

КЫРГЫЗСКО-РОССИЙСКИЙ СЛАВЯНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ЕСТЕСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
Кафедра «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии»

# **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА С ОСНОВАМИ ЭЛЕКТРОНИКИ И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Методические указания  
к выполнению лабораторных работ для бакалавров

Бишкек 2014

УДК 621.3.01

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. *М.М. Шамсутдинов*,  
канд. техн. наук, доц. *А.П. Балянов*

Составители:

*И.А. Аккозиев, Д.В. Виноградов*

Рекомендованы к изданию  
кафедрой «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии»

Э 45 ЭЛЕКТРОТЕХНИКА С ОСНОВАМИ ЭЛЕКТРОНИКИ И ЭЛЕКТРО-  
СНАБЖЕНИЯ: Методические указания к выполнению лабораторных  
работ для бакалавров / Сост.: И.А. Аккозиев, Д.В. Виноградов. Бишкек:  
КРСУ, 2014. 80 с.

В методических указаниях приведена методика проведения лабораторных работ по электротехнике и электронике.  
Предназначены для студентов бакалавров технических направлений.

© КРСУ, 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа 1. Проверка законов Ома и Кирхгофа .....	4
Лабораторная работа 2. Исследование линии передачи постоянного тока .....	12
Лабораторная работа 3. Соединение источников ЭДС в режимах источника и приемника электрической энергии .....	16
Лабораторная работа 4. Опытная проверка расчета тока по методу эквивалентного генератора .....	21
Лабораторная работа 5. Определение индуктивности катушки, емкости конденсатора .....	25
Лабораторная работа 6. Исследование резонанса напряжений .....	32
Лабораторная работа 7. Исследование трехфазной цепи, соединенной звездой и треугольником .....	38
Лабораторная работа 8. Исследование работы однофазного трансформатора .....	48
Лабораторная работа 9. Исследование характеристик диодов и простейших схем выпрямителей .....	52
Лабораторная работа 10. Исследование транзистора с общей базой и транзистора в схеме с общим эмиттером .....	62
Лабораторная работа 11. Исследование основных логических элементов .....	72

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

## ПРОВЕРКА ЗАКОНОВ ОМА И КИРХГОФА

### Цель работы

Экспериментальная проверка законов Ома и Кирхгофа на примере разветвленной цепи с двумя источниками энергии.

Ознакомление с приборами магнитоэлектрической системы, приобретение навыков по измерениям в цепях постоянного тока.

### Краткие теоретические сведения

Электрический ток в проводящей среде есть упорядоченное движение электрических зарядов. Направление тока характеризуется знаком тока. Понятия положительный ток или отрицательный ток имеют смысл, если сравнивать направление тока в проводнике с некоторым заранее выбранным ориентиром – так называемым положительным направлением.

Электротехника – это область науки и техники, изучающая электрические и магнитные явления и их использование в практических целях.

Электрическая цепь – это совокупность устройств, предназначенных для производства, передачи, преобразования и использования электрического тока.

Участок электрической цепи, по которому проходит один и тот же ток, называется ветвью.

Место соединения трех и более ветвей электрической цепи называется узлом.

Любой замкнутый путь, включающий в себя несколько ветвей, называется контуром.

В 1827 г. немецкий физик Г. Ом, проведя серию точных экспериментов, установил один из основных законов электрического тока. Он гласит: постоянный электрический ток в участке электрической цепи прямо пропорционален напряжению на этом участке.

На рис. 1.1 изображен участок цепи с сопротивлением  $R$ .

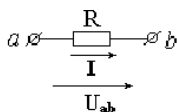


Рис. 1.1

Ток, протекающий через сопротивление  $R$ , пропорционален падению напряжения на сопротивлении и обратно пропорционален величине этого сопротивления

$$I = \frac{U_{ab}}{R}.$$

Падением напряжения на сопротивлении называется произведение тока, протекающего через сопротивление, на величину этого сопротивления. Основными законами электрических цепей, наряду с законом Ома, являются законы баланса токов в разветвлениях (первый закон Кирхгофа) и баланса напряжений на замкнутых участках цепи (второй закон Кирхгофа).

Законы Кирхгофа устанавливают соотношения между токами и напряжениями в разветвленных электрических цепях произвольного типа.

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

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

где  $n$  – число токов, сходящихся в данном узле.

Например, для узла электрической цепи (рис. 1.2) уравнение по первому закону Кирхгофа можно записать в виде

$$I_1 - I_2 + I_3 - I_4 + I_5 = 0.$$

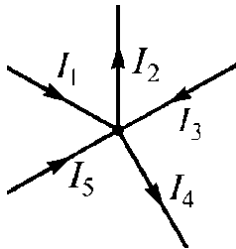


Рис. 1.2

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

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

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

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

Так, для замкнутого контура схемы (рис. 1.3)

$$E_1 - E_2 + E_3 = I_1 R_1 - I_2 R_2 + I_3 R_3 - I_4 R_4.$$

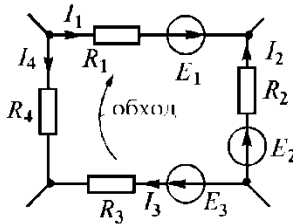


Рис. 1.3

Замечание о знаках полученного уравнения:

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

Расчет и исследование сложных электрических схем во многих случаях можно значительно облегчить за счет преобразования. Суть преобразования заключается в замене участков цепи эквивалентными, но более простыми, т.е. не вызывающими изменения напряжения и токов в остальной части цепи.

### Последовательное соединение резисторов

Если несколько резисторов соединены один за другим без разветвлений и по ним протекает один и тот же ток, такое соединение называется последовательным (рис. 1.4а). Обозначим сопротивления отдельных резисторов через  $R_1, R_2, R_3$ , а напряжения на них соответственно  $U_1, U_2, U_3$ .

По второму закону Кирхгофа имеем

$$U = U_1 + U_2 + U_3.$$

Разделим обе части формулы на ток  $I$

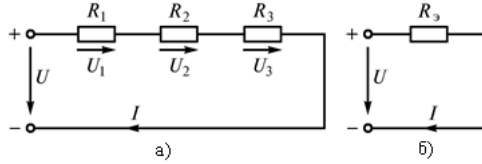


Рис. 1.4

$$\frac{U}{I} = \frac{U_1}{I} + \frac{U_2}{I} + \frac{U_3}{I},$$

или

$$R_3 = R_1 + R_2 + R_3 \dots$$

Таким образом, при последовательном соединении эквивалентное или общее сопротивление равно сумме сопротивлений отдельных участков цепи (рис. 1.4б). В общем случае

$$R_3 = \sum_{i=1}^n R_i,$$

где  $n$  – число последовательно соединенных резисторов.

Ток в этой цепи

$$I = \frac{U}{R_3}.$$

Напряжения на отдельных участках определяются по формулам

$$U_1 = IR_1; \quad U_2 = IR_2; \quad U_3 = IR_3.$$

Последовательное соединение приемников энергии широко применяется в различных областях техники. Оно используется обычно в тех случаях, когда расчетное напряжение приемника меньше напряжения источника электрической энергии.

### Параллельное соединение резисторов

Параллельным соединением приемников называется такое соединение, при котором к одним и тем же двум узлам электрической цепи присоединяется несколько ветвей.

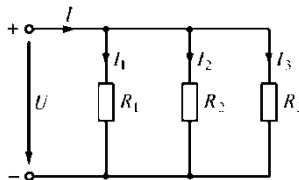


Рис. 1.5

В соответствии с законом Ома и первым законом Кирхгофа

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; I_2 = \frac{U}{R_2}; I_3 = \frac{U}{R_3};$$
$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

или

$$\frac{U}{R_3} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}.$$

Сократив обе части равенства на  $U$ , получим

$$\frac{1}{R_3} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3},$$

или

$$g_3 = g_1 + g_2 + g_3.$$

Таким образом, общая (эквивалентная) проводимость при параллельном соединении приемников равна сумме проводимостей параллельных ветвей.

Если параллельно включены  $n$  одинаковых резисторов  $R_i$ , то эквивалентное сопротивление цепи  $R_3$  в  $n$  раз меньше сопротивления одной ветви

$$R_3 = \frac{R_i}{n}.$$

Во всех случаях параллельного соединения эквивалентное сопротивление меньше самого малого из параллельно включенных.

Практический интерес представляет цепь с двумя параллельными резисторами (рис. 1.6). Эквивалентное сопротивление ее рассчитывают по формуле

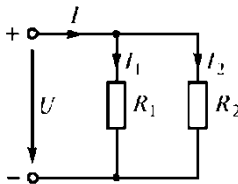


Рис. 1.6

$$R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$



Токи в ветвях можно выразить через общий ток

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{IR_3}{R_1} = \frac{IR_2}{R_1 + R_2};$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{IR_3}{R_2} = \frac{IR_1}{R_1 + R_2}.$$

Параллельное соединение имеет свои особенности: все приемники находятся под одним напряжением; при неизменном напряжении отключение одного или нескольких приемников энергии не нарушает режима работы оставшихся включенными приемников.

### Рабочее задание

#### Опыт 1

Собрать схему параллельного соединения сопротивлений.

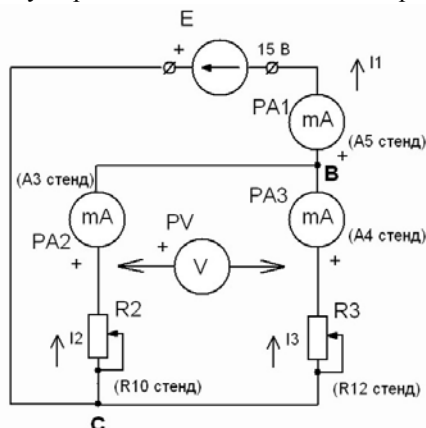


Рис. 1.7

Для начала работы с собранной схемой включить источник ЭДС  $E = 15$  В. Напряжение  $U_{bc}$  измеренное между точками BC нужно записать в табл. 1.

Ручкой переменного резистора R10 задаться значением тока на миллиамперметре (PA2) соответствующее значению тока  $I_2$  и снять показания миллиамперметров PA1 и PA3. Измерения записать в табл. 1.

Ручкой управления изменением значения переменного сопротивления R12 задаться значением тока на миллиамперметре (PA3) соответствующее значению тока  $I_3$  и снять показания миллиамперметров PA1 и PA2. Измерения записать в табл. 1.

Определить величины сопротивлений резисторов R2, R3.  
 Рассчитать эквивалентное сопротивление элементов цепи  $R_{\text{экв}}$  и подтвердить правильность расчета, найдя значение  $R_{\text{об}}$  используя закон Ома.  
 Проверить выполнение первого закона Кирхгофа.  
 Определить величины сопротивлений резисторов R2, R3 и проверить выполнение первого закона Кирхгофа.

## Опыт 2

Собрать схему смешанного соединения сопротивлений.

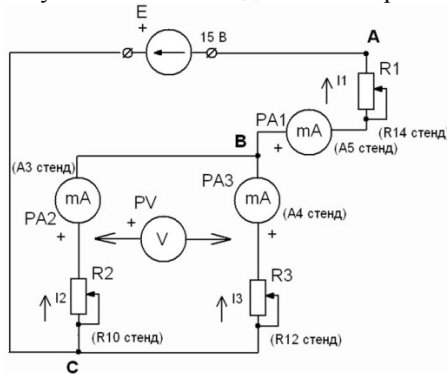


Рис. 1.8

Для начала работы с собранной схемой включить источник ЭДС  $E = 15 \text{ В}$ . Напряжение на входе цепи УАС нужно записать в табл. 2.

Плавно перемещая ручку резистора R14, задаться двумя значениями тока на миллиамперметре PA1, вольтметром измерить соответствующие им значение напряжения  $U_1$  на резисторе R14 (между точек AB), затем измерить  $U_2(3)$  на резисторах R10 и R12 (между точек BC). Значения тока (показания миллиамперметров PA1, PA2, PA3) и измеренные в контрольных точках напряжения, записать в табл. 2.

Плавно перемещая ручку резистора R10 задаться значением тока на миллиамперметре (PA2) соответствующее значению тока I2 и снять показания миллиамперметров PA1 и PA3. Значения тока (показания миллиамперметров PA1, PA2, PA3) и напряжения (показания вольтметров  $U_1$  и  $U_2(3)$ ), измеренные в контрольных точках, записать в табл. 2.

Плавно перемещая ручку резистора R12 задаться значением тока на миллиамперметре (PA3) соответствующее значению тока I2 и снять показания миллиамперметров PA1 и PA2. Значения тока (показания миллиамперметров PA1, PA2, PA3) и напряжения (показания вольтметров  $U_1$  и  $U_2(3)$ ), измеренные в контрольных точках, записать в табл. 2.

Определить величины сопротивлений резисторов R1, R2, R3. Рассчитать эквивалентное сопротивление элементов цепи R<sub>экв</sub> и подтвердить правильность расчета найдя значение R<sub>об</sub>, используя закон Ома.

Проверить действие законов Кирхгофа.

Таблица 1

№ опыта	1	2	№ опыта	3	4
$I_2, A$			$I_3, A$		
$U_{\text{вх}}, B$			$U_{\text{вх}}, B$		
$I_1, A$			$I_1, A$		
$I_3, A$			$I_2, A$		
$R_2, \text{OM}$			$R_2, \text{OM}$		
$R_3, \text{OM}$			$R_3, \text{OM}$		
$R_{\text{экв}}, \text{OM}$			$R_{\text{экв}}, \text{OM}$		
$R_{\text{об}}, \text{OM}$			$R_{\text{об}}, \text{OM}$		

Таблица 2

№ опыта	1	2	№ опыта	3	4	№ опыта	5	6
$I_1, A$			$I_2, A$			$I_3, A$		
$U_{\text{вх}}, B$			$U_{\text{вх}}, B$			$U_{\text{вх}}, B$		
$I_2, A$			$I_1, A$			$I_1, A$		
$I_3, A$			$I_3, A$			$I_2, A$		
$U_1, B$			$U_1, B$			$U_1, B$		
$U_{2(3)}, B$			$U_{2(3)}, B$			$U_{2(3)}, B$		
$R_1, \text{OM}$			$R_1, \text{OM}$			$R_1, \text{OM}$		
$R_2, \text{OM}$			$R_2, \text{OM}$			$R_2, \text{OM}$		
$R_3, \text{OM}$			$R_3, \text{OM}$			$R_3, \text{OM}$		
$R_{\text{экв}}, \text{OM}$			$R_{\text{экв}}, \text{OM}$			$R_{\text{экв}}, \text{OM}$		
$R_{\text{об}}, \text{OM}$			$R_{\text{об}}, \text{OM}$			$R_{\text{об}}, \text{OM}$		

## Содержание отчета

1. Схемы измерений.
2. Таблицы с результатами измерений и вычислений.
3. Формулы расчета.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### Цель работы

Исследование линии передачи постоянного тока с нагрузкой в конце линии. В результате выполнения работы студент должен изучить режимы работы электрической цепи, уметь рассчитывать потери напряжения и мощность потерь энергии в линии, КПД линии.

#### Основные теоретические положения

При передаче электрической энергии постоянного тока от источника к приемнику по проводам достаточно большой протяженности происходит потеря напряжения на сопротивлении линии передачи. В схеме замещения (рис. 2.1) сопротивление  $r_{л}$  имитирует сопротивление проводов линии передачи,  $R$  – сопротивление нагрузки.

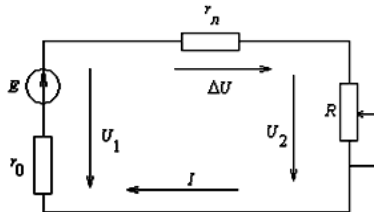


Рис. 2.1. Схема передачи энергии от источника к приемнику

Потеря напряжения в линии  $\Delta U$  равна:

$$\Delta U = U_1 - U_2 = r_{л} I,$$

где  $U_1$  и  $U_2$  – напряжения в начале и в конце линии.

Мощность потерь в линии определяется формулой:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \Delta U I = r_{л} I^2,$$

где  $P_1$  – мощность источника или мощность в начале линии

$$P_1 = U_1 I = (r_{\text{л}} + R) I^2$$

$P_2$  – мощность потребления энергии нагрузкой или мощность в конце линии:

$$P_2 = U_2 I = R I^2 = \frac{R U_1^2}{(r_{\text{л}} + R)^2}$$

КПД:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I}{U_1 I} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{R I}{(r_{\text{л}} + R) I} = \frac{R}{r_{\text{л}} + R}$$

Чтобы повысить КПД линии передачи, нужно уменьшить мощность потерь энергии на линии.

Режимы работы электрической цепи (рис. 2.1) будут определять сопротивление нагрузки  $R$ . В режиме холостого хода тока в цепи нет, поскольку  $R = \infty$  (цепь разомкнута), а режиме короткого замыкания  $R = 0$ . При согласованном режиме мощность потребления энергии приемником  $P_2$  должна быть максимальной.

С энергетической точки зрения согласованный режим является нерациональным ( $\eta = 0,5$ ), но он находит применение там, где важно получить максимальную мощность на нагрузке, а низкий КПД имеет второстепенное значение из-за малых абсолютных значений мощности (например, в некоторых радиотехнических устройствах, в автоматике и измерительной технике).

Характер зависимостей  $U_1, U_2, \Delta U, P_1, P_2, \eta$  от тока  $I$  представлен на рис. 2.2.

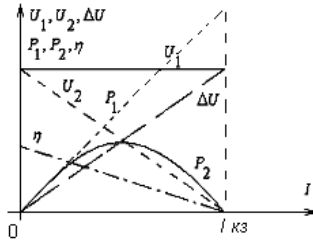


Рис. 2.2. График зависимостей параметров цепи от изменения тока.

