8)  
ББК 31.2+32.85я73  
В37

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом  
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 9 от 26.03.2013 г.)*

Рецензент: доц. каф. «Автоматизированный электропривод» ГГТУ им. П. О. Сухого  
канд. техн. наук *В. В. Брель*

- Вершинин, А. Н.**  
В37 Электротехника и электроника : лаборатор. практикум по одноим. курсу для студентов специальности 1-36 12 01 «Проектирование и производство сельскохозяйственной техники» днев. и заоч. форм обучения / А. Н. Вершинин. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2013. – 77 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://library.gstu.by/>. – Загл. с титул. экрана.  
ISBN 978-985-535-160-4.

Приведены описания четырнадцати лабораторных работ, каждая из которых содержит тему, цель работы, краткие теоретические сведения, лабораторное задание, контрольные вопросы и требования к содержанию отчета.

Для студентов специальности 1-36 12 01 «Проектирование и производство сельскохозяйственной техники» дневной и заочной форм обучения.

**УДК 621.3+621.38(078.8)  
ББК 31.2+32.85я73**

**ISBN 978-985-535-160-4**

© Вершинин А. Н., 2013  
© Учреждение образования «Гомельский  
государственный технический университет  
имени П. О. Сухого», 2013

## ВВЕДЕНИЕ

В учебные планы подготовки инженеров неэлектротехнических специальностей входит целый ряд общеобразовательных дисциплин, к которым относится и электротехника – наука о техническом применении электрических и магнитных явлений.

Необходимость в усвоении базовой системы знаний, умений и навыков в области электротехники будущими инженерами обусловлена широким использованием электромагнитных явлений, электрических аппаратов и электрических методов измерений.

В формировании этой системы знаний, умений и навыков большое значение имеют лабораторные занятия.

Лабораторные занятия по электротехнике и электронике имеют целью:

- дать возможность изучить устройство и характеристики наиболее часто применяемых на практике электроизмерительных приборов, машин и аппаратов;

- помочь овладеть практическими способами настройки и управления электротехнических и электронных устройств на требуемый режим;

- научить технике проведения экспериментального исследования физических моделей или промышленных образцов электротехнических устройств;

- выработать умение выносить суждение о рабочих свойствах и степени пригодности исследованных устройств для решения тех или иных практических задач.

# Лабораторная работа № 1

## Исследование линейных цепей постоянного тока с одним источником ЭДС

*Цель работы:*

- убедиться в соблюдении законов Кирхгофа в линейных цепях постоянного тока;
- уяснить режимы работы электрической цепи;
- экспериментально исследовать законы распределения токов, напряжений и мощностей в неразветвленной и разветвленной цепях с одним источником ЭДС.

### 1.1. Краткие теоретические сведения

**1.1.1. Последовательное соединение.** *Последовательным* называют такое соединение, при котором в каждом из элементов проходит один и тот же ток. Схема такой цепи представлена на рис. 1.1. Режим работы каждого элемента этой цепи и всей электрической цепи характеризуется значениями тока, напряжения и мощности:

– для тока:  $I = \frac{U}{R_{\text{экв}}} = \frac{U}{R_1 + R_2}$ ; при этом с уменьшением сопротивления резистора  $R_2$  от бесконечности (режим холостого хода  $R_2 = \infty$ ) до нуля (режим короткого замыкания  $R_2 = 0$ ) величина тока изменяется от нуля до максимального значения;

– для напряжения на первом и втором резисторах:  $U_1 = I_1 R_1$ ;  
 $U_2 = U - U_1 = I R_2 = \frac{U}{1 + \frac{R_1}{R_2}}$ ; причем напряжение  $U_1$  увеличивается пропорционально току, а напряжение  $U_2$  равно напряжению источника ЭДС при холостом ходе и нулю при коротком замыкании;

– для мощностей, потребляемых первым и вторым резистором:

$P_1 = U_1 I = I^2 R_1 = \frac{U_1^2}{R_1}$ ;  $P_2 = U_2 I = I^2 R_2 = \frac{U_2^2}{R_2}$ ; причем мощность  $P_1$  увеличивается пропорционально квадрату тока от нуля при холостом ходе до мощности, отдаваемой источником энергии в цепь  $P = UI$ , а мощность  $P_2$  равна нулю при холостом ходе и при коротком замыкании.

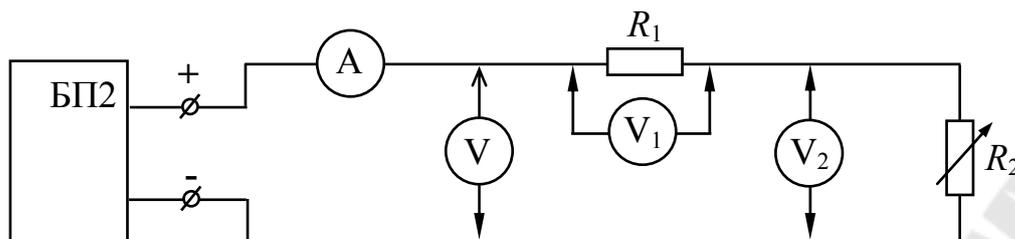


Рис. 1.1. Схема цепи постоянного тока с последовательным соединением приемников

Ток при согласованном режиме определяется из выражения

$$I = \frac{U}{2R_1} = 0,5I_k, \quad (1.1)$$

где  $I_k = \frac{U}{R_1}$  – ток короткого замыкания;  $U_2 = U_1 = 0,5U$ .

Характер изменения напряжения и мощностей в функции тока нагрузки показан на рис. 1.2.

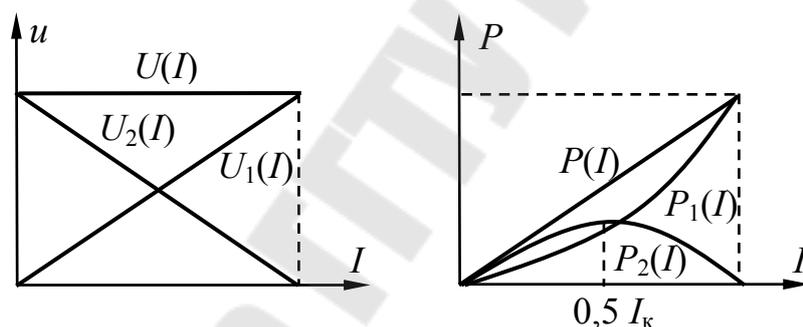


Рис. 1.2. Изменение напряжений и мощностей в зависимости от тока нагрузки для схемы с последовательным соединением элементов

**1.1.2. Параллельное соединение.** *Параллельным* называют такое соединение приемников, при котором напряжение на каждом из них одинаково и режимы их работы не зависят друг от друга. Значения токов в ветвях определяются законом Ома, а тока в неразветвленной части цепи – первым законом Кирхгофа. Схема такой цепи представлена на рис. 1.3. Проводимости ветвей равны  $q_2 = \frac{1}{R_2}$ ;  $q_3 = \frac{1}{R_3}$ . Эквивалентная проводимость всей цепи равна  $q_{\text{эКВ}} = q_1 + q_2$ . Мощность цепи, состоящей из параллельных ветвей, равна

$$P = UI = U(I_2 + I_3) = P_2 + P_3 = I^2 R_{\text{ЭКВ}} = \frac{U^2}{R_{\text{ЭКВ}}}, \quad (1.2)$$

где  $R_{\text{ЭКВ}} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$  – эквивалентное сопротивление двух параллельно включенных резисторов.

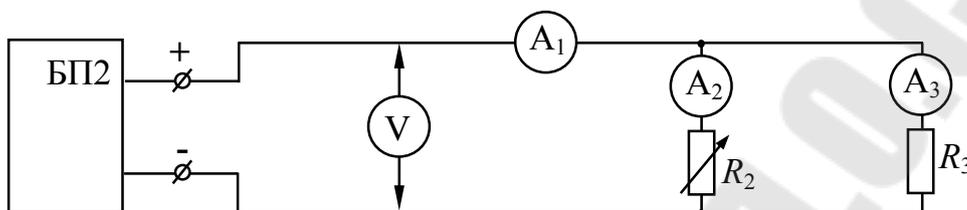


Рис. 1.3. Схема цепи постоянного тока с параллельным соединением приемников

**1.1.3. Смешанное соединение.** *Смешанным* называют такое соединение приемников, которое сочетает в себе и последовательное, и параллельное их соединение. Схема цепи со смешанным соединением приемников приведена на рис. 1.4.

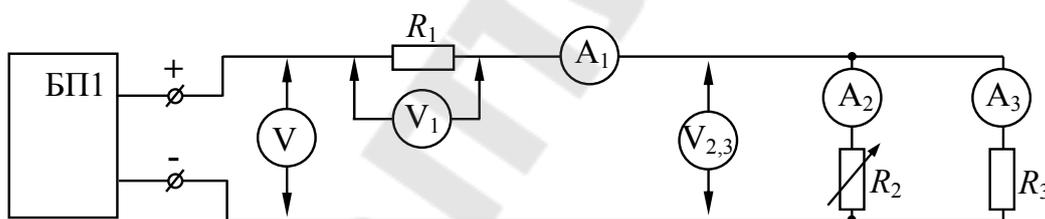


Рис. 1.4. Схема цепи постоянного тока со смешанным соединением приемников

## 1.2. Лабораторное задание

1.2.1. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 1.1 и после проверки правильности сборки преподавателем включить блок питания БП2 и выставить напряжение  $U_{\text{max}}$  на входе схемы. Изменяя  $R_2$  от  $R_{2\text{min}}$  до  $R_{2\text{max}}$  (с помощью ключей SA4, SA5, SA6), получить 6 отсчетов тока и напряжений. Показания приборов записать в табл. 1.1 (в столбцы «измерено»). Выключить блок питания стенда и после проверки полученных результатов преподавателем разобрать схему. Регулятор напряжения установить в исходное положение, соответствующее  $U_{\text{вых}} = 0$ .

Таблица 1.1

№ п/п	Измерено				Вычислено						
	$I,$ А	$U,$ В	$U_1,$ В	$U_2,$ В	$P_1,$ Вт	$P_2,$ Вт	$R_1,$ Ом	$R_2,$ Ом	$R_{\text{экв}},$ Ом	$P,$ Вт	
1											
2											
3											
4											
5											
6											

1.2.2. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 1.3, используя вместо амперметров  $A_1, A_2, A_3$  ключи  $SA_1, SA_2, SA_3$ , и после проверки правильности сборки преподавателем включить блок питания и выставить на входе цепи с помощью преподавателя необходимое напряжение. Изменяя сопротивление реостата  $R_2$  от  $R_{2\text{min}}$  до  $R_{2\text{max}}$  (с помощью ключей  $SA_4, SA_5, SA_6$ ), получить 6 отсчетов напряжений и токов. Показания приборов записать в табл. 1.2. Выключить блок питания и после проверки результатов преподавателем разобрать схему.

Таблица 1.2

№ п/п	Измерено				Вычислено								
	$U,$ В	$I_1,$ А	$I_2,$ А	$I_3,$ А	$R_2,$ Ом	$R_3,$ Ом	$R_{\text{экв}},$ Ом	$q_2,$ См	$q_3,$ См	$q_{\text{экв}},$ См	$P_2,$ Вт	$P_3,$ Вт	$P,$ Вт
1													
2													
3													
4													
5													
6													

1.2.3. Дополнить схему рис. 1.3 резистором  $R_1$  и после проверки преподавателем включить блок питания и выставить напряжение  $U_{\text{max}}$  на входе цепи. Изменяя  $R_2$  от  $R_{2\text{min}}$  до  $R_{2\text{max}}$ , получить 6 отсчетов напряжений и токов. Показания приборов записать в табл. 1.3. Выключить блок питания.

Таблица 1.3

№ п/п	Измерено						Вычислено							
	$U_1,$ В	$U_{2,3},$ В	$U,$ В	$I_1,$ А	$I_2,$ А	$I_3,$ А	$R_1,$ Ом	$R_2,$ Ом	$R_3,$ Ом	$R_{\text{ЭКВ}},$ Ом	$P_1,$ Вт	$P_2,$ Вт	$P_3,$ Вт	$P,$ Вт
1														
2														
3														
4														
5														

1.2.4. Результаты измерений предъявить на подпись преподавателю, а стенд привести в исходное состояние.

### 1.3. Контрольные вопросы

- 1.3.1. Какие электрические цепи называются линейными?
- 1.3.2. Что физически выражает первый закон Кирхгофа?
- 1.3.3. Что физически выражает второй закон Кирхгофа?
- 1.3.4. Какое соединение называют последовательным, параллельным и смешанным?
- 1.3.5. Что означают режимы холостого хода (х.х.) и короткого замыкания (к.з.) электрической цепи?
- 1.3.6. При каком условии в цепи возможен режим согласованной нагрузки и чем он характеризуется?
- 1.3.7. Как определить эквивалентное сопротивление параллельно включенных резисторов?
- 1.3.8. Что такое проводимость ветви и всей цепи?
- 1.3.9. Как определяется мощность источника и приемника в цепи постоянного тока?

### 1.4. Требования к оформлению отчета

- Отчет должен содержать:
- титульный лист;
  - тему и цель работы;
  - схемы исследуемых цепей рис. 1.1, 1.3, 1.4 и табл. 1.1–1.3 результатов измерений и проведенных по ним вычислений;
  - графики зависимостей  $U(I)$ ,  $U_1(I)$ ,  $U_2(I)$  и  $P(I)$ ,  $P_1(I)$  и  $P_2(I)$ , построенные по данным табл. 1.1 (см. рис. 1.2);

- графики зависимостей  $I(I_2)$ ,  $I_3(I_2)$  и  $P(I_2)$ ,  $P_2(I_2)$ ,  $P_3(I_2)$ , построенные по данным табл. 1.2;
- анализ результатов и выводы.

## **Лабораторная работа № 2**

### **Исследование сложной линейной цепи постоянного тока с несколькими источниками ЭДС**

*Цель работы:*

- освоить и экспериментально проверить расчет линейных цепей постоянного тока методом наложения;
- освоить методику измерения и построения потенциальной диаграммы.

#### **2.1. Краткие теоретические сведения**

**2.1.1. Метод наложения.** Метод наложения полагает, что каждая ЭДС вызывает в отдельных ветвях электрической цепи свои (частичные) токи независимо от действия всех остальных ЭДС, включенных в эту же цепь. Это позволяет найти ток в любой ветви как алгебраическую сумму токов, возникающих в этой ветви при действии каждой ЭДС отдельно. Так, расчет токораспределения в электрической цепи рис. 2.1, а методом наложения сводится к нахождению токов в двух более простых цепях с ЭДС  $E_1$  (рис. 2.1, б) и ЭДС  $E_2$  (рис. 2.1, в) при сохранении в них прежних значений внешних и внутренних сопротивлений.

В электрической цепи рис. 2.1, б токи в ветвях определяются из выражений:

$$I_1' = \frac{E_1}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}}; \quad I_2' = \frac{R_3}{R_2 + R_3} I_1'; \quad I_3' = \frac{R_2}{R_2 + R_3} I_1'.$$

Аналогично в электрической цепи рис. 2.1, в токи в ветвях определяются из выражений:

$$I_3'' = \frac{E_2}{R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}; \quad I_2'' = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I_3''; \quad I_1'' = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I_3''.$$

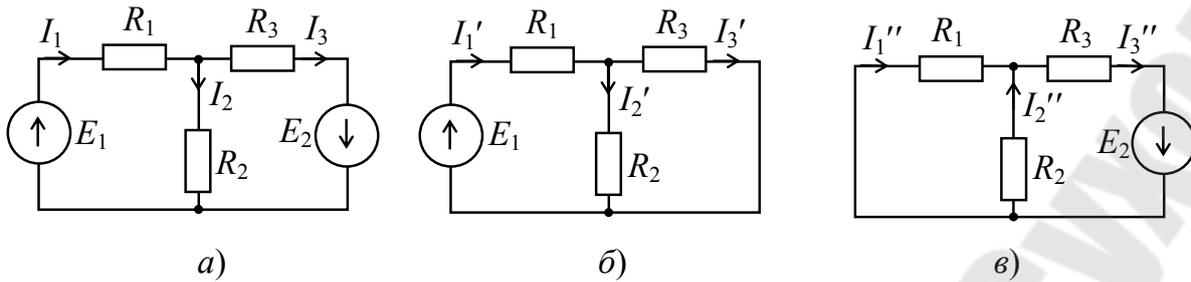


Рис. 2.1. Схемы для расчета токов в ветвях методом наложения

Наложение токов  $I_1'$ ,  $I_2'$ ,  $I_3'$  на токи  $I_1''$ ,  $I_2''$ ,  $I_3''$  с учетом их направлений позволяет найти действительные токи в ветвях исходной схемы рис. 2.1, а:

$$I_1 = I_1' + I_1''; \quad I_2 = I_2' - I_2''; \quad I_3 = I_3' + I_3''.$$

**2.1.2. Потенциальная диаграмма.** Под *потенциальной диаграммой* понимают график распределения потенциала вдоль какого-либо участка цепи или замкнутого контура, в зависимости от суммарного сопротивления от базовой точки (потенциал которой принимается равным нулю) до каждой характерной точки заданного контура. При этом по оси абсцисс откладываются суммарные сопротивления, а по оси ординат – потенциалы.

Для построения диаграммы определяется сумма сопротивлений всех резисторов, входящих в заданный контур, и выбирается масштаб  $m_{R\Sigma}$  (Ом/мм) по оси абсцисс. Далее рассчитываются или измеряются вольтметром постоянного тока (чувствительным к полярности) потенциалы всех точек контура по отношению к базовой точке и выбирается масштаб  $m$  (В/мм).

Для расчета потенциалов следует вначале определить величины и направления токов, протекающих через все элементы, входящие в контур и далее, перемещаясь от базовой точки по контуру в произвольном направлении, рассчитать потенциалы по соотношению

$$\varphi_2 = \varphi_1 \pm E \pm IR,$$

где  $\varphi_2$  – потенциал последующей точки контура;  $\varphi_1$  – потенциал предыдущей точки контура;  $E$  и  $R$  – ЭДС источника напряжения или электрическое сопротивление резистора, включенного между точками 1 и 2;  $I$  – величина тока, протекающего через резистор  $R$ .

Знак перед ЭДС берется положительный, если направление ЭДС совпадает с направлением обхода контура, а знак падения напряжения  $IR$  берется положительным, если направление тока  $I$  через резистор  $R$  встречно направлению обхода.

Для измерения потенциалов всех точек контура вольтметром отрицательный зажим вольтметра соединяется с базовой точкой, а положительным поочередно касаются остальных точек контура. Результаты расчетов или (и) измерений заносятся в табл. 2.2 и строится диаграмма (рис. 2.4).

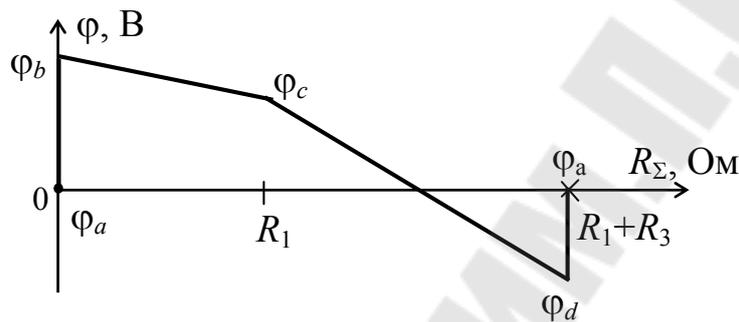


Рис. 2.4. Пример построения потенциальной диаграммы для внешнего контура схемы рис. 2.5

Вертикальные участки диаграммы отвечают переходам через идеальные источники ЭДС.

Расчеты и экспериментальные измерения в данной работе проводятся применительно к схеме рис. 2.5.

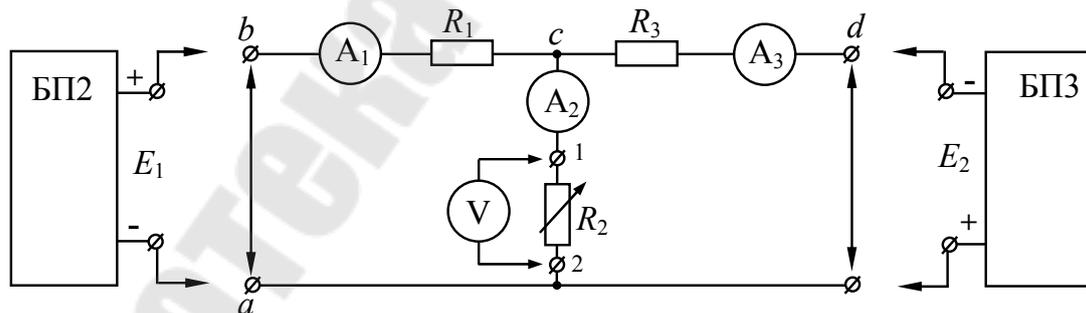


Рис. 2.5. Схема электрической цепи для проведения расчетов и измерений

## 2.2. Лабораторное задание

2.2.1. Произвести проверку метода наложения, для чего:

- Соберите схему рис. 2.5, включив между точками  $a$  и  $b$  вместо перемычки источник ЭДС  $E_1$ , соблюдая полярность.

- После проверки схемы преподавателем регулятор напряжения  $E_1$  установите на нуль и, включив источник питания стенда, установите величину ЭДС  $E_1 = \frac{E_{1\max}}{2}$ . Установите ключи резистора  $R_2$  в положение  $R_{2\max}$ , измерьте и запишите в табл. 2.1 величины  $E_1, I_1', I_2', I_3'$ . Выключите питание источника  $E_1$  тумблером.

- Замените источник ЭДС  $E_1$  перемычкой, а перемычку между точками  $d$  и  $a$  – источником ЭДС  $E_2$ , и, включив питание источника  $E_2$ , измерьте и запишите в табл. 2.1 величины  $E_2, I_1'', I_2'', I_3''$ . Выключите питание источника  $E_2$ .

- Замените перемычку между точками  $a$  и  $b$  схемы источником ЭДС  $E_1$ , и, включив питание обоих источников, измерьте и запишите в табл. 2.1 величины  $E_1, E_2, I_1, I_2, I_3$ . Выключите питание источников ЭДС  $E_1$  и  $E_2$ .

2.2.2. Измерьте потенциалы указанных на схеме рис. 2.5 точек (относительно базовой точки  $a$ ) по методике, изложенной в разделе 2.1.3 для величины  $R_2 = R_{2\max}$  и занесите результаты измерений в табл. 2.2.

Таблица 2.1

Режим работы	Измерено			Вычислено		
	$I_1, A$	$I_2, A$	$I_3, A$	$I_1, A$	$I_2, A$	$I_3, A$
Включен источник ЭДС $E_1 \neq 0; E_2 = 0$						
Включен источник ЭДС $E_1 = 0; E_2 \neq 0$						
Включены оба источника ЭДС $E_1 \neq 0; E_2 \neq 0$						

Таблица 2.2

Способ определения потенциала	Точки контура				
	$\varphi_a, B$	$\varphi_b, B$	$\varphi_c, B$	$\varphi_d, B$	$\varphi_a, B$
Расчет $\varphi_i, B$					
Измерение $\varphi_i, B$					
Суммарное сопротивление $R_\Sigma, \text{Om}$					

## **2.3. Контрольные вопросы**

2.3.1. Как осуществляется расчет электрических цепей по методу наложения?

