

Министерство образования и науки Российской Федерации

Калужский филиал  
федерального государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования  
**«Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»**  
(КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Ю.Е. Гагарин

## **ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Лабораторный практикум

Калуга - 2017

УДК 621.38

ББК 32.85

Г12

**Г12** Гагарин Ю.Е. Основы электроники. Лабораторной практикум. — М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. — 83 с.

Практикум содержит описание лабораторных работ по основным разделам дисциплины «Основы электроники».

Лабораторной практикум предназначен для студентов 2-го курса направления подготовки 09.03.04 «Программная инженерия».

УДК 621.38

ББК 32.85

© Гагарин Ю.Е.

© Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА .....	6
ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ, ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ЕЁ ВЫПОЛНЕНИЯ.....	6
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ .....	7
ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ .....	16
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ.....	16
ВАРИАНТЫ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ.....	18
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ.....	22
ФОРМА ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ.....	22
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С ПОМОЩЬЮ ТЕОРЕМ ОБ ЭКВИВАЛЕНТНОМ ИСТОЧНИКЕ .....	23
ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ, ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ЕЁ ВЫПОЛНЕНИЯ.....	23
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ .....	24
ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ .....	28
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ.....	28
ВАРИАНТЫ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ.....	31
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ.....	31
ФОРМА ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ.....	31
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ, СОДЕРЖАЩИХ ДИОДЫ.....	33
ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ, ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ЕЁ ВЫПОЛНЕНИЯ.....	33
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ .....	34
ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ .....	38
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ.....	38
ВАРИАНТЫ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ.....	43
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ.....	46
ФОРМА ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ.....	47
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ ДЛЯ ВЫПРЯМЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА .....	48
ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ, ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ЕЁ ВЫПОЛНЕНИЯ.....	48
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ .....	49

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ .....	54
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ.....	54
ВАРИАНТЫ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ.....	58
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ.....	58
ФОРМА ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ.....	59
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5 ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА В СХЕМЕ С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ .....	60
ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ, ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ЕЁ ВЫПОЛНЕНИЯ .....	60
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ .....	61
ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ .....	70
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ.....	70
ВАРИАНТЫ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ.....	72
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ.....	73
ФОРМА ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ.....	73
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6 ПОСТРОЕНИЕ КОМБИНАЦИОННЫХ ЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ И ИХ ИССЛЕДОВАНИЕ .....	74
ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ, ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ЕЁ ВЫПОЛНЕНИЯ .....	74
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ .....	75
ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ .....	79
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ.....	79
ВАРИАНТЫ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ.....	80
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ.....	81
ФОРМА ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ.....	81
ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА .....	83
ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА .....	83

## **ВВЕДЕНИЕ**

Лабораторный практикум соответствует программе проведения лабораторных работ по курсу «Основы электроники» на кафедре «Программное обеспечение ЭВМ, информационные технологии и прикладная математика» факультета фундаментальных наук Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Лабораторный практикум предназначен для студентов 2-го курса направления подготовки 09.03.04 «Программная инженерия» и содержит цели и задачи лабораторных работ, основные теоретические сведения, дается описание порядка выполнения и методические указания, приведены варианты индивидуальных заданий, контрольные вопросы и формы отчетов по лабораторным работам.

Выполнение лабораторного практикума позволит студентам получить и закрепить знания, умения и навыки, достижения которых является результатом освоения дисциплины «Основы электроники».

# **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1**

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

### **ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ, ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ЕЁ ВЫПОЛНЕНИЯ**

Целью выполнения лабораторной работы является формирование практических навыков моделирования электрических цепей и использование [законов Ома](#) и [Кирхгофа](#) для расчета [электрических цепей](#).

Основными задачами выполнения лабораторной работы являются:

1. определение значения токов в ветвях с помощью моделирования схемы;
2. определение значения токов в ветвях с использованием расчетных формул.

Результатами работы являются:

- схема электрической цепи и значения токов, полученные по показаниям приборов;
- уравнения для заданной электрической цепи и их решение;
- подготовленный отчет.

Необходимое оборудование для выполнения лабораторной работы:

- персональный компьютер с программным обеспечением NI Multisim.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

### Элементы электрических цепей

**Электрическая цепь** – это совокупность определенным образом соединенных друг с другом элементов, создающих пути для прохождения тока. Электрическая цепь состоит из источников и приемников электрической энергии и промежуточных звеньев (проводов), связывающих источники с приемниками.

**Источниками электрической энергии** являются устройства, которые преобразуют химическую, тепловую, механическую и другие виды энергии в электрическую.

**Приемниками электрической энергии**, или так называемой нагрузкой, являются электрические лампы, электрические двигатели и другие устройства, в которых электрическая энергия превращается в световую, тепловую, механическую и в другие виды энергии.

При исследовании процессов в электрических цепях вводится понятие **элемента**, под которым подразумевается не физические существующие электротехнические устройства, а их идеализированные модели, которым теоретически присваиваются определенные электрические и магнитные свойства.

Электрический ток представляет собой упорядоченное движение электрических зарядов. Носителями зарядов в металлах являются свободные электроны, а в жидкостях – ионы. Электрическому току предписывается направление – так называемое **положительное направление**. Но в общем случае ток представляет собой движение электрических зарядов разных знаков в разные стороны, и положительное направление тока выбирается произвольно (на схемах указывается стрелкой).

Элементы электрической цепи могут быть **активными и пассивными**.

К **пассивным элементам электрических цепей** относятся сопротивления, индуктивности и емкости.

1) **Сопротивление** – это идеализированный элемент электрической цепи, приближенно заменяющий резистор, в котором

происходит необратимый процесс преобразование электрической энергии в тепловую энергию.

Условное графическое изображение сопротивления показано на рис. 1.

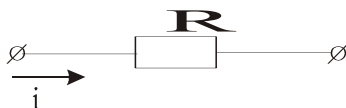


Рис. 1. Условное графическое изображение сопротивления

По закону Ома (1826)  $R = \frac{u}{i}$ .

В Международной системе единиц (СИ)  $i$  измеряется в амперах ( $A$ ),  $u$  – в вольтах ( $B$ ) и сопротивление в Омах ( $Om$ ). Величина, обратная сопротивлению, называется проводимостью  $g = \frac{1}{R}$ .

В системе СИ проводимость измеряется в сименсах ( $Cим$ ).

2) **Индуктивность** – идеализированный элемент электрической цепи, приближающийся по свойствам к индуктивной катушке, в которой накапливается энергия магнитного поля.

Условное графическое изображение индуктивности приведено на рис. 2.

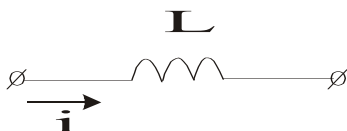


Рис. 2. Условное графическое изображение индуктивности

Ток в индуктивности определяется по формуле:

$$i = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u_L dt.$$

Индуктивность в системе СИ измеряется в генри ( $Гн$ ).

3) **Емкость** – это идеализированный элемент электрической цепи, заменяющий конденсатор, в котором накапливается энергия электрического поля.

Условное графическое обозначение емкости приведено на рис.3.





Рис.3. Условное графическое обозначение емкости

Ток, проходящий через емкость, определяется по формуле:

$$i = C \frac{du_c}{dt}.$$

В системе СИ емкость измеряется в фарадах (Ф).

**Активными элементами электрических цепей** являются источники электрической энергии: источники напряжения (источник ЭДС) и источники тока.

Упорядоченное перемещение положительных зарядов в источнике от меньшего потенциала к большему возможно за счет присущих источнику сторонних сил. Величина работы, затрачиваемой сторонними силами на перемещение единицы положительного заряда, называется **электродвижущей силой** (ЭДС) источника.