Напряжение, подаваемое на двухполюсник, то есть напряжение в начале линии остается неизменным ( $U_1 = \text{const}$ ) при любом значении сопротивления нагрузки. При холостом ходе, когда  $R = \infty$ , ток в линии равен нулю, потери напряжения  $\Delta U$  и мощности  $\Delta P$  также равны нулю, а КПД линии:

$$\eta = \frac{U_2}{U_1} = 1$$

При включении нагрузки  $R$  ток в линии будет зависеть от величины  $R$ :

$$I = \frac{U}{r_l + R}$$

С уменьшением сопротивления  $R$  ток в линии будет увеличиваться, напряжение в конце линии  $U_2$  уменьшаться, а мощность энергии, потребляемой нагрузкой, будет сначала увеличиваться, а затем уменьшаться, достигая своего наибольшего значения  $P_{2\max}$  при согласованном режиме.

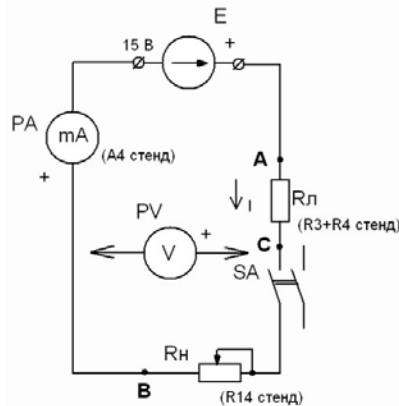
При коротком замыкании нагрузки, когда сопротивление равно нулю ( $R = 0$ ), ток в линии достигает максимального значения:

$$I_{к.з} = \frac{U_1}{r_l}$$

тогда напряжение на зажимах нагрузки  $U_2$ , мощность  $P_2$  будут равны нулю.

### Рабочее задание

Собрать электрическую схему исследуемой электрической цепи (рис. 2.3).



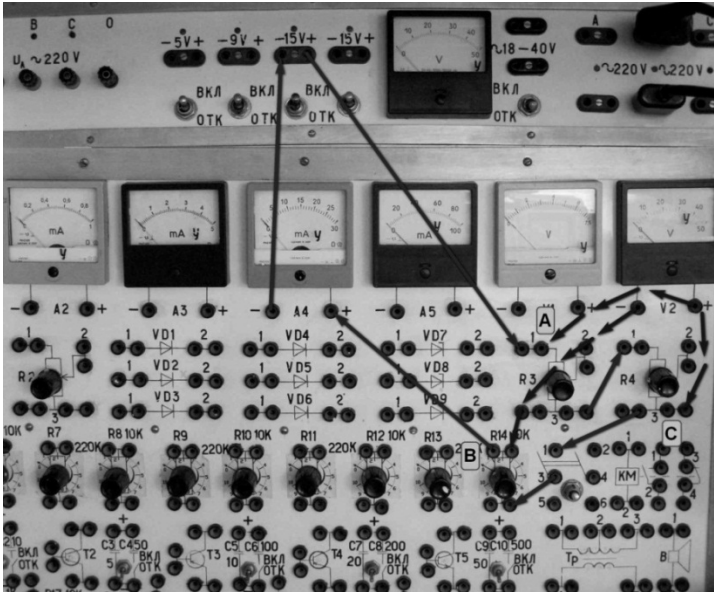


Рис. 2.3

При разомкнутом ключе SA, измерить силу тока амперметром PA (A4 на стенде) и напряжение  $U_1$  в начале линии передачи подключив вольтметр PV (V2 на стенде) между точками A и B, показания приборов записать в табл. 1 в строчку «Режим холостого хода».

Подключить электрическую цепь ключом SA к источнику E и, вращая ручку переменного резистора  $R_n$  (R14 на стенде), тем самым, изменяя сопротивления нагрузки от бесконечности (режим холостого хода, цепь разомкнута  $R_n = \infty$ ) до нуля (режим короткого замыкания,  $R_n = 0$ ), сделать несколько измерений силы тока на амперметре PA (A4 на стенде) и напряжения  $U_2$  подключив вольтметр PV (V2 на стенде) в конце линии передачи (точки B и C).

Измерить напряжения  $U_1$  и  $U_2$ , а также ток  $I$  при согласованном режиме, когда  $R_l = R_n$ .

Результаты всех измерений внести в табл. 1.

Таблица 1

№	Режимы	Измерено			Вычислено					
		$U_1$ , В	$U_2$ , В	$I$ , мА	$\Delta U$ , В	$P_1$ , Вт	$P_2$ , Вт	$\Delta p$ , Вт	$R_n$ , Ом	$\eta$
1	Холостой ход									
2										
3										
4	Согласованный режим									
5										
6										
7	Короткое замыкание									

### Содержание отчета

1. Рабочая схема.
2. Таблица с опытными и расчетными данными (табл. 1).
3. Графики зависимостей.
4. Выводы по работе.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3 СОЕДИНЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ЭДС В РЕЖИМАХ ИСТОЧНИКА И ПРИЕМНИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

### Цель работы

Приобретение практических навыков измерения. Изучение особенностей реализующихся в электрической цепи при встречном и согласованном включении источников энергии.

### Краткие теоретические сведения

Преобразование любого вида энергии в электрическую энергию в источниках происходит за счет электродвижущей силы (ЭДС). Электродвижущая сила  $E$  характеризует действие сторонних (неэлектрических) сил в источниках постоянного или переменного тока. В замкнутом проводящем контуре она равна работе этих сил по перемещению единичного положительного заряда вдоль этого контура. Сторонние силы приводят в движение заряженные частицы внутри источника электрической энер-



гии: генераторов, гальванических элементов и т.д. ЭДС определяется как отношение работы  $A$ , совершаемой сторонними силами при переносе заряженной частицы внутри источника, к ее заряду:

$$E = \frac{A}{Q}.$$

Если  $Q = 1$  Кл, то  $E = A$ .

Следовательно, ЭДС равна работе, совершаемой сторонними силами при переносе единицы заряда внутри источника от зажима с меньшим потенциалом к зажиму с большим потенциалом. Ее можно представить разностью потенциалов или напряжением между положительным и отрицательным зажимами источника энергии при отсутствии в нем тока.

В замкнутой электрической цепи под действием ЭДС источника возникает ток. Цепь, в которой ток не изменяется во времени, называют цепью постоянного тока. При расчете и анализе электрических цепей источник электрической энергии представляют либо источником ЭДС, либо источником тока.

Идеальным источником ЭДС (рис. 3.1) называют такой источник энергии, ЭДС которого не зависит от протекающего через него тока и равна ЭДС реального источника, а его внутреннее сопротивление равно нулю. На рис. 3.1 показаны условные обозначения и вольтамперная характеристика идеального источника ЭДС.

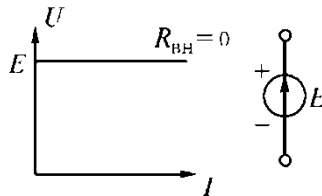


Рис. 3.1

За положительное направление ЭДС источника принимается направление возрастания потенциала внутри этого источника. Внутреннее сопротивление  $R_{\text{вн}}$  показывает, что часть энергии, вырабатываемой источником, используется внутри источника.

Схема замещения реального источника ( $R_{\text{вн}} \neq 0$ ) может быть представлена в виде последовательного соединения идеального источника ЭДС и внутреннего сопротивления (рис. 3.2). Реальный источник называют источником напряжения.

Ток в цепи (рис. 3.2) определяется по закону Ома:

$$I = \frac{E}{R + R_{\text{вн}}}.$$

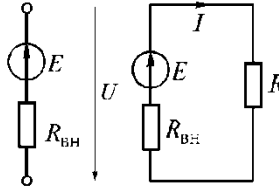


Рис. 3.2

Из последней формулы видно, что внутреннее сопротивление оказывает влияние на ток в электрической цепи.

Напряжение на зажимах источника или на нагрузке определяется по формуле

$$U = IR = \frac{ER}{R + R_{\text{вн}}} = E - IR_{\text{вн}}.$$

### Последовательное соединение источников энергии

В практике последовательное и согласное включение источников применяют для увеличения напряжения. Рассмотрим схему с двумя согласно и одним встречно включенными источниками (рис. 3.3).

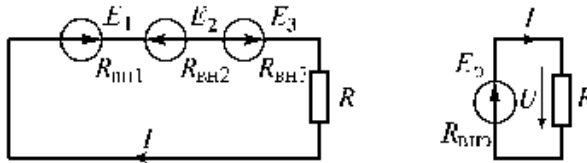


Рис. 3.3

По второму закону Кирхгофа запишем

$$E_1 - E_2 + E_3 = IR_{\text{вн1}} + IR_{\text{вн2}} + IR_{\text{вн3}} + IR.$$

Отсюда

$$I = \frac{E_1 - E_2 + E_3}{R_{\text{вн1}} + R_{\text{вн2}} + R_{\text{вн3}} + R} = \frac{E_э}{R_{\text{внэ}} + R},$$

где  $E_э = E_1 - E_2 + E_3$ ;  $R_{\text{внэ}} = R_{\text{вн1}} + R_{\text{вн2}} + R_{\text{вн3}}$ .

Напряжения на зажимах источников и приемника  
 $U_1 = E_1 - IR_{вн1}$ ;  $U_2 = E_2 + IR_{вн2}$ ;  $U_3 = E_3 - IR_{вн3}$ ;  $U = IR$ .

### Рабочее задание

#### Опыт 1

- Используя вольтметр PV (V2 на стенде) необходимо измерить напряжение на E1 и E2.
- Собрать схему.

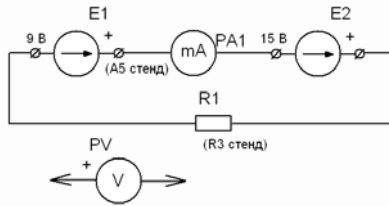


Рис. 3.4. Схема согласного соединения сопротивлений

- В собранной схеме необходимо измерить ток амперметром PA1 (A5 на стенде) и падение напряжения на сопротивлении R (R3 на стенде, гнезда 2 и 3).
- Используя вольтметр PV (V2 на стенде) измерить напряжение  $U_1$  и  $U_2$  на источниках энергии.
- Данные измерений занести в табл. 1.

Таблица 1

Соединение источников	Опытные данные						Расчетные данные											
	E1, В	U1, В	E2, В	U2, В	U <sub>ит</sub> , В	I <sub>ит</sub> , мА	U <sub>01</sub> , В	U <sub>02</sub> , В	R <sub>01</sub> , Ом	R <sub>02</sub> , Ом	I, мА	P <sub>1</sub> , Вт	R <sub>ит</sub> , Ом	P <sub>2</sub> , Вт	P <sub>01</sub> , Вт	P <sub>02</sub> , Вт	P <sub>ит</sub> , Вт	h
Согласное включение																		
Встречное включение																		

## Опыт 2

Собрать схему встречного соединения источников энергии

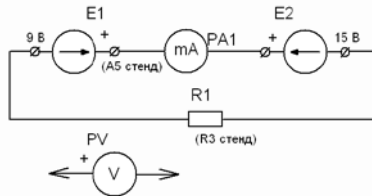


Рис. 3.5. Схема встречного соединения источников энергии

2. В собранной схеме также необходимо измерить ток амперметром PA1 (A5 на стенде) и падение напряжения на сопротивлении R (R3 на стенде, гнезда 2 и 3).

3. Используя вольтметр PV (V2 на стенде) измерить напряжение  $U_1$  и  $U_2$  на источниках энергии.

4. Данные измерений занести в табл. 1.

5. Проведите расчет данных табл. 1.

6. Данные расчета занесите в табл. 1.

Расчетные формулы:

1)  $U_0 = E - U$ ;

2)  $R_0 = \frac{U_0}{I_{\text{Опыт}}}$ ;

3)  $U_n = I * U$ ;

4)  $I_{\text{(расчет)}} = \frac{E1 \pm E2}{R_n + r_{01} + r_{02}}$ ;

5)  $P = U * I$ ;

6)  $P_0 = U_0 * I$ ;

7)  $h = \frac{P_n}{P_1 + P_2}$ .

## Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Схемы измерений.
3. Таблицы с результатами измерений и вычислений.
4. Формулы расчета.
5. Расчетные формулы, расчет встречного и согласного включения источников ЭДС.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4 ОПЫТНАЯ ПРОВЕРКА РАСЧЕТА ТОКА ПО МЕТОДУ ЭКВИВАЛЕНТНОГО ГЕНЕРАТОРА

## Цель работы

Определение опытным путем параметров эквивалентного генератора.

Выяснить какие особенности реализуются в электрической цепи, и в чем заключается методика расчета схемы по методу эквивалентного генератора.

## Основные теоретические сведения

При исследовании процессов в сложных электрических цепях часто появляется необходимость определить ток, напряжение и мощность только в одной ветви. В этом случае выделяют исследуемую ветвь, присоединенную к сложной цепи в двух точках. Остальная часть электрической схемы может быть условно представлена некоторыми прямоугольниками с двумя зажимами.

Часть электрической схемы произвольной конфигурации с двумя выделенными зажимами называется двухполюсником. Двухполюсники, содержащие источники электрической энергии, называют активными. Если в двухполюсниках нет источников, их называют пассивными. В дальнейшем активные двухполюсники будем обозначать прямоугольниками с буквой А (рис. 4.1б), а пассивные – прямоугольниками с буквой П (рис. 4.1в).

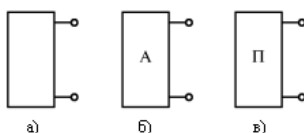


Рис. 4.1

Всякий пассивный двухполюсник является потребителем электрической энергии и характеризуется сопротивлением  $R_{вх}$ , называемым внутренним или входным.

По отношению к выделенной ветви активный двухполюсник можно заменить эквивалентным генератором, ЭДС которого равна напряжению холостого хода на выделенной ветви, а внутреннее сопротивление равно входному сопротивлению пассивного двухполюсника.

Выделим в электрической цепи одну ветвь с сопротивлением  $R_{ab}$ , присоединенную в точках  $a$  и  $b$  к активному двухполюснику (рис. 4.2а).

После замены активного двухполюсника эквивалентным генератором схема принимает вид, показанный на рис. 4.2б.

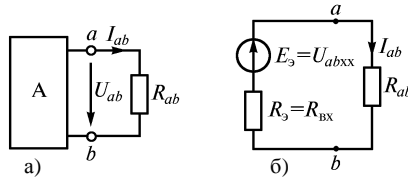


Рис. 4.2

Ток в выделенной ветви

$$I_{ab} = \frac{U_{ab \text{ xx}}}{R_{ab} + R_{\text{вх}}} = \frac{E_3}{R_{ab} + R_3},$$

где  $R_{\text{вх}} = R_3$  – входное сопротивление двухполюсника по отношению к зажимам  $ab$ .

Расчет по методу эквивалентного генератора сводится к следующему:

- а) находят напряжение на зажимах разомкнутой ветви  $ab$ ;
- б) определяют входное сопротивление  $R_{\text{вх}}$  всей схемы по отношению к зажимам  $ab$  при короткозамкнутых источниках ЭДС;
- в) определяют ток.

При  $R_{ab} = 0$  в цепи будет режим короткого замыкания. Ток короткого замыкания определяют по формуле

$$I_{\text{кз}} = \frac{U_{ab \text{ xx}}}{R_{\text{вх}}}.$$

Отсюда входное сопротивление

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{ab \text{ xx}}}{I_{\text{кз}}},$$

то есть измеряют напряжение холостого хода на зажимах разомкнутой ветви  $U_{ab \text{ xx}}$  и ток короткого замыкания  $I_{\text{кз}}$  ветви.

### Рабочее задание

Собрать электрическую схему исследуемой электрической цепи (рис. 4.3).

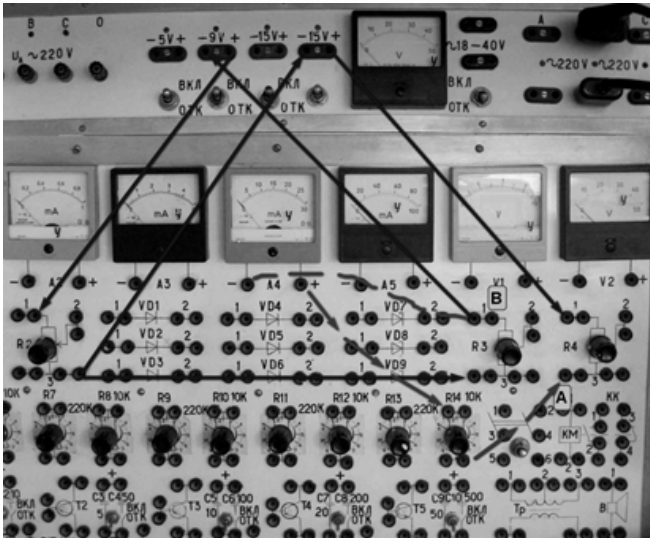
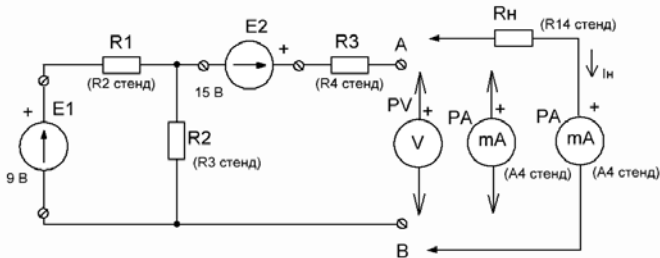


Рис. 4.3

Измерить вольтметром (V2 на стенде) величины  $E_1$ ,  $E_2$  источников энергии и записать в табл. 1.

Таблица 1

Измеренные величины						Результаты опыта			Расчет по опыту		Расчет по измеренным данным		
$E_1, В$	$E_2, В$	$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$R_3, Ом$	$R_H, Ом$	$U_{XX}, В$	$I_{K3}, А$	$I_H, А$	$R_3, Ом$	$I_H, А$	$E_3, В$	$R_3, Ом$	$I_H, А$

Измерить омметром величины сопротивлений  $R_1, R_2, R_2, R_H$  и записать в табл. 1.

Опыт 1:

Измерить  $U_{XX}$  (вольтметр  $V_2$  на стенде) подключив вольтметр к гнездам «А» и «В» (опыт холостого хода).

Опыт 2:

Подключить к гнездам «А» и «В» миллиамперметр ( $A_4$  на стенде), проделать опыт короткого замыкания для измерения тока  $K.3$ .