2.3.2. В каких случаях можно использовать метод наложения для расчета электрических цепей?

2.3.3. Что понимается под потенциальной диаграммой?

2.3.4. Как рассчитываются и как измеряются потенциалы узлов заданного контура схемы?

## **2.4. Требования к оформлению отчета**

Отчет должен содержать:

- титульный лист;
- тему и цель работы;
- результаты расчета и измерения токов в ветвях схемы по методу наложения в виде заполненной табл. 2.1;
- схему рис. 2.5;
- табл. 2.2 и потенциальные диаграммы (расчетную и экспериментальную на одном рисунке);
- анализ результатов и выводы.

## **Лабораторная работа № 3**

### **Исследование нелинейных цепей постоянного тока**

*Цель работы:*

- изучить различные нелинейные элементы электрических цепей, их параметры и характеристики. Снять экспериментально их вольт-амперные характеристики;
- выполнить графический расчет нелинейных цепей постоянного тока и проверить их экспериментально.

### **3.1. Краткие теоретические сведения**

В электрические цепи могут входить элементы, сопротивление которых не является величиной постоянной, вследствие чего ток в них не находится в прямой пропорциональной зависимости по отношению к напряжению. Такие элементы называются нелинейными элементами.

Основной характеристикой нелинейных элементов, по которой судят об их электрических свойствах, является вольт-амперная (ампер-вольтная) характеристика  $I(U)$ . Она не может быть установлена теоретически и определяется экспериментально. В зависимости от вида вольт-амперной характеристики различают симметричные (электрические лампы накаливания (рис. 3.1, *a*), бареттеры (рис. 3.1, *б*)) и несимметричные (полупроводниковый диод (рис. 3.2)) нелинейные элементы.

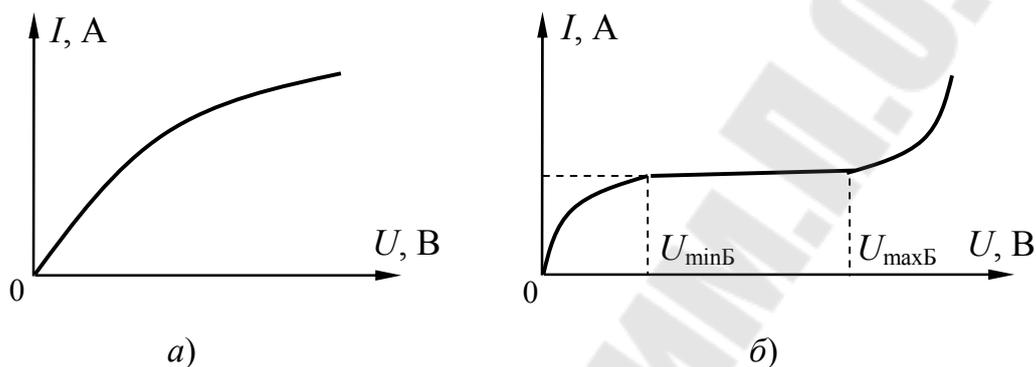


Рис. 3.1. Вольт-амперные характеристики нелинейных элементов:  
*a* – лампы накаливания; *б* – бареттера

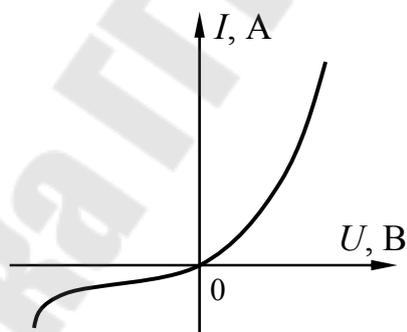


Рис. 3.2. Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода

При исследовании и расчете цепей с нелинейными элементами применяются такие параметры, как статическое и динамическое (дифференциальное) сопротивление, определяемые по вольт-амперным характеристикам.

Статическим сопротивлением  $R_{ст}$  нелинейного элемента в заданной точке  $A$  его характеристики называют отношение напряжения на элементе к току в нем (рис. 3.3):

$$R_{ст} = \frac{U_A}{I_A} = \frac{m_U}{m_I} \frac{AB}{OB} = m_R \operatorname{tg} \alpha,$$

где  $m_U$ ,  $m_I$ ,  $m_R$  – масштабы напряжения, тока и сопротивления.

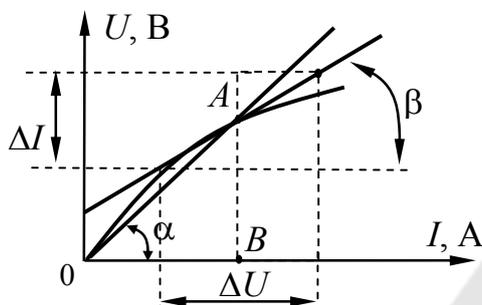


Рис. 3.3. Определение статического и дифференциального сопротивления нелинейного элемента

Дифференциальным сопротивлением  $R_{диф}$  нелинейного элемента в заданной точке его характеристики называют отношение бесконечно малого приращения напряжения  $dU$  к соответствующему приращению тока  $dI$  (рис. 3.3):

$$R_{диф} = \frac{dU}{dI} \approx \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A} = m_R \operatorname{tg} \beta.$$

Очевидно, что  $R_{ст}$  и  $R_{диф}$  нелинейного элемента зависят от тока и напряжения.

Метод графического расчета нелинейных цепей постоянного тока получил название метода эквивалентных преобразований. Применительно к последовательному соединению линейного и нелинейного элементов этот метод проиллюстрирован на рис. 3.4.

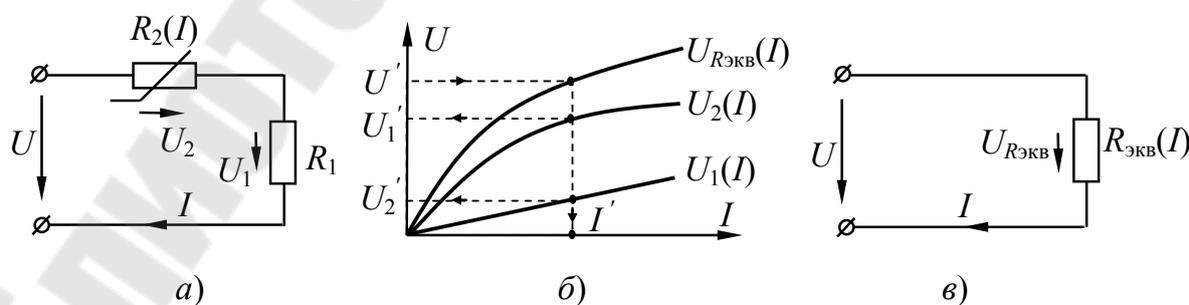


Рис. 3.4. Последовательное соединение линейного и нелинейного элементов:

*a* – схема соединения; *б* – ВАХ; *в* – эквивалентная схема

Применительно к параллельному соединению линейного и нелинейного элементов метод эквивалентных преобразований проиллюстрирован на рис. 3.5.

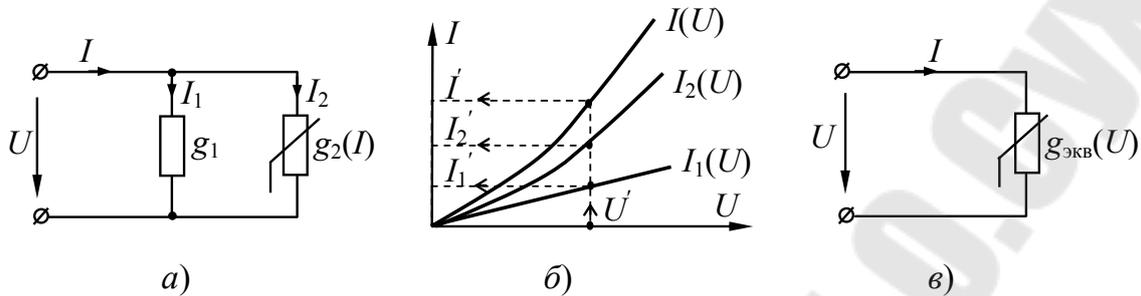


Рис. 3.5. Параллельное соединение линейного и нелинейного элементов: а – схема соединения; б – ВАХ; в – эквивалентная схема

### 3.2. Лабораторное задание

3.2.1. Соберите электрическую цепь по схеме рис. 3.6.

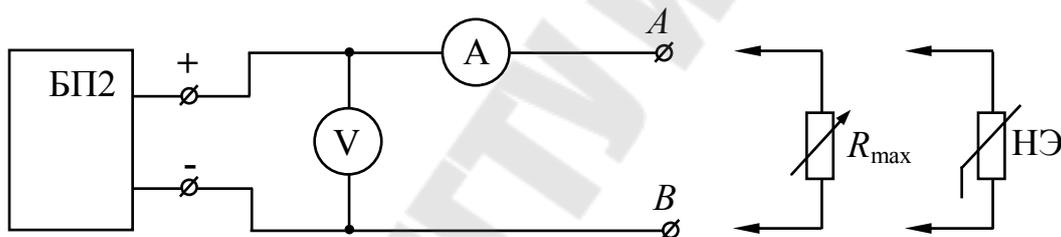


Рис. 3.6. Схема электрической цепи для снятия ВАХ элементов

3.2.2. Снимите ВАХ резистора и лампы накаливания, подключая их поочередно к зажимам А и В, устанавливая с помощью ЛАТРа блока питания напряжения, указанные в табл. 3.1. Измеренные значения токов записать в эту таблицу.

Таблица 3.1

Измерено	Тип элемента	U, В	0	1,5	3,0	4,5	6,0	7,5	9,0	10,5	12	13,5
		Реостат	I, мА									
	Лампа	I, мА										

3.2.3. Для проверки результатов графического метода расчета электрической цепи при последовательном соединении лампы и резистора соберите электрическую цепь по схеме рис. 3.7 и, изменяя на-

пряжение в соответствии с данными табл. 3.1 для последовательного соединения, измерьте и занесите в табл. 3.2 значения  $U$  и  $I$ .

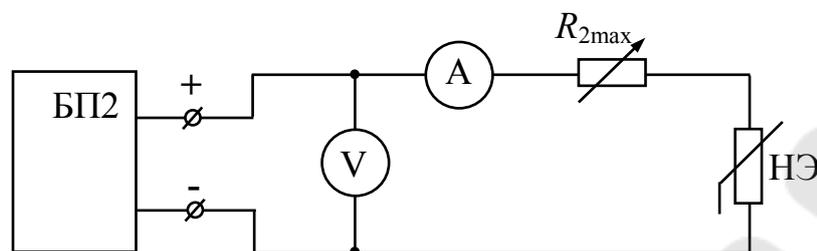


Рис. 3.7. Схема для снятия ВАХ последовательного соединения линейных и нелинейных элементов

Таблица 3.2

Последовательное соединение	$U$ , В	0	3,0	6,0	9,0	12	15	18
	$I$ , мА							
Параллельное соединение	$U$ , В	0	2,5	5,0	7,5	10	12,5	15
	$I$ , мА							

3.2.4. Для проверки результатов графического метода расчета электрической цепи при параллельном соединении лампы и резистора соберите электрическую цепь по схеме рис. 3.8. Изменяя напряжение в соответствии с данными табл. 3.1 для параллельного соединения, измерьте и занесите в табл. 3.2 значения  $U$  и  $I$ .

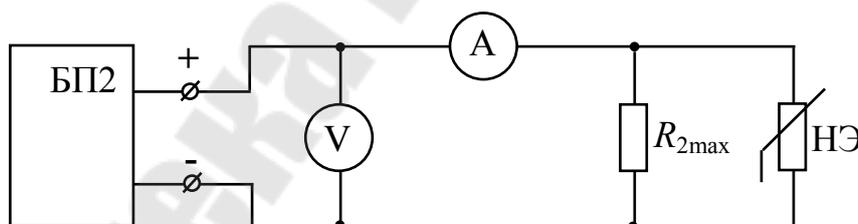


Рис. 3.8. Схема для снятия ВАХ параллельного соединения реостата и лампы накаливания

3.2.5. Экспериментально полученные данные по п. 3.2.3, 3.2.4 (т. е. данные табл. 3.2) отобразите графически на соответствующих рисунках, построенных по данным расчетов (по данным табл. 3.2). Оцените точность графического метода расчета путем сравнения.

### 3.3. Контрольные вопросы

3.3.1. Какие элементы электрической цепи называют нелинейными?

3.3.2. Что называют вольт-амперной (ампер-вольтной) характеристикой элемента электрической цепи?

3.3.3. Почему лампа накаливания является нелинейным элементом?

3.3.4. Чем отличается статическое сопротивление нелинейного элемента от дифференциального?

3.3.5. Как построить ВАХ нелинейной электрической цепи из последовательно соединенных элементов, зная ВАХ элементов?

3.3.6. Как построить АВХ нелинейной электрической цепи из параллельно соединенных элементов, зная АВХ элементов?

### 3.4. Требования к оформлению отчета

Отчет должен содержать

- титульный лист;
- тему и цель работы;
- схемы опытов и заполненные табл. 3.1, 3.2 результатов измерений и расчетов;
- вольт-амперные характеристики лампы накаливания и реостата на одном рисунке;
- зависимость  $R_{ст}(I)$  резистора и ламп на одном рисунке;
- расчетную и экспериментальную ВАХ электрической цепи с последовательным соединением реостата и лампы на одном рисунке;
- расчетную и экспериментальную АВХ электрической цепи с параллельно соединенными резистором и лампой на одном рисунке;
- анализ результатов и выводы.

## Лабораторная работа № 4

### Исследование линейной однофазной электрической цепи с последовательным соединением элементов

*Цель работы:*

- исследовать электрическое состояние линейной цепи синусоидального тока при последовательном соединении различных приемников;

- научиться вычислять параметры электрической цепи и строить векторные диаграммы, треугольники напряжений, сопротивлений и мощностей по опытным данным;
- исследовать явление резонанса напряжений и определить параметры последовательной  $RLC$ -цепи.

#### 4.1. Краткие теоретические сведения

Рассмотрим схему рис. 4.1, *a* с последовательным соединением катушки индуктивности с параметрами  $R_k$ ,  $L$  и конденсатора с электрической емкостью  $C$ .

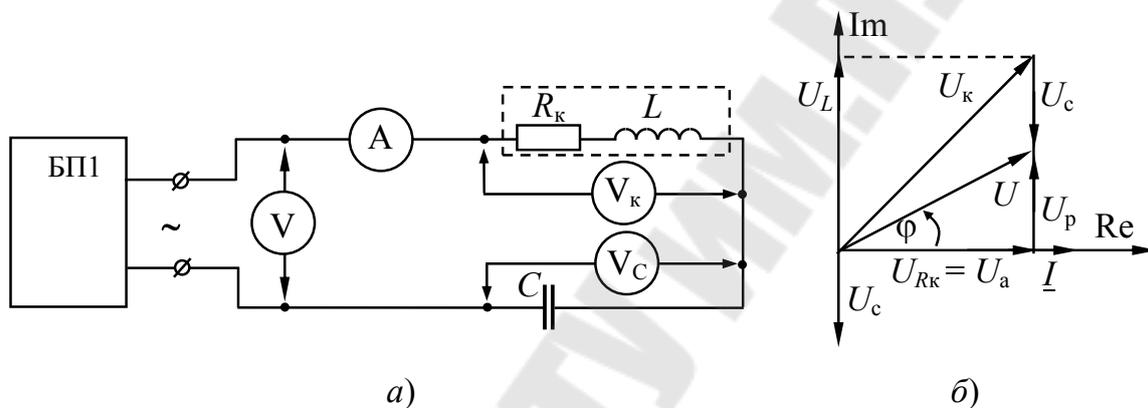


Рис. 4.1. Схема электрической цепи из последовательно соединенных катушки индуктивности и конденсатора (*a*) и векторная диаграмма для случая, когда  $X_L > X_C$  (*б*)

Величина тока в этой цепи равна

$$I = \frac{U}{Z},$$

где  $Z = \sqrt{R_k^2 + (X_L - X_C)^2}$  – входное сопротивление цепи рис. 4.1, *a* (полное сопротивление цепи);  $X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}$  – реактивное сопротивление цепи.

Уравнение для мгновенных значений напряжений согласно второму закону Кирхгофа имеет вид

$$u = u_{R_k} + u_L + u_C. \quad (4.1)$$

Уравнение (4.1) в символической форме записи имеет вид

$$\underline{U} = \underline{I} R_k + \underline{I} (jX_L) + \underline{I} (-jX_C) \quad (4.2)$$

или

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{R_k + j(X_L - X_C)} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}}, \quad (4.3)$$

где  $\underline{Z} = R_k + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$  – комплекс входного сопротивления цепи (рис. 4.1, а).

Поскольку из (4.3) следует, что

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \frac{Ue^{j\psi_u}}{Ie^{j\psi_i}} = \frac{U}{I}e^{j(\psi_u - \psi_i)} = \frac{U}{I}e^{j\varphi},$$

то очевидно, что  $\varphi = \psi_u - \psi_i = \arg \underline{Z} = \arctg\left(\frac{X_L - X_C}{R_k}\right)$ , и, следовательно, угол  $\varphi$  может быть положительным ( $X_L - X_C > 0$ ), отрицательным ( $X_L - X_C < 0$ ) или равным нулю ( $X_L - X_C = 0$ ).

Векторно-топографическая диаграмма напряжений для случая  $X_L - X_C > 0$  приведена на рис. 4.1, б.

Под резонансом напряжений понимают такой режим работы цепи из последовательно соединенных  $R$ -,  $L$ -,  $C$ -элементов, при котором разность фаз  $\varphi$  между напряжением  $\underline{U}$  на входе цепи и током  $\underline{I}$  в этой цепи равна нулю.

Величины напряжений на реактивных элементах цепи рис. 4.1, а при резонансе в  $q$  раз больше, чем величина напряжения  $U$ , приложенная к входным клеммам цепи рис. 4.1, а.

Действительно,

$$U_L = I\omega_0 L = \frac{U}{Z}\omega_0 L = U \frac{\omega_0 L}{R_k} = U q, \quad (4.4)$$

где  $q = \frac{U_L(\omega = \omega_0)}{U} = \frac{X_L(\omega = \omega_0)}{R_k} = \frac{\rho}{R_k}$  – добротность цепи или коэф-

фициент резонанса;  $\rho = \omega_0 L = \sqrt{\frac{L}{C}}$  – характеристическое сопротивление цепи.

## 4.2. Лабораторное задание

4.2.1. Соберите электрическую цепь по схеме рис. 4.1, а. Установите на входе цепи напряжение 10 В и, изменяя степенями величину

емкости  $C$ , установите в цепи режим резонанса напряжений по максимуму тока в цепи. По указанию преподавателя заполните колонку  $C_{уст}$  табл. 4.1 значениями емкостей. Устанавливая далее величины емкостей, измерьте и запишите в табл. 4.1 значения величин  $U$ ,  $U_k$ ,  $U_C$ ,  $I$ ,  $R_k$  (для каждого значения емкости  $C$  заполняется строка данных).

Таблица 4.1

Данные измерений						Результаты вычислений								
						для всей цепи			для индуктивной катушки				для конденсатора	
$C_{уст}$ мкФ	$U$	$U_k$	$U_C$	$I$	$P$	$Z$	$X$	$\cos\varphi$	$R_k$	$Z_k$	$X_k$	$L$	$X_C$	$C_{выч}$
	В	В	В	А	Вт	Ом	Ом	–	Ом	Ом	Ом	Гн	Ом	мкФ

### 4.3. Контрольные вопросы

4.3.1. Перечислите величины, применяемые при описании электрического состояния линейных цепей синусоидального тока. Укажите соотношения между ними.

4.3.2. Как рассчитать действующее значение тока в цепи с последовательно соединенными  $R$ -,  $L$ -,  $C$ -элементами?

4.3.3. От каких величин зависит значение угла сдвига фаз между напряжением и током?

4.3.4. Дайте определение режима резонанса напряжений. Каковы признаки наличия в цепи этого режима?

4.3.5. Дайте физическое толкование активной, реактивной и полной мощности.

4.3.6. Как рассчитать активную, реактивную и полную мощности источника ЭДС и цепи? Чему равны эти величины при резонансе напряжений?

4.3.7. Почему напряжения на индуктивной катушке и конденсаторе при резонансе больше, чем напряжение на входе цепи?

### 4.4. Требования к содержанию отчета

Отчет должен содержать:

- титульный лист;
- тему и цель работы;
- схему рис. 4.1, а, табл. 4.1, выражения для расчета величин  $Z$ ,  $P$ ,  $R_k$ ,  $X$ ,  $\cos$ ,  $Z_k$ ,  $X_k$ ,  $L$ ,  $X_C$  и  $C$  и результаты вычислений этих величин (для каждого значения емкости  $C$ ), помещенные в табл. 4.1 и век-

торные диаграммы рис. 4.1, б для  $C_{\min}$ ,  $C_{\text{рез}}$  и  $C_{\max}$ , построенные в масштабе по данным табл. 4.1;

– графики зависимости величин  $I$ ,  $U_{\text{к}}$ ,  $U_{\text{с}}$ ,  $P$  и  $\cos \varphi$  в функции от емкости  $C$  по образцу рис. 4.2;

– анализ результатов и выводы.

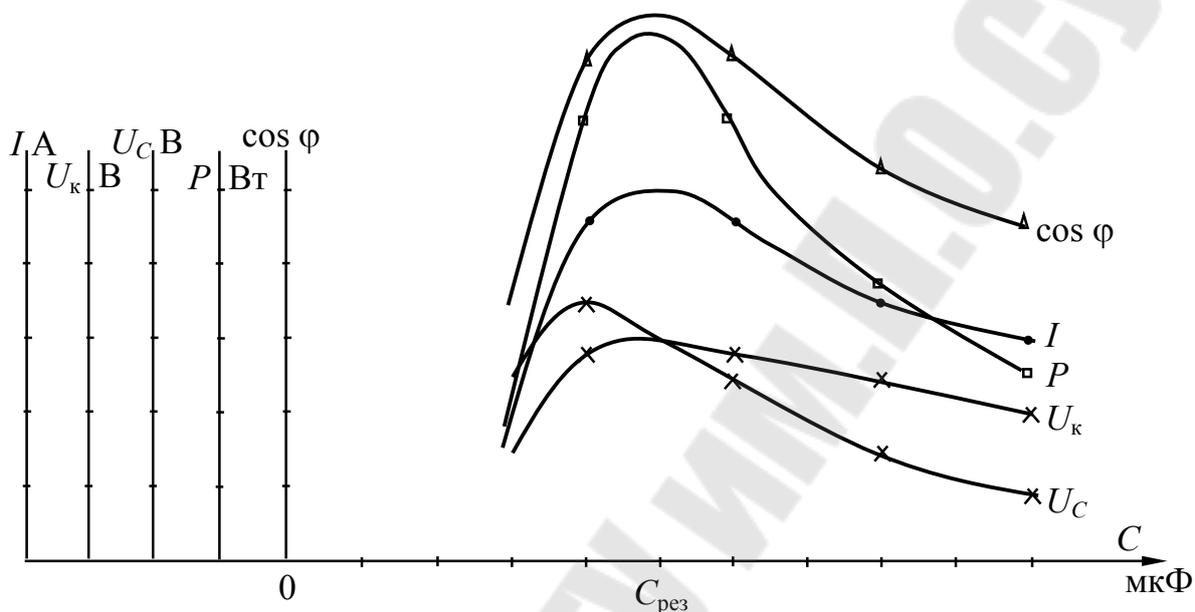


Рис. 4.2. Зависимость величин  $I$ ,  $U_{\text{к}}$ ,  $U_{\text{с}}$ ,  $P$ ,  $\cos \varphi$  от величины емкости  $C$  батареи конденсаторов

### Лабораторная работа № 5

#### Исследование линейной однофазной электрической цепи с параллельным соединением элементов

*Цель работы:*

- исследовать электрическое состояние линейной цепи синусоидального тока с параллельным соединением различных приемников;
- научиться вычислять параметры электрической цепи и строить векторные диаграммы, треугольники токов, проводимостей и мощностей по опытным данным;
- исследовать явление резонанса токов и определить параметры колебательного контура.