**Источник напряжения** (источник ЭДС) – это идеализированный источник питания, напряжение на котором не зависит от тока, проходящего через него. Предполагается, что внутри такого идеального источника напряжения пассивные элементы ( $R, L, C$ ) отсутствуют и прохождение через него не вызывает в нем падения напряжения.

На рис. 4 изображен источник напряжения. Стрелка внутри кружка указывает положительное направление ЭДС, т.е. направление возрастания потенциала внутри источника.



Рис. 4. Идеальный источник напряжения

**Источник тока** – это идеализированный источник питания, который дает ток, не зависящий от величины нагрузки цепи. Предполагается, что внутреннее сопротивление идеального источника бесконечно велико и поэтому параметры внешней электрической цепи, от которых зависит напряжение на зажимах источника, не влияют на ток источника.

На рис. 5 изображен источник тока, стрелка внутри которого показывает положительное направление тока  $I$ .

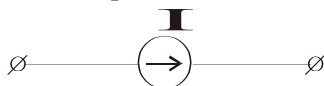


Рис. 5. Идеальный источник тока

**Линейной электрической цепью** называют такую цепь, в которой сопротивления, индуктивности и емкости не зависят от величин и направлений токов и напряжений. Пассивные элементы в таких цепях также являются линейными, т.к. напряжение и ток в каждом элементе связаны линейными уравнениями – алгебраическим или дифференциальным первого порядка.

Для активных элементов электрических цепей, условием линейности идеального источника напряжения является независимость величины ЭДС от тока, проходящего через источник. Условием линейности идеального источника тока является независимость тока от напряжения на его зажимах.

В действительности реальные элементы электрических цепей не являются линейными. Например, при прохождении тока через цепь, содержащую сопротивление, выделяются тепло. Сопротивление нагревается и его величина изменяется.

Рассмотрим основные определения, относящиеся к электрической цепи.

**Ветвь** образуется одним или несколько последовательно соединенными элементами цепи (рис. 6).

**Узел** – место соединения трех или большего числа ветвей (рис. 6 – 7).

Ветви, присоединенные к одной паре узлов, называют **параллельными** (рис. 7).

Любой замкнутый путь, проходящий по нескольким ветвям, называется **контуром** (рис. 6).

Замкнутый контур называется **независимым**, если он содержит хотя бы одну ветвь по сравнению с ранее рассмотренными контурами.

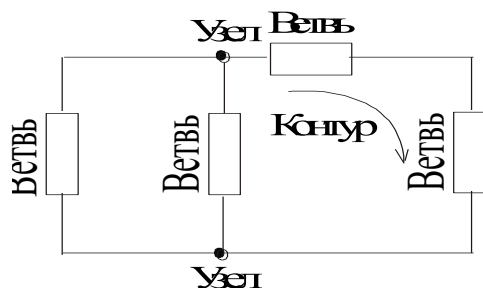


Рис. 6. Схема электрической цепи

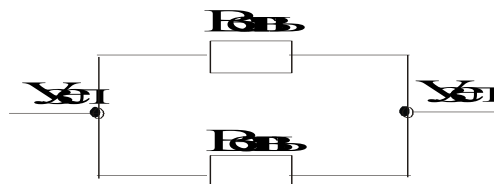


Рис. 7. Параллельное соединение ветвей

### Напряжение на участке цепи

Под напряжением на некотором участке электрической цепи понимают разность потенциалов между крайними точками этого участка.

Рассмотрим участок цепи (рис. 8), на котором есть сопротивление  $R$  и нет ЭДС.

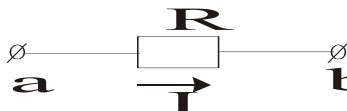


Рис. 8. Участок цепи без источника напряжения

Выберем положительное направление тока (указано стрелкой на рис. 8). Ток течет от более высокого потенциала к более низкому. Поэтому, потенциал точки  $a$  ( $\varphi_a$ ) выше потенциала точки  $b$  ( $\varphi_b$ ) на величину, равную произведению  $I$  на сопротивление  $R$

$$\varphi_a = \varphi_b + IR.$$

Напряжение между точками  $a$  и  $b$  :

$$u_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = IR.$$

Рассмотрим участок цепи (рис. 9), на котором имеется не только сопротивление, но и источник напряжения.

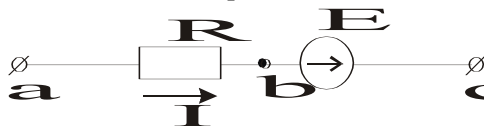


Рис. 9. Участок цепи с источником напряжения

По определению напряжения имеем:  $u_{ac} = \varphi_a - \varphi_c$ .

При переходе от точки  $c$  к точке  $b$  ЭДС источника напряжения направлена встречно, поэтому потенциал точки  $b$  меньше, чем потенциал точки  $c$ , на величину ЭДС:

$$\varphi_b = \varphi_c - E.$$

Ток течет от более высокого потенциала к более низкому. Поэтому потенциал точки  $a$  выше, чем потенциал точки  $b$  на величину падения напряжения в сопротивлении  $R$ .

$$\varphi_a = \varphi_b + IR.$$

В итоге имеем:

$$\varphi_a = \varphi_c - E + IR, \quad u_{ac} = \varphi_a - \varphi_c = IR - E.$$

Если для рис. 9 находить  $u_{ca}$ , то получим:

$$u_{ca} = \varphi_c - \varphi_a = -u_{ac}.$$

Изменения чередования индексов равносильно изменению знака этого напряжения.

### Закон Ома для участка цепи

**Закон Ома** устанавливает связь между током и напряжением на некотором участке цепи. Например, для рис. 8 можно записать:

$$u_{ab} = IR$$

или

$$I = \frac{u_{ab}}{R} = \frac{\varphi_a - \varphi_b}{R}.$$

Для участка цепи, изображенного на рис. 9 ток определяется по формуле:

$$I = \frac{\varphi_a - \varphi_c + E}{R} = \frac{u_{ac} + E}{R}.$$

## Законы Кирхгофа

Все электрические цепи подчиняются первому и второму закону Кирхгофа.

**Первый закон Кирхгофа.** Алгебраическая сумма токов в узле равна нулю:

$$\sum_i I_i = 0.$$

Знаки токов берутся с учетом выбранных положительных направлений токов. Всем токам, направляемым к узлу, присваивается одинаковый знак, и все токи, направленные от узла учитываются с противоположным знаком.

Например, для рис. 10 по первому закону Кирхгофа получим:

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

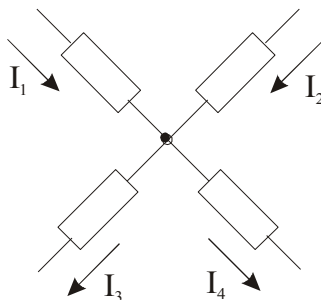


Рис. 10. Пример к первому закону Кирхгофа

Физически первый закон Кирхгофа означает, что движение зарядов в цепи происходит так, что ни в одном из узлов они не скапливаются.

**Второй закон Кирхгофа.** Алгебраическая сумма ЭДС в любом контуре цепи равна алгебраической сумме падений напряжения на элементах этого контура:

$$\sum IR = \sum E.$$

Обход контура совершается в произвольно выбранном направлении. При этом слагаемые входят со знаком плюс, если они совпадают с направлением обхода контура, и со знаком минус, если они не совпадают с ним.