Опыт 3:

Подключить к гнездам «А» и «В» нагрузку  $R_H$  и измерить ток нагрузки  $I_H$ . Результаты измерений занести в табл. 1.

Расчетные формулы:

$$R_3 = \frac{U_{AB\ XX}}{I_{K3}}, \quad I_H = \frac{U_{AB\ XX}}{R_3 + R_H},$$

$$E_3 = \frac{\frac{E_1}{R_1}}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_2}} + E_2, \quad R_3 = R_3 + \frac{R_1 * R_2}{R_1 + R_2}, \quad I_H = \frac{E_3}{R_3 + R_H}.$$

Примечание: Внутренним сопротивлением источников пренебрегаем, считая их идеальными.

### Обработка и анализ результатов

1. Занести результаты измерений в таблицу 1.
2. Провести расчет параметров эквивалентного генератора по измеренным данным.
3. Произвести расчет  $R_3$  и  $I_H$  по опытным данным.
4. Расчетные данные внести в табл. 1.
5. Сравнить опытные и расчетные данные.



## Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Схемы исследования. Таблица.
3. Расчетные формулы, расчет.
4. Краткие выводы по эксперименту (устно при защите).

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ КАТУШКИ, ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА

Цель работы. Изучение основных закономерностей электрических цепей переменного тока и знакомство с простейшими способами измерения индуктивности и емкости. Проверка закона Ома для переменного тока.

#### Краткие теоретические сведения

Под действием переменной электродвижущей силы (ЭДС) в электрической цепи, в ней возникает переменный ток.

Переменным называется такой ток, который изменяется по направлению и по величине. В данной работе рассматривается только такой переменный ток, величина которого изменяется периодически по синусоидальному закону.

Рассмотрение синусоидального тока вызвано тем обстоятельством, что все крупные электростанции вырабатывают переменные токи, весьма близкие к синусоидальным токам.

Переменный ток в металлах представляет собой движение свободных электронов то в одном, то в противоположном направлении. При синусоидальном токе характер этого движения совпадает с гармоническими колебаниями. Таким образом, синусоидальный переменный ток имеет период  $T$  – время одного полного колебания и частоту  $\nu$  – число полных колебаний за единицу времени. Между этими величинами имеется зависимость  $\nu = 1/T$ ,  $T = 1/\nu$ .

Циклическая частота равна  $\omega = 2\pi/T = 2\pi\nu$ .

Цепь переменного тока, в отличие от цепи постоянного тока, допускает включение конденсатора.

Если обкладки конденсатора присоединить к источнику постоянного тока, то в цепи пойдет быстро уменьшающийся ток, который прекратится, когда на обкладках конденсатора возникнет разность потенциалов, компенсирующая ЭДС источника тока. Если же обкладки конденсатора

сатора присоединить к источнику переменной ЭДС, то они непрерывно будут перезаряжаться, и в цепи все время будет идти ток.

Соединим последовательно конденсатор, емкость которого  $C$ , с катушкой, имеющей активное сопротивление  $R$  и индуктивность  $L$  (сопротивление проводящих проводов будем считать малым по сравнению с  $R$ ; к концам этой цепи  $M$  и  $N$  (рис. 5.1) приложим переменную ЭДС

$$e = e_0 \sin \omega t,$$

где  $e$  – мгновенное значение ЭДС;

$e_0$  – максимальная (амплитудная) ЭДС;

$\omega$  – циклическая частота переменной ЭДС;

$t$  – время.

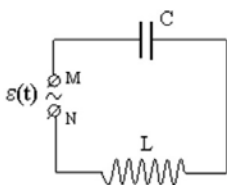


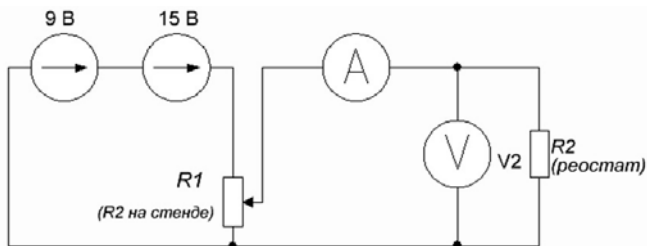
Рис. 5.1

## Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

### Опыт 1

#### Определение активного сопротивления $R$ катушки

1. Собрать схему (рис. 5.2).



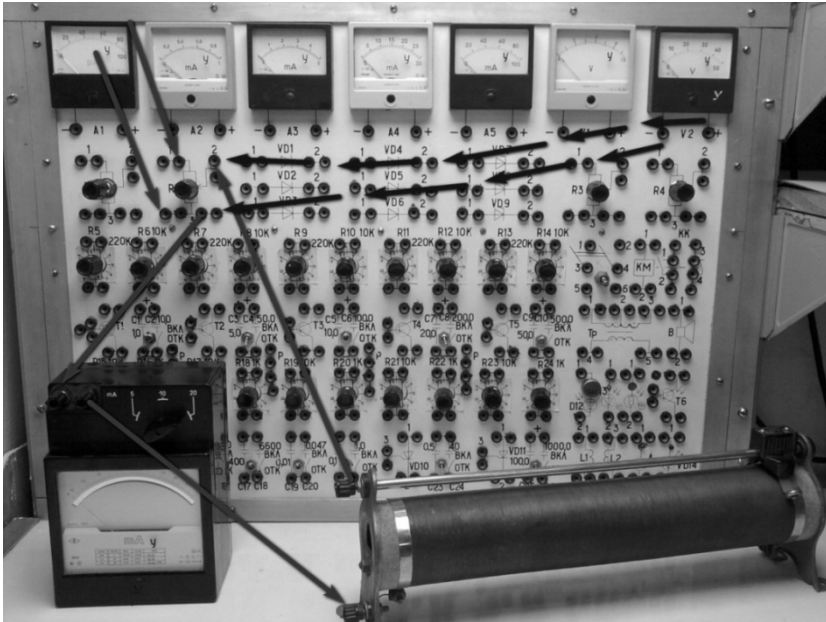


Рис. 5.2

2. Установить на реостате R2 максимальное сопротивление, изменив положение ползунка ручкой управления.
3. Подключить схему к источникам питания.
4. Медленно перемещая ручку резистора R1, установить ее в такое положение, чтобы стрелки амперметра и вольтметра дали достаточные для отсчета отклонения.
5. Записать показания амперметра и вольтметра,
6. По формуле закона Ома для участка цепи постоянного тока  $R = U/I$  определить активное сопротивление катушки R.
7. Продолжая уменьшать сопротивление реостата, определить еще две пары значений величин  $U$  и  $I$ , подставляя в формулу  $R = U/I$ , определить величину R.
8. Определить среднее значение активного сопротивления катушки

$$R_{cp} = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{3}.$$

9. Результаты измерений заносят в табл. 1.

Таблица 1

	1	2	3
$U, В$			
$I, А$			
$R = U/I, Ом$			

**Опыт 2**  
**Определение индуктивности L катушки**

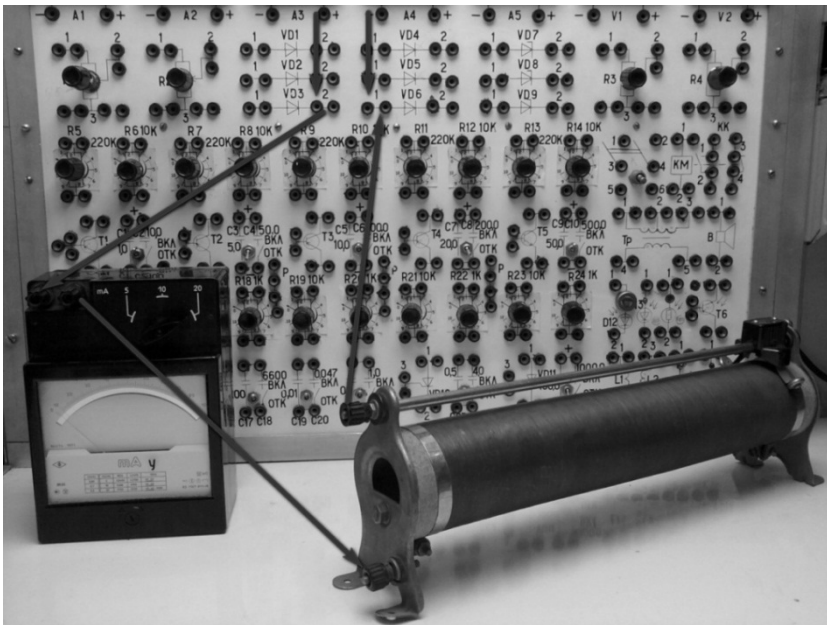
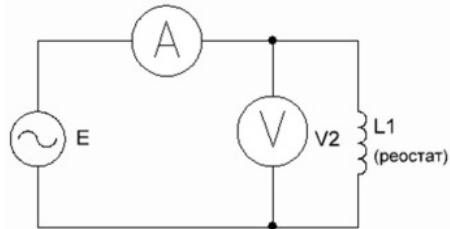


Рис. 5.3

1. Собрать схему (рис. 5.3). При выполнении данного опыта использовать амперметр и вольтметр переменного тока.
2. Подключить схему к источнику переменного тока.
3. Перемещая ручку управления источника переменного тока, установить ее в такое положение, чтобы стрелки амперметра и вольтметра дали достаточные для отсчета отклонения.
4. Записать показания амперметра и вольтметра.
5. В данном случае амперметр и вольтметр будут уже показывать эффективные значения  $U_{\text{эф}}$  напряжения и тока  $I_{\text{эф}}$ . По формуле

$$Z_L = \frac{U_{\text{эф}}}{I_{\text{эф}}}$$

определить величину  $Z_L$ .

Опыт выполняют три раза и вычисляют среднее значение этой величины  $Z_{L \text{ ср}}$ .

6. Найденную величину  $Z_L \text{ ср}$  подставить в формулу

$$L = \frac{\sqrt{Z_L^2 - R^2}}{\omega}$$

и, полагая  $\nu = 50$  Гц, определить индуктивность катушки  $L$ .

Результаты измерений занести в табл. 2.

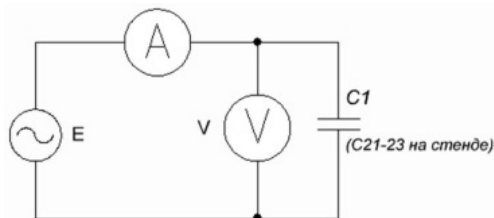
Таблица 2

	1	2	3
$U_{\text{эф}}, \text{ В}$			
$I_{\text{эф}}, \text{ А}$			
$Z_L, \text{ Ом}$			

### Опыт 3

#### Определение емкости $C$ конденсатора

Собрать схему согласно рис. 5.4.



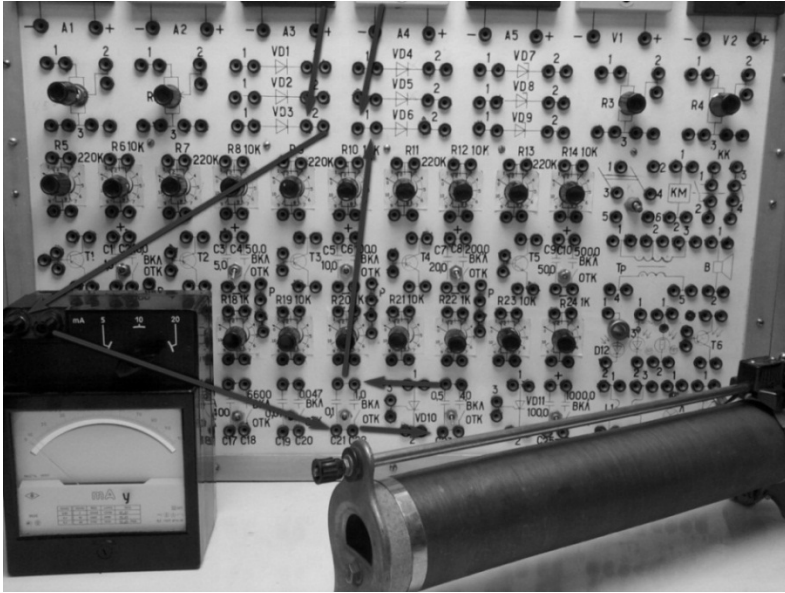


Рис. 5.4

На схеме рис. 5.4 обозначения те же, что и на схеме рис. 5.3, только вместо катушки включен конденсатор  $C$ .

1. При выполнении данного опыта использовать амперметр и вольтметр переменного тока.
2. Подключить схему к источнику переменного тока.
3. Перемещая ручку управления источника переменного тока, установить ее в такое положение, чтобы стрелки амперметра и вольтметра дали достаточные для отсчета отклонения.
4. Записать показания амперметра и вольтметра.
5. В данном случае амперметр и вольтметр будут уже показывать эффективные значения  $U_{эф}$  напряжения и тока  $I_{эф}$ . По формуле

$$Z_C = \frac{U_{эф}}{I_{эф}}$$

три раза определяются величина  $Z_C$  и затем определяется среднее значение этой величины. Величину  $Z_C$  подставить в формулу

$$C = \frac{1}{\omega Z_C}$$

и определить емкость  $C$  конденсатора.

Результаты измерений занести в табл. 3.

Таблица 3

	1	2	3
$U_{ЭФ}$ , В			
$I_{ЭФ}$ , А			
$Z_C$ , Ом			

#### Опыт 4 Проверка закона Ома для переменного тока

Собрать схему согласно рис. 5.5.

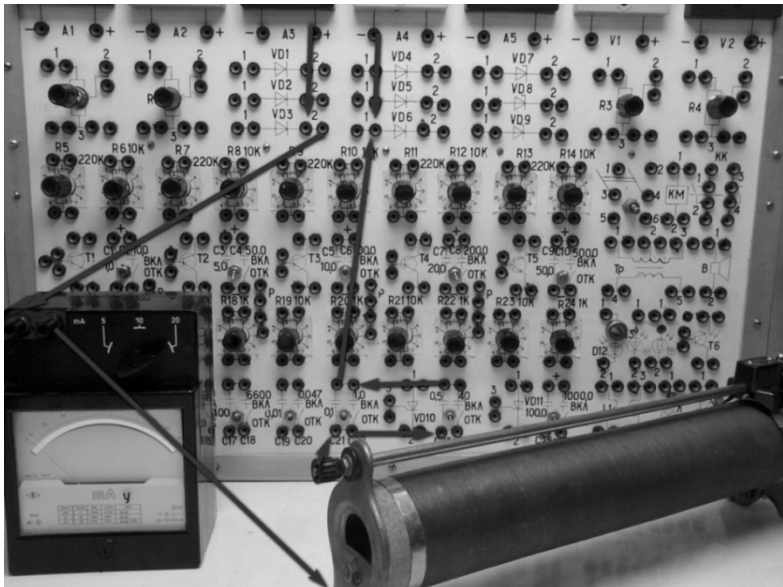
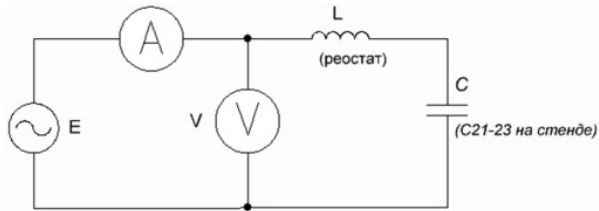


Рис. 5.5

На схеме (рис. 5.5) обозначения прежние.

1. При выполнении данного опыта использовать амперметр и вольтметр переменного тока.
2. Подключить схему к источнику переменного тока.
3. Перемещая ручку управления источника переменного тока, установить ее в такое положение, чтобы стрелки амперметра и вольтметра дали достаточные для отсчета отклонения;
4. Записать показания амперметра и вольтметра;

$$Z = \frac{U_{\text{эф}}}{I_{\text{эф}}}.$$

Определить величину полного сопротивления цепи  $Z$  и вычислить среднее значение этой величины. Результат измерений занести в табл. 4.

Таблица 4

	1	2	3
$U_{\text{эф}}, \text{В}$			
$I_{\text{эф}}, \text{А}$			
$Z, \text{Ом}$			

Расчитанную величину сопоставить с величиной, вычисленной по формуле

$$Z = R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2$$

при подстановке в нее значений величин  $R$ ,  $L$  и  $C$ , полученных в 1, 2 и 3 опытах.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6

### ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСА НАПРЯЖЕНИЙ

Цель работы:

Изучение резонансных свойств и частотных характеристик последовательного контура с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью.

#### Основные теоретические положения

Явление резонанса наступает при совпадении частоты источника питания с частотой свободных колебаний контура (рис. 6.1).



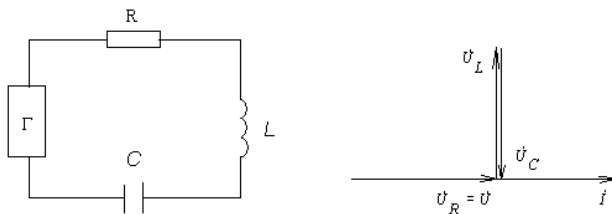


Рис. 6.1

При этом реактивные сопротивления катушки и конденсатора оказываются равными по величине:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}. \quad (1)$$

Добиться этого равенства можно изменением одной из трех величин –  $\omega$ ,  $L$ ,  $C$ .

Угловая частота, при которой наступает резонанс, называется резонансной частотой и определяется из выражения (1)

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}. \quad (2)$$

В случае гармонического воздействия модуль полного сопротивления:

$$z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Аргумент этого сопротивления, равный по величине разности фаз приложенного напряжения и тока в контуре, определяется как:

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}.$$

Амплитуда тока в контуре:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}.$$

В режиме резонанса ток в цепи приобретает максимальное значение и становится равным:

$$I_0 = \frac{U}{R} \quad (3)$$

и совпадает по фазе с приложенным напряжением. Векторная диаграмма для режима резонанса приведены на рис. 6.1.