## 5.1. Краткие теоретические сведения

На рис. 5.1 приведена схема электрической цепи из параллельно включенных индуктивной катушки и конденсатора.

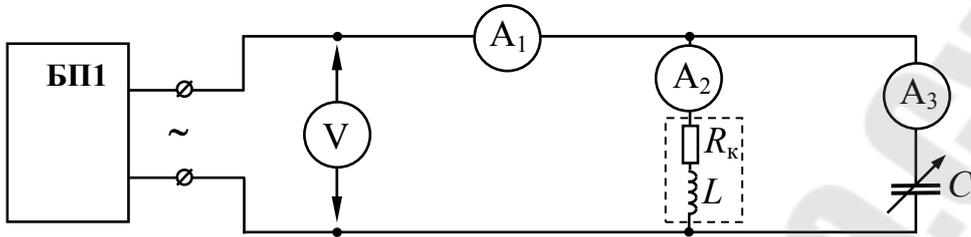


Рис. 5.1. Схема электрической цепи с параллельным соединением индуктивной катушки и конденсатора

Первый закон Кирхгофа в символической форме имеет вид

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 + \underline{I}_3$$

или 
$$\underline{U} \underline{y} = \underline{U} (\underline{y}_2 + \underline{y}_3); \quad \underline{y} = \underline{y}_2 + \underline{y}_3. \quad (5.1)$$

Следовательно, комплекс  $\underline{y}$  входной проводимости цепи равен сумме комплексных проводимостей параллельных ветвей.

При этом по закону Ома в символической форме:

$$\underline{y} = \frac{\underline{I}_1}{\underline{U}}; \quad \underline{y}_2 = \frac{\underline{I}_2}{\underline{U}}; \quad \underline{y}_3 = \frac{\underline{I}_3}{\underline{U}}. \quad (5.2)$$

При построении векторных диаграмм рис. 5.2 начальную фазу комплекса напряжения  $\underline{U}$  на входе цепи принимаем равной нулю ( $\psi_U = 0$ ). На рис. 5.2, а построена диаграмма для случая, когда разность фаз  $\varphi$  между напряжением  $\underline{U}$  на входе и током  $\underline{I}_1$  в неразветвленной части цепи больше нуля ( $\varphi > 0$ ). Этот случай имеет место, когда  $b_L > b_C$ .

Так как сопротивление второй ветви активно-индуктивное, то ток  $\underline{I}_2$  отстает по фазе от  $\underline{U}$  на угол  $\psi_2 = \arctg\left(\frac{X_L}{R_k}\right)$ . Ток третьей ветви  $\underline{I}_3$  опережает по фазе напряжение  $\underline{U}$  на угол  $\psi_3 = 90^\circ$ . При этом вектор тока  $\underline{I}_1$  равен векторной сумме векторов  $\underline{I}_2$  и  $\underline{I}_3$ , согласно первому закону Кирхгофа.



Так как при резонансе токов  $\varphi = 0$  ( $\cos\varphi = 1$ ), то активная мощность равна полной мощности цепи, т. е.

$$P = UI_1 \cos\varphi = UI_1 = S. \quad (5.7)$$

Реактивная мощность  $Q$  при резонансе токов равна нулю:

$$Q = Q_L - Q_C = UI_1 \sin\varphi = 0. \quad (5.8)$$

Если в схеме рис. 5.1 изменять величину емкости  $C$ , то величины  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $P$  и  $\cos\varphi$  будут изменяться по рис. 5.3.

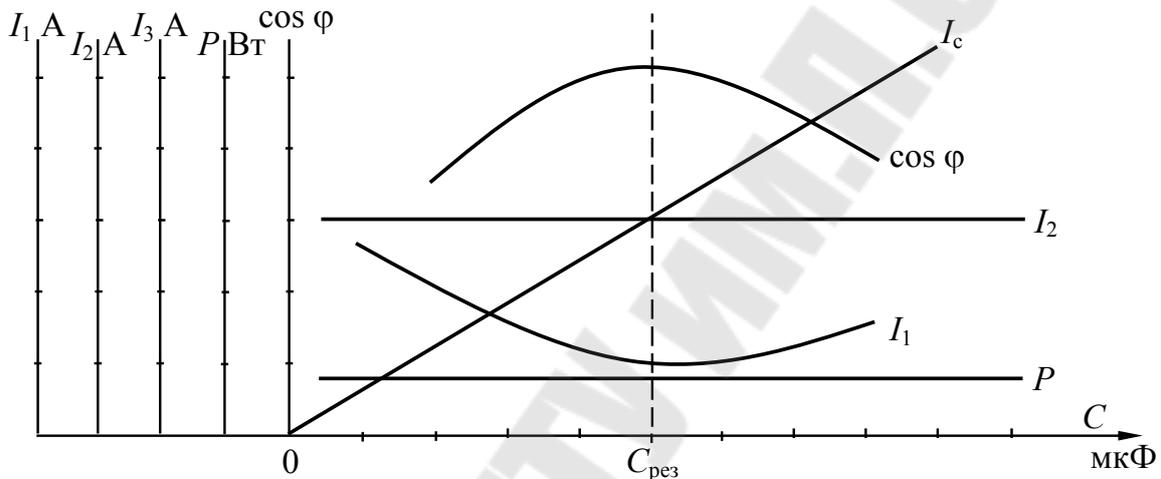


Рис. 5.3. Зависимость величин  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $P$ ,  $\cos\varphi$  от величины емкости батареи конденсаторов

## 5.2. Лабораторное задание

5.2.1. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 5.1. Установить заданное преподавателем напряжение на входе цепи ( $U = U_{\max}$ ) и, изменяя ступенями величину емкости, установить в цепи режим резонанса токов (по минимальному показанию амперметра). Записать резонансное значение емкости  $C_{\text{рез}}$  в третью строку колонки  $C$  табл. 5.1. С помощью преподавателя выбрать два значения емкости меньших  $C_{\text{рез}}$  и два значения емкости больших  $C_{\text{рез}}$ , заполнив колонку  $C$  табл. 5.1. Устанавливая поочередно значения емкости батареи конденсаторов от  $C_{\min}$  до  $C_{\max}$ , записать в табл. 5.1 показания приборов.

Таблица 5.1

Данные измерений							Результаты вычислений						
							для всей цепи				катушка		конденсатор
$C$ , мкФ	$U$ , В	$P$ , Вт	$I_1$ , А	$I_2$ , А	$I_3$ , А	$\varphi$ , град	$y$ , Ом <sup>-1</sup>	$g$ , Ом <sup>-1</sup>	$b$ , Ом <sup>-1</sup>	$\cos\varphi$	$\varphi_k$ , град	$b_k$ , Ом <sup>-1</sup>	$b_C$ , Ом <sup>-1</sup>

### 5.3. Контрольные вопросы

5.3.1. Чему равна эквивалентная реактивная проводимость параллельных ветвей, от каких параметров она зависит?

5.3.2. Как рассчитать действующее значение тока сети при параллельном соединении приемников?

5.3.3. Чему равен коэффициент мощности электрической цепи параллельно соединенных ветвей?

5.3.4. Могут ли токи в параллельных ветвях электрической цепи превышать ток сети?

5.3.5. Каковы условия возникновения резонанса токов? Каким способом он может быть получен?

5.3.6. Какие признаки характерны для цепи в режиме резонанса токов?

5.3.7. Каково соотношение токов  $I_2$  и  $I_3$  в схеме рис. 5.6 при резонансе токов?

5.3.8. Какое практическое значение имеет явление резонанса токов, где оно применяется?

5.3.9. Чему равна мощность электрической цепи при резонансе токов?

### 5.4. Требования к содержанию отчета

Отчет должен содержать:

- титульный лист;
- тему и цель работы;
- схему рис. 5.1, выражения для расчета величин  $y$ ,  $g$ ,  $b$ ,  $\cos$ ,  $b_k$ ,  $\varphi_k$ ,  $b_C$  по измеренным значениям  $U$ ,  $R_k$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ , результаты вычисления этих величин (табл. 5.1) и три векторные диаграммы по образцу рис. 5.2, построенные в масштабе по данным таблицы и для  $C_{\min}$ ,  $C_{\text{рез}}$  и  $C_{\max}$ ;

- выражения для расчета величин  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $R_k$ ,  $\cos$ , как функции  $C$  для схемы рис. 5.1 и графики зависимости этих величин от емкости  $C$  конденсатора по образцу рис. 5.3, построенные в масштабах по данным табл. 5.1;

- анализ результатов и выводы.

## Лабораторная работа № 6

### Исследование трехфазной электрической цепи при соединении приемников треугольником

*Цель работы:*

- исследовать трехфазную цепь при симметричной и несимметричной нагрузке фаз;
- установить экспериментально соотношение между линейными и фазовыми токами и построить по результатам измерений векторные диаграммы напряжений и токов.

#### 6.1. Краткие теоретические сведения

**6.1.1. Основные понятия и величины.** Под трехфазной симметричной системой ЭДС (токов, напряжений) понимается совокупность трех ЭДС (токов, напряжений) одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутых по фазе на  $120^\circ$ .

Совокупность трехфазной системы ЭДС, трехфазной нагрузки и трехфазной линии передачи называется *трехфазной электрической цепью*.

На рис. 6.1 изображена трехфазная электрическая цепь при соединении генератора звездой «Y», а нагрузки – треугольником «Δ». Такая схема соединения называется *трехпроводной*.

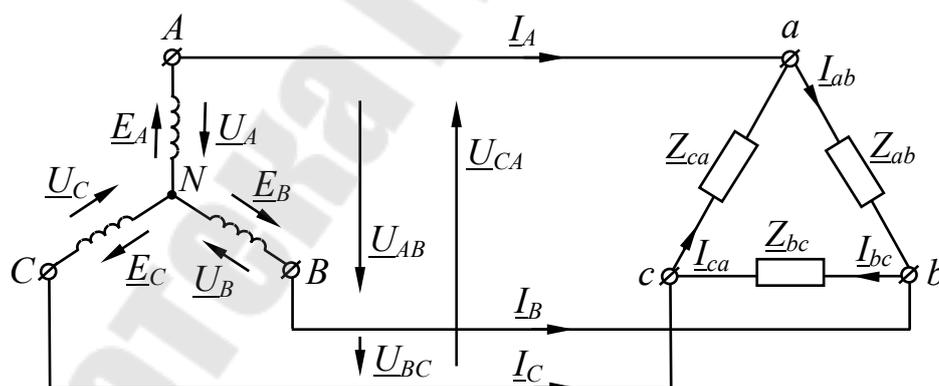


Рис. 6.1. Схема трехфазной цепи при соединении «звезда–треугольник» – «Y–Δ»

Если комплексные сопротивления фаз трехфазного приемника равны между собой ( $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} = Z e^j$ ), то такой приемник называется симметричным; если это условие не выполняется, то – несим-

метричным. При этом, если  $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca}$ , то трехфазный приемник называется равномерным, а если  $\varphi_{ab} = \varphi_{bc} = \varphi_{ca} = \varphi$  – то однородным.

На нагрузке, фазы которой образуют треугольник, линейные и фазовые напряжения совпадают ( $U_{л} = U_{\phi}$ ), а линейные и фазовые токи связаны соотношениями

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}, \quad \underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}, \quad \underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}, \quad (6.1)$$

вытекающими из уравнений первого закона Кирхгофа, записанных для узлов  $a, b, c$ .

Для симметричного приемника действующие значения линейных и фазовых токов связаны соотношением

$$I_{л} = \sqrt{3}I_{\phi}; \quad I_{\phi} = \frac{I_{л}}{\sqrt{3}}. \quad (6.2)$$

После определения фазовых токов находятся комплексы действующих значений линейных токов по соотношениям (6.1).

**6.1.2. Векторные диаграммы.** На рис. 6.2 приведены примеры построения векторно-топографических диаграмм напряжений, совмещенных с диаграммой токов для трех режимов. Диаграмма рис. 6.2, *а* отвечает случаю, когда приемник симметричный.

Диаграмма рис. 6.2, *б* – для приемника с конденсатором в фазе  $ab$  и резисторами с одинаковыми электрическими сопротивлениями  $R$  в фазах  $bc$  и  $ca$ .

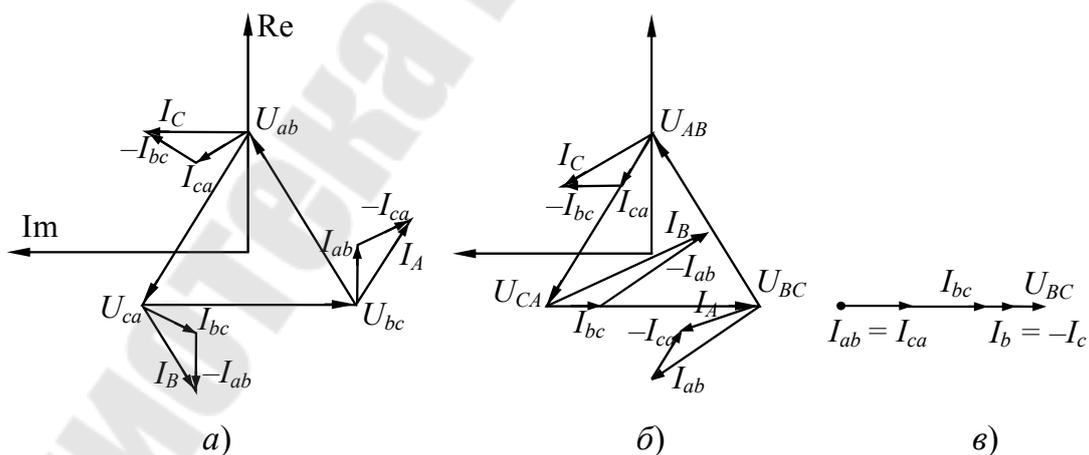


Рис. 6.2. Векторные диаграммы для схемы 6.1

Диаграмма рис. 6.2, *в* иллюстрирует режим в схеме рис. 6.1, при обрыве линейного провода  $Aa$  и симметричном активном приемнике  $Z_{ab} = R, Z_{bc} = R, Z_{ca} = R$ .

## 6.2. Лабораторное задание

6.2.1. Собрать электрическую цепь согласно схеме рис. 6.3. В фазах трехфазного приемника включить последовательно с резисторами ключи SA7, SA8, SA9. В линейных проводах вместо амперметров использовать ключи SA1, SA2, SA3.

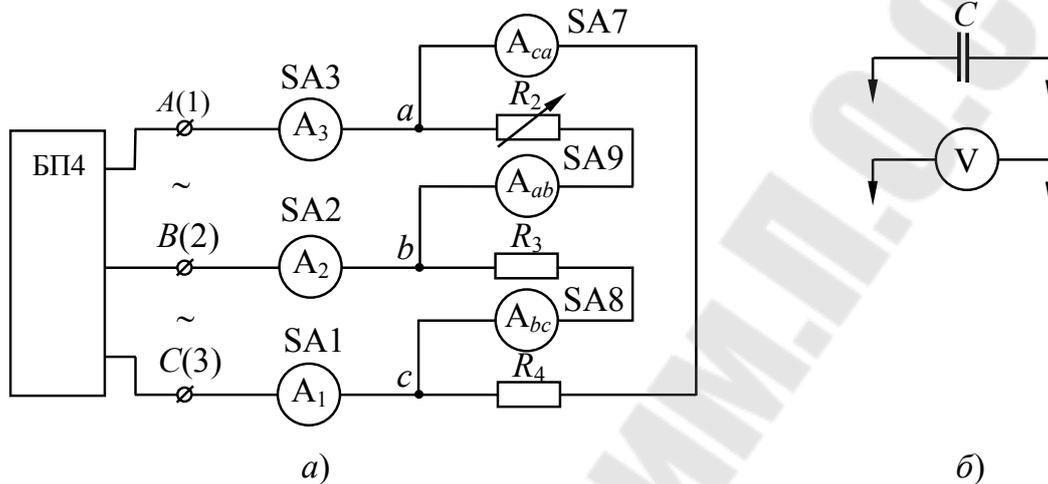


Рис. 6.3. Схема электрической цепи для экспериментальных исследований

6.2.2. Установить ключи SA1, SA2, SA3, SA7, SA8, SA9 в замкнутое положение и, включив питание блока трехфазного напряжения (БП4), выровнять резистором  $R_2$  токи в фазах. Измерить и записать в табл. 6.1 значения фазовых и линейных токов.

6.2.3. Отсоединить один из проводов от резистора  $R_3$  фазы  $bc$ , и в режиме холостого хода этой фазы измерить и записать в табл. 6.1 токи. Восстановить схему.

6.2.4. Разомкнуть линейный провод  $Aa$ , измерить и записать в табл. 6.1 токи в режиме обрыва линейного провода. Восстановить схему.

6.2.5. Установить  $R_2$  в положение, отвечающее максимуму электрического сопротивления (минимуму тока  $I_{ab}$ ), измерить и записать в табл. 6.1 значения фазных и линейных токов.

6.2.6. Включив в фазу  $ab$  вместо  $R_2$  конденсатор емкостью 20 мкФ, включить питание блока БП4 и повторить измерения фазовых и линейных токов. Результаты измерений занести в табл. 6.1. Выключить питание. Вернуться к предыдущей схеме.

6.2.7. Измерить с помощью вольтметра значения линейных напряжений на клеммах трехфазного блока питания БП4.

Таблица 6.1

Нагрузка	Измерено						Вычислено			Линейные напряжения
	$I_{ab}$	$I_{bc}$	$I_{ca}$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$\frac{I_A}{I_{ab}}$	$\frac{I_B}{I_{bc}}$	$\frac{I_C}{I_{ca}}$	В
	А	А	А	А	А	А				
Симметричная										$U_{ab} =$
Холостой ход фазы $bc$										
Обрыв линейного провода $Aa$										$U_{bc} =$
Несимметричная										
В фазу $ab$ включен конденсатор										$U_{ca} =$

### 6.3. Контрольные вопросы

6.3.1. Дайте определение симметричной трехфазной системы ЭДС (токов, напряжений).

6.3.2. Из каких элементов состоит трехфазная цепь?

6.3.3. Почему обмотки статора трехфазного генератора соединяют звездой?

6.3.4. Укажите соотношения между линейными и фазовыми токами при соединении фаз приемника треугольником.

6.3.5. Какие напряжения действуют между точками  $ab$ ,  $bc$  и  $ca$  трехфазного приемника, соединенного треугольником?

6.3.6. Как изменится режим в трехфазной цепи «звезда–треугольник» при обрыве одной из фаз приемника?

6.3.7. Как три однофазных приемника соединить треугольником?

### 6.4. Требования к содержанию отчета

Отчет должен содержать:

- титульный лист;
- тему и цель работы;
- схему рис. 6.3 и результаты измерения токов и мощностей для различных нагрузок в виде заполненной табл. 6.1 (колонки «Измерено»);
- результаты расчета отношения токов и мощностей для различных нагрузок (колонки «Вычислено», «Расчет мощности»);
- векторно-топографические диаграммы напряжений и токов для всех режимов, построенные в масштабе по данным табл. 6.1 (по образцу рис. 6.2);
- анализ результатов и выводы.

## Лабораторная работа № 7

### Исследование трехфазной электрической цепи при соединении приемников звездой

*Цель работы:*

- научиться определять нейтральный и линейные провода трехфазной четырехпроводной сети;
- исследовать влияние изменения параметров одного из трех однофазных приемников, а также влияние обрыва нейтрального и линейного проводов на работу трехфазной цепи (на соотношение линейных и фазовых напряжений, на ток в нейтральном проводе);
- научиться строить по опытным данным векторно-топографические диаграммы напряжений, совмещенные с векторными диаграммами токов.

#### 7.1. Краткие теоретические сведения

**7.1.1. Основные понятия и величины.** На рис. 7.1 приведена схема трехфазной цепи при соединении обмоток генератора и фаз приемника звездой. При этом потенциал точки  $N$  соединения концов  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  обмоток фаз генератора принимается равным нулю. Концы  $x$ ,  $y$ ,  $z$  фаз приемника также соединены в одну точку  $n$ . Точки  $N$  и  $n$  называют нейтральными, а провод, их соединяющий, нейтральным. Провода  $Aa$ ,  $Bb$  и  $Cc$ , соединяющие начала фаз генератора (трансформатора) и приемника, называют линейными.