Например, для рис. 11, согласно второму закону Кирхгофа получим:

$$R_1 I + R_2 I + R_3 I = E_1 - E_2.$$

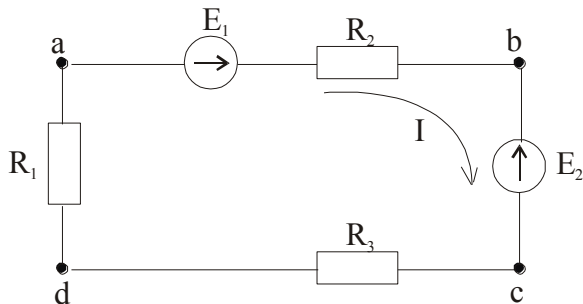


Рис. 11. Пример ко второму закону Кирхгофа

Если на схеме (рис. 11) нанести точки  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ , то полученное уравнение можно записать в другом виде:

$$u_{ab} + u_{bc} + u_{cd} + u_{da} = 0.$$

В этом случае второй закон Кирхгофа можно сформулировать следующим образом: алгебраическая сумма напряжений вдоль любого замкнутого контура равна нулю.

Законы Кирхгофа используются для нахождения токов в ветвях схемы. Порядок анализа электрических цепей с помощью законов Кирхгофа следующий:

- 1) произвольно выбирается направление токов во всех ветвях;
- 2) для  $(k-1)$  узла, где  $k$  – число узлов, составляется уравнение по [первому закону Кирхгофа](#);
- 3) выбираются независимые контура (их число  $n-k+1$ , где  $n$  – число ветвей) и произвольно устанавливаются в них направление обходов;
- 4) для каждого независимого контура составляется уравнение по [второму закону Кирхгофа](#);
- 5) решается система  $n$  – уравнений с  $n$  – неизвестными, составленных по пунктам 2 и 4;
- 6) появление отрицательных результатов, для каких – либо токов означает, что их истинное направление противоположно выбранному.

**Пример.** Найти токи в ветвях схемы рис. 12, при следующих исходных данных:

$$E_1 = 15\text{ В}, E_2 = 30\text{ В}, R_1 = R_3 = R_5 = 20\text{ Ом}, R_2 = R_4 = 10\text{ Ом}.$$

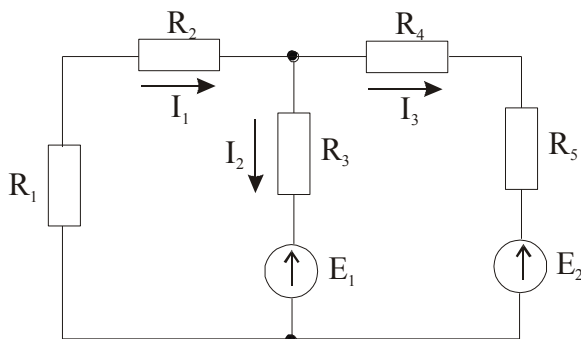


Рис. 12. Схема электрической цепи

**Решение:**

Следуя порядку анализа электрических цепей, произвольно выберем направления токов во всех ветвях. В схеме два узла, поэтому по [первому закону Кирхгофа](#) можно составить одно уравнение:

$$I_1 = I_2 + I_3.$$

Количество независимых контуров в данной схеме равно 2. Направления обхода контуров выбираем по часовой стрелке. Для контура  $R_1 R_2 R_3 E_1$  по [второму закону Кирхгофа](#) получим:

$$R_1 I_1 + R_2 I_1 + R_3 I_2 = -E_1.$$

Для контура:  $E_1 R_3 R_4 R_5 E_2$

$$R_4 I_3 + R_5 I_3 - R_3 I_2 = -E_2 + E_1.$$

Совместное решение трех уравнений дает результат:

$$I_1 = -0,5\text{ А}, I_2 = 0\text{ А}, I_3 = -0,5\text{ А}.$$

[Отрицательные значения токов](#)  $I_1$  и  $I_3$  говорит о том, что выбранные направления этих токов не совпадают с истинными направлениями. В действительности токи  $I_1$  и  $I_3$  текут в обратном направлении.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

На выполнение лабораторной работы отводится 4 академических часов: 3 часов на выполнение и сдачу лабораторной работы и 1 час на подготовку отчета.

Порядок выполнения:

1. Изучить краткий теоретический материал.
2. Собрать схему электрической цепи и определить значения токов в ветвях схемы.
3. Составить уравнения для заданной электрической цепи и вычислить значения токов в ветвях схемы.
4. Оформить отчет.
5. Защитить выполненную работу у преподавателя.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Для электрической цепи (рис.13) найдем токи в ветвях.

1) При моделировании электрической схемы необходимо воспользоваться источниками ЭДС из раздела *Sources*, резисторами из раздела *Basic* и амперметрами из раздела *Indicators*. Для каждого источника ЭДС задается значение напряжение (пункт *Component Properties* на панели инструментов, вкладка – *Value*). Для каждого резистора задается сопротивление (пункт *Component Properties* на панели инструментов, вкладка – *Value*). Каждый элемент электрической цепи должен быть обозначен соответствующей меткой (пункт *Component Properties* на панели инструментов, вкладка – *Label*).

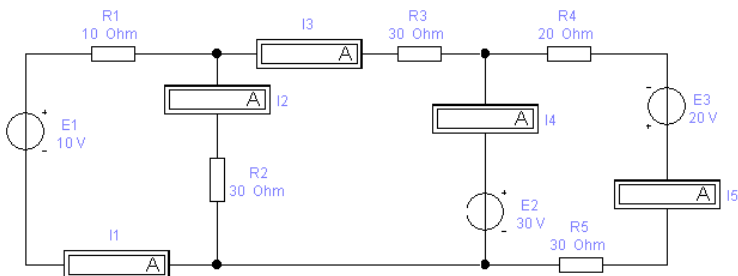




Рис. 13. Схема электрической цепи

В результате измерений получим:  $I_1 = 0,2 \text{ A}$  ,  $I_2 = -0,4 \text{ A}$  ,  $I_3 = -0,6 \text{ A}$  ,  $I_4 = 1,6 \text{ A}$  ,  $I_5 = -1 \text{ A}$  .

2) В схеме три узла ( $k = 3$ ) и пять ветвей ( $n = 5$ ). По [первому закону Кирхгофа](#) составим два уравнения, по [второму закону Кирхгофа](#) – три уравнения:

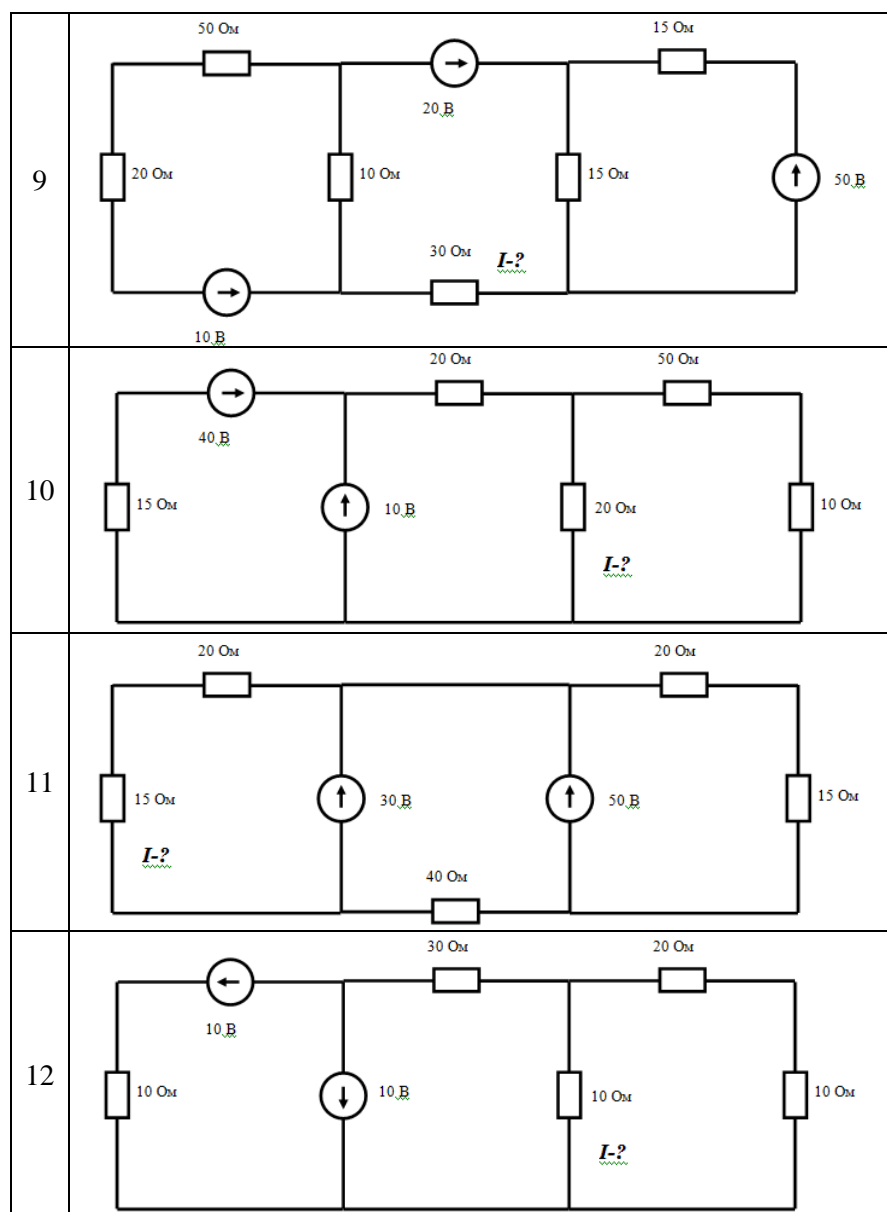
$$\begin{cases} I_2 = I_1 + I_3 \\ I_3 + I_5 = I_4 \\ -R_1 I_1 - R_2 I_2 = E_1 \\ R_2 I_2 + R_3 I_3 = -E_2 \\ -R_4 I_5 - R_5 I_5 = E_2 + E_3 \end{cases}$$

Совместное решение трех уравнений дает результат:  $I_1 = 0,2 \text{ A}$  ,  $I_2 = -0,4 \text{ A}$  ,  $I_3 = -0,6 \text{ A}$  ,  $I_4 = -1,6 \text{ A}$  ,  $I_5 = -1 \text{ A}$  . [Отрицательные значения токов](#) говорит о том, что выбранные направления токов не совпадают с истинными направлениями.

# ВАРИАНТЫ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ

№	Исследуемая электрическая схема
1	
2	
3	
4	

5	
6	
7	
8	



13	
14	
15	

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. В чем отличия между источниками и приемниками электрической энергии?
2. На какие группы делятся элементы электрических цепей?
3. Какие элементы электрических цепей относятся к пассивным?
4. Приведите формулы для определения тока, проходящего через пассивные элементы.
5. Что понимается под ЭДС источника?
6. Дайте определение линейной электрической цепи.
7. Сформулируйте закон Ома для участка цепи.
8. В чем заключаются законы Кирхгофа, и каковы цели их использования?
9. Для схемы (рис. 12), определите токи в ветвях при следующих исходных данных:  $E_1 = 10\text{В}$  ,  $E_2 = 30\text{В}$  ,  $R_1 = R_3 = 20\text{Ом}$  ,  $R_2 = R_4 = R_5 = 20\text{Ом}$ .

## ФОРМА ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Номер варианта студенту выдается преподавателем. Отчет на защиту предоставляется в печатном виде.

Структура отчета (на отдельном листе(-ах)):

- титульный лист;
- цели и задачи работы;
- формулировка задания (вариант);
- схема электрической цепи и значения токов, полученные по показаниям приборов;
- уравнения для заданной электрической цепи и результаты их решения;
- выводы.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2**

### **РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С ПОМОЩЬЮ ТЕОРЕМ ОБ ЭКВИВАЛЕНТНОМ ИСТОЧНИКЕ**

#### **ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ, ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ЕЁ ВЫПОЛНЕНИЯ**

Целью выполнения лабораторной работы является формирование практических навыков использования методов для расчета электрических цепей, опирающихся на [теоремы](#) об эквивалентном источнике.

Основными задачами выполнения лабораторной работы являются:

1. определение значения тока в ветви с помощью моделирования схемы;
2. определение значения тока в ветви с использованием теорем об эквивалентном источнике.

Результатами работы являются:

- схемы электрических цепей и показания приборов;
- уравнения, составленные по теоремам об эквивалентном источнике для заданной электрической цепи, и их решение;
- подготовленный отчет.

Необходимое оборудование для выполнения лабораторной работы:

- персональный компьютер с программным обеспечением NI Multisim.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

### Активный и пассивный двухполюсники

В любой электрической схеме всегда можно выделить, какую – то одну ветвь, а всю остальную часть схемы, вне зависимости от ее структуры и сложности, условно изобразить некоторым прямоугольником (рис. 14). **Двухполюсник** – это обобщенное название схемы, которая своими двумя выходными зажимами (полюсами) присоединяется к выделенной ветви.

Если в двухполюснике есть ЭДС или источник тока, то такой двухполюсник называется **активным**.

Если в двухполюснике нет ЭДС и источника тока, то двухполюсник называется **пассивным**.

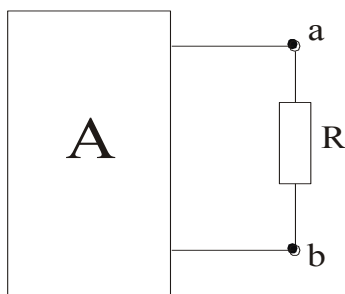


Рис. 14. Условное изображение активного двухполюсника

Для расчета электрических цепей существуют методы, которые опираются на два варианта теоремы об эквивалентном источнике.

**Теорема об эквивалентном источнике напряжения** (Thevenin's theorem): Любой линейный активный двухполюсник может быть представлен в виде эквивалентного источника напряжения, ЭДС которого равна напряжению холостого хода на зажимах двухполюсника, а внутреннее сопротивление равно сопротивлению между зажимами двухполюсника, когда все источники внутри него выключены.

Холостой ход соответствует размыканию ветви, т.е. отсутствию тока в ветви.

**Пример.** Задана электрическая схема (рис. 15), в которой:



$R_1 = 15 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 10 \text{ Ом}$ ,  $E_1 = 20 \text{ В}$ .

Найти ток  $I_3$ .

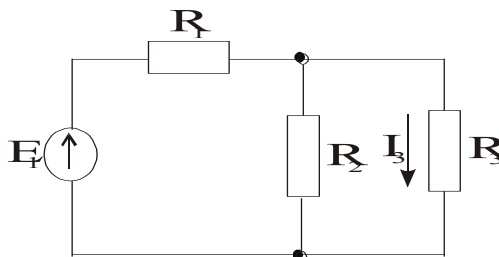


Рис. 15. Схема электрической цепи

**Решение:**

Для определения тока  $I_3$  мысленно удалим  $R_3$  из цепи и воспользуемся теоремой об эквивалентном источнике напряжения. Оставшаяся часть схемы представляет собой активный двухполюсник (рис. 16).