При этом напряжение на конденсаторе  $U_C$  и на катушке  $U_L$

$$U_C = U_L = I_0 \cdot \omega_0 \cdot L = \frac{I_0}{\omega_0 \cdot C} \quad (4)$$

и превышают напряжение на зажимах цепи, если  $\frac{1}{\omega_0 \cdot C} > R$  и  $\omega_0 \cdot L > R$ .

Отношение

$$\frac{\omega_0 \cdot L}{R} = \frac{1/\omega_0 \cdot C}{R} = \frac{\sqrt{L/C}}{R} = \frac{\rho}{R} = Q$$

называется добротностью цепи. Величину  $\alpha$ , обратную добротности, называют затуханием:

$$\alpha = \frac{1}{Q} = \frac{R}{\rho}, \quad (5)$$

где  $\rho = \sqrt{L/C}$  – волновое сопротивление цепи.

Величина добротности показывает, во сколько раз падение напряжения на индуктивности или емкости превышает напряжение, приложенное к цепи, в режиме резонанса напряжений:  $\frac{U_C}{U} = \frac{U_L}{U} = Q$ .

Для изучения резонанса напряжений наибольший интерес представляют частотные зависимости  $I(\omega)$ ,  $U_L(\omega)$  и  $U_C(\omega)$ , разности фаз приложенного напряжения и тока  $\varphi(\omega)$ . Такие кривые представлены на рис. 6.2а. Как видно из этого рисунка, максимум  $U_L$  имеет место при частоте большей  $\omega_0$ , а максимум  $U_C$  – при частоте меньшей  $\omega_0$ : расхождение будет тем больше, чем больше величина затухания. При изменении частоты от 0 до  $\omega_0$  реактивное сопротивление цепи (рис. 6.2б)  $X = X_C$  имеет емкостный характер и изменяется от  $-\infty$  до 0. При этом ток возрастает от нуля до наибольшего значения  $U/R$ , а угол  $\varphi$  сдвига фаз между током и напряжением изменяется от  $-\pi/2$  до 0. При изменении частоты от  $\omega_0$  до  $\infty$  результирующее реактивное сопротивление возрастает

от 0 до  $\infty$  и имеет уже индуктивный характер. При этом ток уменьшается от наибольшего значения до нуля, а угол  $\varphi$  возрастает от 0 до  $+\pi/2$ .

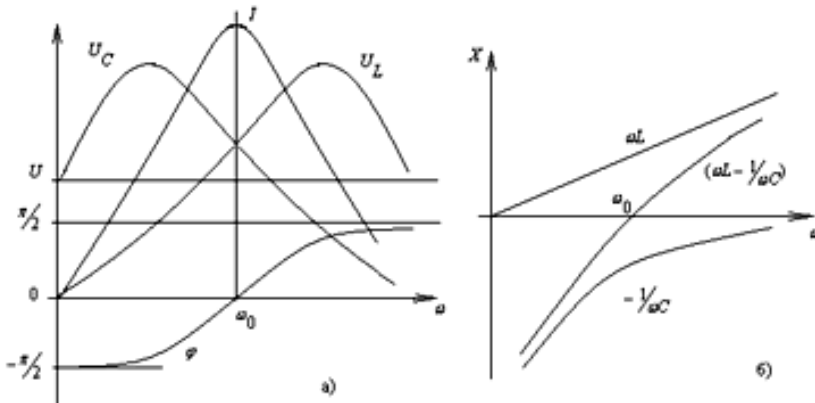


Рис. 6.2

Влияние параметров цепи на вид резонансной кривой  $I(\omega)$  можно учитывать, используя величину добротности  $Q$ .

Используя величину добротности, определенную на основании графических зависимостей, легко найти активное сопротивление цепи.

### Описание установки

На стенде находятся: генератор сигналов специальной формы, осциллограф для наблюдения сдвига фаз напряжения и тока, вольтметр универсальный и панель с элементами электрической цепи.

В качестве приемников энергии в данной работе применяются: резистор с сопротивлением  $R$ , катушка индуктивности с параметрами  $R_L, L$  (изменение индуктивности выполняется переключением тумблеров на касете), батарея конденсаторов  $C$  (емкость батареи изменяется переключением тумблеров на касете).

### Рабочее задание

1. Собрать цепь согласно рис. 6.3. После проверки цепи преподавателем включить генератор.
2. При фиксированных значениях  $R, L, C$  настроить контур в резонанс (о резонансе можно судить по максимальному показанию миллиам-

перметра при изменении частоты генератора и  $U_G = const$ ). При возникновении резонанса в цепи соблюдается условие  $X_L = X_C$ .

3. Измерить ЭДС генератора равную  $U_G$ .
4. Измерить падение напряжения на активном сопротивлении  $U_R$ .
5. Измерить падение напряжения на катушке индуктивности  $U_K$ .
6. Измерить падение напряжения на емкости  $U_C$ .
7. Записать показания миллиамперметра и значение частоты колебаний.
8. Результаты измерений свести в таблицу 1. В дальнейшем параметры  $R, L, C$  не меняются.
9. Изменяя частоту генератора, установить  $X_L < X_C, X_L \ll X_C$ . Измерить напряжения на всех участках цепи и ток. Результаты измерений занести в табл. 1.
10. Изменяя частоту генератора, установить  $X_L > X_C, X_L \gg X_C$ . Измерить напряжения на всех участках цепи и ток. Результаты измерений занести в табл. 1.
11. По результатам измерений и таблицы построить векторные диаграммы напряжений до резонанса, в режиме резонанса и после резонанса.
12. Определить добротность контура.

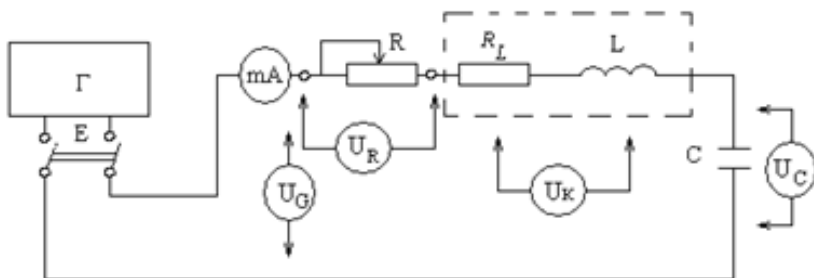


Рис. 6.3

Таблица 1

	Измерено						Вычислено								
	$U_{\Gamma}$	$U_K$	$U_R$	$U_C$	$I$	$f$	$R$	$R_L$	$Z_K$	$X_L$	$X_C$	$L$	$C$	$Q$	
	В	В	В	В	мА	Гц	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Гн	мкФ		
$X_L \square X_C$															
$X_L < X_C$															
$X_L = X_C$															
$X_L > X_C$															
$X_L \square X_C$															

### Обработка результатов эксперимента

1. По результатам измерений рассчитать параметры контура  $Q, R_L, L, C$  и занести в табл. 1.
2. Построить в масштабе зависимости:

$$U_C = F(f); U_L = F(f); I = F(f).$$

### Методические указания

При расчетах общее активное сопротивление контура принять  $R_{об} = R + R_L$ . Потерями в конденсаторе пренебречь.

Учитывая, что полное активное сопротивление равно сумме сопротивлений резистора  $R$  и  $R_L$ , находим из режима резонанса:

$$R_p = R + R_L = \frac{U_{\Gamma}}{I}.$$

Для определения сопротивления резистора  $R$  измеряют на нем напряжение  $U_R$ :

$$R = \frac{U_R}{I}.$$

Тогда

$$R_L = R_p - R.$$

Если измерить напряжение на катушке  $U_k$ , можно найти полное сопротивление:

$$Z_k = \frac{U_K}{I} = \sqrt{R_L^2 + X_L^2}.$$

Реактивное сопротивление катушки:

$$X_L = \omega L = \sqrt{Z_K^2 - R_L^2}.$$

Реактивное сопротивление конденсатора:

$$X_c = 1/\omega \cdot C = \frac{1}{2\pi fC}.$$

Для определения  $X_C$  надо измерить ток через конденсатор и напряжение. При  $R_C = 0$  величина  $X_C = U_C / I$ .

$$\text{Зная } X_C \text{ можно определить } C = \frac{1}{2\pi fX_C}.$$

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схема для экспериментального определения параметров контура  $R, L, C$ .
3. Расчетные формулы.
4. Таблица расчетных и опытных данных.
5. Построенные в масштабе зависимости:

$$U_C = F(f); U_L = F(f); I = F(f).$$

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ, СОЕДИНЕННОЙ ЗВЕЗДОЙ И ТРЕУГОЛЬНИКОМ

#### Цель работы

Опытная проверка основных соотношений в трехфазной системе при соединении приемников звездой и треугольником для равномерной и неравномерной нагрузок фаз.

#### Основные теоретические сведения

Под трехфазной симметричной системой ЭДС понимают совокупность трех синусоидальных ЭДС одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутых по фазу на  $120^\circ$ . Графики их мгновенных значений изображены на рис. 7.1а; векторная диаграмма – на рис. 7.1б.

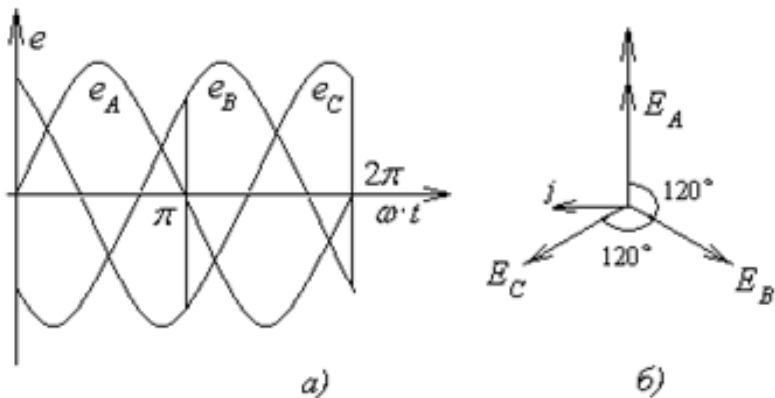


Рис. 7.1

Принцип получения трехфазной системы ЭДС иллюстрирует рис. 7.2.

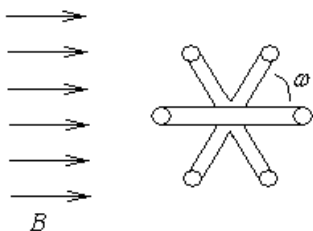


Рис. 7.2

В равномерном магнитном поле с постоянной угловой скоростью  $\omega$  вращаются три одинаковых жестко скрепленных друг с другом катушки. Плоскости катушек смещены в пространстве друг относительно друга на  $120^\circ$ . В каждой катушке наводится синусоидальная ЭДС одинаковой амплитуды, но по фазе они сдвинуты на  $120^\circ$ .

ЭДС трехфазного генератора обозначают следующим образом: одну из ЭДС обозначают  $\bar{E}_A$ , отстающую от нее на  $120^\circ$  ЭДС  $\bar{E}_B$ , а опережающую на  $120^\circ$  –  $\bar{E}_C$ .

Последовательность прохождения ЭДС через одинаковые значения (например, через нулевое значение) называют последовательностью фаз.

### Соединение звездой

При симметрии токов трехфазного приемника, соединенного звездой с нейтральным проводом

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$$

и ток в нейтральном проводе  $\bar{I}_0$  равен нулю.

При равномерной нагрузке нейтральный провод можно устранить. Линейные напряжения  $U_l$  связаны с фазными напряжениями  $U_\phi$  следующими соотношениями:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C; \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A. \quad (1)$$

При симметричной системе ЭДС

$$U_l = \sqrt{3}U_\phi \quad (2)$$

линейные токи равны фазным

$$I_l = I_\phi. \quad (3)$$

Если трехфазная система не имеет нейтрального провода, то геометрическая сумма линейных (фазных) токов при любой нагрузке равна нулю.

В этом случае при неравномерной нагрузке фаз между нейтральными точками генератора  $O$  и приемника  $O_1$  (рис. 7.3) появляется напряжение  $U_{0,0}$ , кроме того, напряжения на фазах приемника  $\bar{U}_A, \bar{U}_B, \bar{U}_C$  не равны по величине и сдвинуты относительно друг друга на разные углы. Поэтому, чтобы избежать значительного нарушения симметрии системы напряжений приемника при неравномерной нагрузке фаз, включают нейтральный провод, обеспечивающий независимую работу отдельных фаз.

Нейтральный провод позволяет также включать приемники между отдельными проводами на линейное напряжение, а между одним линейным проводом и нейтральным проводом – на фазное напряжение.



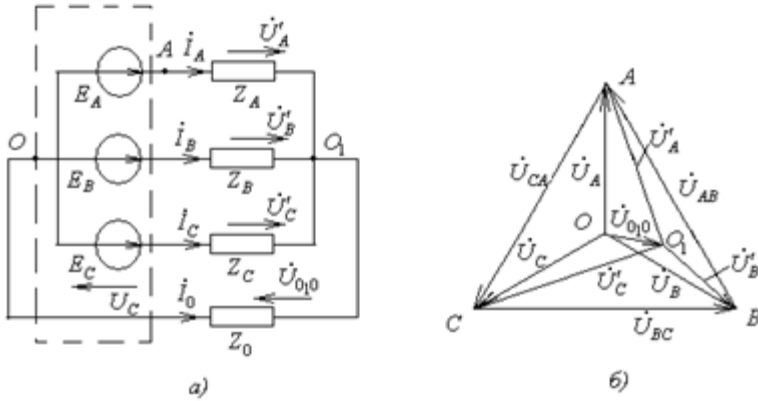


Рис. 7.3

Пусть генератор и приемник соединены звездой с нейтральным проводом, проводимость которого имеет конечное значение (рис. 7.3а). Тогда при принятых направлениях напряжений векторная диаграмма напряжений будет иметь вид рис. 7.3б. При этом в общем случае между точками  $O$  и  $O_1$  будет действовать некоторое напряжение  $U_{0,0}$ , изображенное вектором  $OO_1$ .

Для расчета комплексного значения  $U_{0,0}$  можно воспользоваться методом узловых напряжений для схемы с двумя узлами:

$$\dot{U}_{0,0} = \frac{\dot{U}_A Y_A + \dot{U}_B Y_B + \dot{U}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_0}. \quad (4)$$

Тогда на основании векторной диаграммы (рис. 7.3б) напряжения на фазах приемника:

$$\dot{U}'_A = \dot{U}_A - \dot{U}_{0,0}; \quad \dot{U}'_B = \dot{U}_B - \dot{U}_{0,0}; \quad \dot{U}'_C = \dot{U}_C - \dot{U}_{0,0}. \quad (5)$$

Токи в фазах приемника и нулевом проводе

$$\dot{I}_A = \dot{U}'_A Y_A; \quad \dot{I}_B = \dot{U}'_B Y_B; \quad \dot{I}_C = \dot{U}'_C Y_C; \quad \dot{I}_0 = \dot{U}_{0,0} Y_0. \quad (6)$$

Если нейтрального провода нет, то в выражении (5) надо принять  $Y_0 = 0$ .

В частных случаях точка  $O_1$  диаграммы напряжений может лежать вне треугольника линейных напряжений, а также в его вершине или на одной из сторон.

Рассмотрим подробнее случай неравномерной нагрузки приемника при соединении звездой с нейтральным проводом ( $Z_0 = 0$ ).

При обрыве одной из фаз, например фазы А, ток в ней станет равным нулю ( $Z_A = \infty$ ). Токи в двух других фазах не изменяются, так как напряжения на всех фазах, считая и поврежденную, остаются без изменения. Ток в нейтральном проводе будет равен геометрической сумме токов неповрежденных фаз

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_B + \dot{I}_C.$$

При активной и равномерной нагрузке неповрежденных фаз приемника векторная диаграмма напряжений и токов, соответствующая этому случаю, приведена на рис. 7.4а.

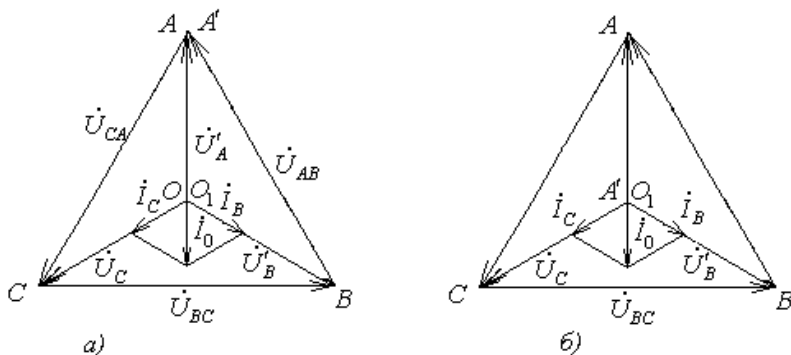


Рис. 7.4

Если в трехфазной системе соединенной звездой с нейтральным проводом, при равномерной нагрузке фаз произойдет обрыв одного линейного провода, например одного провода А, то это вызовет исчезновение не только тока в фазе А, но и напряжения на этой фазе. Вершина А' треугольника линейных напряжений (рис. 7.4б) переместится в точку О<sub>1</sub>. Фазные напряжения на неповрежденных фазах останутся без изменения. При активной нагрузке токи в неповрежденных фазах останутся без изменения. При активной нагрузке токи в неповрежденных фазах и ток нейтрального провода остаются такими же, как и в предыдущем случае ( $I_0 = I_\phi$ ).

Короткое замыкание одной из фаз при наличии нейтрального провода приводит к аварии, так как сопротивление этой фазы уменьшается до нуля.

Для трехфазного приемника, соединенного звездой без нейтрального провода, связывающего нейтральные точки приемника и генератора, характерна взаимная зависимость режимов работы отдельных фаз.

При равномерной нагрузке фаз соотношения между фазными и линейными токами и напряжениями сохраняются теми же, что и в случае симметричного режима в звезду с нейтральным проводом. Нейтральная точка приемника располагается в центре тяжести треугольника линейных напряжений, следовательно, напряжение  $U_{0,0} = 0$ .