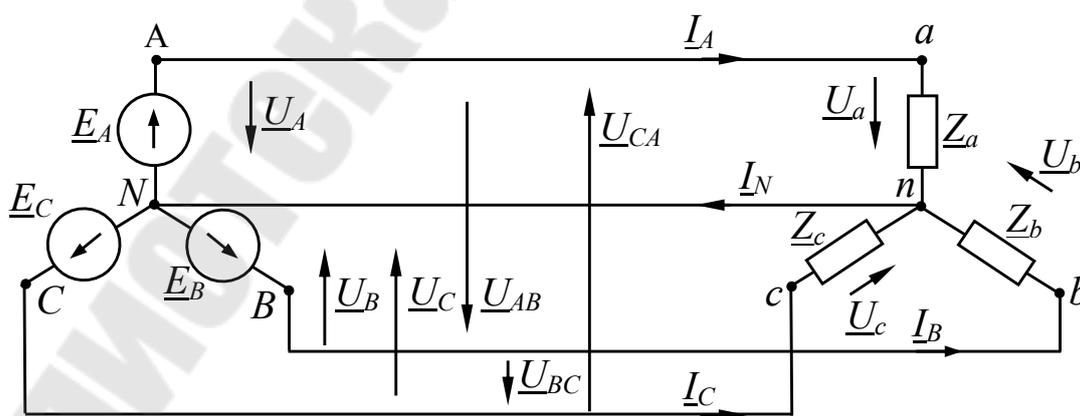


Рис. 7.1. Схема трехфазной четырехпроводной цепи

Положительное направление токов в фазах генератора совпадает с положительным направлением ЭДС, а положительные направления напряжений на фазах приемников совпадают с направлениями токов в фазах приемников. Положительные направления напряжений на фазах генератора противоположны направлениям соответствующих ЭДС (рис. 7.1). Так как обмотка генератора, линейный провод и приемник, принадлежащий одной фазе, соединены последовательно, то при соединении звездой, линейный ток  $\underline{I}_л$  равен фазному току  $\underline{I}_ф$ :

$$\underline{I}_л = \underline{I}_ф. \quad (7.1)$$

При этом для симметричного трехфазного генератора соотношение между действующими значениями фазных и линейных напряжений имеет вид

$$U_л = \sqrt{3} U_ф, \quad U_ф = \frac{U_л}{\sqrt{3}}. \quad (7.2)$$

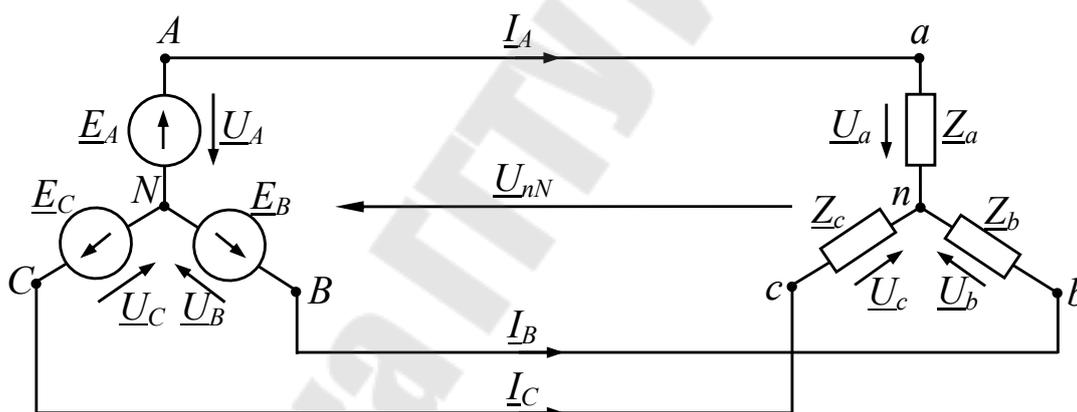


Рис. 7.2. Схема трехфазной трехпроводной цепи при соединении фаз источника и приемника звездой

Таким образом, в схеме рис. 7.1 нейтральный провод выравнивает фазные напряжения приемника и, следовательно,  $\underline{U}_{nN}$  в этом случае равно нулю, даже для несимметричного приемника.

**7.1.2. Векторные диаграммы.** На рис. 7.3 приведены примеры построения векторно-топографических диаграмм напряжений и токов для трех режимов. Диаграмма рис. 7.3, а отвечает случаю симметричного приемника.

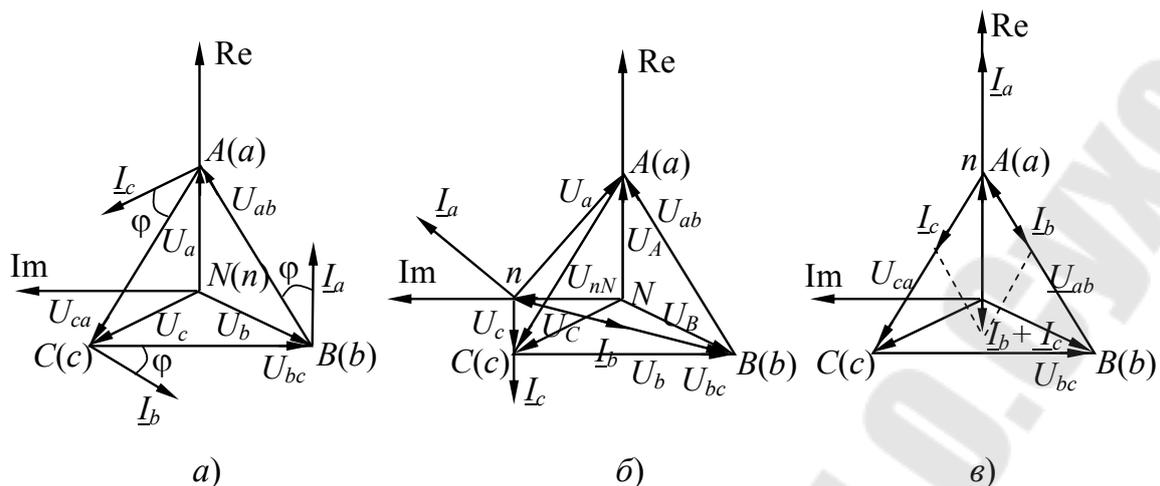


Рис. 7.3. Векторные диаграммы для схемы «звезда–звезда»

Диаграмма рис. 7.3, б – для трехпроводной цепи с конденсатором в фазе *a*. Диаграмма рис. 7.3, в – для режима короткого замыкания фазы *a*. (При этом в фазах *b* и *c* включены резисторы с одинаковыми сопротивлениями.)

## 7.2. Лабораторное задание

7.2.1. Измерить и записать в табл. 7.1 значения линейных напряжений на клеммах блока  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$  и  $U_{CA}$ .

7.2.2. Собрать электрическую цепь согласно схеме рис. 7.4. В фазу *a* включить резистор  $R_2$ . Последовательно в линейных и нулевом проводах включить ключи SA1, SA2, SA3, SA7 (для подключения амперметра и коммутации нулевого провода).

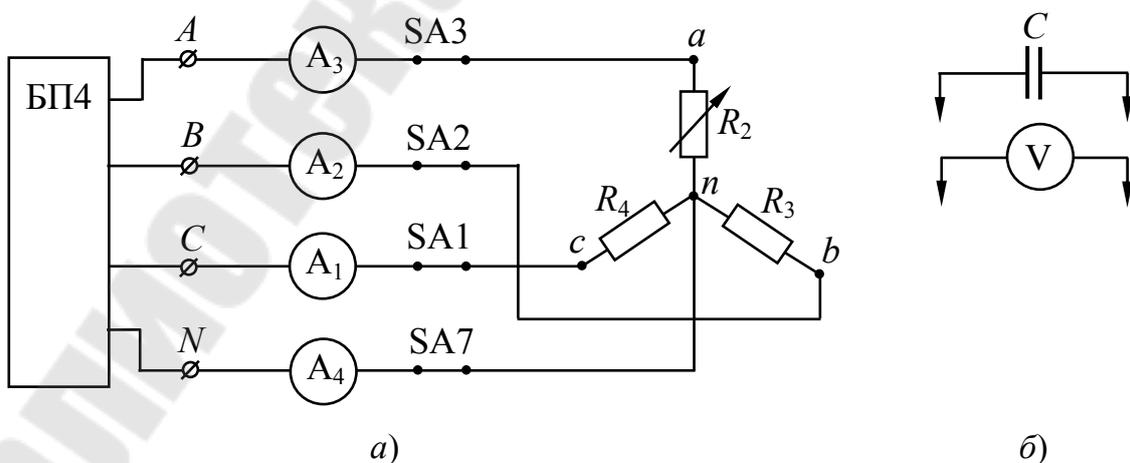


Рис. 7.4. Схема электрической цепи для экспериментальных исследований

7.2.3. Установить ключи в линейных и нулевом проводах в замкнутое положение и, включив питание блока БП4, выровнять резистором  $R_2$  токи в фазах (по минимальному току в нулевом проводе). Измерить и записать в табл. 7.1 значения токов и фазных напряжений.

7.2.4. Поочередно меняя режимы нагрузки фаз согласно табл. 7.1, записать показания приборов в соответствующие строки табл. 7.1.

Несимметричный режим устанавливается изменением сопротивления резистора  $R_2$ . Режим короткого замыкания устанавливается следующим образом:

- выключить блок питания БП4;
- выключить ключ в нулевом (нейтральном) проводе;
- нагрузку фазы  $a$  закоротить, соединив точки  $a$  и  $n$  проводником;
- включить блок питания БП4 и выполнить измерения.

Таблица 7.1

Нагрузка	Нейтральный провод	Измерено						Вычислено			Линейные напряжения, В	
		$I_a$	$I_b$	$I_c$	$I_N$	$U_a$	$U_b$	$U_c$	$\frac{U_{ab}}{U_a}$	$\frac{U_{bc}}{U_b}$		$\frac{U_{ca}}{U_c}$
		А	А	А	А	В	В	В	$\frac{U_{ab}}{U_a}$	$\frac{U_{bc}}{U_b}$		$\frac{U_{ca}}{U_c}$
1* Симметричная	вкл.											$U_{AB} =$
2. ( $R_a = R_b = R_c$ )	откл.											
3* Несимметричная	вкл.										$U_{BC} =$	
4* ( $R_a > R_b = R_c$ )	откл.											
5. В фазу $a$ включен конденсатор	вкл.										$U_{CA} =$	
6. ( $R_b = R_c$ )	откл.											
7. Холостой ход фазы $a$	вкл.										$U_{CA} =$	
8. ( $R_a = \infty; R_b = R_c$ )	откл.											
9. Короткое замыкание фазы $a$ ( $R_a = 0; R_b = R_c$ )	откл.											

### 7.3. Контрольные вопросы

7.3.1. Каковы соотношения между линейными и фазными напряжениями и токами при соединении «звезда–звезда» (нагрузка симметричная и несимметричная)?

7.3.2. Как в четырехпроводной линии опытным путем определить линейные и нейтральные провода?

7.3.3. Какое назначение имеет нейтральный провод? Почему в нейтральный провод не ставят предохранитель?

7.3.4. Чему равен ток в нейтральном проводе при симметричной и несимметричной нагрузке?

7.3.5. Что происходит в трехфазной трехпроводной цепи (соединение «звезда–звезда») при обрыве одной из фаз?

7.3.6. Почему опасно короткое замыкание одной из фаз приемника в четырехпроводной цепи?

7.3.7. Что происходит в трехфазной трехпроводной цепи (соединение «звезда–звезда») при коротком замыкании одной из фаз?

7.3.8. Как аналитически и графически определить напряжение между нейтралями?

7.3.9. Какими способами можно измерить мощность в четырехпроводной и трехпроводной цепях?

7.3.10. Как три однофазных приемника соединить звездой?

#### **7.4. Требования к содержанию отчета**

Отчет должен содержать:

- титульный лист;
- тему и цель работы;
- схему рис. 7.4 и результаты измерений токов, напряжений для различных нагрузок в виде заполненных колонок «измерено» в табл. 7.1;
- результаты расчета отношения величин линейных и фазовых напряжений для различных нагрузок и мощности (колонки «вычислено» в табл. 7.1);
- векторно-топографические диаграммы напряжений и токов для всех режимов, указанных в табл. 7.1, построенные в масштабах ( $m_U$  В/мм;  $m_I$  А/мм) по результатам измерений методом «засечек». Из построенных диаграмм определить напряжения между нейтралями. Значение  $U_{nN}$  указать рядом с диаграммами;
- анализ результатов и выводы.

### **Лабораторная работа № 8**

#### **Исследование однофазного трансформатора**

*Цель работы:*

- изучить назначение, принцип действия и устройство трансформаторов;
- исследовать различные режимы работы однофазного трансформатора;

– построить зависимость тока  $I_1$ , КПД  $\eta$ ,  $\cos \varphi_1$ ,  $U_2$  от тока  $I_2$  для однофазного трансформатора и определить его параметры по экспериментальным данным.

### 8.1. Краткие теоретические сведения

Трансформатор – это статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты.

В простейшем случае трансформатор состоит из стального сердечника (магнитопровода) и двух обмоток. К первичной обмотке подводится питающее напряжение  $U_1$ . Со вторичной обмотки снимается напряжение  $U_2$ , которое подводится к потребителю электрической энергии. Если  $U_2 > U_1$ , то трансформатор называют повышающим, а если  $U_2 < U_1$ , то понижающим.

Переменный ток, проходя по виткам первичной обмотки трансформатора, возбуждает в сердечнике магнитопровода переменный магнитный поток.

При синусоидальном изменении магнитного потока и отсутствии насыщения магнитной системы действующие значения ЭДС, наводимых в первичной и вторичной обмотках трансформатора, определяются по формулам:

$$E_1 = 4,44 \omega_1 f \Phi_m \text{ и } E_2 = 4,44 \omega_2 f \Phi_m, \quad (8.1)$$

где  $f$  – частота переменного тока.

Отношение ЭДС первичной обмотки трансформатора к ЭДС вторичной его обмотки, равное отношению соответствующих чисел витков обмоток, называется коэффициентом трансформации трансформатора по напряжению

$$K_U = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (8.2)$$

Различают три режима работы трансформатора: режим холостого хода, режим работы под нагрузкой (или нагрузочный режим) и режим короткого замыкания.

В режиме холостого хода вторичная обмотка трансформатора разомкнута и по первичной обмотке протекает ток холостого хода  $I_0$ , значение которого обычно невелико и составляет 4–10 % от номинального значения.

В результате этого можно принять, что мощность  $P_0$ , потребляемая трансформатором в опыте холостого хода и измеряемая ваттметром, расходуется на потери в магнитопроводе, обусловленные гистерезисом и вихревыми токами

$$P_0 = P_M. \quad (8.3)$$

В режиме короткого замыкания вторичная обмотка трансформатора замкнута накоротко, ток  $I_2$  максимален, а  $U_2 \approx 0$ . Замыкание вторичной обмотки трансформатора накоротко в процессе эксплуатации приводит к тому, что при номинальном напряжении  $U_1$ , подводимом к первичной обмотке, в обмотках трансформатора возникают весьма значительные токи, которые могут привести к выходу его из строя.

В отличие от аварийного режима короткого замыкания, в процессе исследования трансформатора проводится опыт короткого замыкания с целью определения электрических потерь мощности в проводах обмоток и с целью определения параметров эквивалентной схемы (схемы замещения) трансформатора.

При проведении этого опыта к первичной обмотке трансформатора подводится такое напряжение  $U_{1к}$ , при котором в обмотках возникают токи, равные номинальным значениям  $I_{1н}$  и  $I_{2н}$ .

Таким образом, можно считать, что в опыте короткого замыкания вся мощность  $P_к$ , потребляемая трансформатором, идет на нагрев обмоток трансформатора, т. е. равна электрическим потерям

$$P_к = P_э = I_{1н}^2 R_к, \quad (8.4)$$

где  $R_к = R_1 + R_2'$  – активное сопротивление обмоток трансформатора в схеме замещения.

Схемы опытов холостого хода и короткого замыкания приведены на рис. 8.1.

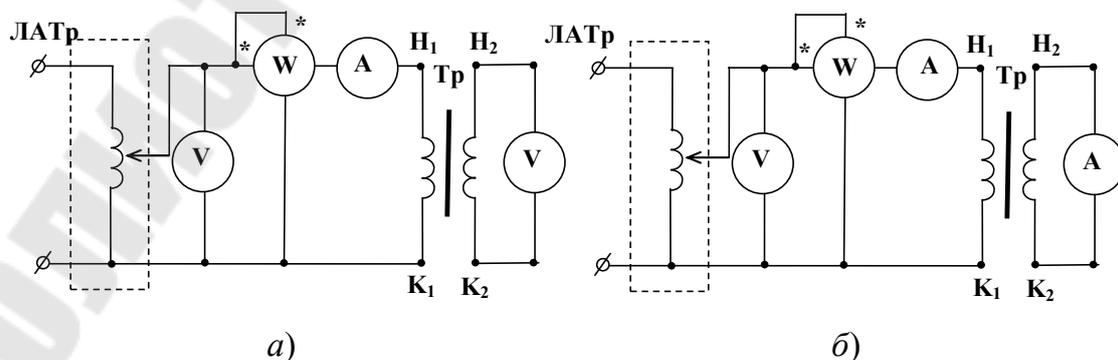


Рис. 8.1. Схемы опытов холостого хода (а) и короткого замыкания (б)

По данным опыта холостого хода  $P_0$ ,  $I_0$ ,  $U_1$ ,  $U_2$ , кроме коэффициента трансформации  $K_U$ , определяют коэффициент мощности  $\cos \varphi_1 = \frac{P_0}{U_1 I_0}$ , а также параметры контура намагничивания эквивалентной схемы трансформатора:

$$R_m = \frac{P_0}{I_0^2}; \quad Z_m = \frac{U_1}{I_0}; \quad X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}. \quad (8.5)$$

По данным опыта короткого замыкания  $U_{1к}$ ,  $P_k$ ,  $I_{1к}$ ,  $I_{2н}$  определяют коэффициент трансформации по току

$$K_I = \frac{I_{2н}}{I_{1к}}, \quad (8.6)$$

коэффициент мощности трансформатора при коротком замыкании

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{U_{1к} I_{1к}}, \quad (8.7)$$

а также параметры упрощенной схемы замещения трансформатора при коротком замыкании:

$$Z_k = \frac{U_{1к}}{I_{1к}}; \quad R_k = R_1 + R_2' = \frac{P_k}{I_{1к}^2}; \quad X_k = X_1 + X_2' = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}. \quad (8.8)$$

При включении нагрузки по вторичной обмотке трансформатора протекает ток  $I_2$ , который создает магнитодвижущую силу (МДС), направленную навстречу МДС первичной обмотки.

Величина  $\eta = \frac{P_2}{P_1}$  называется коэффициентом полезного действия трансформатора.

Выразив  $P_1$  в виде суммы  $P_1 = P_2 + P_0 + P_k$ , можно представить  $\eta$  в виде

$$\eta = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + P_0 + P_k}. \quad (8.9)$$

У идеализированных трансформаторов  $U_2 = U_1 / K = \text{const}$ , т. е.  $U_2$  не зависит от нагрузки, поэтому его вольт-амперная характеристика проходит параллельно оси  $I_2$  (рис. 8.2, а (прямая 1)). У реального трансформатора существуют ЭДС от полей рассеяния и падение на-

пряжения на вторичной обмотке, поэтому при активно-индуктивных нагрузках  $U_2$  уменьшается с ростом  $I_2$  (рис. 8.2, а (кривая 2)).

При емкостном характере нагрузки с ростом  $I_2$  происходит возрастание  $U_2$  (рис. 8.2, а (кривая 3)).

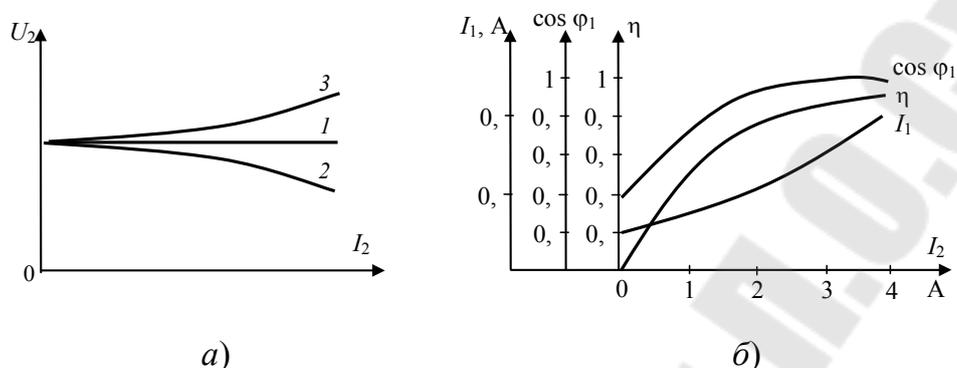


Рис. 8.2. Нагрузочные характеристики трансформатора

К нагрузочным характеристикам относятся такие зависимости:  $\cos \varphi_1$ ,  $\eta$  и  $I_1$  от тока  $I_2$  (рис. 8.2, б).

## 8.2. Лабораторное задание

8.2.1. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 8.3 и записать марки приборов.

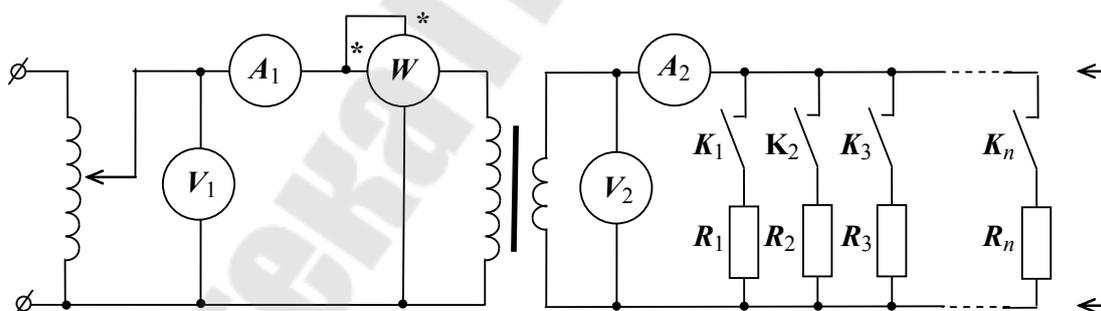


Рис. 8.3. Схема экспериментального исследования характеристик однофазного трансформатора

8.2.2. Подать на первичную обмотку испытуемого трансформатора синусоидальное напряжение  $U_H = 220\text{ В}$  от выходных клемм ЛАТРа и снять зависимость показаний приборов для различных нагрузок, последовательно замыкая ключи  $K_1, K_2, K_3, \dots, K_n$ , начиная с холостого хода, когда все ключи разомкнуты. Результаты измерений занести в табл. 8.1. Следить за тем, чтобы  $I_2$  не превышал  $1,2I_{2H}$ .

Таблица 8.1

Номер опыта	Результаты измерений					Результаты расчетов		
	$U_1$	$I_1$	$P_1$	$U_2$	$I_2$	$P_2$	$\cos \varphi_1$	$\eta$
	В	А	Вт	В	А	Вт	–	%
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								

8.2.3. Осуществить опыт короткого замыкания. Для этого:

- установить на выходе ЛАТРа нулевое напряжение и затем коротнуть перемычкой (рис. 8.3) клеммы нагрузки;
- плавно увеличивая напряжение от ЛАТРа на первичной обмотке  $U_{1к}$  до момента установки тока  $I_2 = I_{2н}$ , записать показания приборов в табл. 8.2. Выключить питание установки и разобрать цепь.

Таблица 8.2

Режим работы цепи	Результаты измерения					Расчет	
	$U_{1к}$	$I_{1к}$	$U_2$	$I_2$	$P_k$	$\cos \varphi_k$	$K_I$
	В	А	В	А	Вт	–	–
Короткое замыкание							

### 8.3. Контрольные вопросы

- 8.3.1. Объясните назначение и принцип работы трансформаторов.
- 8.3.2. Как устроен однофазный трансформатор?
- 8.3.3. Какие параметры трансформаторов можно определить по данным опыта холостого хода?
- 8.3.4. Чем отличается опыт короткого замыкания от режима короткого замыкания?
- 8.3.5. Какие параметры трансформатора можно определить по данным опыта короткого замыкания?
- 8.3.6. Какие виды потерь энергии имеют место в трансформаторе и от чего они зависят?