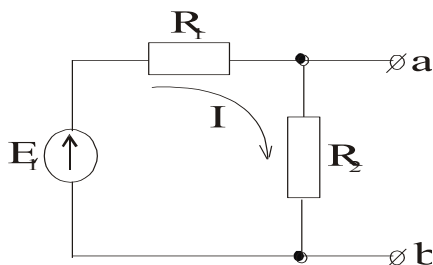


Рис. 16. Преобразованная схема электрической цепи

Найдем напряжение холостого хода  $u_{abx.x}$  и внутреннее сопротивление двухполюсника  $R_{ab}$ .

$$I = \frac{E_1}{R_1 + R_2} = \frac{20}{25} = 0,8 \text{ А} \quad ; \quad u_{abx.x} = \varphi_a - \varphi_b = IR_2 = 0,8 \cdot 10 = 8 \text{ В} \quad ;$$

$$R_{ab} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{150}{25} = 6 \text{ Ом}.$$

По теореме об эквивалентном источнике напряжения линейный активный двухполюсник представляется в виде генератора ЭДС и сопротивления  $R_{ab}$  (рис. 17).

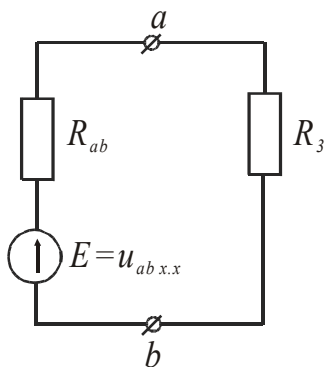


Рис. 17. Преобразованная, согласно теореме, схема электрической цепи

Из рис. 17 найдем ток  $I_3$ :

$$I_3 = \frac{u_{abx.x}}{R_{ab} + R_3} = \frac{8}{6 + 10} = 0,5 \text{ A}.$$

**Теорема об эквивалентном источнике тока** (Norton's theorem):

Любой линейный активный двухполюсник может быть представлен в виде эквивалентного источника тока, ток которого равен току короткого замыкания, проходящего между зажимами двухполюсника, а внутреннее сопротивление равно сопротивлению между зажимами двухполюсника, когда все источники внутри него выключены.

Для рассмотренного примера (рис. 15) мысленно удалим  $R_3$  и воспользуемся теоремой об эквивалентном источнике тока (рис. 18).

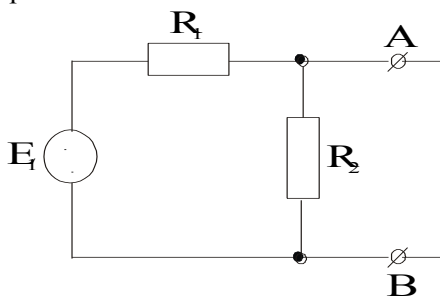


Рис. 18. Преобразованная схема электрической цепи

Сопротивление  $R_3$  стало равным нулю ( $R_3 = 0$ ) и для этой ветви имеет место режим короткого замыкания, а протекающий ток по этой ветви будет являться током короткого замыкания ( $I_{кз}$ ).

$$I_{\kappa 3} = \frac{E_I}{R_I} = \frac{20}{15} = 1,33 \text{ A}.$$

Схема, эквивалентная рис. 15, представлена на рис. 19.

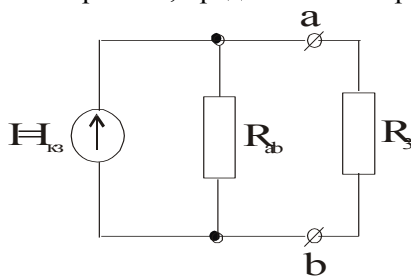


Рис. 19. Схема электрической цепи, преобразованная по теореме об эквивалентном источнике тока

Из рис. 19 определим ток  $I_3$  :

$$I_3 = I_{\kappa 3} \frac{R_{ab}}{R_3 + R_{ab}} = 1,33 \cdot \frac{6}{10 + 6} = 0,5 \text{ A}.$$

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

На выполнение лабораторной работы отводится 2 академических часа.

Порядок выполнения:

1. Изучить краткий теоретический материал.
2. Собрать схему электрической цепи и определить значение напряжение холостого хода, тока короткого замыкания и сопротивления между зажимами двухполюсника.
3. Составить уравнения и вычислить значение напряжение холостого хода, тока короткого замыкания и сопротивления между зажимами двухполюсника.
4. Согласно теоремам об эквивалентном источнике построить преобразованные схемы электрической цепи и определить значение тока в исследуемой ветви.
5. Оформить отчет.
6. Защитить выполненную работу у преподавателя.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Для электрической цепи (рис.20) определим ток, проходящий через сопротивление  $R_2$ .

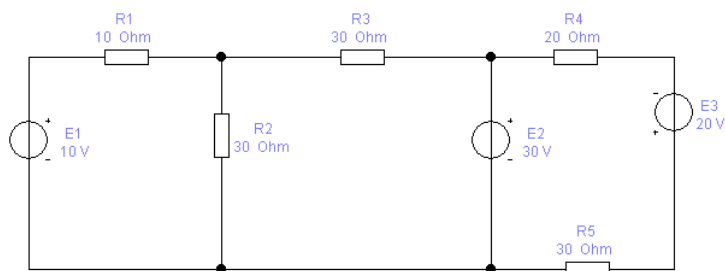


Рис. 20. Исходная схема

Схема исследования электрической цепи показана на рис.21.

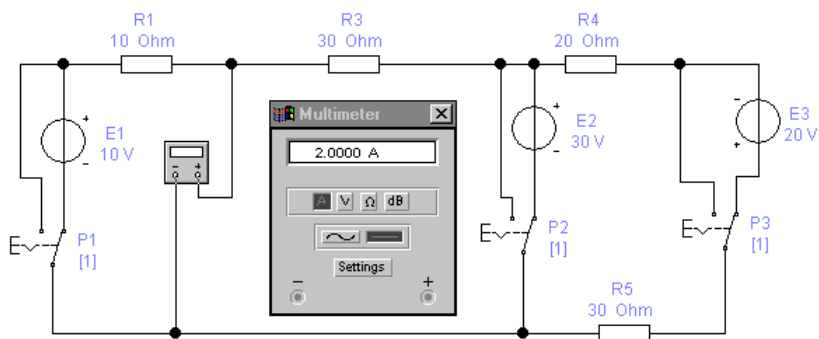


Рис. 21. Схема исследования электрической цепи

Сопротивление  $R_2$  из цепи исключено. Для измерения напряжения холостого хода ( $U_{xx}$ ), тока короткого замыкания ( $I_{кз}$ ) и сопротивления  $R_{ab}$  используется мультиметр. В электрическую цепь включены три переключателя ( $P1$ ,  $P2$ ,  $P3$ ), которые используются для отключения источников постоянного напряжения при измерении  $R_{ab}$ . Переключение осуществляется нажатием клавиши «1».

В результате измерений получаем следующие значения:

$$U_{xx} = 15 \text{ В}; I_{кз} = 2 \text{ А}; R_{ab} = 7,5 \text{ В}.$$

По формулам определим значение тока  $I_2$ :

$$I_2 = \frac{U_{xx}}{R_{ab} + R_2} = \frac{15}{7,5 + 30} = 0,4 \text{ А};$$

$$I_2 = I_{кз} \frac{R_{ab}}{R_{ab} + R_2} = 2 \cdot \frac{7,5}{7,5 + 30} = 0,4 \text{ А}.$$

Произведем расчет для схемы (рис.20). Сопротивление  $R_{ab}$  определим из схемы, в которой источники постоянного напряжения отключены (рис.22).