При обрыве одной из фаз приемника, например, фазы А, неповрежденные фазы В и С оказываются соединенными последовательно и подключенными к одному линейному напряжению  $U_{BC}$ . Так как геометрическая разность фазных напряжений  $U'_B$  и  $U'_C$  должна составлять линейное напряжение  $U_{BC}$ , то начало фазных напряжений, определяющее положение нейтральной точки  $O_1$  на рис. 7.5а переместится на середину отрезка между вершинами В и С при равномерной нагрузке неповрежденных фаз.

Напряжение на оборванной фазу в этом случае будет равно:

$$U'_A = U_A \cos \frac{\pi}{6} = \sqrt{3} \cdot U_\phi \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{3}{2} U_\phi,$$

а напряжения на фазах В, С уменьшаться:

$$U'_B = U'_C = U_A \sin \frac{\pi}{6} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_\phi$$

по сравнению с равномерной нагрузкой фаз. Векторная диаграмма для этого случая при активной нагрузке фаз показана на рис. 7.5а.

Обрыв линейного провода сходен с рассмотренным случаем обрыва фазы и характерен превращением трехфазной цепи в однофазную.

Короткое замыкание одной из фаз приемника, соединенного звездой без нейтрального провода, не вызывает аварии, так как линейные напряжения сети воспринимаются двумя другими неповрежденными фазами. В случае замыкания накоротко фазы А напряжение на ней падает до нуля, а напряжение двух других становятся равными линейным напряжениям, т.е. увеличиваются в  $\sqrt{3}$  раз.

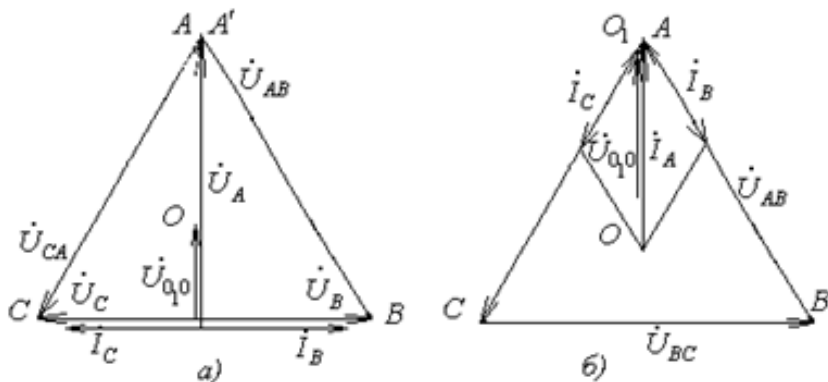


Рис. 7.5

При этом фазный ток в фазе А увеличивается в три раза против нормального режима. На векторной диаграмме рис. 7.5б показано перемещение нейтральной точки  $O_1$  приемника в вершину А треугольника линейных напряжений, а напряжение  $U_{O_1O}$  между нейтральными точками приемника и генератора при коротком замыкании фазы будет равно фазному напряжению сети.

### Соединение треугольником

При соединении треугольником фазные напряжения равны линейным, а линейные токи равны геометрической разности двух фазных токов, подходящих к вершине треугольника. Поэтому для положительных направлений токов (рис. 7.6а) между токами существует следующая зависимость:

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

Фазные токи рассчитывают по известным линейным напряжениям и проводимости фаз приемника:

$$\dot{I}_{AB} = \dot{U}_{AB} Y_{AB}; \quad \dot{I}_{BC} = \dot{U}_{BC} Y_{BC}; \quad \dot{I}_{CA} = \dot{U}_{CA} Y_{CA}$$

При несимметричной системе ЭДС и равномерной нагрузке:

$$I_{л} = \sqrt{3} I_{\phi}$$

На рис. 7.6б приведена векторная диаграмма линейных напряжений, фазных и линейных токов для случая симметричной системе напряжений и неравномерной активной нагрузки фаз.

В случае обрыва одной из фаз приемника, например фазы АВ (рис. 7.6в), ток в этой фазе будет равен нулю. Токи двух других фаз

будет равен нулю. Токи двух других фаз не изменятся, как и фазные напряжения приемника. В проводе С, не связанном с оборванной фазой, линейный ток  $I_C$  остается неизменным. Линейные токи  $I_A$  и  $I_B$  станут равны фазным, т.е. уменьшатся в  $\sqrt{3}$  раз относительно  $I_A$  при равномерной нагрузке.

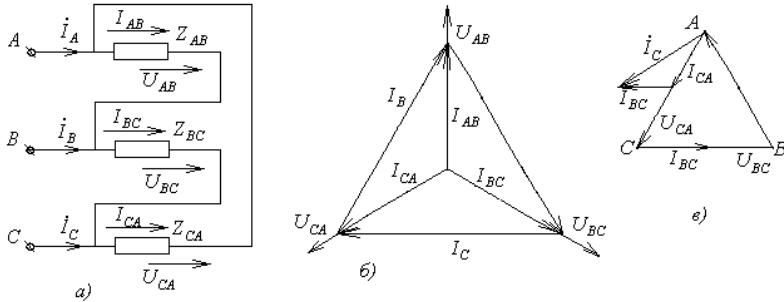


Рис. 7.6

При обрыве одного из линейных проводов трехфазная система превращается в однофазную. Напряжение и ток в фазе, не связанной с оборванным линейным проводом, остаются без изменения. Две другие фазы (например, АВ и СА), при обрыве линейного провода А оказываются соединенными последовательно и включенными параллельно фазе ВС.

Короткое замыкание одной из фаз приемника при соединении треугольником приводят в очень большому увеличению фазного и линейных токов и является аварийным режимом.

### Рабочее задание

Собрать трехфазную четырехпроводную цепь (рис. 7.7), и после проверки ее преподавателем пакетным переключателем подключать к источнику трехфазного напряжения.

Изменяя сопротивления нагрузки исследовать режимы, указанные в пунктах 1–4 табл. 1. Результаты измерений свести в табл. 1.

Пакетным переключателем обеспечить исследуемую цепь. Отключить нейтральный провод в цепи (рис. 7.7).

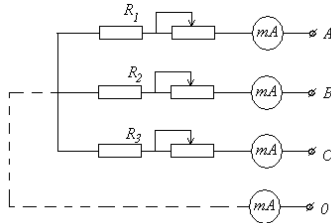


Рис. 7.7

При отключении питания панели собрать цепи (рис. 7.8), и после проверки ее преподавателем изменения сопротивлений нагрузки провести исследование режимов, указанных в п. 1–6 табл. 2.

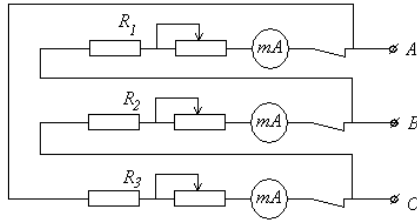


Рис. 7.8

Проверить соотношения между линейным и фазным напряжениями и токами для случая симметричной нагрузки трехпроводной цепи при соединении приемников энергии звездой и треугольником.

На какой угол опережает линейное напряжение при соединении симметричной нагрузки звездой фазное напряжение?

### Обработка результатов эксперимента

Проверить соотношения между фазными и линейными величинами при симметричной нагрузке для случаев соединения звездой и треугольником.

Рассчитать активные мощности потребления цепью для всех режимов работы.

Построить векторные топографические диаграммы для следующих режимов:

Симметричный режим для соединения звездой (четырёхпроводная цепь);

Несимметричный режим для соединения звездой (трехпроводная цепь);

Емкость в фазе С для соединения звездой (трехпроводная цепь);  
Обрыв фазы А для создания звездой (трехпроводная цепь);  
Несимметричный режим при соединении треугольником;  
Обрыв линейного провода при равномерной нагрузке (соединение  
треугольником).

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Исследование трехфазной цепи при соединении нагрузки звездой.
3. Схема рис. 7.7.
4. Табл. 1.
5. Расчетные формулы.
6. Векторные топографические диаграммы.
7. Исследование трехфазной цепи при соединении нагрузки в треугольник.
8. Схема рис. 7.8.
9. Табл. 2.
10. Расчетные формулы.
11. Векторные топографические диаграммы.

### Методические указания

Построение векторных диаграмм при соединении звездой следует начинать с треугольника линейных напряжений, величины которых определяются из опыта. Чтобы найти из топографической диаграммы положение точки 0 (нейтраль нагрузки), нужно из вершин треугольника А, В, С сделать циркулем засечки радиусами соответственно  $U'_A$ ,  $U'_B$ ,  $U'_C$ , как это показано на рис. 7.9. Соединяя полученную при пересечении этих засечек точку О с А, В, С находим векторы  $U'_A$ ,  $U'_B$ ,  $U'_C$ .

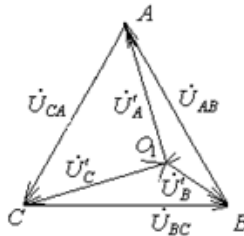


Рис. 7.9

Векторы  $I_A, I_B, I_C$  проводятся из точки О, причем углы относительно соответствующих напряжений определяются характером нагрузки каждой фазы.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 8

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

#### Цель работы

Практическое усвоение приемов лабораторного исследования однофазного трансформатора и определение его параметров.

#### Краткие теоретические сведения и пояснения к работе

Трансформатор является самым распространенным электромагнитным преобразователем переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения. В настоящее время трансформаторы используются для передачи электрической энергии на дальние расстояния, в схемах выпрямления переменного тока, радиопередающих и радиоприемных устройствах, в бытовых приборах и т.д.

Трансформатор состоит из замкнутого магнитопровода, собранного из тонких изолированных друг от друга листов электротехнической стали, на котором находятся две независимые обмотки, выполненные изолированным медным проводом. К одной из обмоток (первичной) – присоединяется источник преобразуемой энергии, а к другой (вторичной) – приемники.

Переменный магнитный поток, возбужденный в магнитопроводе переменным током первичной обмотки, наводит в обеих обмотках ЭДС  $E_1, E_2$ .

$$E_1 = 4,44 \cdot \Phi_m \cdot f \cdot \omega_1.$$

$$E_2 = 4,44 \cdot \Phi_m \cdot f \cdot \omega_2.$$

Отношение ЭДС первичной и вторичной обмоток определяется зависимостью

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2},$$

где  $\omega_1$  и  $\omega_2$  – число в первичной и вторичной обмотках трансформатора.

Для случая, когда вторичная обмотка трансформатора разомкнута, справедливо следующее соотношение:



$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = K,$$

где  $K$  – коэффициент трансформации трансформатора.

Пренебрегая потерями в индуктивном и активном сопротивлениях первичной обмотки, коэффициент трансформации можно выразить следующим образом:

$$K \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2}.$$

Параметры трансформатора (коэффициент трансформации, потери в стали и проводах, сопротивления обмоток и т.д.) можно определить, проделав опыты холостого хода и короткого замыкания.

Холостым ходом трансформатора называют такое его состояние, когда первичная обмотка включена на напряжение сети, а вторичная обмотка разомкнута.

Для создания режима короткого замыкания в трансформаторах вторичную обмотку замыкают накоротко, а к первичной подводят незначительное напряжение, при котором токи в обмотках достигают номинальных значений.

Исследование работы трансформатора в рабочем режиме (под нагрузкой) позволяет получить данные для построения его внешней характеристики и определения коэффициента полезного действия трансформатора.

Данная работа предусматривает испытание однофазного трансформатора во всех перечисленных режимах с целью определения опытным путем его параметров и снятия внешней характеристики.

### **Задание**

1. Прodelать опыт холостого хода трансформатора.
2. Прodelать опыт короткого замыкания трансформатора.
3. Исследовать работу трансформатора в рабочем режиме.
4. Используя результаты проведенных опытов рассчитать параметры трансформатора, указанные в табл. 1–3.
5. Построить графики зависимостей  $U_2 = f(I_2)$ ,  $\eta = f(I_2)$ .
6. Составить отчет по прodelанной работе.

### **Порядок выполнения работы и указания**

Ознакомиться с типами измерительных приборов, устройством трансформатора, записать их технические данные.

Собрать электрическую схему (рис. 8.1) исследования однофазного трансформатора и представить ее для проверки преподавателю.

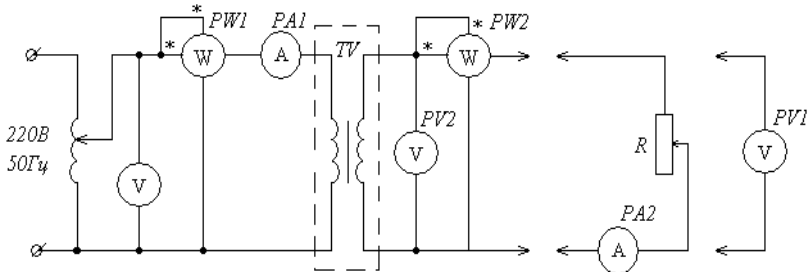


Рис. 8.1. Электрическая схема для исследования однофазного трансформатора

Продумать опыт холостого хода: разомкнуть вторичную обмотку, подать питание на схему и с помощью автотрансформатора установить напряжение на первичной обмотке трансформатора, равное 220 В. Контроль осуществлять с помощью вольтметра PV1.

Снять показания всех приборов и результаты измерений записать в табл. 1.

Таблица 1

### Режим холостого хода трансформатора

№	Измеренные величины				Вычисленные величины				
	$U_{10}$ , В	$I_{10}$ , А	$P_1$ , Вт	$U_{20}$ , В	$Z_0$ , Ом	$R_0$ , Ом	$X_0$ , Ом	$\cos \varphi_0$	$K$

Исследовать работу трансформатора в рабочем режиме: установить напряжение на первичной обмотке трансформатора 220 В, и с помощью реостата изменять ток вторичной обмотки от 1,5 до 4 А через 0,5 А. Для каждого случая снять показания приборов и результаты измерений записать в табл. 2.

Таблица 2

### Рабочий режим трансформатора

№	Измеренные величины				Вычисленные величины			
	$U_{1к.з.}$ , В	$I_{1к.з.}$ , А	$P_{1к.з.}$ , Вт	$I_{2к.з.}$ , А	$Z_{к.з.}$ , Ом	$R_{к.з.}$ , Ом	$X_{к.з.}$ , Ом	$\cos \varphi_{к.з.}$

Проделать опыт короткого замыкания: обесточить схему, вольтметра PV2 (с пределом измерения 30 В) включить в цепь первичной обмотки, вывести полностью реостат R ( $R = 0$ ). Включить питание и, плавно увеличивая напряжение с помощью автотрансформатора, установить во вторичной обмотке номинальный ток, равный 4 А.

Снять показания всех приборов и результаты измерений записать в табл. 3.

Таблица 3

Режим короткого замыкания трансформатора

№	Измеренные величины					Вычисленные величины		
	$I_1$ , А	$P_1$ , Вт	$I_2$ , А	$U_2$ , В	$P_2$ , Вт	$\eta$ , %	$\cos \varphi$	$P_{\text{пот}}$ , Вт

Используя результаты проведенных опытов, рассчитать следующие параметры однофазного трансформатора:

**а) по данным опыта холостого хода:**

$$Z_0 = \frac{U_{10}}{I_{10}} \text{ – полное сопротивление первичной обмотки трансформатора;}$$

$$R_0 = \frac{P_{10}}{I_{10}^2} \text{ – активное сопротивление первичной обмотки трансформатора;}$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} \text{ – реактивное сопротивление первичной обмотки трансформатора;}$$

$$K = \frac{U_{10}}{U_{20}} \text{ – коэффициент трансформации;}$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{R_0}{Z_0} \text{ – коэффициент мощности;}$$

**б) по данным опыта короткого замыкания:**

$$Z_{\text{к.з.}} = \frac{U_{1\text{к.з.}}}{I_{1\text{к.з.}}} \text{ – полное сопротивление трансформатора в опыте короткого замыкания;}$$

$$R_{\text{к.з.}} = \frac{P_{1\text{к.з.}}}{I_{1\text{к.з.}}^2} \text{ – активное сопротивление трансформатора;}$$

$$X_{1\text{к.з.}} = \sqrt{Z_{\text{к.з.}}^2 - R_{\text{к.з.}}^2} \text{ – индуктивное сопротивление;}$$

$$\cos \varphi_{\text{к.з.}} = \frac{P_{\text{к.з.}}}{I_{\text{к.з.}} \cdot U_{\text{к.з.}}} - \text{коэффициент мощности};$$

**в) по данным рабочего режима:**

$$\eta = \frac{P_1}{P_2} \cdot 100\% - \text{коэффициент полезного действия трансформатора};$$

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{U_1 I_1} - \text{коэффициент мощности};$$

$$P_{\text{пот}} = P_1 - P_2 - \text{мощность потерь.}$$

По данным табл. 2 построить графики зависимостей

$$U_2 = f(I_2), \eta = f(I_2).$$

Составит отчет о проделанной работе.

### Содержание отчета

1. Технические данные приборов и трансформатора.
2. Электрическая схема исследования однофазного трансформатора.
3. Таблицы с данными измерений при исследовании трансформатора.
4. Графики зависимостей  $U_2 = f(I_2)$ ,  $\eta = f(I_2)$ .
5. Выводы о проделанной работе.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 9

### ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДИОДОВ И ПРОСТЕЙШИХ СХЕМ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

#### Цель работы

Изучение принципа действия и основных характеристик неуправляемых и управляемых выпрямителей. Ознакомление с принципом действия и основными характеристиками сглаживающих фильтров.

#### Краткие теоретические сведения

Полупроводниковый диод представляет собой монокристалл, в котором созданы области различной проводимости: дырочной (р-типа) и электронной (n-типа). Граница между этими областями называется р-n переходом (рис. 9.1а). Если к кристаллу приложить напряжение так, чтобы к р-области был приложен отрицательный потенциал, а к n-области – положительный, то носители, притягиваясь к разноименным полюсам, создадут около р-n перехода область, лишенную носителей.