8.3.7. Как маркируются силовые трансформаторы?

8.3.8. Почему при изменении тока  $I_2$  изменяется также и ток  $I_1$ ?

8.3.9. Объясните вид внешней характеристики для разных нагрузок.

#### **8.4. Требования к оформлению отчета**

Отчет должен содержать:

- тему и цель работы;
- схему рис. 8.3 и заполненные табл. 8.1, 8.2;
- параметры  $K_U$ ,  $R_m$ ,  $Z_m$ ,  $X_m$ , найденные по данным строки 1 из табл. 8.1;
- графики (по образцу рис. 8.2) нагрузочных характеристик по данным табл. 8.1;
- параметры  $\alpha = 0$ ,  $Z_k$ ,  $X_k$  найденным по данным табл. 8.2;
- анализ результатов измерений и выводы.

### **Лабораторная работа № 9**

#### **Исследование трехфазного асинхронного электродвигателя**

*Цель работы:*

- изучить устройство и принцип действия асинхронных двигателей различного назначения;
- освоить методику снятия механической характеристики асинхронного двигателя.

#### **9.1. Краткие теоретические сведения**

Асинхронные электродвигатели предназначены для преобразования электрической энергии переменного тока в механическую энергию.

Асинхронный трехфазный двигатель состоит из неподвижного статора и вращающегося ротора. Статор имеет цилиндрическую форму и состоит из корпуса, сердечника и обмоток. Корпус изготавливается из стали, чугуна или алюминиевого сплава. Сердечник набирается из тонких листов электротехнической стали. Листы изолируют друг от друга тонкой оксидной пленкой, набираются в пакет и запрессовываются в корпус статора. С внутренней стороны сердечника вырубается продольные пазы, в которые укладываются обмотки статора, выполненные из медного изолированного эмалью провода и состоящие из

трех отдельных обмоток, оси которых повернуты в пространстве относительно друг друга на  $120^\circ$ . Обмотки называются фазами статора и соединяются между собой треугольником или звездой, в зависимости от значения подводимого трехфазного напряжения.

Начала обмоток статора обозначаются буквами  $C_1, C_2, C_3$  или  $a_n, b_n, c_n$ , а концы – буквами  $C_4, C_5, C_6$  или  $a_k, b_k, c_k$ .

Ротор трехфазного АД состоит из стального вала, на который напрессован сердечник, состоящий из пакета тонких пластин электротехнической стали с продольными пазами, в которые заливаются стержни из алюминия в случае короткозамкнутого ротора либо укладываются обмотки из медного провода – в случае ротора с контактными кольцами.

В рабочем режиме ротор АД вращается с числом оборотов  $n_2 < n_1$ , поэтому магнитное поле статора скользит относительно ротора с числом оборотов  $n_s = (n_1 - n_2)$  об/мин.

Относительное отставание ротора от вращающего магнитного поля статора характеризуется скольжением

$$S = \frac{n_s}{n_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{\Omega_1 - \Omega_2}{\Omega_1}. \quad (9.1)$$

Для большинства современных АД скольжение ротора при номинальной нагрузке составляет (2–6) %, т. е.  $S = 0,02–0,06$ , а при работе на холостом ходе – доли процента. При заторможенном роторе ( $n_2 = 0$ ) скольжение максимально и равно единице ( $S = 1$ ).

График зависимости  $M(S)$  приведен на рис. 9.1. Точка  $S = 0$ ,  $M = 0$  соответствует идеальному холостому ходу двигателя, а точка  $M_{\text{ном}}$ ,  $S_{\text{ном}}$  – номинальному режиму. Участок  $HK$  графика соответствует механической перегрузке двигателя. В точке  $K$  момент достигает максимального значения и называется критическим моментом. Скольжение  $S_k$ , соответствующее критическому моменту, называется критическим скольжением.

При практических расчетах обычно определяют момент, развиваемый АД для заданного скольжения  $S$ , пользуясь приближенной формулой Клосса

$$M = \frac{2 M_{\text{кр}}}{\frac{S_{\text{кр}}}{S} + \frac{S}{S_{\text{кр}}}}. \quad (9.2)$$

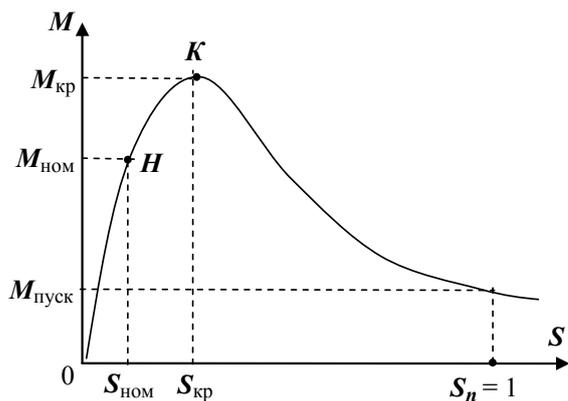


Рис. 9.1. Зависимость момента  $M$  АД от скольжения  $S$

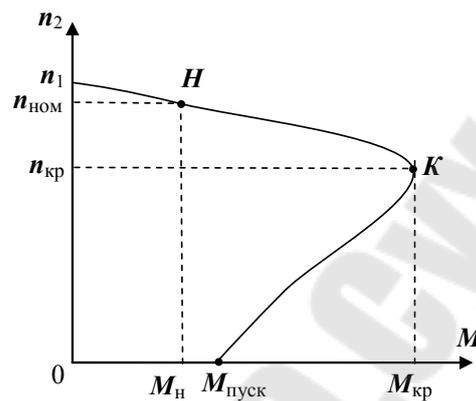


Рис. 9.2. Механическая (скоростная) характеристика АД

Зависимости момента  $M$ , развиваемого двигателем, потребляемой мощности  $P_1$ , коэффициента мощности  $\cos \varphi_1$ , коэффициента полезного действия  $\eta$ , скольжения ротора  $S$ , тока статора  $I_1$  от полезной мощности, т. е. от мощности  $P_2$  на валу двигателя являются рабочими характеристиками асинхронного двигателя (рис. 9.3). Эти характеристики снимаются при  $U = \text{const}$  и  $f = \text{const}$ .

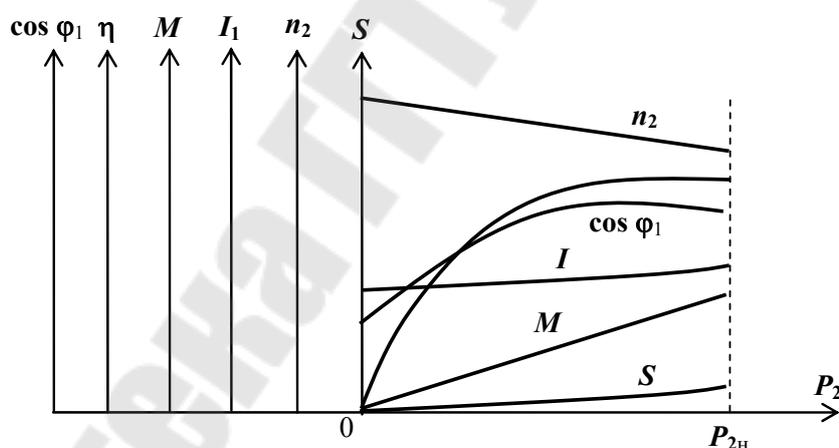


Рис. 9.3. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Как правило,  $M$  отсчитывают по заранее отградуированной шкале в  $\text{Н} \times \text{м}$ , а мощность на валу рассчитывают по формуле

$$P_2 = \frac{M n_2}{9550}, \text{ кВт}, \quad (9.3)$$

где  $n_2$  — измеряемая тахогенератором частота вращения ротора, об/мин.

Коэффициент мощности АД определяют по формуле

$$\cos\varphi = \frac{P_{\phi}}{U_{\phi} I_{\phi}} = \frac{P_1}{\sqrt{3} U_{л} I_{л}}, \quad (9.4)$$

а коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (9.5)$$

## 9.2. Лабораторное задание

9.2.1. Переписать с таблички, укрепленной на корпусе асинхронного двигателя, его марку и все указанные параметры

9.2.2. Исследовать работу АД под нагрузкой. Для этого следует:

- собрать схему рис. 9.7, а с применением измерительного комплекта К505, либо набора приборов (по указанию преподавателя);
- снять зависимость показаний измерительных приборов от момента  $M$  на валу, регулируя величину момента ЛАТРОм, либо реостатом  $R_{н}$ . Число оборотов определять с помощью тахометра. Данные занести в табл. 9.1.

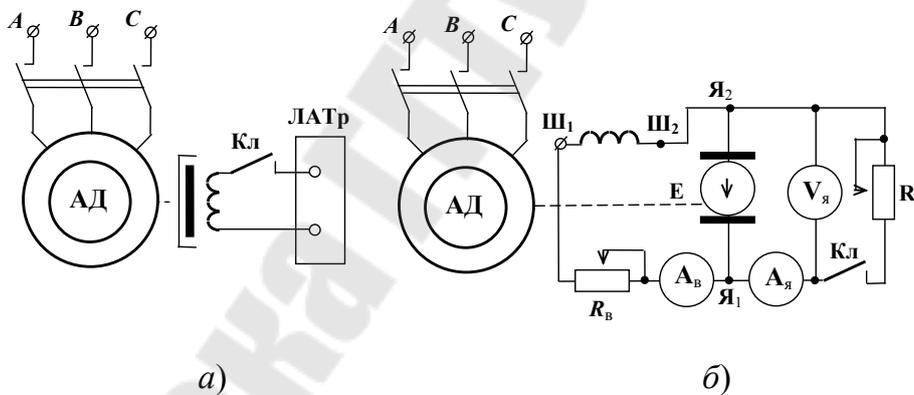


Рис. 9.4. Цепь регулируемого момента  $M$  на валу АД

Таблица 9.1

№	Измерение					Вычисления					
	Измерено	$I_{\phi}$ , А	$U_{\phi}$ , В	$P_{\phi}$ , Вт	$n_2$ , об/мин	$M$ , Н · м	$\cos$	$P_1$ , Вт	$P_2$ , Вт	$\eta$	$S$
1											
2											
3											
4											
5											
6											

### 9.3. Контрольные вопросы

- 9.3.1. Как устроен АД и какие разновидности АД Вам известны?
- 9.3.2. Какие физические явления лежат в основе работы АД?
- 9.3.3. Какие данные приводятся на табличках, укрепляемых на корпусе АД?
- 9.3.4. Как обозначаются выводы статорных обмоток АД с короткозамкнутым ротором и выводы якорных обмоток АД с фазным ротором?
- 9.3.5. Каковы основные условия получения вращающегося магнитного поля?
- 9.3.6. От чего зависит частота вращения ротора АД?
- 9.3.7. Что такое скольжение и в каких пределах эта величина изменяется?
- 9.3.8. Приведите энергетическую диаграмму АД и поясните, как распределяется энергия, потребляемая двигателем из сети.
- 9.3.9. Как зависит момент  $M$ , развиваемый АД, от величины подводимого напряжения  $U_1$ ?
- 9.3.10. Запишите формулу Клосса и определите по ней величину пускового момента  $M_{\text{п}}$ .
- 9.3.11. Что понимается под механической характеристикой АД?
- 9.3.12. Приведите графики  $M(S)$  и  $n_2(M)$  и укажите на них точки  $M_{\text{п}}$ ,  $M_{\text{н}}$ ,  $M_{\text{кр}}$ .
- 9.3.13. Как изменить направление вращения АД?
- 9.3.14. Что понимается под рабочими характеристиками АД, как они экспериментально снимаются и как используются при выборе электродвигателя для электропривода?
- 9.3.15. Чем объяснить значительное превышение пусковых токов в сравнении с  $I_{\text{н}}$  и какие способы снижения пусковых токов применяются?

### 9.4. Требования к содержанию отчета

Отчет должен содержать:

- титульный лист.
- цель работы.

Результаты выполнения лабораторного задания в виде схем опытов, полученных данных и рабочих характеристик рис. 9.4–9.6 АД. При этом величины  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $\eta$ ,  $S$  и  $\cos \varphi_1$  вычисляются по данным измерений по формулам:

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_\phi}{U_\phi I_\phi}, \quad P_1 = 3 P_\phi, \quad P_2 = \frac{M n_2}{9,55}, \quad \eta = \frac{P_2}{P_1}, \quad S = 1 - \frac{n_2}{n_1}.$$

Анализ результатов и выводы.

## **Лабораторная работа № 10**

### **Исследование электрических машин постоянного тока**

*Цель работы:*

- изучить назначение, устройство, принцип действия, конструктивные разновидности машин постоянного тока (МПТ), их параметры и характеристики;
- приобрести навыки запуска, реверсирования и регулирования частоты вращения ротора (якоря) МПТ в режиме двигателя;
- освоить методику лабораторного испытания МПТ в режиме двигателя и в режиме генератора.

#### **10.1. Теоретические сведения**

Машины постоянного тока, как и асинхронные машины, чаще используются в режиме двигателя, т. е. служат для преобразования электрической энергии постоянного тока в механическую энергию. Кроме того, МПТ довольно широко используются и в режиме генератора, преобразуя механическую энергию вращательного движения ротора в электрическую энергию. Машина постоянного тока состоит из статора и вращающейся части – ротора, называемого в МПТ якорем. Статор состоит из станины, служащей корпусом и магнитопроводом МПТ, главных и дополнительных полюсов электромагнитов с обмотками, через которые пропускают постоянный ток (ток возбуждения), подшипниковых щитов, закрывающих корпус с торцов и центрирующих на подшипниках якорь, и щеточной траверсы со щетками.

Якорь состоит из сердечника, обмотки и коллектора. Магнитопровод сердечника набирается из листов электротехнической стали. В продольные пазы магнитопровода укладываются секции обмоток, концы которых припаиваются к пластинам коллектора. Токопроводящие медные пластины коллектора располагают по цилиндрической поверхности и изолируют друг от друга и от вала якоря миканитовыми прокладками. К коллекторным пластинам прижимаются щетки,

к которым в режиме ДПТ подводится постоянное напряжение от источника питания, а в режиме генератора подключается внешняя нагрузка. Таким образом, МПТ обладает свойством обратимости.

Свойства и характеристики МПТ зависят главным образом от схемы включения обмотки главных полюсов. По этому признаку МПТ делятся на машины с независимым возбуждением, с параллельным, последовательным и смешанным (параллельно-последовательным) возбуждением.

В МПТ с независимым возбуждением обмотка возбуждения питается от отдельного источника постоянного напряжения. В машинах с параллельным возбуждением обмотка возбуждения и обмотка якоря включены параллельно и питаются от одного источника.

В МПТ с последовательным возбуждением  $I_B$  и  $I_A$  равны, так как обмотка возбуждения и якорь соединяются последовательно.

В МПТ со смешанным возбуждением содержится две обмотки возбуждения, одна из которых соединена с якорем последовательно, а вторая – параллельно.

**10.1.1. Работа МПТ в режиме двигателя.** Зависимости между величинами описываются уравнениями:

$$M_{\text{э.м}} = C_M I_A \Phi \quad (10.1)$$

– уравнение развиваемого ДПТ электромагнитного момента;

$$U = E_{\text{пр}} + R_A I_A \quad (10.2)$$

– уравнение электрического состояния, где

$$M_{\text{э.м}} = M_c + M_{\text{п}} \quad (10.3)$$

– уравнение равновесия моментов в установившемся режиме работы двигателя, где  $M_c$  – момент сопротивления на валу, создаваемый нагрузкой;  $M_{\text{п}}$  – момент потерь, создаваемый всеми видами потерь в двигателе;  $C_M$  – конструктивный коэффициент момента, зависящий от конструкции обмотки якоря и числа полюсов ДПТ;  $I_A$  – ток якоря в двигателе;  $\Phi$  – магнитный поток одной пары главных полюсов электродвигателя.

$$E_{\text{пр}} = C_e \Phi n \quad (10.4)$$

– противоЭДС, т. е. ЭДС, которая наводится в обмотке вращающегося якоря и направленная против тока якоря;  $C_e$  – конструктивный коэффициент ЭДС;  $n$  – частота вращения якоря электродвигателя.

Важнейшими из характеристик ДПТ являются следующие зависимости:

– механическая характеристика  $n(M_c)$  – зависимость частоты вращения от момента на валу при  $U = \text{const}$  и  $I_B = \text{const}$ ;

– рабочие характеристики – зависимость  $M, P, n, I, \eta$  от  $P_2$  при  $U = \text{const}$  и при  $R_B = \text{const}$ .

Уравнение механической характеристики может быть получено из выражения для ЭДС МПТ:

$$E_{\text{пр}} = C_e \Phi n,$$

где  $E_{\text{пр}} = U - I_{\text{я}} R_e$  и, следовательно,

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} R_e}{C_e \Phi}. \quad (10.5)$$

Заменив  $I_{\text{я}}$  из выражения для электромагнитного момента  $I_{\text{я}} = \frac{M_{\text{э.м.}}}{C_m \Phi}$ , получим уравнение механической характеристики:

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{C_e C_m \Phi^2} M_{\text{э.м.}} \quad (10.6)$$

**10.1.2. ДПТ параллельного возбуждения.** Электрическая схема этого ДПТ приведена на рис. 10.1. Обмотка якоря и обмотка возбуждения включены параллельно друг другу.

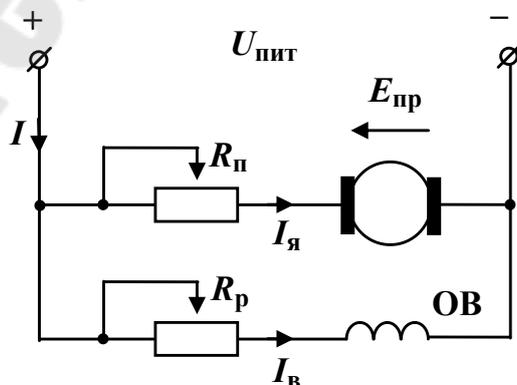


Рис. 10.1. Электрическая схема ДПТ с параллельным возбуждением:  $I$  – потребляемый двигателем ток;  $I_{\text{я}}$  – ток якоря;  $I_B$  – ток возбуждения

$$I = I_{\text{я}} + I_{\text{в}}. \quad (10.7)$$

Естественная механическая характеристика для этого типа ДПТ описывается уравнением (10.6).

Реверсирование (изменение направления вращения) осуществляется изменением направления тока, либо в обмотке возбуждения, либо в обмотке якоря.

**10.1.3. ДПТ последовательного возбуждения.** Электрическая схема этого типа двигателя приведена на рис. 10.4. Из рисунка следует, что  $I = I_{\text{я}} = I_{\text{в}}$ .

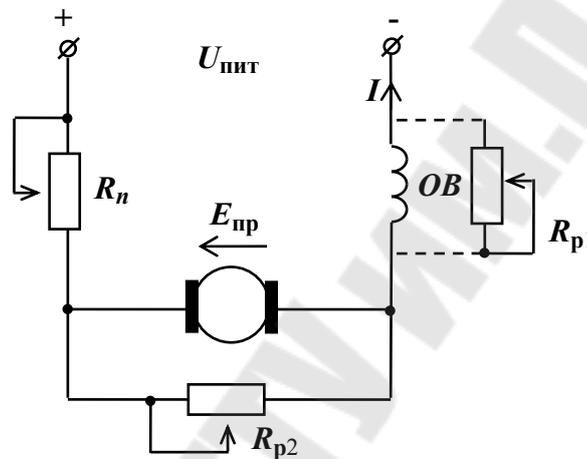


Рис. 10.2. Электрическая схема ДПТ с последовательным возбуждением

Из рис. 10.2 следует уравнение электрического равновесия

$$U = E_{\text{пр}} + (R_{\text{я}} + R_{\text{в}}) I_{\text{я}},$$

где  $R_{\text{в}}$  – сопротивление  $OB$ .

С учетом того, что  $E_{\text{пр}} = C_e n \Phi$ , уравнение механической характеристики ДПТ с последовательным возбуждением приводится к виду

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{в}}}{C_e \Phi} I_{\text{я}}. \quad (10.8)$$

Это выражение, с учетом (10.1) можно представить в виде  $n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{в}}}{C_e C_M \Phi^2} M_{\text{э.м}}$ . При изменении  $M = M_{\text{э.м}}$  частота вращения резко изменяется. Такая характеристика называется мягкой. При  $M \rightarrow 0$   $n$  неограниченно растет, и двигатель идет «вразнос».

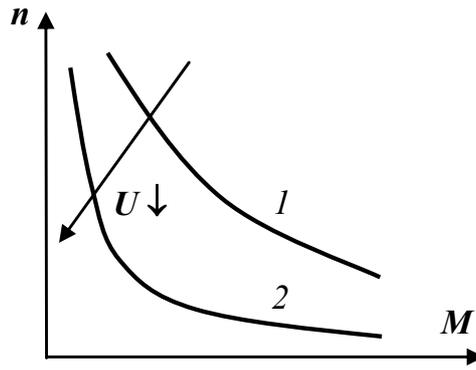


Рис. 10.3. Механическая характеристика ДПТ с последовательным возбуждением

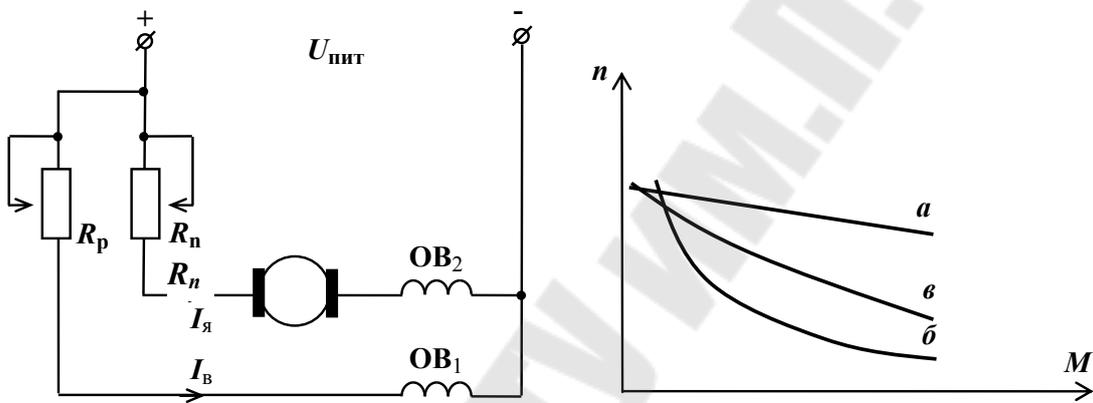


Рис. 10.4. Электрическая схема ДПТ со смешанным возбуждением

Рис. 10.5. Механическая характеристика ДПТ: а – параллельного возбуждения; б – последовательного возбуждения; в – смешанного возбуждения

Рабочие характеристики ДПТ с параллельным возбуждением приведены на рис. 10.6, а.