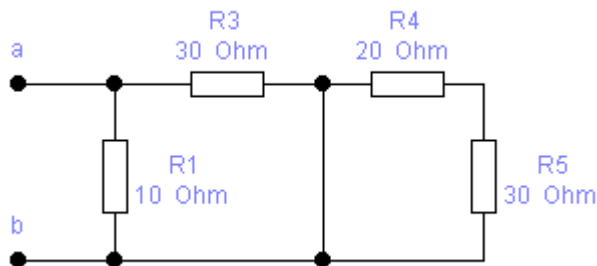


Рис.22. Схема для расчета  $R_{ab}$

$$R_{ab} = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} = \frac{30 \cdot 10}{30 + 10} = 7,5 \text{ Ом}.$$

Напряжения холостого хода  $U_{xx}$  найдем из схемы на рис. 23.

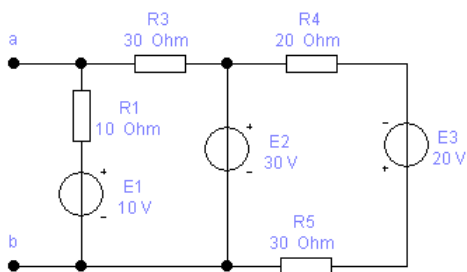


Рис. 23. Схема для расчета  $U_{xx}$

$U_{xx} = IR_1 - E_1$  ; где  $I$  – ток в контуре  $E_1 R_1 R_3 E_2$  , который определяется по формуле:  $I = \frac{E_1 - E_2}{R_1 + R_3} = \frac{-20}{40} = -0,5 \text{ A}.$

$$U_{xx} = 0,5 \cdot 10 - 10 = -15 \text{ В}.$$

Искомый ток через сопротивление  $R_2$  рассчитывается по формуле:

$$I_2 = \frac{U_{xx}}{R_{ab} + R_2} = \frac{-15}{7,5 + 30} = -0,4 \text{ A}.$$

Согласно теореме об эквивалентном источнике тока, ток  $I_2$  можно определить через ток короткого замыкания  $I_{кз}$  по формуле:

$$I_2 = I_{кз} \frac{R_{ab}}{R_{ab} + R_2}.$$

## ВАРИАНТЫ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ

Варианты заданий соответствуют вариантам лабораторной работы № 1. Рассчитывается значение тока, проходящего через сопротивление и обозначенное на схеме  $I - ?$ .

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Что называется двухполюсником?
2. Какие двухполюсники называются активными?
3. Какие двухполюсники называются пассивными?
4. Сформулируйте теорему об эквивалентном источнике напряжения.
5. Сформулируйте теорему об эквивалентном источнике тока.
6. Чем можно заменить линейный активный двухполюсник согласно теореме об эквивалентном источнике напряжения?
7. Чем можно заменить линейный активный двухполюсник согласно теореме об эквивалентном источнике тока?
8. Объясните способ определения напряжения холостого хода.
9. Объясните способ определения тока короткого замыкания.
10. Как определяется внутреннее сопротивление двухполюсника?

## ФОРМА ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Номер варианта студенту выдается преподавателем. Отчет на защиту предоставляется в печатном виде.

Структура отчета (на отдельном листе(-ах)):

- титульный лист;
- цели и задачи работы;
- формулировка задания (вариант);
- схема электрической цепи и значения напряжение холостого хода, тока короткого замыкания и сопротивления

между зажимами двухполюсника токов, полученные по показанию прибора;

- уравнения для определения напряжения холостого хода, тока короткого замыкания и сопротивления между зажимами двухполюсника;
- преобразованные схемы электрической цепи и вычисленное значение тока в исследуемой ветви;
- выводы.



## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ, СОДЕРЖАЩИХ ДИОДЫ**

### **ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ, ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ЕЁ ВЫПОЛНЕНИЯ**

Целью выполнения лабораторной работы является формирование практических навыков моделирования и расчета электрических цепей, содержащих диоды.

Основными задачами выполнения лабораторной работы являются:

1. определение значения тока и напряжение на диоде с помощью моделирования схемы;
2. определение значения тока и напряжение на диоде графическим способом.

Результатами работы являются:

- схема электрической цепи и значения тока и напряжение на диоде, полученные по показаниям приборов;
- уравнение линии нагрузки;
- график вольт – амперной характеристики диода и линии нагрузки;
- подготовленный отчет.

Необходимое оборудование для выполнения лабораторной работы:

- персональный компьютер с программным обеспечением NI Multisim.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

**Полупроводниковым диодом** называется двухэлектродный прибор, основу которого составляет электронно-дырочный ( $n$ - $p$ ) переход (рис.24).

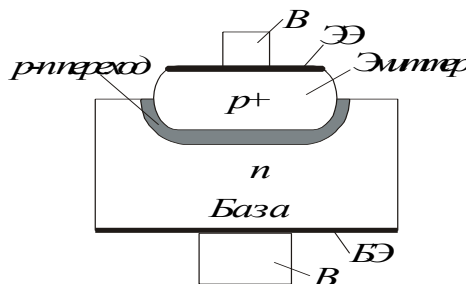


Рис.24. Устройство полупроводникового диода

Изготавливают диоды главным образом из кремния и германия. Одна из областей  $n$ - $p$  – структуры диода – эмиттер, вследствие того что в нее введено больше примеси, имеет большую концентрацию основных носителей, чем другая область, называемая базой. Поэтому при прохождении прямого тока носители инжектируются преимущественно из эмиттера в базу. База и эмиттер с помощью специальных электродов ЭЭ, БЭ, обеспечивающих омический контакт, соединяются с металлическими выводами В, посредством которых диод включается в электрическую цепь.

### Отличия реальной характеристики от теоретической

Свойствами электронно-дырочного перехода определяются все важнейшие характеристики и параметры полупроводникового диода. **Реальная вольт – амперная характеристика** полупроводникового диода показана на рис. 25, здесь же пунктиром нанесена **теоретическая вольт – амперная характеристика** электронно-дырочного перехода.

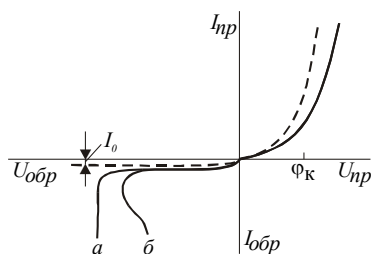


Рис. 25. Теоретическая и реальная вольт – амперная характеристика диода

В области малых токов реальная и теоретическая характеристики совпадают. Но при больших прямых токах, а также при больших обратных напряжениях характеристики расходятся, что является следствием ряда причин, не учтенных при теоретическом анализе процессов в электронно-дырочном переходе.

В области больших прямых токов порядка десятков и более миллиампер становится значительным падение напряжения на омическом распределенном сопротивлении базы диода и сопротивлении электродов. При этом напряжение на электронно-дырочном переходе будет заметно меньше напряжения, приложенного к диоду, в результате реальная характеристика идет ниже теоретической и оказывается почти линейной.

### Рабочий режим

В практических схемах в цепь диода включается какая-либо нагрузка, например резистор (рис. 26).

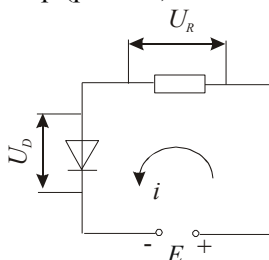


Рис. 26. Схема диода с нагрузкой

Режим диода с нагрузкой называют **рабочим режимом**. Если бы диод обладал линейным сопротивлением, то общее сопротивление

цепи было бы равно сумме сопротивления диода постоянному току  $R_0$  и сопротивления нагрузочного резистора  $R_n$ . Но диод обладает нелинейным сопротивлением, и значение  $R_0$  у него изменяется при изменении тока. Поэтому расчет тока делают графически. Задача состоит в следующем: известны значения  $E$ ,  $R_n$  и характеристика диода. Требуется определить ток в цепи и напряжение на диоде.