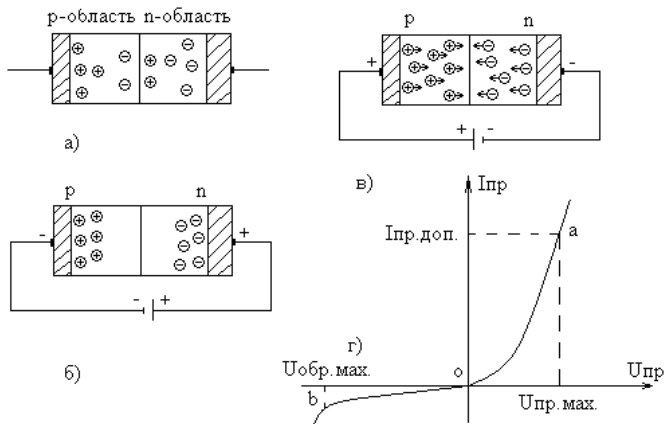


Рис. 9.1. Полупроводниковые диоды и их характеристики

Эта область как бы разрывает цепь, и ток в этой цепи отсутствует. Такая полярность напряжения называется запирающей или обратной и соответствует закрытому состоянию диода (рис. 9.1б).

Противоположная полярность напряжения перемещает носители навстречу друг другу, и происходит переход (инжекция) носителей в «чужую» область. В результате по внешней цепи появляется ток. Такая полярность напряжения называется прямой или отпирающей и соответствует открытому диоду (рис. 9.1в). Типичная вольтамперная характеристика полупроводникового диода изображена на рис. 9.1г. Здесь ветвь oa соответствует проводящему (прямому) направлению, а ветвь ob – непроводящему (обратному). В прямом направлении диод характеризуют допустимым током  $I_{пр. доп}$  и соответствующим ему падением напряжения на диоде  $U_{пр. макс}$ .

В обратном направлении диод характеризуют допустимым значением напряжения  $U_{обр. макс}$ , которое может быть приложено к диоду.

Для преобразования переменного напряжения в постоянное применяют выпрямительные устройства. В выпрямительное устройство обычно входят трансформатор, один или несколько вентилях, сглаживающий фильтр, электронный стабилизатор постоянного напряжения. В зависимости от условий работы отдельные элементы выпрямительного устройства могут отсутствовать. В настоящей работе исследуются однополупериодный и мостовой двухполупериодный выпрямители. Схема однополупериодного выпрямителя приведена на рис. 9.2а.

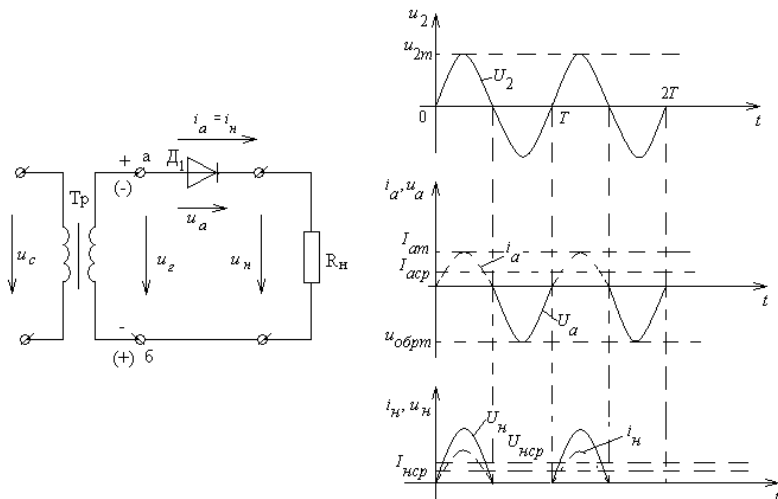


Рис. 9.2. Схема (а) и временные диаграммы (б) однополупериодного выпрямителя

Для упрощения анализа будем считать диод идеальным, т.е. будем полагать, что его сопротивление в прямом направлении равно нулю, а в обратном – бесконечности. Тогда в течение первого полупериода входного напряжения, когда на аноде диода Д будет положительный относительно катода потенциал, диод будет открыт. Напряжение  $U_2$  на вторичной обмотке трансформатора будет непосредственно приложено к нагрузке  $R_n$  и в ней возникнет ток  $i_n$  (рис. 9.2б), который будет повторять форму напряжения на вторичной обмотке трансформатора. В течение второго полупериода входного напряжения на аноде диода Д будет отрицательный относительно катода потенциал, диод будет закрыт, а ток в нагрузке окажется равным нулю.

Постоянная составляющая выходного напряжения однополупериодной схемы выпрямителя

$$U_{н. ср.} = U_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} U_{2m} \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot d(\omega \cdot t) = \frac{U_{2m}}{\pi} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_2}{\pi}, \quad (1)$$

где  $U_2$  – действующее значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора.

Из переменных составляющих максимальную амплитуду  $U_{1m}$  имеет составляющая с частотой  $\omega$ , которая может быть легко найдена из разложения выходного напряжения в ряд Фурье. В однополупериодной схеме выпрямителя  $U_{1m} = 1,57U_0$ , т.е. пульсации выходного напряжения велики, что является ее существенным недостатком.

При проектировании однополупериодных выпрямителей важно правильно выбрать тип диода, который удовлетворительно работал бы в такой схеме. Этот выбор проводят на основе двух соображений. Во-первых, допустимый ток диода должен не превышать величину  $I_m$ . Во-вторых, диод должен обладать определенной электрической прочностью. Последняя связана с тем, что в течение тех полупериодов, когда диод закрыт, к нему приложено напряжение, равное напряжению на вторичной обмотке трансформатора, причем это напряжение имеет обратную для диода полярность («минус» на аноде). Максимальная величина этого напряжения, называемая обратным напряжением  $U_{обр}$ , в нашем случае равна амплитуде напряжения на вторичной обмотке трансформатора  $U_{2m}$ , т.е. в однополупериодной схеме выпрямителя:

$$U_{обр} = U_{2m}. \quad (2)$$

А допустимое обратное значение диода должно быть больше  $U_{2m}$ .

Один из вариантов двухполупериодного выпрямителя, собранного по мостовой схеме, приведен на рис. 9.3а. Здесь переменное напряжение подводится к одной диагонали моста, а выпрямленное напряжение снимается с другой.

Рассмотрим работу схемы. Пусть в некоторый момент времени переменное напряжение на вторичной обмотке трансформатора таково, что потенциал точки а выше потенциала точки б. Тогда от точки а («+» источника напряжения) ток будет проходить через диод Д1 к точке г, далее через нагрузку к точке б и через диод Д3 к точке в («-» источника напряжения). В течение следующего полупериода, когда потенциал точки в выше потенциала точки а, ток будет проходить через диод, нагрузку и диод к точке а. Для первого полупериода направление тока показано сплошными стрелками, для второго полупериода – пунктирными стрелками. В любой полупериод ток через нагрузку проходит в одном направлении.

Временные диаграммы напряжений и токов для мостовой схемы выпрямителя приведены на рис. 9.3б.

Соотношения между токами и напряжениями для мостовой схемы выпрямителя очень легко определяются.

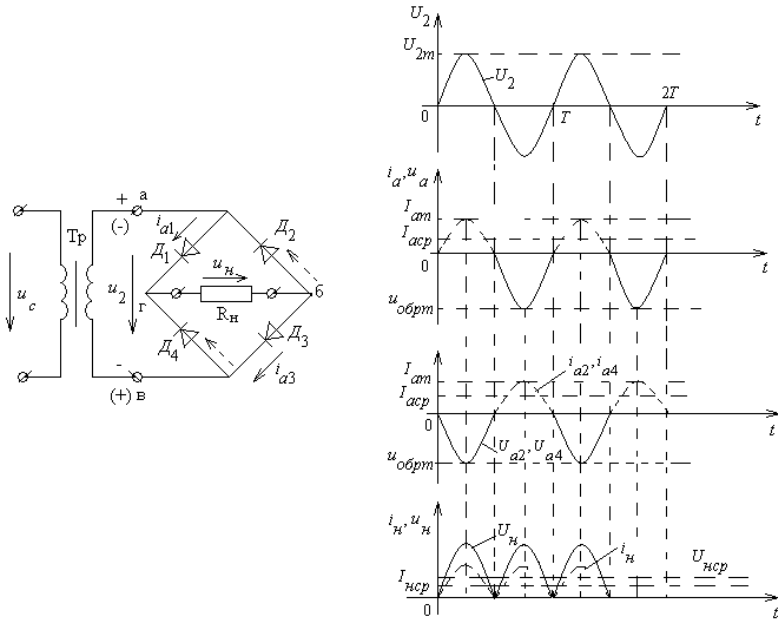


Рис. 9.3. Схема (а) и временные диаграммы (б) двухполупериодного выпрямителя

Отношение действующего значения напряжения вторичной обмотки к среднему значению выпрямленного напряжения равно коэффициенту формы синусоидального напряжения, поэтому:

$$U_2 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_H \approx 1,11 U_H. \quad (3)$$

Максимальное значение обратного напряжения на вентиле равно амплитудному значению приложенного напряжения, так как в один из полупериодов, когда ток проходит через вентили 1 и 3, вентили 2 и 4 оказываются включенными параллельно и к ним приложено напряжение  $U_2$ , а в другой полупериод напряжение  $U_2$  приложено к параллельно включенным вентилям 1 и 3. Таким образом

$$U_{\text{обр. макс.}} = U_{2m} = \sqrt{2} \cdot U_2 = \frac{\pi}{2} U \approx 1,57 U_H. \quad (4)$$

Среднее значение тока вентилей

$$I_{\text{а. ср.}} = 0,5 I_H. \quad (5)$$



А максимальное значение тока вентиля:

$$I_{a.\max} = \frac{U_{2m}}{R_H} = \frac{\pi U_H}{2R_H} \approx 1,57I_H. \quad (6)$$

Емкостной фильтр  $C_\phi$  включают параллельно нагрузочному резистору  $R_H$  (рис. 9.4а).

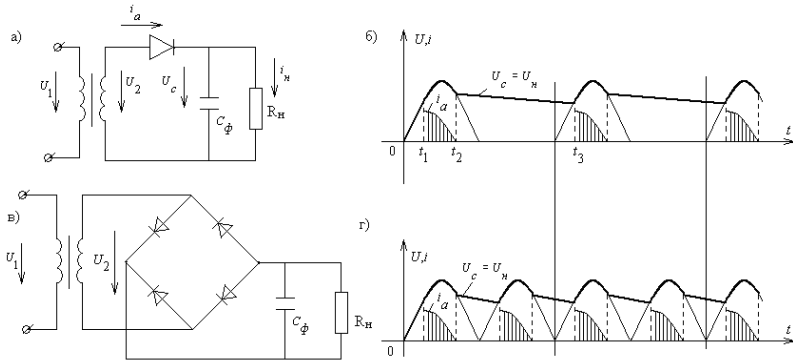


Рис. 9.4. Схемы емкостных фильтров с однополупериодным (а) и мостовым (в) выпрямителями; временные диаграммы напряжений и токов однополупериодного (б) и мостового (г) выпрямителей с емкостным фильтром

При таком включении конденсатор  $C_\phi$  заряжается через вентиль до амплитудного значения напряжения  $U_{2m}$  в момент времени, когда напряжение  $U_2$  на вторичной обмотке трансформатора превышает напряжение  $U_C$  на конденсаторе (рис. 9.4б). Этому режиму соответствует интервал времени  $t_1 - t_2$ . В течение интервала времени  $t_2 - t_3$  напряжение  $U_C > U_2$ , вентиль закрыт, а конденсатор разряжается через нагрузочный резистор  $R_H$  с постоянной времени  $\tau = C_\phi R_H$ . При этом напряжение  $U_C$  на конденсаторе становится меньше напряжения  $U_2$ . Вентиль открывается. Конденсатор  $C_\phi$  начинает заряжаться, и процессы повторяются. Как показывают временные диаграммы (рис. 9.4б), при включении емкостного фильтра напряжение  $U_H$  не уменьшается до нуля, а пульсирует в некоторых пределах, увеличивая среднее значение выпрямленного напряжения.

Временные диаграммы двухполупериодного мостового выпрямителя с емкостным фильтром (рис. 9.4а) приведены на рис. 9.4г. Емкость конденсатора  $C_{\phi}$  выбирают такой величины, чтобы для основной гармоники выпрямленного напряжения сопротивление конденсатора было много меньше  $R_n$ , т.е.

$$\frac{1}{2\pi \cdot f_{\text{осн. гарм.}} \cdot C_{\phi}} \ll R_n, \text{ или } C_{\phi} \gg \frac{1}{2\pi \cdot f_{\text{осн. гарм.}} \cdot R_n}. \quad (7)$$

При таком выборе величины емкости конденсатора постоянная времени разряда  $\tau_{\text{раз}}$  значительно больше периода изменения выпрямленного напряжения:

$$\tau_{\text{раз}} = C_{\phi} R_n \gg \frac{1}{2\pi \cdot f_{\text{осн. гарм.}}} = T. \quad (8)$$

И конденсатор  $C_{\phi}$  разряжается сравнительно медленно, т.е. напряжение на нем уменьшается несущественно. Это приводит к увеличению среднего напряжения на нагрузочном резисторе  $U_{\text{н. ср}}$  по сравнению с величиной  $U_{\text{н. ср}}$  при отсутствии фильтра и уменьшению переменной составляющей, а следовательно, к снижению коэффициента пульсаций  $\varepsilon$ .

При использовании емкостных фильтров следует иметь в виду, что импульсы тока при открытом вентиле определяются сопротивлениями вентиля и вторичной обмотки трансформатора и могут достигать значительной величины.

Такие скачки тока могут привести в выходу вентиля из строя. Это особенно опасно для полупроводниковых диодов, так как их сопротивления при прямом включении имеют небольшую величину. Для ограничения величины тока через вентиль последовательно с ним следует включать добавочный резистор.

Применение емкостного фильтра более эффективно при высокоомном нагрузочном резисторе, так как выпрямленное напряжение и коэффициент сглаживания имеют большие величины, чем при низкоомном нагрузочном резисторе.

При работе выпрямительного устройства часть выпрямленного напряжения падает на активном сопротивлении вторичной обмотки трансформатора и на прямом сопротивлении открытого диода. Следовательно, с ростом величины выпрямленного тока  $I_{\text{н. ср}}$  увеличивается

падение напряжения на этих сопротивлениях и напряжение на нагрузочном устройстве  $U_n$  уменьшается. Зависимость  $U_n = f(I_n)$  – называется внешней характеристикой. Эта характеристика является одной из важнейших характеристик выпрямительного устройства. Сопротивление открытого диода зависит от величины тока, поэтому и зависимость  $U_n = f(I_n)$  нелинейная (рис. 9.5, кривая 1). Если в выпрямительное устройство включен фильтр, то зависимость  $U_n = f(I_n)$  изменится. Емкостному фильтру соответствует кривая 2.

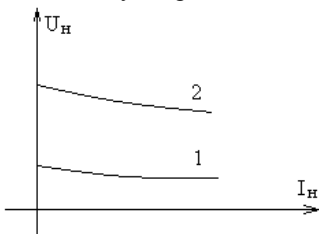


Рис. 9.5. Внешние характеристики выпрямителей

### Рабочее задание

Диоды:

Собрать схему рис. 9.6. для снятия прямой ветви вольтамперной характеристики полупроводникового диода на касете по электронике.

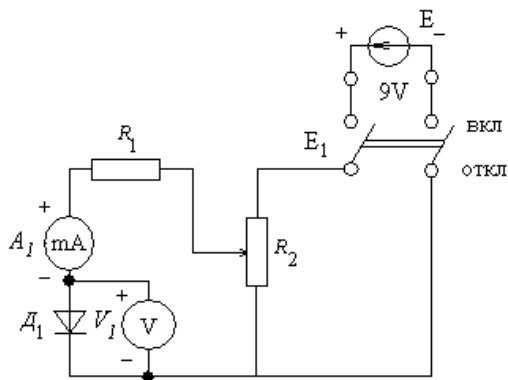


Рис. 9.6. Схема исследования прямой ветви ВАХ полупроводникового диода

Собранная схема в программе ELECTRONICS WORKBENCH приведена на рис. 9.7.

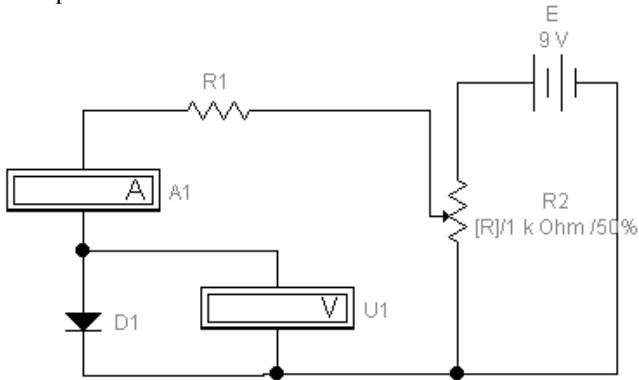



Рис. 9.7


После проверки собранной схемы преподавателем подключить ее к источнику напряжения (необходимо нажать кнопку в верхнем правом углу ).

Плавно изменяя сопротивление потенциометра R2 снять показания амперметра при подаче напряжения на диод. Результаты измерений занести в табл. 1.

Таблица 1

Прямая ветвь ВАХ полупроводникового диода

$U_{пр}$	$B$											
$I_{пр}$	$A$											

Отключить питание выключателем .

Собрать схему рис. 9.8 для снятия обратной ветви вольтамперной характеристики полупроводникового диода (полярность включения диода изменена на противоположную).

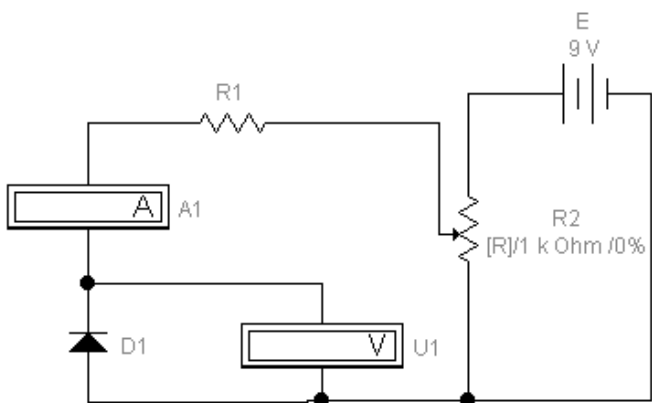


Рис. 9.8


После проверки собранной схемы преподавателем подключить ее к источнику напряжения (необходимо нажать кнопку в верхнем правом углу ). Плавно изменяя сопротивление потенциометра R2 снять показания амперметра и вольтметра при различных значениях. Результаты измерений занести в табл. 2.