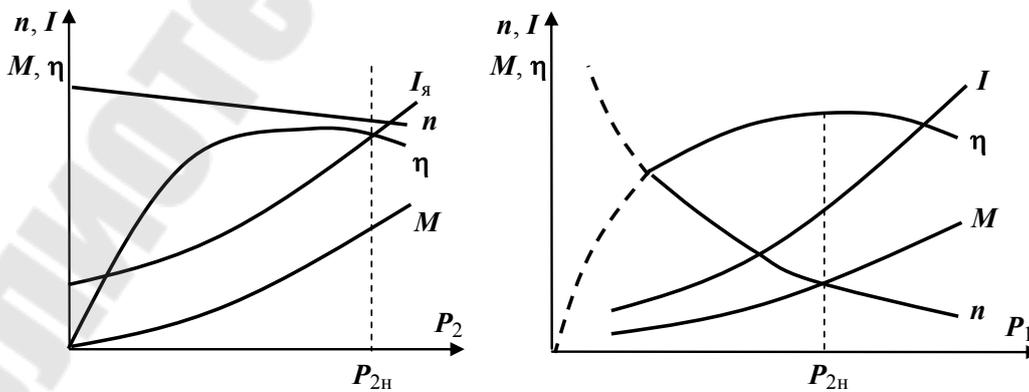


Рис. 10.6. Рабочие характеристики ДПТ с параллельным (а) и последовательным (б) возбуждением

Из этого рисунка видно, что частота вращения с ростом  $P_2$  уменьшается незначительно. Зависимость момента, развиваемого двигателем от  $P_2$  почти линейная, так как  $M = 9550 P_2 / n$ . Искривление этой зависимости обусловлено снижением  $n$  с увеличением нагрузки  $P_2$ . При  $P_2 = 0$  ток, потребляемый ДПТ, равен току холостого хода, а при увеличении нагрузки на валу ток якоря увеличивается приблизительно как и  $M$ , поскольку при  $\varphi = \text{const}$   $I_{\text{я}}$  пропорционален  $M$ .

**10.1.4. Работа МПТ в режиме генератора.** Генератор постоянного тока (ГПТ) преобразует механическую энергию в энергию постоянного тока.

Принцип действия ГПТ основан на законе электромагнитной индукции. При вращении якоря первичным двигателем, вследствие пересечения проводниками обмотки якоря магнитного поля полюсов, в соответствии с законом электромагнитной индукции, в обмотке якоря наводится ЭДС.

Генераторы постоянного тока, в зависимости от способа возбуждения, делятся на генераторы с независимым возбуждением и генераторы с самовозбуждением.

На практике в основном применяют генераторы с самовозбуждением, имеющие более простую конструкцию и легкость эксплуатации. Из этого класса ГПТ наиболее широко в настоящее время применяют генераторы с параллельным возбуждением (рис. 10.7).

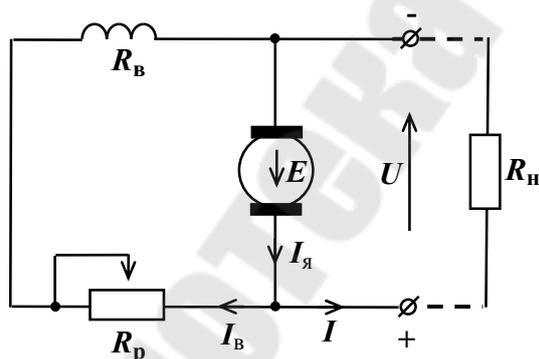


Рис. 10.7. Электрическая схема ГПТ с параллельным возбуждением

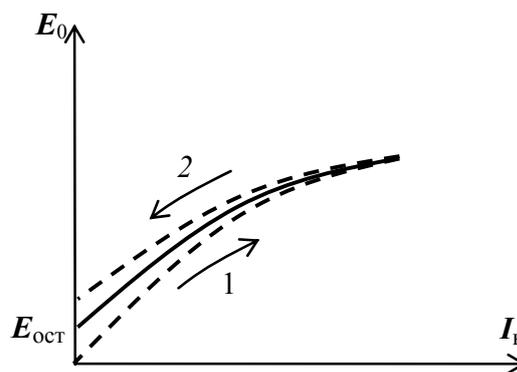


Рис. 10.8. Характеристика холостого хода с параллельным возбуждением

Основными характеристиками, определяющими свойства ГПТ, являются:

– характеристика холостого хода (ХХХ) – зависимость ЭДС на зажимах якоря от тока возбуждения при токе нагрузки, равном нулю (при разомкнутой цепи нагрузки) и постоянной частоте вращения якоря, равной номинальной, т. е.

$$E = f(I_B) \quad | \quad I = 0 \quad (10.9)$$

$$n_H = \text{const};$$

– внешняя характеристика – зависимость напряжения на зажимах обмотки якоря от тока нагрузки  $I$  при постоянном сопротивлении в цепи обмотки возбуждения и номинальной частоте вращения, т. е.

$$U = f(I) \quad | \quad R_B = \text{const} \quad (10.10)$$

$$n_H = \text{const};$$

– регулировочная характеристика – зависимость тока возбуждения  $I_B$  от тока нагрузки  $I_H$  при  $n = n_{\text{ном}} = \text{const}$ , при которой обеспечивается постоянство напряжения  $U$  на зажимах генератора, т. е.

$$I_B = f(I) \quad | \quad U = \text{const} \quad (10.11)$$

$$n_H = \text{const}.$$

Характеристика холостого хода ГПТ с параллельным возбуждением (рис. 10.8) представляет собой совокупность двух расходящихся ветвей.

## 10.2. Лабораторное задание

10.2.1. Переписать с табличек, закрепленных на ДПТ и ГПТ спарки марки и все указанные параметры. Пояснить смысл всех приведенных параметров. Занести в протокол схему разметки выводов обмоток возбуждения и якоря.

10.2.2. Исследовать работу МПТ в режиме двигателя. Для этого:

– собрать схему рис. 10.19, запитав обмотку якоря ДПТ от регулируемого выпрямителя на основе ЛАТРа;

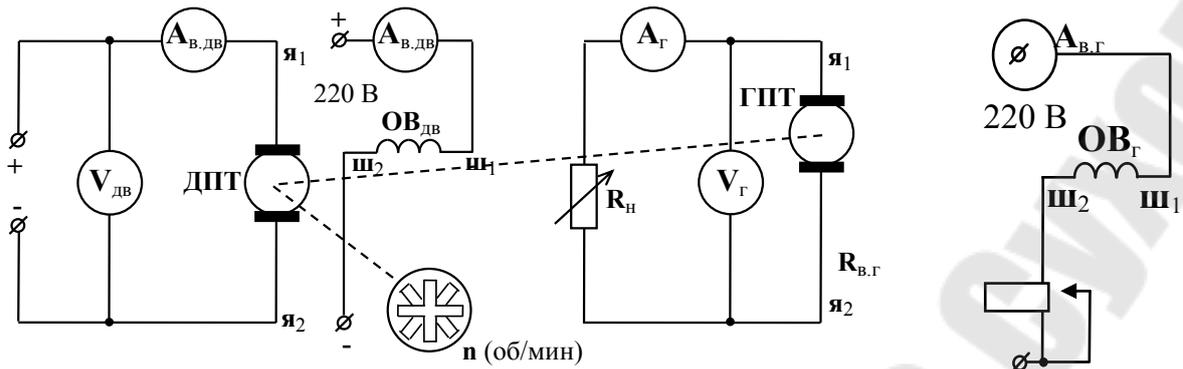


Рис. 10.9. Электрическая схема испытания ДПТ с параллельным возбуждением с нагрузочным генератором

Таблица 10.1

№ п/п	Измерения					Вычисления						
	$U_{дв}$	$I_{дв}$	$n$	$U_{г}$	$I_{г}$	$P_{1дв}$	$P_{2г}$	$\sum P$	$\sum P_{дв}$	$P_{2дв}$	$\eta$	$M$
	В	А	об/мин	В	А	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	-	Н · м
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												

Постепенно нагружая двигатель от тока холостого хода до тока  $I_{дв} = 1,2 I_{дв.н}$ , снять показания всех приборов и заполнить остальные строки табл. 10.1. Выключить питание установки.

Вычисления произвести по формулам:

$P_{1дв} = U_{дв} I_{дв}$  – мощность, потребляемая двигателем от источника питания;

$P_{2г} = U_{г} I_{г}$  – мощность, отдаваемая нагрузочным генератором;

$\sum P = \sum P_{дв} + \sum P_{г} = P_{1дв} - P_{2г}$  – суммарные потери в двигателе и генераторе;

$\sum P_{дв} = \frac{P_{1дв} - P_{2г}}{2}$  – суммарные потери в двигателе;

$P_{2дв} = P_{1дв} - \sum P_{дв}$  – полезная мощность, отдаваемая двигателем;

$\eta = \frac{P_{2\text{дв}}}{P_{1\text{дв}}}$  – коэффициент полезного действия двигателя;

$$M = M_0 + M_2, \text{ где } M_0 = 9,550 \frac{P_{1\text{дв}}^{\text{XX}}}{n^{\text{XX}}}, M_2 = 9,550 \frac{P_{2\text{дв}}}{n};$$

– по данным табл. 10.1 построить в одной координатной системе рабочие характеристики двигателя (по образцу рис. 10.6, а) при постоянных  $U_{\text{дв.н}}$  и  $I_{\text{в.дв.н}}$ ;

– по данным табл. 10.1 построить механическую  $n(M)$  и скоростную  $n(I_{\text{дв}})$  характеристики ДПТ.

10.2.3. Исследовать работу МПТ в режиме генератора. Для этого необходимо:

– собрать схему рис. 10.9;

– замкнув далее обмотку возбуждения  $I_{\text{в.г}}$ , произвести 6–8 измерений  $I_{\text{в.г}}$  и  $E$  (до  $E = 1,25U_{\text{н}}$ ), регулируя  $I_{\text{в.г}}$  реостатом  $R_{\text{в.г}}$ . Таким образом снимают восходящую ветвь характеристики холостого хода, передвигая движок реостата  $R_{\text{в.г}}$  в одну сторону (в сторону уменьшения сопротивления);

– передвигая далее движок в обратную сторону, т. е. уменьшая  $I_{\text{в.г}}$  до минимально-возможного, снять нисходящую ветвь характеристики ХХ. Выключить питание;

– по данным табл. 10.2 построить характеристику холостого хода генератора (рис. 10.10).

Таблица 10.2

№ п/п	$I_{\text{в.г}}, \text{ А}$	$E, \text{ В}$	
		Восходящая ветвь	Нисходящая ветвь
1			
2			
3			
4			
5			
6			

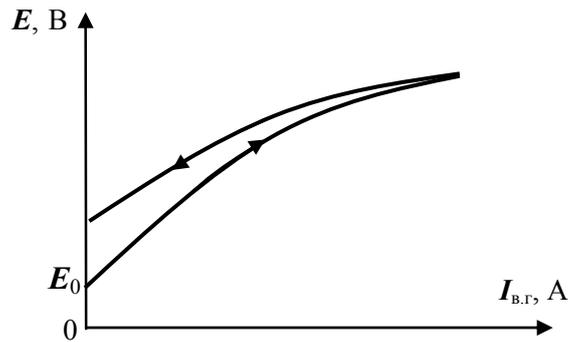


Рис. 10.10. Характеристика холостого хода генератора

10.2.4. Осуществить пуск ДПТ по предыдущему пункту и, возбуждив генератор при отключенной нагрузке до  $U_r = (1,1-1,2)U_n$ , при  $n = n_n$  и  $R_{в.г} = \text{const}$ , снять внешнюю характеристику  $U(I_2)$ , изменяя  $I_r$  от нуля (нагрузка отключена) до  $I_r = 1,2 I_n$ , передвигая движок реостата  $R_n$ , сделать 5–6 измерений. Данные занести в табл. 10.3 и по ним построить внешнюю характеристику (рис. 10.11).

Таблица 10.3

№ п/п	$U_r$	$I_r$	$I_{в.г}$
	В	А	А
1			
2			
3			
4			
5			
6			

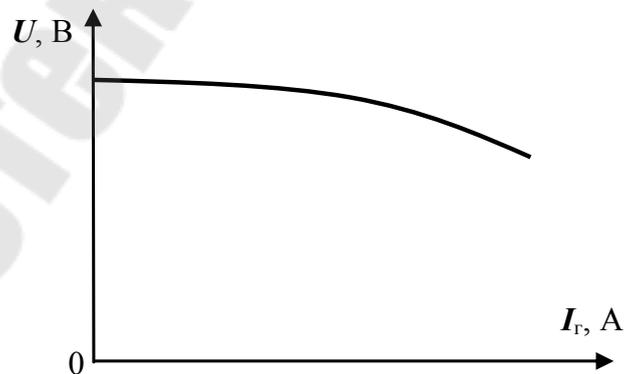


Рис. 10.11. Внешняя (нагрузочная) характеристика генератора

10.2.5. Снять регулировочную характеристику  $I_{в.г}(I_{г})$  при  $U = \text{const}$  и  $n = \text{const}$ , осуществив пуск ДПТ и возбуждив генератор до  $E = U_{н}$  при  $I_{г} = 0$ . Далее генератор нагружать  $R_{н}$ , а ток возбуждения регулировать  $R_{в.г}$  так, чтобы напряжение на выходе генератора оставалось постоянным и равным  $U_{н}$ . Данные 5–7 опытов занести в табл. 10.4 и по ним построить регулировочную характеристику (рис. 10.12).

Таблица 10.4

№ п/п	$I_{г}$	$I_{в.г}$	Примечание
	А	А	
1			$U = \dots \text{ В}$ $n = \text{const}$
2			
3			
4			
5			
6			

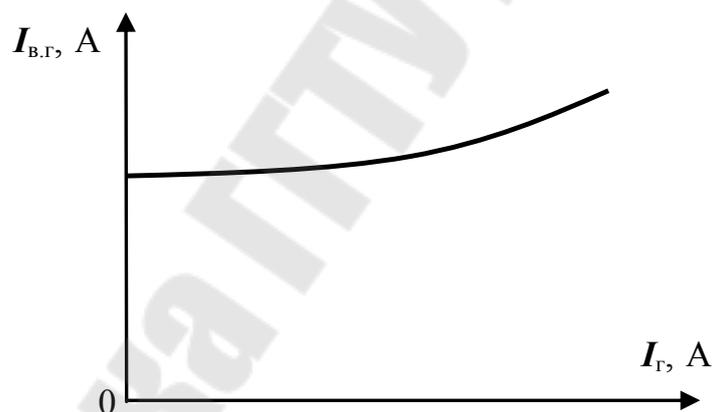


Рис. 10.12. Регулировочная характеристика ГПТ с параллельным возбуждением

### 10.3. Контрольные вопросы

- 10.3.1. Как устроен ДПТ?
- 10.3.2. Объясните принцип действия ДПТ с параллельным возбуждением.
- 10.3.3. Приведите электрическую схему ДПТ параллельного возбуждения с пусковыми и регулируемыми элементами.
- 10.3.4. Как осуществляется пуск ДПТ?

10.3.5. Перечислите способы регулирования частоты вращения ДПТ.

10.3.6. Почему во время работы ДПТ нельзя разрывать цепь возбуждения?

10.3.7. Как можно изменить направление вращения якоря ДПТ?

10.3.8. Как в лабораторной работе регулируется нагрузка на валу ДПТ?

10.3.9. Как снимаются рабочие характеристики ДПТ?

10.3.10. Дайте сравнительную оценку ДПТ различных способов возбуждения и приведите их области применения.

10.3.11. Объясните устройство и принцип действия генератора постоянного тока с параллельным возбуждением.

10.3.12. Объясните, как происходит процесс самовозбуждения ГПТ с параллельным возбуждением и какие факторы влияют на величину ЭДС на зажимах якоря.

10.3.13. Каково назначение коллектора в ГПТ?

10.3.14. Почему в МПТ магнитопровод статора выполняется сплошным (литым), а якоря – наборным из изолированных пластин электротехнической стали?

10.3.15. Почему при изменении полярности подключения обмотки возбуждения ГПТ с параллельным возбуждением к обмотке якоря генератор не возбуждается?

10.3.16. Почему снижается напряжение на зажимах генератора с параллельным возбуждением при увеличении тока нагрузки?

10.3.17. Чем отличаются ГПТ с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением и где они применяются?

#### **10.4. Требования к содержанию отчета**

Отчет должен содержать:

- титульный лист;
- цель работы;
- марки ДПТ и ГПТ и их номинальные параметры;
- схему рис. 10.9, табл. 10.1 и рабочие характеристики ДПТ с параллельным возбуждением, а также механическую и скоростную характеристики;
- заполненные табл. 10.2–10.4 и построенные по ним характеристики МПТ в режиме генератора;
- анализ результатов и выводы.

## **Лабораторная работа № 11**

### **Исследование трехфазного мостового выпрямителя**

*Цель работы:* изучить назначение трехфазного выпрямителя, понимать его работу, знать назначение элементов, уметь оценить качество работы его по параметрам и характеристикам.

#### **11.1. Краткие теоретические сведения**

Трехфазные выпрямители используют для питания постоянным током потребителей средней и большой мощности. Наибольшее распространение получили трехфазные мостовые выпрямители (схема Ларионова), электрическая схема которого приведена на рис. 11.1. Мостовой выпрямитель содержит шесть диодов. В одной группе из трех диодов аноды соединены вместе (анодная группа), а к катодам поданы линейные напряжения  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$  и  $U_{CA}$ . В другой группе из трех диодов все катоды соединены вместе, катодная группа, а к анодам поданы линейные напряжения. Нагрузка подсоединяется между соединенными анодами анодной группы и соединенными катодами катодной группы

Среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_d = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_2 = 2,34U_2,$$

где  $U_2$  – действующее значение фазного напряжения.

#### **11.2. Лабораторное задание**

11.2.1. Соберите трехфазный выпрямитель, электрическая схема которого приведена на рис. 11.1.

11.2.2. Подключите выпрямитель к выходам  $A$ ,  $B$ ,  $C$  трехфазного источника ГТН.

11.2.3. Установите одинаковые величины линейных напряжений  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$  и  $U_{CA}$ . При помощи осциллографа убедитесь в симметричности линейных напряжений.

11.2.4. Наблюдайте на экране осциллографа временные диаграммы входных и выходного напряжений. Зарисуйте в масштабе

временные диаграммы и сравните их с теоретическими (при известных линейных напряжениях). Коротко опишите работу выпрямителя.

11.2.5. Экспериментально получите внешнюю характеристику  $n$ , изменяя  $R_H$  в пределах  $R_H = 20 \text{ кОм}$  (100 Ом).

### 11.3. Контрольные вопросы

11.3.1. Назовите области применения трехфазных мостовых выпрямителей.

11.3.2. Покажите замкнутые контуры прохождения выпрямленного тока в трехфазном выпрямителе (через нагрузку, диоды, трансформатор) в различное время.

11.3.3. Чему равно среднее выпрямленное напряжение  $U_d$  в трехфазном мостовом выпрямителе?

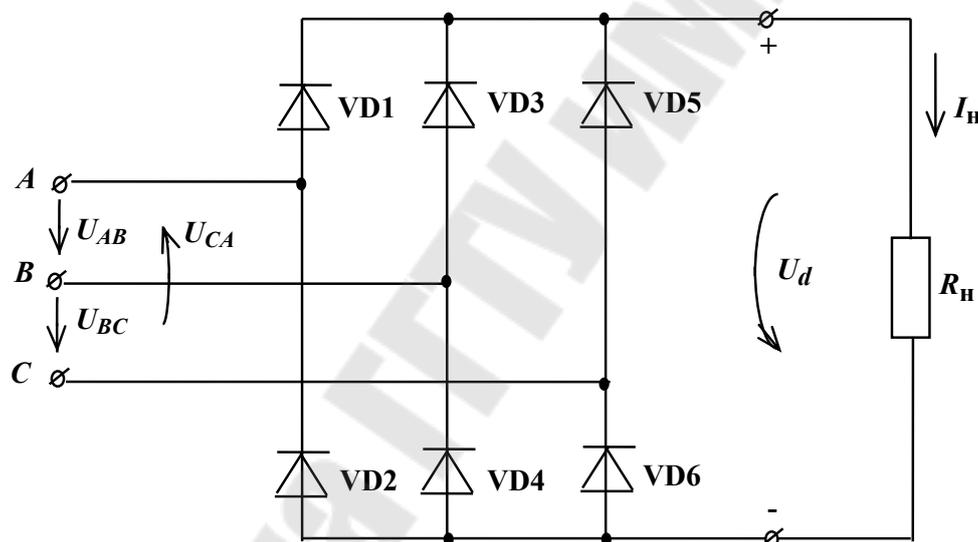


Рис. 11.1. Схема трехфазного мостового выпрямителя

### 11.4. Требования к содержанию отчета

Отчет должен содержать:

- титульный лист;
- цель работы;
- схему трехфазного мостового выпрямителя по рис. 11.1;
- осциллограммы входных и выходного напряжений;
- график внешней характеристики, полученной по п. 11.2.5;
- анализ результатов и выводы.

## **Лабораторная работа № 12**

### **Исследование однофазного управляемого выпрямителя**

*Цель работы:* изучить назначение управляемых выпрямителей, уметь оценить качество работы по параметрам и характеристикам, уметь выбрать выпрямители и систему управления для конкретного применения.

#### **12.1. Краткие теоретические сведения**

Для управления средним значением выпрямленного напряжения  $U_d$  как для маломощных, так и для мощных приемников широко используют управляемые выпрямители на тиристорах. Регулирование среднего значения выпрямленного напряжения здесь осуществляется за счет регулирования времени протекания тока через открытый тиристор путем изменения угла открывания тиристора. При этом амплитуда переменного напряжения  $U_{m2}$  на входе выпрямителя остается неизменной. Этот метод обеспечивает широкий диапазон регулирования среднего значения выпрямленного напряжения при высоком КПД и малом потреблении мощности в цепях управления, высоком быстродействии и автоматическом управлении.

На рис. 12.1, *а* приведено условное обозначение управляемого тиристора, а на рис. 12.1, *б* – его вольт-амперная характеристика (ВАХ). В электрических цепях тиристор может находиться в двух состояниях – открытом и закрытом. При  $I_y = 0$   $I_y = 0$  для открывания тиристора необходимо приложить достаточно большое напряжение между анодом и катодом (от 50 В типа КУ101Б и до нескольких сот вольт у других типов). Чем больше ток управления, тем при меньшем напряжении  $U_a$  открывается тиристор. Когда тиристор открылся, то изменить его состояние, т. е. закрыть, отключением тока управления ( $I_y = 0$ ) невозможно. Закрыть открытый однооперационный тиристор можно только уменьшением до нуля напряжения между анодом и катодом, или при обратной полярности, т. е. при  $U_a \leq 0$ .

Среднее значение выпрямленного напряжения  $U_d$  пропорционально заштрихованной площади полусинусоиды для двухполупериодного выпрямления в режиме холостого хода

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_{m2} \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2U_{m2}}{\pi} \frac{1 + \cos \alpha}{2} = U_{d0} \frac{1 + \cos \alpha}{2}, \quad (12.1)$$

где  $U_{d0} = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} = 0,9U_2$  – среднее значение выпрямленного напряжения при  $\alpha = 0$  в режиме холостого хода.