Характеристику диода следует рассматривать как график некоторого уравнения, связывающего величины  $i$  и  $U$ . Для сопротивления  $R_n$  подобным уравнением является закон Ома:

$$i = U_R / R_n = (E - U) / R_n \quad (1)$$

Имеется два уравнения с двумя неизвестными  $i$  и  $U$ , причем одно из уравнений дано графически. Для решения такой системы уравнений надо построить график второго уравнения и найти координаты точки пересечения двух графиков.

Уравнение для сопротивления  $R_n$  – это прямая линия, называемая *линией нагрузки*. Ее можно построить по двум точкам на осях координат. При  $i = 0$  из уравнения (1) получим:  $E - U_D = 0$  или  $U_D = E$ , что соответствует точке  $A$  на рис. 27. Если  $U = 0$ , то  $i = E / R_n$  (точка  $B$  на рис. 27). Через точки  $A$  и  $B$  проводим прямую, которая является линией нагрузки. Координаты точки  $T$  дают решение поставленной задачи. Следует отметить, что все остальные точки прямой  $AB$  не соответствуют каким-либо рабочим режимам диода.

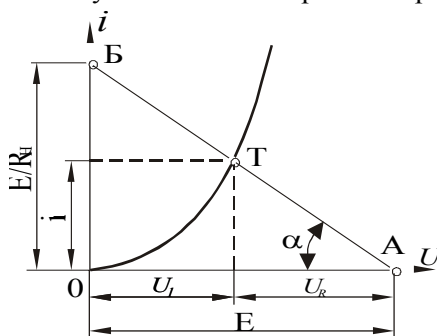


Рис. 27. Построение линии нагрузки

Цепь, изображенная на рис. 26 является нелинейной. Характеристику такой цепи, называемую *рабочей характеристикой диода*, т.е. график зависимости  $i = f(U)$ , можно получить суммированием напряжений для характеристик диода и нагрузочного резистора  $R_n$  (рис. 28). Характеристика резистора  $R_n$  выражает закон Ома  $i = U_R / R_n$  и является прямой линией, проходящей через начало координат.

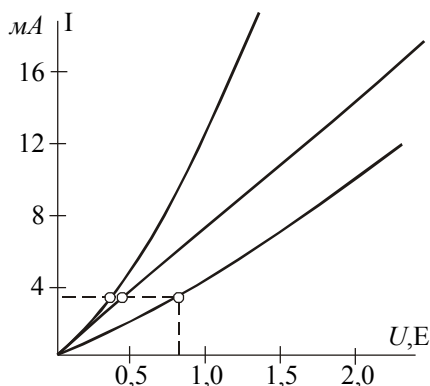


Рис. 28. Построение рабочей характеристики для цепи, изображенной на рис. 26

Для построения этой прямой на график наносится точка, соответствующая произвольному напряжению  $U_R$  и току  $U_R / R_n$ . Через эту точку и начало координат проводится прямая.

Рабочую характеристику цепи  $i = f(U)$  строим, складывая для нескольких значений тока  $i$  напряжения  $U$  и  $U_R$ , т.к.  $E = U + U_R$ . Например, при токе  $3 \text{ mA}$  имеем:  $U = 0,4 \text{ V}$  и  $U_R = 0,5 \text{ V}$ . Суммируя эти напряжения, получаем  $E = 0,9 \text{ V}$  и соответствующую точку результирующей характеристики. Аналогично находим другие точки, и через них проводим кривую.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

На выполнение лабораторной работы отводится 2 академических часа.

Порядок выполнения:

1. Изучить краткий теоретический материал.
2. Собрать схему электрической цепи и определить значения тока и напряжение на диоде.
3. Определить значения тока и напряжение на диоде [графическим способом](#).
4. Оформить отчет.
5. Защитить выполненную работу у преподавателя.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Рассмотрим электрическую цепь (рис. 29).

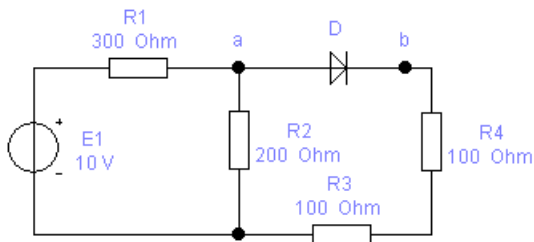


Рис. 29. Исследуемая электрическая цепь

Анализ схемы проведем по [теореме](#) об эквивалентном источнике напряжения. Для этого преобразуем исходную схему (рис. 30) и найдем  $U_{abxx}$  и  $R_{ab}$ .

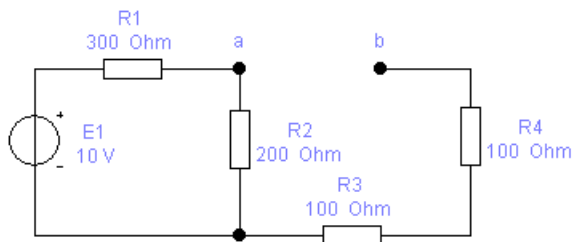


Рис. 30. Преобразованная электрическая схема

Для определения  $U_{abxx}$  можно, например, воспользоваться вольтметром (рис. 31) или мультиметром. Для определения  $R_{ab}$  воспользуемся мультиметром, но при этом необходимо отключить источник напряжения  $E_I$ .

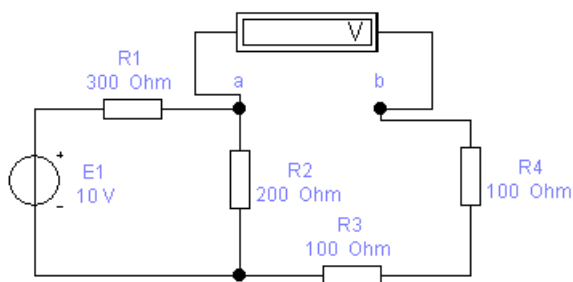


Рис. 31. Схема для определения  $U_{abxx}$

В результате измерений получим следующие значения:  
 $U_{abxx} = 4 \text{ В}$ ;  $R_{ab} = 320 \text{ Ом}$ .

Значения  $U_{abxx}$  и  $R_{ab}$  определим по расчетным формулам:

$$R_{ab} = \frac{R_I R_2}{R_I + R_2} + R_3 + R_4 = \frac{200 \cdot 300}{200 + 300} + 200 = 120 + 200 = 320 \text{ Ом};$$

$$U_{abxx} = \frac{R_2}{R_I + R_2} \cdot E_I = \frac{200}{200 + 300} \cdot 10 = 4 \text{ В}.$$

Согласно [теореме](#) об эквивалентном источнике напряжения исходную схему (рис. 29) преобразуем в схему, показанную на рис. 32.

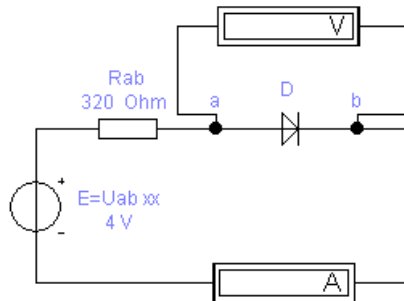


Рис. 32. Преобразованная, согласно теореме электрическая схема

Из преобразованной схемы (рис. 32), с помощью вольтметра и амперметра найдем ток и напряжение на диоде:  $U_D = 0,7153 \text{ В}$ ,  $I_D = 10,27 \text{ мА}$ .