Таблица 2

Обратная ветвь ВАХ полупроводникового диода

$U_{пр}$	<i>B</i>										
$I_{пр}$	<i>A</i>										

По данным табл. 1 и 2 построить на одном графике прямую и обратную ветви вольтамперной характеристики полупроводникового диода. Подсчитать дифференциальное и статическое сопротивление диода для трех участков прямой ветви и одного участка обратной ветви.

### Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Схемы для исследования характеристик полупроводникового диода и схемы исследования неуправляемых с подключенными измерительными приборами.
3. Таблицы с данными измерений.
4. Графики характеристик диода.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 10

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНЗИСТОРА С ОБЩЕЙ БАЗОЙ И ТРАНЗИСТОРА В СХЕМЕ С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ

#### Цель работы

Экспериментальное исследование характеристик транзистора включенных по схеме с общей базой. Экспериментальное исследование статических характеристик транзистора включенного по схеме с общим эмиттером. Определение коэффициента усиления транзистора.

#### Краткие теоретические сведения

##### А. Устройство и принцип действия транзистора

Транзистором называется полупроводниковый прибор с двумя электрическими взаимодействующими  $p$ - $n$ -переходами, имеющий не менее трех выводов и пригодный для усиления мощности.

Основой для изготовления транзистора является пластинка германия или кремния с проводимостью  $n$  или  $p$ - типа. Толщина пластинки составляет десятки микрон. Эта пластинка называется базой  $B$ . К базе с двух сторон примыкают области с дырочной проводимостью, противоположной проводимости базы.

Таким образом, транзистор состоит из трех слоев полупроводника, причем слои имеют одинаковую проводимость, а разделяющий их средний слой – проводимость, противоположную им (рис. 10.1а). Так, если средний слой имеет электронную проводимость, то крайние – дырочную. Такой транзистор называется транзистором типа  $p$ - $n$ - $p$  (рис. 10.1б). Между слоями с различными видами проводимости образуются  $p$ - $n$  – переходы. Их у транзистора два. Один  $p$ - $n$ -переход работает в прямом направлении и называется эмиттерным, а соответствующий ему крайний слой называется эмиттером  $\mathcal{E}$ . Другой  $p$ - $n$ -переход работает в обратном направлении и называется коллекторным, а соответствующий ему крайний слой называется коллектором  $K$ . Площадь эмиттерного перехода меньше площади коллекторного перехода.

Концентрация основных носителей заряда в эмиттере во много раз больше концентрации основных носителей заряда в базе. Концентрация основных носителей заряда в коллекторе несколько меньше концентрации их в эмиттере. Поэтому проводимость эмиттера на несколько порядков выше проводимости базы, а проводимость коллектора меньше проводимости эмиттера.

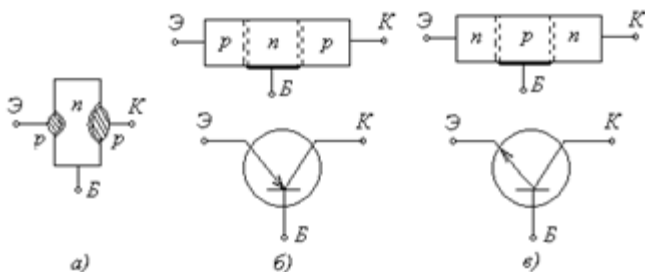


Рис. 10.1. Транзистор:  
 а – схематическое устройство;  
 б, в – структура и условное изображение.

Если средний слой имеет дырочную проводимость, а крайние слои – электронную, то транзистор называется *n-p-n* типа (рис. 10.1в). От эмиттера, базы и коллектора имеются выводы – электроды для включения транзистора в схему. Пластинка германия помещается в герметизированном корпусе, в котором через изолированные втулки выведены электроды.

Физические процессы в транзисторах обоих типов одинаковы. Различие состоит только в полярности включения источников питания и соответственно в направлениях протекания токов.

Транзистор имеет три внешних вывода. В зависимости от того, какой из выводов является общим для входной и выходной цепей, различают три схемы включений:

- с общей базой (рис. 10.2а);
- с общим эмиттером (рис.10.2б);
- с общим коллектором (рис. 10.2в).

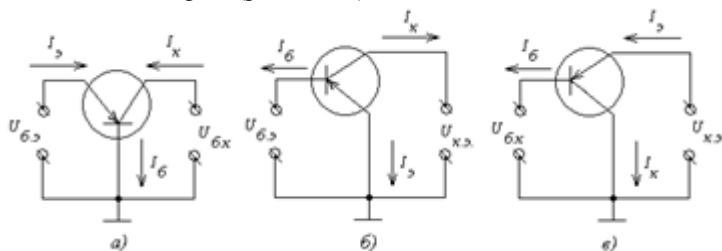


Рис. 10.2. Схемы включения транзисторов

Наиболее часто применяются схемы с общим эмиттером и общей базой. При любой схеме включения транзистора полярность включения источников питания должна быть выбрана так, чтобы эмиттерный переход был включен в прямом направлении, а коллекторный – в обратном.

В каждой схеме имеются две электрические цепи: входная и выходная. Так, например, в схеме, приведенной на рис. 10.2а, входной цепью является эмиттерная цепь, состоящая из источника входного напряжения смещения  $E_э = 0,1 \div 1B$ , источника входного напряжения  $U_{вх}$ , эмиттерного  $p$ - $n$ -перехода, включенного в прямом направлении.

Коллекторная – выходная цепь состоит из источника питания коллектора  $E_k = 10 \div 30$  В, резистора нагрузки  $R_H$  и коллекторного перехода, включенного в обратном направлении.

В зависимости от полярности постоянных напряжений, приложенных к эмиттерному и коллекторному переходам, различают следующие четыре режима их работы: активный, отсечки, насыщения и инверсный.

Активный режим работы транзистора используется для усиления малых напряжений. В этом режиме на эмиттерный переход подается прямое напряжение, а на коллекторный – обратное.

Режим отсечки и насыщения используют при работу транзистора в качестве переключателя. В режиме отсечки к обоим переходам подводится обратное напряжение, и транзистор оказывается запертым. В режиме насыщения оба перехода работают в прямом направлении, и транзистор оказывается полностью открытым. Сопротивление транзистора в режиме насыщения очень мало.

В инверсном режиме коллекторный переход находится под прямым напряжением, а эмиттерный – под обратным.

Стрелка на эмиттере в условном изображении транзистора в схемах указывает направление прямого тока в цепи эмиттера. Принцип действия транзистора рассмотрим кратко на примере транзистора типа  $p$ - $n$ - $p$ , включенного по схеме с общей базой, как показано на рис. 10.3.

Если к коллекторному переходу приложено обратное напряжение а цепь эмиттера разомкнута, то в цепи коллектора протекает небольшой обратный ток  $I_{ко}$  – единицы микроампер. Этот ток возникает под действием обратного напряжения и создается направленным перемещением не основных носителей заряда через коллекторный переход – дырок базы и электронов коллектора. Обратный ток протекает по цепи:  $+E_k$ , база – коллектор транзистора,  $-E_k$ . Обратный ток коллектора  $I_{ко}$  не зависит от напряжения на коллекторе, но зависит от температуры полупроводника.

При включении в цепь эмиттера постоянного напряжения  $E_э$  в прямом направлении потенциальный барьер эмиттерного перехода понижается. Начинается инжектирование (впрыскивание) дырок из эмиттера в базу. Так как электрического поля в базе нет, то инжектиро-



ванные в базу дырки перемещаются в ней посредством диффузии. При этом дырки рекомбинируют с электронами базы. А так как концентрация носителей в базе значительно меньше, чем в эмиттере, то рекомбинируют очень немногие дырки. При малой толщине базы почти все дырки будут доходить до коллекторного перехода. На место рекомбинированных электронов в базу поступают электроны от источника питания  $E_k$ . Дырки, рекомбинировавшие с электронами в базе, создают ток базы.

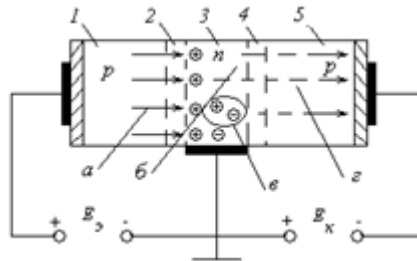


Рис. 10.3. Принцип действия транзистора:

а – инжекция; б – диффузия; в – рекомбинация; г – втягивание; 1 – эмиттер; 2 – эмиттерный переход; 3 – база; 4 – коллекторный переход; 5 – коллектор.

Под действием обратного напряжения  $E_k$  потенциальный барьер коллекторного перехода повышается, толщина перехода увеличивается. Но потенциальный барьер коллекторного перехода не создает препятствия для прохождения через него дырок. Вошедшие в область коллекторного перехода дырки попадают в сильное ускоряющее поле, созданное на переходе коллекторным напряжением, и втягиваются коллектором, образуя коллекторный ток  $I_k$ .

Коллекторный ток протекает по цепи:  $+E_k$ , база – коллектор,  $-E_k$ . Таким образом, в транзисторе типа  $p-n-p$  протекают три тока: эмиттера, коллектора и базы (пути и направления токов эмиттера и коллектора показаны на рис. 10.3). В проводе, являющемся выводом базы, токи эмиттера и коллектора направлены встречно. Следовательно, ток базы равен разности токов эмиттера и коллектора  $I_б = I_э - I_k$ .

Физические процессы в транзисторе типа  $n-p-n$  протекают аналогично процессам в транзисторе типа  $p-n-p$ .

Полный ток эмиттера транзистора  $I_э$  определяется количеством инжектированных эмиттером дырок. Основная часть этих дырок, достигая коллектора за счет диффузии, создает коллекторный ток  $I_k$ . Незначительная часть инжектированных в базу дырок рекомбинирует в базе,

создавая ток базы  $I_б$ . Следовательно, ток эмиттера разделяется на ток базы и ток коллектора, т.е.  $I_э = I_б + I_к$ . Ток эмиттера является входным током, ток коллектора – выходным. Выходной ток составляет часть входного, т.е.

$$\Delta I_к = \alpha \cdot \Delta I_э \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент передачи тока для схемы с общей базой.

Этот коэффициент называют коэффициентом усиления по току:

$$\alpha = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_э} \quad (2)$$

Так как выходной ток меньше входного, то коэффициент  $\alpha$  меньше единицы. Он показывает, какая часть инжектированных в базу дырок достигает коллектора. Чем тоньше база, тем больше  $\alpha$ . Обычно  $\alpha$  составляет 0,92–0,99.

В схеме с общим эмиттером выходным током является ток коллектора, а входным – ток базы. Коэффициент усиления по току для схемы с общим эмиттером:

$$\beta = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_б}, \text{ но } \Delta I_б = \Delta I_э - \Delta I_к = \Delta I_э - \alpha \cdot \Delta I_э = \Delta I_э(1 - \alpha), \text{ тогда}$$

$$\beta = \frac{\alpha \cdot \Delta I_э}{\Delta I_э(1 - \alpha)} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (3)$$

Следовательно, коэффициент усиления по току для схемы с общим эмиттером составляет десятки единиц.

В схеме с общим коллектором выходным током является ток эмиттера, а входным – ток базы. Поэтому коэффициент усиления по току для схемы с общим коллектором определяется по формуле:

$$\frac{\Delta I_э}{\Delta I_б} = \frac{\Delta I_э}{\Delta I_э(1 - \alpha)} = \frac{1}{1 - \alpha} \approx \beta \quad (4)$$

Выходной ток транзистора зависит от входного тока. Поэтому транзистора является прибором, управляемым током.

## Б. Характеристики и параметры транзистора

Для расчета транзисторных схем достаточно иметь две характеристики: входную и выходную. Входной характеристикой транзистора называется зависимость входного от входного напряжения при постоянном выходном токе или постоянном выходном напряжении.

Выходной характеристикой транзистора называется зависимость выходного тока от выходного напряжения при постоянном входном токе или постоянном входном напряжении.

Входное и выходное напряжения отсчитываются относительно общего электрода. Поэтому для различных схем включения транзистора выходные и входные характеристики отображают различные зависимости.

Схема для снятия статических характеристик транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, приведена на рис. 10.4.

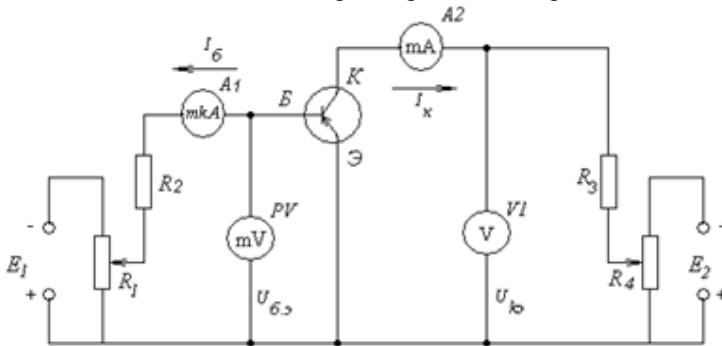


Рис. 10.4. Схема для снятия характеристик транзистора с общим эмиттером

Входным током в схеме с общим эмиттером, как видно на рис. 10.4, является ток базы, а входным напряжением – напряжением между базой и эмиттером. Выходным током является ток коллектора, а выходным напряжением – напряжением между коллектором и эмиттером.

Входной характеристикой транзистора в схеме с общим эмиттером называется зависимость тока базы от напряжения между базой и эмиттером при постоянном напряжении на коллекторе, т.е.

$$I_{\text{б}} = f(U_{\text{бэ}}) \text{ при } U_{\text{кэ}} = \text{const.}$$

Сначала снимается входная характеристика при короткозамкнутом коллекторном переходе. При этом к коллектору и эмиттеру приложены положительные относительно базы напряжения. Оба  $p-n$ -перехода транзистора оказываются включенными параллельно в прямом направлении. Ток базы равен сумме токов эмиттера и коллектора:

$$I_{\text{б}} = I_{\text{э}} + I_{\text{к}}. \quad (5)$$

Снимается характеристика при небольшом отрицательном напряжении на коллектора, например, при  $E_{\text{к}} = -5 \text{ В}$ , затем при большем и т.д. В результате получается семейство входных характеристик, как показано на рис. 10.5а.

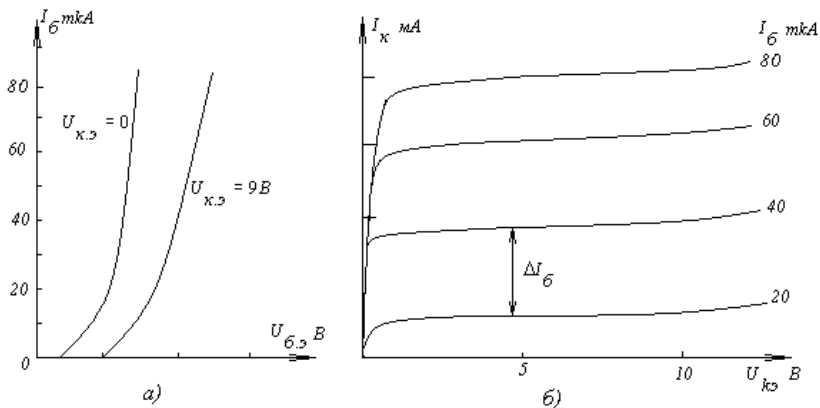


Рис. 10.5. Статические характеристики транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером: а) входные характеристики, б) выходные характеристики

При отрицательных напряжениях на коллекторе ток базы является разностью токов эмиттера и коллектора:  $I_б = I_э - I_к$ .

С увеличением отрицательного напряжения на базе ток базы увеличивается, так как при этом увеличивается прямое напряжение на эмиттерном переходе.

Выходной характеристикой транзистора в схеме с общим эмиттером называется зависимость тока коллектора от напряжения на коллекторе при постоянном токе базы, т.е.

$$I_к = f(U_{кэ}) \text{ при } I_б = \text{const.}$$

Для расчета и анализа схем на транзисторах часто используют так называемые  $h$ -параметры.

Однотипные  $h$ -параметры получают различными для разных схем включения транзистора, поэтому их снабжают дополнительным индексом: для схемы ОБ (общей базой), например  $h_{1б}$ ,  $h_{12б}$  и т.д., а для схемы ОЭ (общим эмиттером) –  $h_{1э}$ ,  $h_{12э}$  и т.д.

Указанные  $h$ -параметры можно определить по статическим характеристикам транзистора. Выражая значения токов и напряжений через соответствующие приращения для транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, получим:

$$h_{11э} = \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta I_б} \text{ при } U_{кэ} = \text{const} (\Delta U_{кэ} = 0);$$

$$h_{12э} = \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta U_{кэ}} \text{ при } I_б = \text{const} (\Delta I_б = 0);$$

$$h_{21э} = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_б} \text{ при } U_{кэ} = \text{const} (\Delta U_{кэ} = 0);$$

$$h_{22э} = \frac{\Delta I_к}{\Delta U_{кэ}} \text{ при } I_б = \text{const} (\Delta I_б = 0).$$

### Порядок выполнения работы

Собранная в программе ELECTRONICS WORKBENCH схема приведена на рис. 10.6.

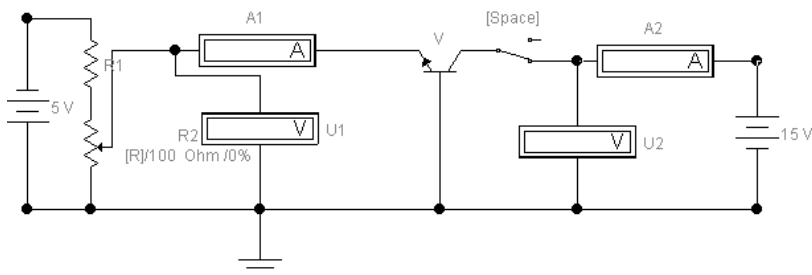



Рис. 10.6

Чтобы схема начала функционировать, необходимо нажать кнопку в верхнем правом углу  окна программы.