На рис. 12.2, б тиристор открывается в конце полусинусоиды при большом  $\alpha$ . При этом заштрихованная часть полусинусоиды невелика, и, следовательно, мало  $U_d$ , что видно также из уравнения (12.1). Зависимость  $U_d = f(\alpha)$  называется регулировочной характеристикой управляемого выпрямителя. На рис. 12.1 приведена регулировочная характеристика однофазного выпрямителя по уравнению (12.1) в относительных единицах выпрямленного напряжения  $U_H = \frac{U_d}{U_{d0}}$  (нормированная характеристика,  $U_H$  – нормированное напряжение).

Для управления выпрямителем используется система управления, включающая в себя фазосдвигающее устройство (ФСУ) и формирователь импульсов управления (ФИ). ФСУ осуществляет сдвиг по фазе  $\alpha$  управляющего относительно выпрямляемого напряжения  $U_2$ , а ФИ формирует импульсы управления заданной величины и заданной формы.

## 12.2. Лабораторное задание

12.2.1. Соберите управляемый выпрямитель, схема которого приведена на рис. 12.3. Для ФСУ использовать источник  $u_{сн1}$ , для силовой части – источник  $u_{сн2}$ .

12.2.2. Изменяя угол  $\alpha$  открывания тиристора путем изменения  $R$ , на экране осциллографа наблюдайте изменения формы напряжения  $U_d$  на  $R_H$ . Определите диапазон изменения  $\alpha$  при помощи осциллографа с синхронизацией от сети (внешняя синхронизация).

12.2.3. Изменяя ток нагрузки  $I_H$ , экспериментально получите внешние характеристики  $U_d = f(I_H)$  для значений  $\alpha = 0, \alpha = 60^\circ, \alpha = 60^\circ, \alpha = 120^\circ$ . Постройте внешние характеристики.

12.2.4. Для  $R_H = \infty$  экспериментально получите и постройте регулировочную характеристику  $U_d = f(\alpha)$  при изменении  $\alpha$  от 0 до  $180^\circ$  (7–8 измерений).

### 12.3. Контрольные вопросы

- 12.3.1. Назначение управляемого выпрямителя. Его достоинства и недостатки.
- 12.3.2. Что такое тиристор? Какова его ВАХ?
- 12.3.3. Каким образом можно открыть и закрыть тиристор?
- 12.3.4. Каким образом регулируется среднее значение выпрямленного напряжения в управляемом тиристорном выпрямителе?
- 12.3.5. Что такое регулировочная характеристика? Приведите ее график.
- 12.3.6. Каковы внешние характеристики выпрямителя при различных значениях угла  $\alpha$ ?
- 12.3.7. Каким образом в исследуемом выпрямителе изменяется угол  $\alpha$ ?
- 12.3.8. Какую роль выполняют компараторы?
- 12.3.9. Чем отличается горизонтальный способ сдвига фаз от вертикального?

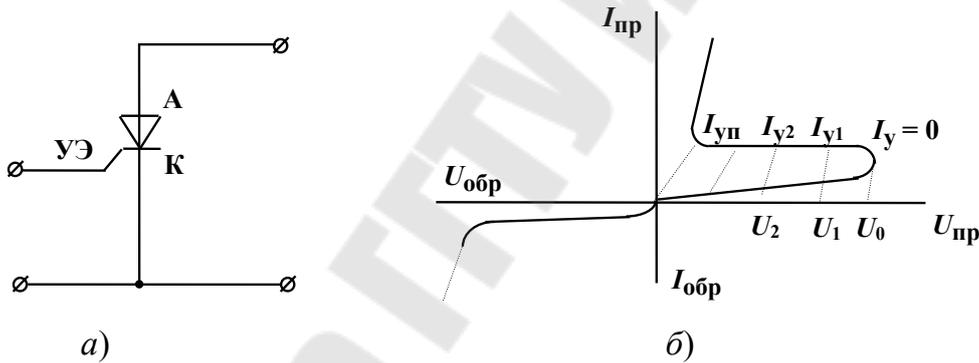


Рис. 12.1. Вольтамперная характеристика

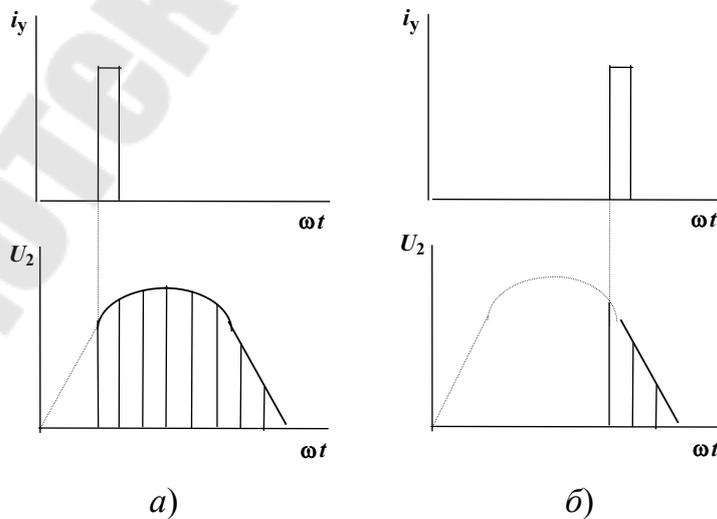


Рис. 12.2. Сущность регулирования  $U_d$

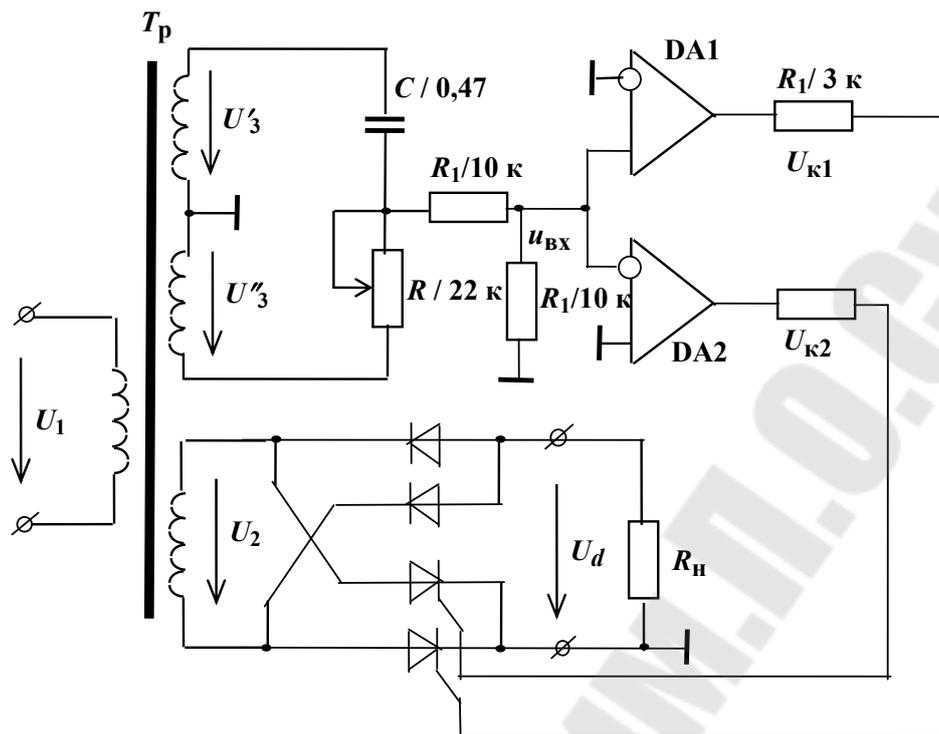


Рис. 12.3. Принципиальная электрическая схема управляемого выпрямителя

## 12.4. Требования к содержанию отчета

Отчет должен содержать:

- титульный лист;
- тему и цель работы;
- схему управляемого выпрямителя по рис. 12.3;
- графики внешних характеристик по п. 12.2.3;
- график регулировочной характеристики по п. 12.2.4;
- анализ результатов и выводы.

## Лабораторная работа № 13

### Исследование стабилизаторов напряжения

*Цель работы:* изучить назначение и принцип действия стабилизаторов напряжения различных типов, их основные параметры и характеристики; научиться экспериментально определять эти параметры и характеристики.

### 13.1. Краткие теоретические сведения

Для существенного уменьшения изменения напряжения на нагрузке под влиянием внешних факторов используют специальные регулирующие электронные устройства – компенсационные стабилизаторы напряжения.

Основной характеристикой стабилизатора является внешняя характеристика:

$$U_{\text{н}} = f(I_{\text{н}}). \quad (13.1)$$

Стабилизаторы напряжения бывают параметрические и компенсационные. В данной лабораторной работе исследуются компенсационные стабилизаторы. Такие стабилизаторы обеспечивают высокую стабилизацию и необходимую мощность для питания радиоэлектронных устройств.

Для увеличения коэффициента стабилизации используют регулирование проводимостью транзистора при помощи усилителя. При этом чувствительность стабилизатора к изменениям  $U_{\text{н}}$  увеличивается в  $K_y$  раз ( $K_y$  – коэффициент усиления усилителя). Схема такого стабилизатора с усилителем приведена на рис. 13.1. В схеме стабилизатора на рис. 13.3 отсутствует защита по току нагрузки. Поэтому при малых  $R_{\text{н}}$  ток  $I_{\text{н}}$  может превысить допустимое значение  $I_{\text{н.доп}}$ , в результате чего может наступить перегрев транзистора VT, что может повлечь за собой выход транзистора из строя. Для ограничения выходного тока  $I_{\text{н}}$  (тока нагрузки) устанавливают дополнительный транзистор VT1 и резистор  $R_4$  в цепь последовательно с  $R_{\text{н}}$ , как показано на рис. 13.4. В этом случае максимальный ток нагрузки будет определяться уравнением

$$I_{\text{н.макс}} = \frac{U_{\text{б.о.1}}}{R_4}, \quad (13.2)$$

где  $U_{\text{б.о.1}}$  – базовое напряжение открывания транзистора VT1.

### 13.2. Лабораторное задание

13.2.1. Соберите стабилизатор на рис. 13.2. Сопротивления  $R_1 = 1,5 \text{ кОм}$ ,  $R_{\text{н}} = 10 \text{ кОм}$ . Подключите к ГН2.

13.2.2. Установите  $U_{\text{вх}} = 20 \text{ В}$ ,  $U_{\text{оп}} = U_{\text{оп.макс}}$  и снимите внешнюю характеристику  $U_{\text{н}} = f(I_{\text{н}})$  для значений сопротивления нагрузки  $R_{\text{н}} = 20 \text{ кОм}$ ,  $10 \text{ кОм}$ ,  $5,1 \text{ кОм}$ ,  $2,5 \text{ кОм}$ ,  $2 \text{ кОм}$ ,  $1 \text{ кОм}$ ,  $0,5 \text{ кОм}$ . Постройте график ВХ.

13.2.3. Установите  $R_{\text{н}} = 1 \text{ кОм}$  и, изменяя  $U_{\text{вх}}$  от  $10 \text{ В}$  до  $24 \text{ В}$ , снимите и построьте зависимость  $U_{\text{н}} = f(U_{\text{вх}})$ .

13.2.4. Соберите стабилизатор на рис. 13.3. Сопротивления  $R_2 = 10 \text{ кОм}$ ,  $R_3 = 15 \text{ кОм}$ ,  $R_6 = 1,5 \text{ кОм}$ .

13.2.5. Установите  $U_{\text{вх}} = 20 \text{ В}$ . Изменяя  $U_{\text{оп}}$ , определите диапазон установки напряжения стабилизации  $U_{\text{н.макс}} - U_{\text{н.мин}}$  при  $R_{\text{н}} = 1 \text{ кОм}$ .

13.2.6. Определите  $K_{\text{ст}}$  и  $r_{\text{дин}}$  и сравните с п. 13.2.4.

13.2.7. Установите VT1 и  $R_4 = 24 \text{ Ом}$  (см. рис. 13.4) и при  $U_{\text{н}} = 15 \text{ В}$  снимите ВХ  $U_{\text{н}} = I_{\text{н}}$  для  $R_{\text{н}}$ , указанных в п. 13.2.2. Постройте ВХ.

### 13.3. Контрольные вопросы

13.3.1. Что такое стабилизатор напряжения? Для чего он предназначен?

13.3.2. Какие основные параметры и характеристики вы знаете?

13.3.3. Чем отличаются параметрические и компенсационные стабилизаторы?

13.3.4. Для чего на входе стабилизатора устанавливают конденсатор достаточно большой емкости?

13.3.5. Для чего во всех стабилизаторах на рис. 13.3–13.5 установлен транзистор VT?

13.3.6. Какая связь между  $U_{\text{оп}}$  и  $U_{\text{н}}$  на рис. 13.4?

13.3.7. Для чего в стабилизаторе на рис. 13.5 установлена защита по току и как она действует?

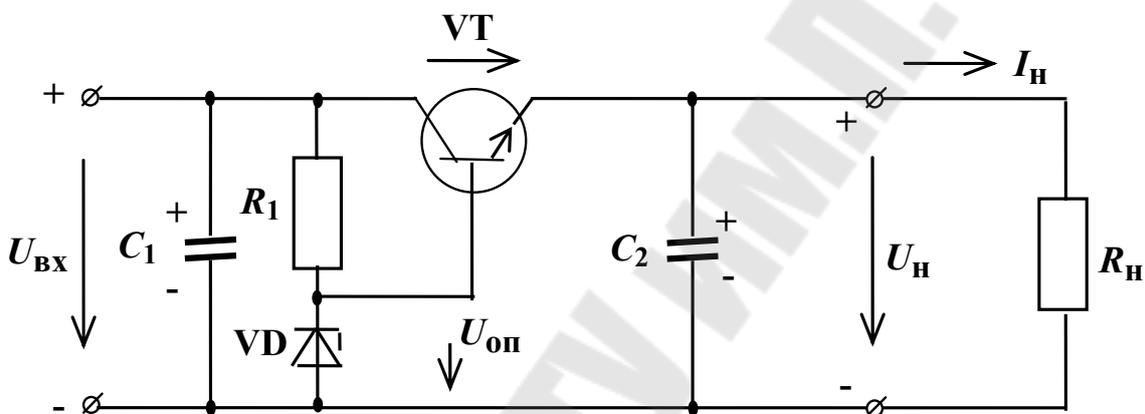
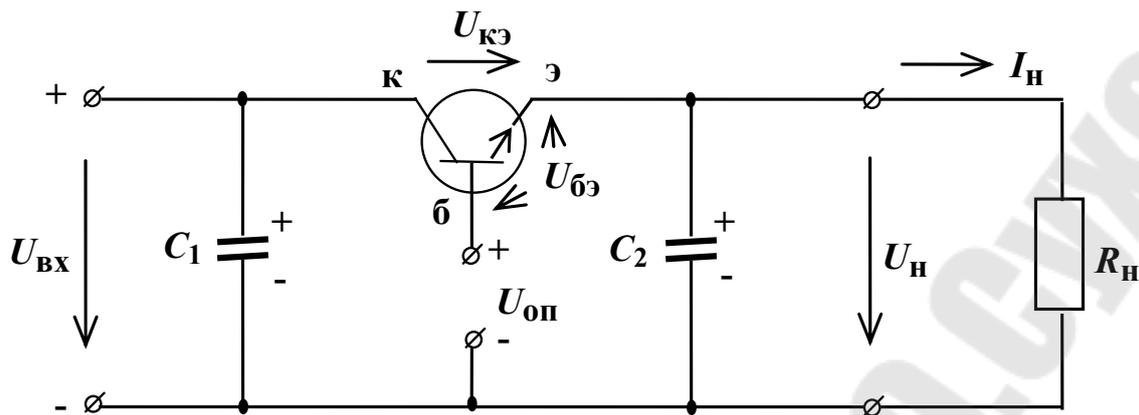


Рис. 13.1. Стабилизатор с  $U_{оп}$  на стабилитроне

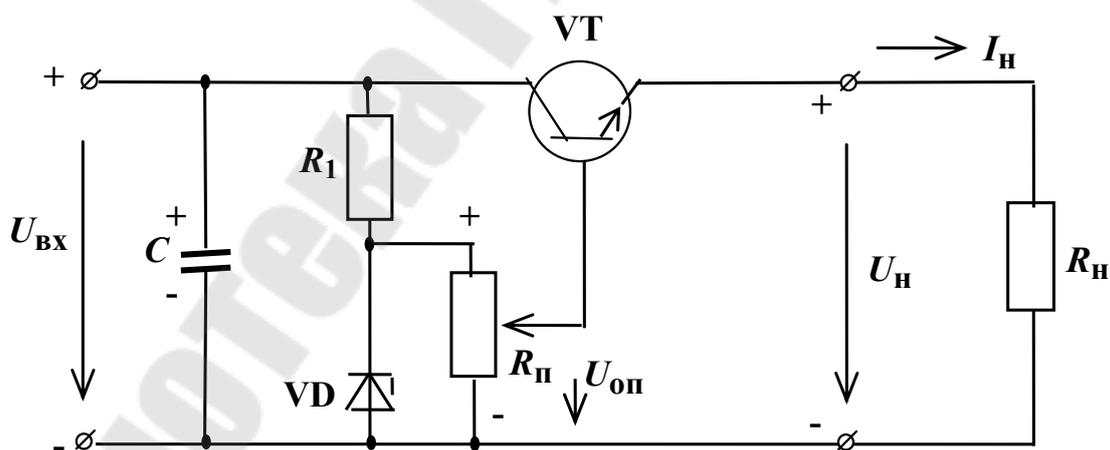


Рис. 13.2. Стабилизатор с установкой  $U_н$

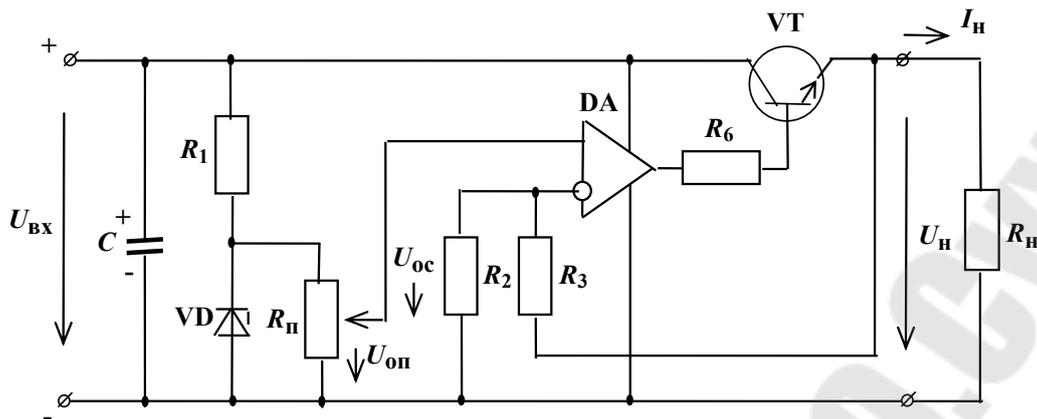


Рис. 13.3. Стабилизатор с усилителем

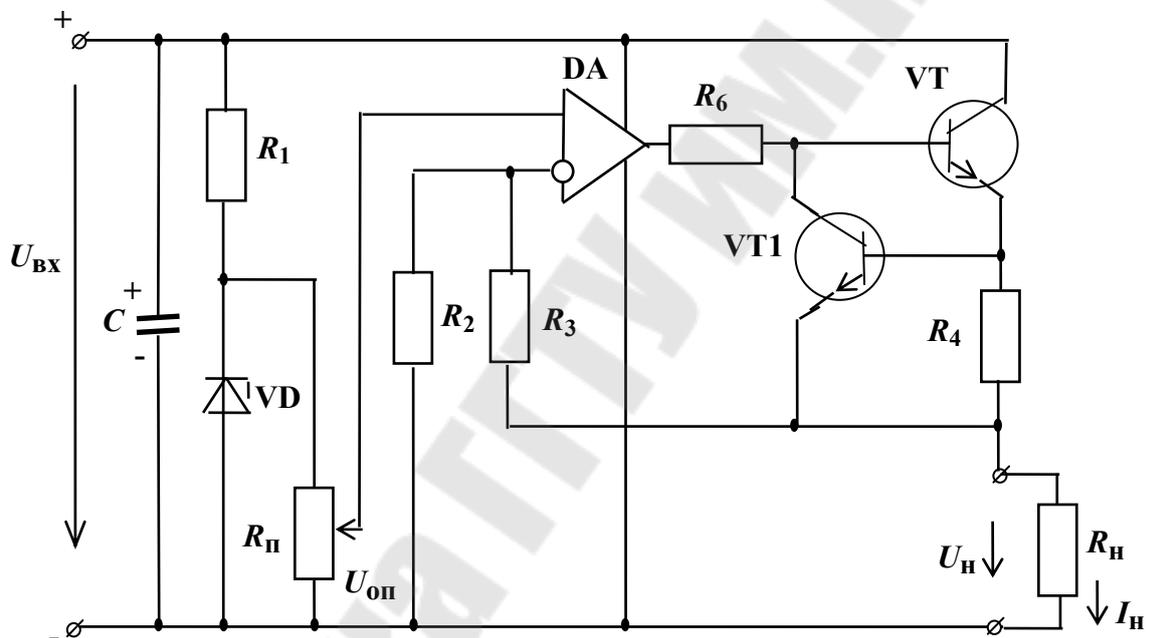


Рис. 13.4. Стабилизатор с защитой по току

### 13.4. Требования к содержанию отчета

Отчет должен содержать:

- титульный лист;
- тему и цель работы;
- схему стабилизатора по рис. 13.2;
- график внешней характеристики по п. 13.2.2;
- график зависимости напряжения в нагрузке от входного напряжения по п. 13.2.3;
- схему стабилизатора напряжения по рис. 13.3;

- диапазон установки напряжения стабилизации по п. 13.2.6;
- схему стабилизатора напряжения по рис. 13.4;
- график внешней характеристики для стабилизатора напряжения по рис. 13.4;
- анализ результатов и выводы.

## **Лабораторная работа № 14**

### **Исследование вторичных источников постоянного тока на базе однофазных выпрямителей**

*Цель работы:* изучить назначение вторичного источника, его блок-схему, назначение и работу каждого блока источника, назначение каждого элемента в блоках, уметь оценить качество работы вторичного источника по его параметрам и характеристикам.

#### **14.1. Краткие теоретические сведения**

Вторичный источник постоянного тока на базе однофазных выпрямителей предназначен для питания различных электронных устройств промышленной, научной и бытовой техники, измерительных устройств, устройств контроля и автоматики, ЭВМ и других приемников небольшой мощности.

Вторичный источник постоянного тока в общем случае включает в себя трансформатор, выпрямитель, сглаживающий фильтр и стабилизатор напряжения постоянного тока. Блок-схема такого источника приведена на рис. 14.1. Трансформатор  $Tr$  предназначен для преобразования синусоидального напряжения  $u_1$  сети в синусоидальное же напряжение  $u_2$  той же самой частоты, но другой, заданной величины. Выпрямитель  $B$  преобразует синусоидальное напряжение  $u_2$  в пульсирующее (в виде полусинусоид) напряжение  $u_d$  одной полярности, под действием которого в цепи протекает пульсирующий ток  $i_d$  одного направления. Сглаживающий фильтр  $\Phi$  производит сглаживание пульсирующего напряжения и, следовательно, тока до заданной (допустимой) величины пульсации. Стабилизатор напряжения  $СН$  поддерживает неизменный заданный уровень напряжения  $U_n$  на выходе вторичного источника, независимо от изменений уровня напряжения сети и величины тока  $I_n$  нагрузки приемника.

Основными параметрами вторичных источников являются:

а) напряжение  $U_H$ ;

б) максимальный ток  $I_{H.\max}$  нагрузки приемника, где  $U_{m\sim}$  – амплитуда основной гармоники выпрямленного напряжения, В;  $U_{\text{ср}}$  – среднее значение выпрямленного напряжения;  $m$  – число фаз выпрямителя;

г) КПД источника

$$\eta = \frac{P_H}{P_1} = \frac{P_H}{P_H + \Delta P}, \quad (14.1)$$

где  $P_H$  – мощность, потребляемая приемником (нагрузкой), Вт;  $P_1$  – мощность, получаемая вторичным источником из сети, Вт;  $\Delta P$  – потери мощности внутри вторичного источника (во всех его блоках и элементах).

Основной характеристикой вторичного источника, как и любого источника, является внешняя характеристика – зависимость напряжения  $U_H$  на выходе источника, т. е. напряжения на нагрузке, от тока  $I_H$  нагрузки при неизменном действующем значении напряжения  $U_1$  сети, т. е.

$$U_H = f(I_H) \quad \text{при} \quad U_1 = \text{const}. \quad (14.2)$$

Вторичный источник с нагрузкой можно заменить упрощенной схемой замещения, приведенной на рис. 14.2. Решая схему замещения, находим

$$U_H = E_{\text{и}} - I_H R_{\text{вн}}, \quad (14.3)$$

где  $E_{\text{и}} = U_{\text{н.хх}}$  – ЭДС идеального источника, В;  $U_{\text{н.хх}}$  – напряжение на выходе вторичного источника в режиме холостого хода, т. е. при  $I_H = 0$ ;  $R_{\text{вн}}$  – внутреннее сопротивление реального источника, Ом.

На рис. 14.3, а приведена электрическая схема простейшего вторичного источника, включающего в себя только трансформатор с нулевым выводом и выпрямитель, а на рис. 14.3, б – временные диаграммы работы вторичного источника.

На рис. 14.4, а приведена электрическая схема простейшего вторичного источника, выпрямитель которого собран по мостовой схеме. При этом достаточно иметь одну вторичную обмотку трансформатора, напряжение которой равно  $U_2$ . На рис. 14.4, б приведены временные диаграммы работы источника с выпрямителем, собранном по

мостовой схеме. Среднее значение выпрямленного напряжения в режиме холостого хода (при  $R_H \gg R_{BH}$ ):

$$U_{d0} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_{m2} \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2U_{m2}}{\pi} = 0,9U_2, \quad (14.4)$$

где  $U_{m2}$  – амплитудное значение вторичной обмотки трансформатора в режиме холостого хода.

Сглаживающие фильтры выполняют на основе реактивных элементов – дросселей и конденсаторов. Конденсаторы имеют емкостное сопротивление  $x_C = \frac{1}{2\pi f C}$ , малое – переменному току и очень большое – постоянному току. Дроссели имеют индуктивное сопротивление  $x_L = 2\pi f L$ , большое – переменному току, малое – постоянному току.

Получили распространение  $C$ -фильтр,  $L$ -фильтр,  $\Gamma$ -образные  $LC$ - и  $RC$ -фильтры. Схемы таких фильтров приведены на рис. 14.5. Даже включение простейших емкостного или индуктивного фильтра приводит к существенному сглаживанию пульсаций. При этом надо помнить, что чем меньше ток нагрузки, тем лучше сглаживает  $C$ -фильтр, чем больше ток нагрузки – тем лучше сглаживает  $L$ -фильтр.

Для стабилизации выпрямленного и сглаженного напряжения чаще всего используют компенсационные стабилизаторы напряжения, представляющие собой устройства автоматического регулирования напряжения.

В маломощных источниках иногда используют простейший параметрический стабилизатор на стабилитроне  $VD$  и балластном резисторе  $R_6$  (рис. 14.6).

## 14.2. Лабораторное задание

14.2.1. Соберите выпрямитель на рис. 14.3, *a*. Напряжения  $U'_2$  и  $U''_2$  – от источника ИСН1 на стенде.

14.2.2. Экспериментально получите внешнюю характеристику  $U_d = f(I_H)$ , изменяя  $R_H$  от  $R_{H1} = 30 \text{ кОм}$  до  $R_{H7} = 200 \text{ Ом}$ . Постройте внешнюю характеристику (ВХ).

14.2.3. Соберите выпрямитель по рис. 14.4, *a*. Напряжение  $U_2$  возьмите от ИСН2.

14.2.4. Экспериментально получите внешнюю характеристику  $U_d = f(I_H)$ , как в п. 14.2.3. Постройте внешнюю характеристику.

14.2.5. Установите П-образный фильтр  $C_1 - R_\phi - C_2$ , как показано на рис. 14.7. Экспериментально получите и постройте в тех же координатах внешнюю характеристику.

14.2.6. Установите стабилитрон VD5 и  $R_6$ , как на рис. 14.8, получите и постройте ВХ. Сравните с другими ВХ.

14.2.7. На экране осциллографа наблюдайте  $u_d$ ,  $u_\phi$ ,  $U_H = U_{\text{стаб}}$ .

### 14.3. Контрольные вопросы

14.3.1. Назначение фильтра. Какими параметрами фильтр характеризуется?

14.3.2. По памяти начертите различные типы фильтров.

14.3.3. Что надо сделать, если выбранный фильтр не обеспечивает требуемого коэффициента сглаживания?

14.3.4. Чему равно  $U_{H.XX}$  на выходе вторичного источника в режиме холостого хода (при  $I_H = 0$ ) при наличии LC или RC-фильтров?

14.3.5. Чему равно  $U_{H.XX}$  в режиме холостого хода при отсутствии фильтра?

14.3.6. При какой схеме выпрямителя лучше используется трансформатор?

14.3.7. С какой частотой пульсирует выходное напряжение мостового выпрямителя? А выпрямителя с нулевым выводом трансформатора?

14.3.8. Почему внешняя характеристика выпрямителя нелинейная?

14.3.9. У какой схемы выпрямителя (без фильтра) КПД больше? Почему?

14.3.10. Действующее значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора  $U_d = 15$  В. Чему равно выходное напряжение  $U_{H.XX}$  вторичного источника при наличии фильтра LC (или RC) в режиме холостого хода?

14.3.11. Двухполупериодный выпрямитель нагружен на  $R_H = 1$  кОм. Параллельно нагрузке подключен конденсатор емкостью 1000 мкФ. Чему будет равно  $U_H$  при  $U_2 = 10$  В?

14.3.12. По памяти начертите схему параметрического стабилизатора напряжения.

## Варианты задания

Для всех  $R_\phi = 100 \text{ Ом}$ ,  $R_\sigma = 200 \text{ Ом}$

Номер стенда	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Подгруппа
$C_1$ , мкФ	10	20	50	5	20	10	20	50	10	Подгруппа
$C_2$ , мкФ	20	50	10	50	20	10	10	5	20	№ 1
$C_1$ , мкФ	5	10	20	50	5	10	20	50	20	Подгруппа
$C_2$ , мкФ	10	20	50	5	20	50	10	5	20	№ 2

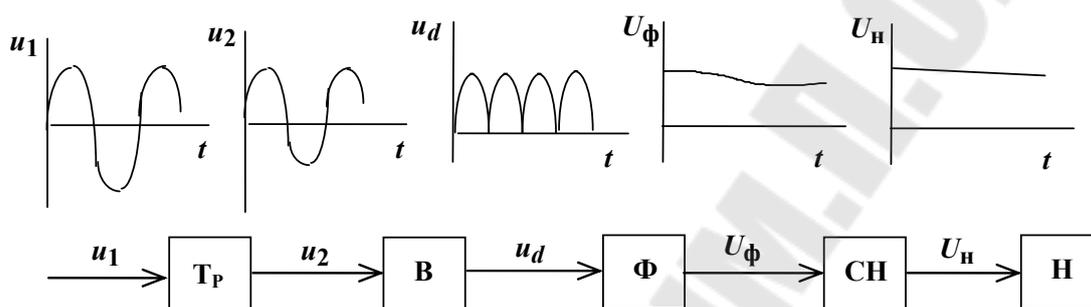


Рис. 14.1. Блок-схема вторичного источника постоянного тока

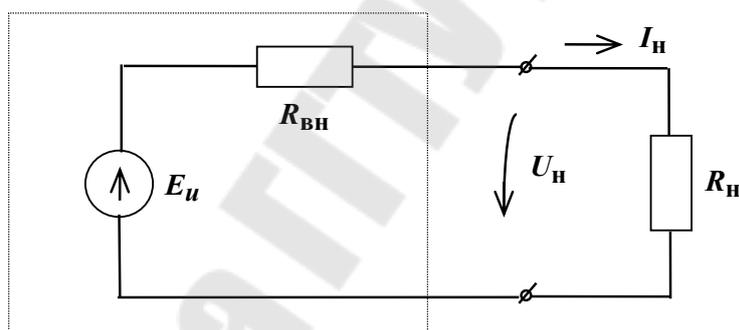


Рис. 14.2. Схема замещения источника с нагрузкой

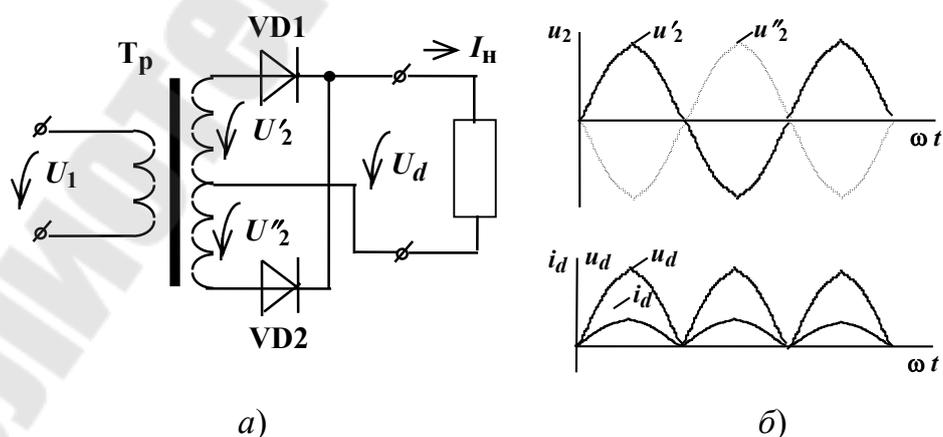


Рис. 14.3. Вторичный источник с нулевым выводом трансформатора:  
 а – электрическая схема; б – временные диаграммы

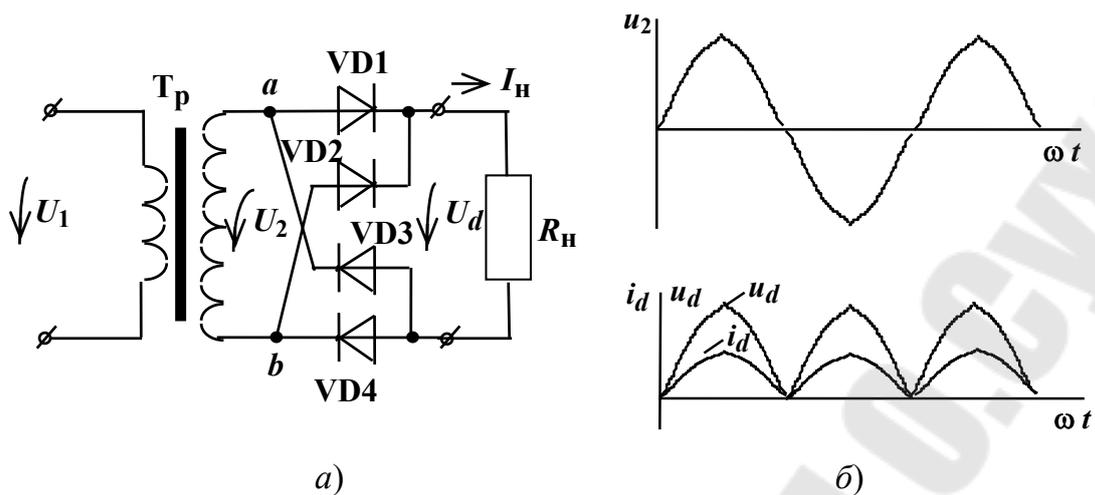


Рис. 14.4. Вторичный источник с мостовым выпрямителем:  
 а – электрическая схема; б – временные диаграммы

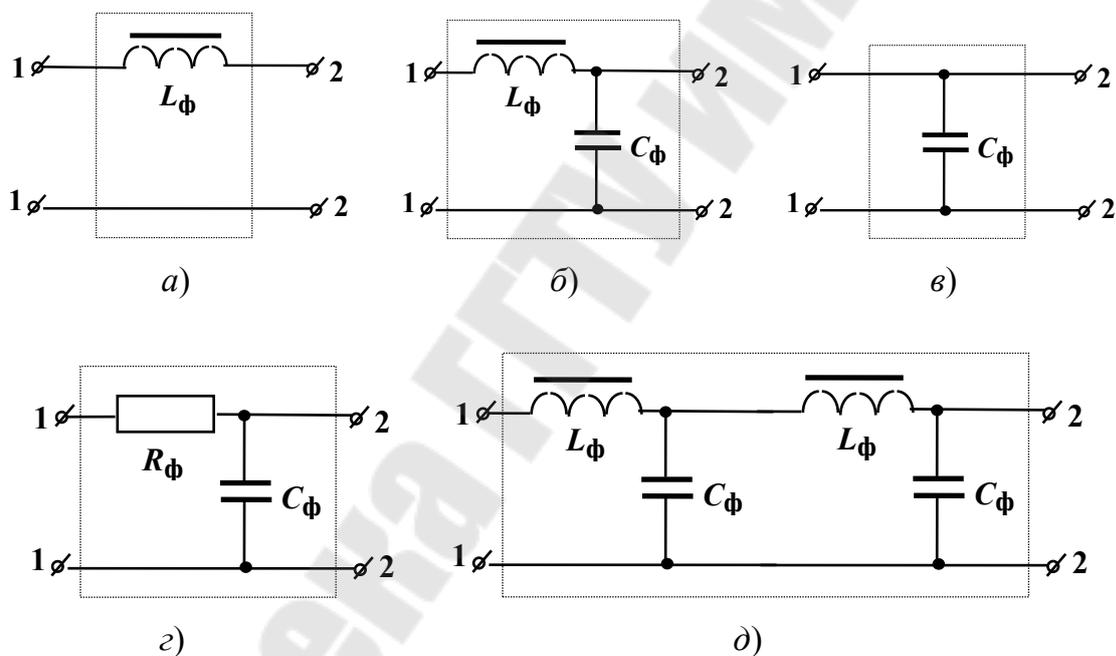


Рис. 14.5. Сглаживающие фильтры: а – С-фильтр; б – L-фильтр;  
 в – Г-образный LC-фильтр; г – Г-образный RC-фильтр;  
 д – двухзвенный Г-образный LC-фильтр

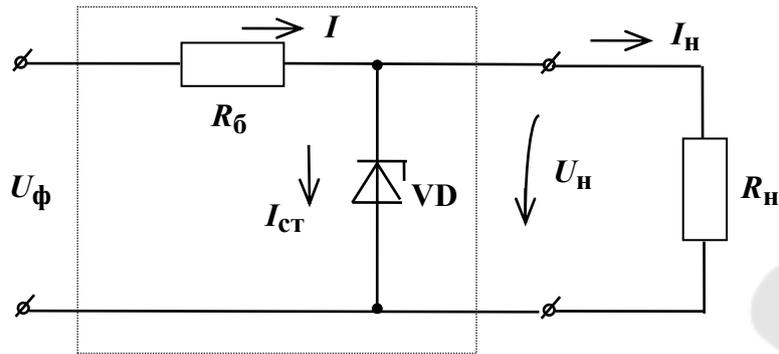


Рис. 14.6. Схема параметрического стабилизатора

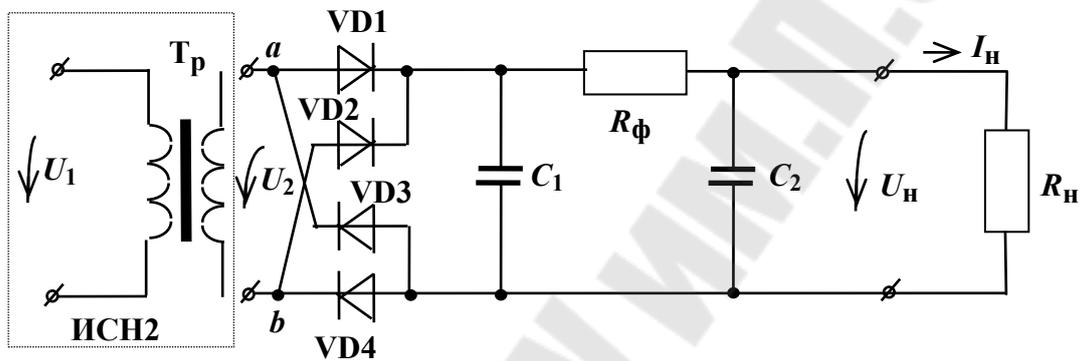


Рис. 14.7. Полная схема исследуемого вторичного источника со средним выводом трансформатора

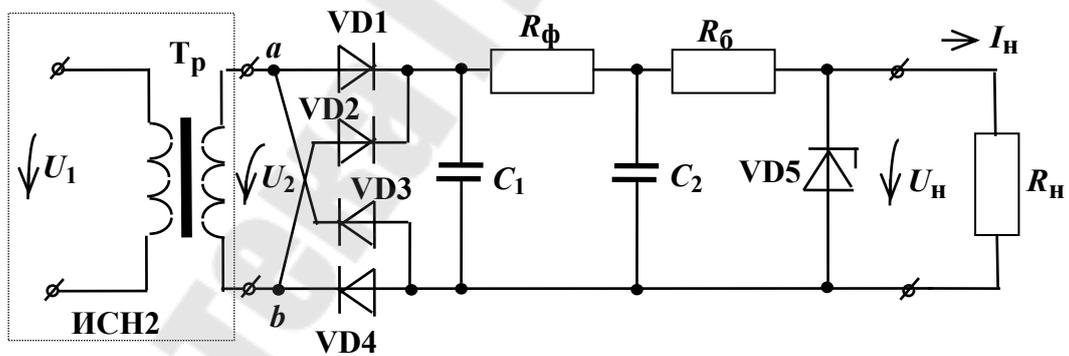


Рис. 14.8. Полная схема исследуемого вторичного источника с мостовым выпрямителем

#### 14.4. Требования к содержанию отчета

Отчет должен содержать:

- титульный лист;
- тему и цель работы;

- схему выпрямителя по рис. 14.3;
- график внешней характеристики по п. 14.2.3;
- схему выпрямителя по рис. 14.4;
- график внешней характеристики по п. 14.2.2;
- график внешней характеристики по п. 14.2.4;
- график внешней характеристики по п. 14.2.6;
- анализ результатов и выводы.

## Литература

1. Иванов, И. И. Электротехника: Основные положения, примеры и задачи / И. И. Иванов, А. Ф. Лукин, С. И. Соловьев. – 2-е изд., испр. – СПб. : Лань, 2002. – 192 с.
2. Иванов, И. И. Электротехника / И. И. Иванов, В. С. Равдоник. – М. : Высш. шк., 1984. – С. 97–101, 104–107.
3. Борисов, Ю. М. Электротехника / Ю. М. Борисов, Д. Н. Липатов. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – С. 131–137.
4. Общая электротехника / под ред. А. Т. Блажкина. – Л. : Энергия, 1979. – С. 109–118.
5. Электротехника : учеб. для неэлектротехн. специальностей вузов / под ред. В. Г. Герасимова. – М. : Высш. шк., 1985. – С. 104–114, 117–121, 305–308.
6. Горбачев, Г. Н. Промышленная электроника / Г. Н. Горбачев, Е. Е. Чаплыгин. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – С. 212–222, 275–295.
7. Забродин, Ю. С. Промышленная электроника / Ю. С. Забродин. – М. : Высш. шк., 1982. – С. 306–314.

## Содержание

Введение.....	3
<i>Лабораторная работа № 1. Исследование линейных цепей постоянного тока с одним источником ЭДС .....</i>	<i>4</i>
<i>Лабораторная работа № 2. Исследование сложной линейной цепи постоянного тока с несколькими источниками ЭДС .....</i>	<i>9</i>
<i>Лабораторная работа № 3. Исследование нелинейных цепей постоянного тока .....</i>	<i>13</i>
<i>Лабораторная работа № 4. Исследование линейной однофазной электрической цепи с последовательным соединением элементов....</i>	<i>18</i>
<i>Лабораторная работа № 5. Исследование линейной однофазной электрической цепи с параллельным соединением элементов .....</i>	<i>22</i>
<i>Лабораторная работа № 6. Исследование трехфазной электрической цепи при соединении приемников треугольником....</i>	<i>27</i>
<i>Лабораторная работа № 7. Исследование трехфазной электрической цепи при соединении приемников звездой .....</i>	<i>31</i>
<i>Лабораторная работа № 8. Исследование однофазного трансформатора .....</i>	<i>35</i>
<i>Лабораторная работа № 9. Исследование трехфазного асинхронного электродвигателя .....</i>	<i>41</i>
<i>Лабораторная работа № 10. Исследование электрических машин постоянного тока.....</i>	<i>46</i>
<i>Лабораторная работа № 11. Исследование трехфазного мостового выпрямителя.....</i>	<i>58</i>
<i>Лабораторная работа № 12. Исследование однофазного управляемого выпрямителя .....</i>	<i>60</i>
<i>Лабораторная работа № 13. Исследование стабилизаторов напряжения .....</i>	<i>63</i>
<i>Лабораторная работа № 14. Исследование вторичных источников постоянного тока на базе однофазных выпрямителей ....</i>	<i>68</i>
Литература .....	76

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

**Вершинин Андрей Николаевич**

## **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА**

**Лабораторный практикум  
по одноименному курсу для студентов  
специальности 1-36 12 01 «Проектирование  
и производство сельскохозяйственной техники»  
дневной и заочной форм обучения**

**Электронный аналог печатного издания**

Редактор *Н. В. Гладкова*  
Компьютерная верстка *Н. Б. Козловская*

Подписано в печать 30.12.13.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 4,65. Уч.-изд. л. 4,7.

Изд. № 23.

<http://www.gstu.by>

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Издательский центр Учреждения образования  
«Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого».

ЛИ № 02330/0549424 от 08.04.2009 г.

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48