Изменяя переменным резистором (при нажатии клавиши <R> сопротивление уменьшается, при нажатии комбинаций клавиш <shift>-<R> сопротивление увеличивается) входное напряжение ( $U_{бэ}$ ) от 0 до 0,9 В, снимите входную характеристику транзистора  $I_э = f(U_{бэ})$  при напряжении коллектора ( $U_{кэ}$ ) 0; 5; 10 В ( $U_{кэ} = 0$ , при отключённом тумблере (нажатие длинной клавиши в нижней части клавиатуры)).

Собираем схему (рис. 10.7).

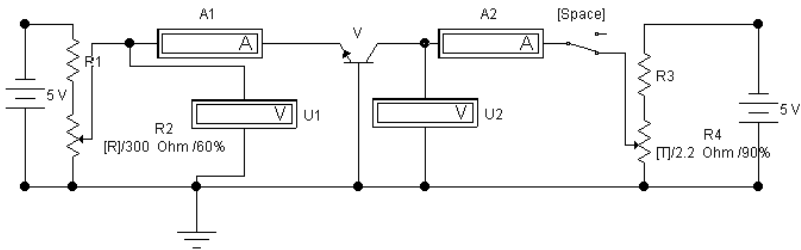


Рис. 10.7

Изменяя резистором (клавиша <T>) напряжение  $U_{кб}$  от 0,8 до 0 В, снимите отрицательную ветвь выходной характеристики транзистора  $I_k = f(U_{кб})$  при установке эмиттерного тока 10, 20, 30 мА.

Собираем схему (рис. 10.8).

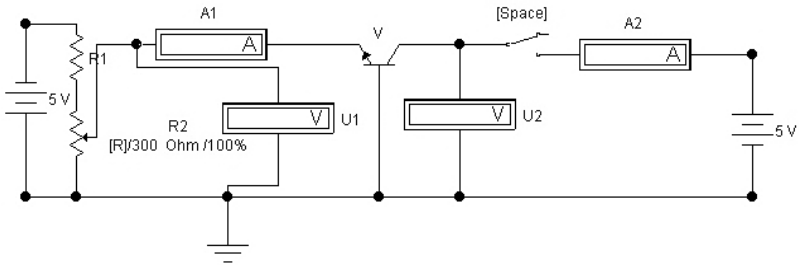


Рис. 10.8

Изменяя напряжение коллектора ( $U_{кб}$ ) от 0 до 10 В, снимите положительную ветвь выходной характеристики транзистора  $I_k = f(U_{кб})$  при установке эмиттерного тока ( $I_э$ ) 10, 20 и 30 мА.

По данным измерений постройте входные и выходные характеристики транзистора.

## ВХОДНЫЕ И ВЫХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНЗИСТОРА В СХЕМЕ С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ

Собираем схему (рис. 10.9).

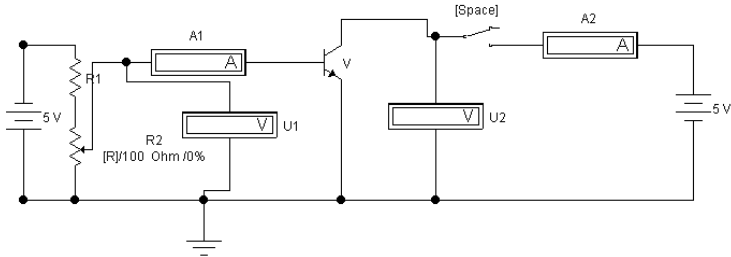


Рис. 10.9

Чтобы схема начала функционировать, необходимо нажать кнопку в верхнем правом углу . Изменяя переменным резистором (при нажатии клавиши <R> сопротивление уменьшается, при нажатии комбинаций клавиш <shift>-<R> сопротивление увеличивается) входное напряжение ( $U_{бэ}$ ) от 0 до 0,9 В, снимите зависимость базового тока ( $I_б$ ) от напряжения база-эмиттер ( $U_{бэ}$ ) при установке коллекторного напряжения ( $U_{кэ}$ ) 0; 5; 10 В (входная характеристика транзистора  $I_б = f(U_{бэ})$ , ( $U_{кэ} = 0$  обеспечивается при выключении тумблера (клавиша «Пробел»)).

Изменяя переменным резистором (клавиша <T>, или <shift>-<T>) напряжение коллектора ( $U_{кэ}$ ) от 0 до 8 В, снимите зависимость коллекторного тока ( $I_к$ ) от напряжения коллектор-эмиттер ( $U_{кэ}$ ) при установке тока базы ( $I_б$ ) 0,1; 0,2 мА (выходная характеристика транзистора  $I_к = f(U_{кэ})$ ).

По данным измерения построить входные и выходные характеристики транзистора.

Определить по характеристикам транзистора графоаналитическим методом параметры транзистора:

Расчитать входное сопротивление транзистора  $R_{вх} = \Delta U_{бэ} / \Delta I_б$ ;

Расчитать выходное сопротивление транзистора  $R_{вых} = \Delta U_{кэ} / \Delta I_к$ ;

Расчитать коэффициент усиления транзистора  $\beta = \Delta I_к / \Delta I_б$ .

### Содержание отчета

1. Отчет о проделанной работе должен содержать.
2. Схема для снятия характеристик транзистора.
3. Таблицы наблюдений.
4. Графики выходных характеристик транзистора.
5. Графики входных характеристик транзистора.

6. Значения  $h$ -параметров, определенные по характеристикам транзистора.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 11

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

#### Цель работы

Исследование логических элементов и простейших комбинационных устройств.

#### Краткие теоретические сведения

#### Основные положения алгебры логики

В отличие от аналоговых электронных устройств, в цифровых устройствах (ЦУ) входные и выходные сигналы могут принимать ограниченное количество состояний. В зависимости от конкретной физической реализации элементов ЦУ, более положительному значению физической величины, «Н» – уровень, соответствует состояние «логическая 1», а менее положительному значению, «L – уровень» – «логический 0».

Теоретической основой проектирования ЦУ является алгебра логики или булева алгебра, оперирующая логическими переменными. Для логических переменных, принимающих только два значения, существуют 4 основных операции. Операция логическое «И» (AND) конъюнкция или логическое умножение, обозначается \* или  $\wedge$ . Операция логическое «ИЛИ» (OR), дизъюнкция или логическое сложение, обозначается + или  $\vee$ . Операция логическое «НЕ» (NOT), изменение значения, инверсия или отрицание, обозначается чертой над логическим выражением. Инверсия иногда будет в тексте обозначаться знаком «~». Операция эквивалентности обозначается « $\Leftrightarrow$ ». Следующие соотношения являются аксиомами.

(1)	$0 + 0 = 0$	$1 * 1 = 1$	(1')
(2)	$1 + 1 = 1$	$0 * 0 = 0$	(2')
(3)	$1 + 0 = 0 + 1 = 1$	$0 * 1 = 1 * 0 = 0$	(3')
(4)	$\sim 1 = 0$	$\sim 0 = 1$	(4')

Из (1, 2) и (1',2') следует:

$$x + x = x \text{ и } x * x = x. \quad (5)$$

Из (1, 3) и (2',3') следует

$$x + 0 = x \text{ и } 0 * x = 0. \quad (6)$$



Из (2, 3) и (1',3') следует

$$1 + x = 1 \text{ и } x * 1 = x. \quad (7)$$

Из (3) и (3') следует

$$x + \sim x = 1 \text{ и } \sim x * x = 0. \quad (8)$$

Из (4) и (4') следует

$$\sim(\sim x) = x. \quad (9)$$

И, наконец, из (1,1'), (2,2'), (3,3') и (4,4') следует

$$\begin{aligned} \sim(x_0 + x_1) &= \sim x_0 * \sim x_1 \\ &\text{и} \\ \sim(x_0 * x_1) &= \sim x_0 + \sim x_1. \end{aligned} \quad (10)$$

Последние выражения (10) называют принципом двойственности или теоремой Де Моргана (инверсия логической суммы равна логическому произведению инверсий и наоборот). Соотношения двойственности для  $n$  переменных, часто записывают в виде:

$$\begin{aligned} \sim(x_1 + \dots + x_n) &= \sim x_1 * \dots * \sim x_n \\ &\text{и} \\ \sim(x_1 * \dots * x_n) &= \sim x_1 + \dots + \sim x_n. \end{aligned} \quad (11)$$

На функции И и ИЛИ распространяются обычные алгебраические законы – переместительный, сочетательный и распределительный, которые легко доказываются методом перебора:

- $x_1 \text{ ор } x_0 = x_0 \text{ ор } x_1$  – переместительный;
- $x_2 \text{ ор } x_1 \text{ ор } x_0 = (x_2 \text{ ор } x_1) \text{ ор } x_0$  – сочетательный;
- $x_2 * (x_1 + x_0) = (x_2 * x_1) + (x_2 * x_0)$  и  $x_2 + (x_1 * x_0) = (x_2 + x_1) * (x_2 + x_0)$  – распределительный, где операция ор может быть, либо И, либо ИЛИ.

Наряду с тремя основными логическими функциями, называемыми также переключательными, существуют и другие.

Функция «И» равна единице, если равны единице ВСЕ ее аргументы. Функция «ИЛИ» равна единице, если равен единице ХОТЯ БЫ один аргумент. Функция «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ» (XOR) равна единице, если равен единице ТОЛЬКО один ее аргумент.

### Указания к выполнению работы

В ходе лабораторной работы исследуются:

- Элемент И-НЕ для положительной логики или ИЛИ-НЕ для отрицательной логики;

- Элемент ИЛИ-НЕ для положительной логики или И-НЕ для отрицательной логики;
- Элемент И;
- Элемент ИЛИ;
- Элемент ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ;
- Элемент НЕРАВНОЗНАЧНОСТЬ;
- Трехразрядное устройство проверки на ЧЕТНОСТЬ;
- Устройство СРАВНЕНИЯ двух двухразрядных чисел;
- Двоичный одноразрядный сумматор.

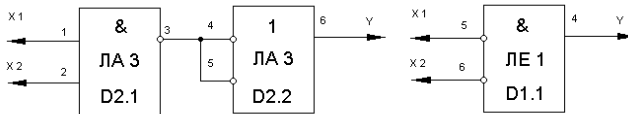
Лабораторная работа выполняется на «Стенде универсальном ОАВТ» ИГ.2.390.005-01. на плате П 1 с технологическими картами I – 1 ... I – 9.

На технологических картах изображена принципиальная схема исследуемого устройства в виде соединений логических элементов, выполняющих логические функции.

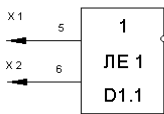
I - 1



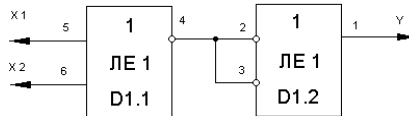
I - 2



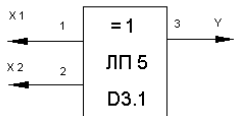
I - 3



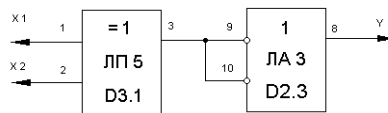
I - 4



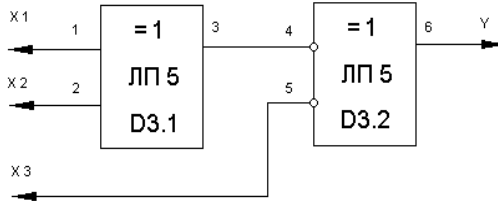
I - 5



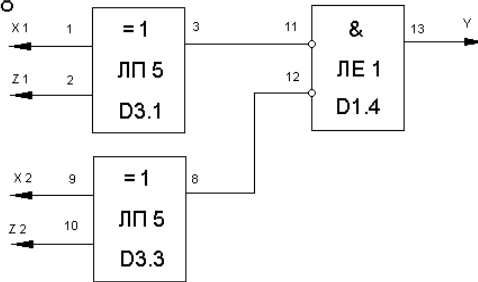
I - 6



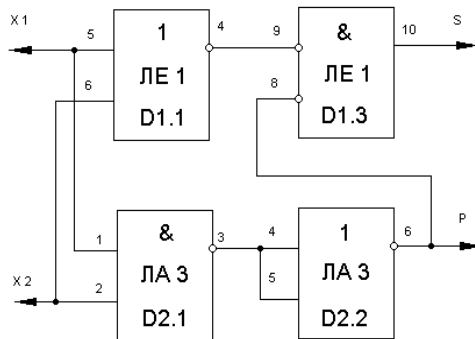
I - 7



I - 8



I - 9



Принципиальная схема платы П 1 приведена на рисунке внутри прямоугольника, обведенного пунктирной линией. Блоки управления и индикации расположены в блоке ввода-вывода и используются при работе с одной платой.

Логические элементы и устройства, расположенные на плате П 1 исследуются при подаче на их входы логических сигналов (0 или 1) от тумблеров SA 1 – SA 5. Уровень сигнала, подаваемого от соответствующего тумблера, определяется по положению подвижного контакта (вверху – 1, внизу – 0), уровень выходного сигнала – по свечению светодиодных индикаторов HL 1 – HL 9.

Этот светодиодный дисплей установлен на передней панели стенда. Дисплей состоит из 9 светодиодов, позволяющих индицировать в 9 разрядах уровни логической «1» (светодиоды светятся) и логического «0» (не светятся).

Все исследуемые элементы и устройства собраны на печатной плате П 1. Используя технологические карты, необходимо провести исследования девяти устройств.

Карта I – 1 разрешает использование тумблеров SA 1, SA 2 и индикатора HL 3.

Карта I – 2 разрешает использование тумблеров SA 1, SA 2 и индикатора HL 5.

Карта I – 3 разрешает использование тумблеров SA 1, SA 2 и индикатора HL 2.

Карта I – 4 разрешает использование тумблеров SA 1, SA 2 и индикатора HL 4.

Карта I – 5 разрешает использование тумблеров SA 1, SA 2 и индикатора HL 6.

Карта I – 6 разрешает использование тумблеров SA 1, SA 2 и индикатора HL 7.

Карта I – 7 разрешает использование тумблеров SA 1, SA 2 и индикатора HL 9.

Карта I – 8 разрешает использование тумблеров SA 1, SA 2, SA 4, SA 5 и индикатора HL 1.

Карта I – 9 разрешает использование тумблеров SA 1, SA 2 и индикатора HL 8, HL 5.

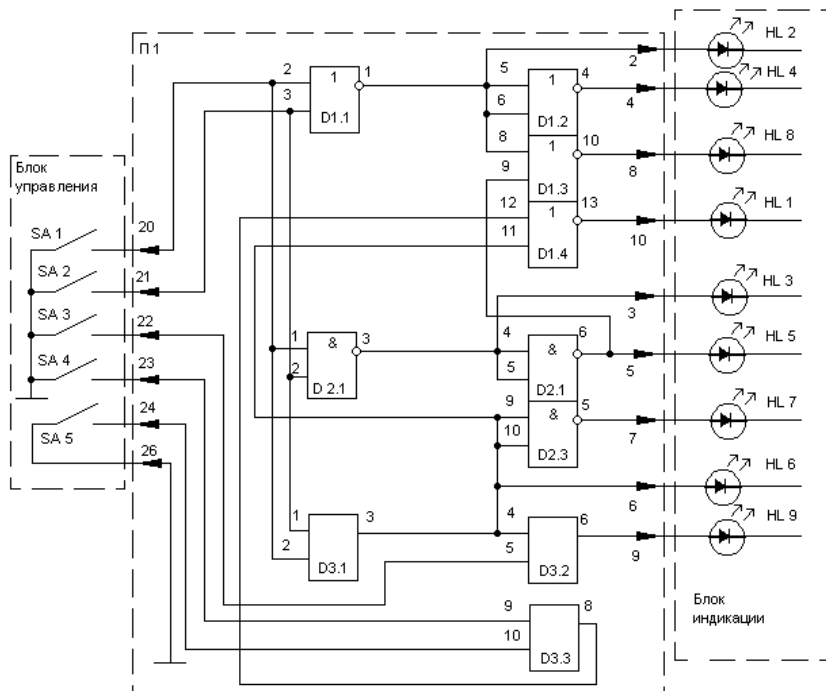


Схема платы П 1 и её подключения к основному блоку

### Задания для выполнения:

1. Выписать основные логические функции двух переменных и основные законы алгебры логики.
2. Ознакомиться с элементной базой ТТЛ.
3. Зарисовать условно-графическое обозначения изучаемых логических элементов.
4. Зарисовать схемы комбинационных устройств, а также одноразрядный сумматор.
5. Манипулируя переключателями, составить таблицу истинности исследуемого устройства.
6. Определить логическую функцию и записать её через операции И, ИЛИ и НЕ.
7. Определить тип каждого логического элемента, входящего в устройство.

$$Y = f(x_1, x_2)$$

$X_1$	$X_2$	Y

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Жаворонков М.А.* Электротехника и электроника: Учебное пособие / М.А. Жаворонков, А.В. Кузин. М.: Академия, 2005. 400 с.: ил. (Высшее профессиональное образование).
2. *Касаткин А.С.* Электротехника: Учебник / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. 9-е изд., стер. М.: Академия, 2005. 544 с.: ил. (Высшее профессиональное образование).

Составители:  
*Имиль Акунович Аккозиев,*  
*Дмитрий Витальевич Виноградов*

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА  
С ОСНОВАМИ ЭЛЕКТРОНИКИ  
И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Методические указания  
к выполнению лабораторных работ для бакалавров

Редактор *А.И. Шевченко*  
Компьютерная верстка – *Ю.Ф. Атаманов*

Подписано в печать 15.05.14. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Офсетная печать. Объем 5,0 п.л.  
Тираж 100 экз. Заказ 192.

Отпечатано в типографии КРСУ  
720048, Бишкек, ул. Горького, 2