Определим значения тока в цепи и напряжение на диоде графическим способом. Для этого в одной системе координат можно построить вольт – амперную характеристику (ВАХ) диода и линию нагрузки. Уравнение линии нагрузки имеет вид:

$$I_D = f(U_D) = \frac{U_{abxx} - U_D}{R_{ab}}.$$

Эта линия строится по токам пересечения с осями координат:

$$I_D = 0; U_D = U_{abxx} = 4 \text{ В};$$

$$U_D = 0; I_D = \frac{U_{abxx}}{R_{ab}} = 12,5 \text{ мА}.$$

Точка пересечения ВАХ и линии нагрузки будет соответствовать искомым значениям тока и напряжения.

С помощью схемы, изображенной на рис. 33 построим прямую ветвь ВАХ диода.



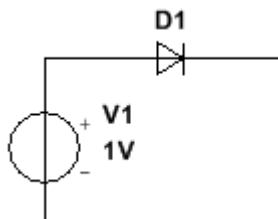


Рис. 33. Схема для исследования прямой ветви ВАХ диода

Схема (рис. 33) содержит источник напряжения ( $V1$ ) и диод ( $D1$ ). Проведем исследование схемы с помощью меню *Simulate* пункт *Analyses and Simulation* вид анализа *DC Sweep*.

В диалоговом окне пункта *DC Sweep* на вкладке *Analysis parameters* задаются параметры источников при исследовании схемы по постоянному току. В схеме на рис. 33 имеется один источник напряжения  $V1$ . Для источника  $V1$  задается начальное (*Start value*) и конечное (*Stop value*) значения изменяемой величины. Кроме этого задается шаг изменения величины (*Increment*). Для схемы на рис. 33 можно задать следующие значения:  $0,65\text{ V}$ ;  $0,8\text{ V}$  и  $0,001\text{ V}$  (рис. 34).

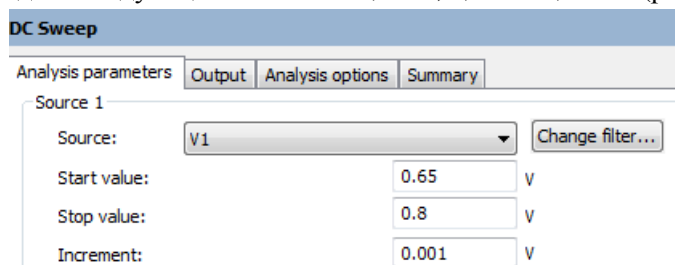


Рис. 34. Настройки вкладки *Analysis parameters* диалогового окна *DC Sweep*

На вкладке *Output* необходимо выбрать изменяемую величину (*Variables in circuit*). Для получения ВАХ диода это изменение тока на диоде  $I(D1)$ .

Результаты моделирования показаны на рис. 35. Для полученного графика задаются параметры изображения (кнопка *Properties*). К параметрам относятся: атрибуты заголовка изображения, атрибуты координатных осей и выводимой линии.

Кнопка *Show Cursors* позволяет вывести числовые значения для двух визирных линий. В частности на рис. 35 показана визирная линия в точке пересечения ВАХ с линией нагрузки. Числовые значения этой точки:  $I = 10,27 \text{ мА}$  ;  $U = 715,29 \text{ мВ}$  соответствуют ранее полученным измеренным значениям.

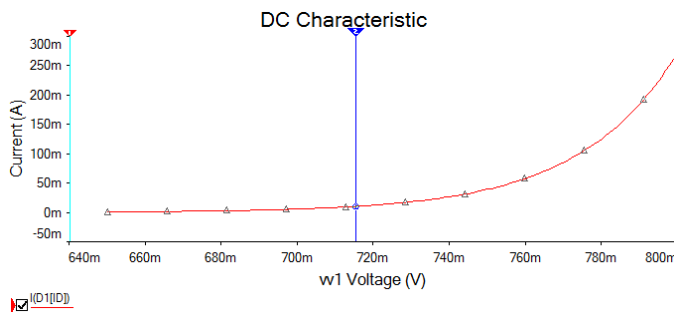


Рис. 35. Прямая ветвь ВАХ диода

Выводы, которые можно сделать из приведенных расчетов: ток в цепи и напряжение на диоде соответствуют значениям  $U_D = 0,7153 \text{ В}$  ,  $I_D = 10,27 \text{ мА}$  .

В преобразованной схеме (рис. 32) источник напряжения соответствует  $E = 4 \text{ В}$  . Часть этого напряжения падает на диоде  $U_D = 0,7153 \text{ В}$  , а часть на сопротивлении  $R_{ab}$  :

$$U_R = I_D R_{ab} = 0,01027 \cdot 320 = 3,2864 \text{ В} .$$

$$\text{Таким образом } E = U_R + U_D = 3,2864 + 0,7153 = 4,0017 \text{ В} .$$

# ВАРИАНТЫ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ

№	Исследуемая электрическая схема
1	<p>Circuit diagram for task 1: A voltage source of 20 В (green) is in series with a 400 resistor. This is in parallel with a 15 В (green) source in series with a 200 resistor. The main branch contains a diode in series with a 100 resistor.</p>
2	<p>Circuit diagram for task 2: A voltage source of 40 В (green) is in series with a 100 resistor. This is in parallel with a 300 resistor. The main branch contains a diode in series with a 200 resistor. There is also a 50 resistor in series with the source.</p>
3	<p>Circuit diagram for task 3: A voltage source of 30 В (green) is in series with a 200 resistor. This is in parallel with a 100 resistor. The main branch contains a diode in series with a 50 resistor. There is also a 300 resistor in series with the source and a 150 resistor in series with the diode.</p>
4	<p>Circuit diagram for task 4: A voltage source of 40 В (green) is in series with a 200 resistor. This is in parallel with a 10 В (green) source in series with a 50 resistor. The main branch contains a diode in series with a 140 resistor. There is also a 100 resistor in series with the source.</p>

5	
6	
7	
8	

9	
10	
11	
12	

13	
14	
15	

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. В чем отличие реальной [вольт – амперной характеристики](#) диода от теоретической?
2. Что понимается под пробоем диода?
3. Какие основные виды пробоев электронно – дырочного перехода существуют?
4. Назовите виды электрических пробоев электронно – дырочного перехода?
5. Какой вид пробоя электронно – дырочного перехода является обратимым?

6. Для каких типов электронно – дырочных переходов характерны лавинный и туннельный пробой?
7. Чем объясняется тепловой пробой диода?
8. Что характеризуют барьерная и диффузионная емкости электронно – дырочного перехода?
9. Каково влияние температуры на электронно – дырочного переход?
10. Что понимается под рабочим режимом диода?

### **ФОРМА ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ**

Номер варианта студенту выдается преподавателем. Отчет на защиту предоставляется в печатном виде.

Структура отчета (на отдельном листе(-ах)):

- титульный лист;
- цели и задачи работы;
- формулировка задания (вариант);
- схемы электрических цепей и значения тока и напряжение на диоде, полученные по показаниям приборов;
- вольт – амперная характеристика диода и построенная по точкам линия нагрузки;
- выводы.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4** **ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ ДЛЯ** **ВЫПРЯМЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

### **ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ,** **ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ЕЁ ВЫПОЛНЕНИЯ**

Целью выполнения лабораторной работы является формирование практических навыков построения и исследования схем [выпрямителей](#).

Основными задачами выполнения лабораторной работы являются:

1. построить модель [однополупериодной схемы](#) выпрямителя;
2. для заданных значений входного синусоидального сигнала получить [временные диаграммы](#) на диоде и сопротивлении нагрузки.

Результатами работы являются:

- схема однополупериодного выпрямителя;
- временные диаграммы, соответствующие всем элементам исследуемой схемы;
- подготовленный отчет.

Необходимое оборудование для выполнения лабораторной работы:

- персональный компьютер с программным обеспечением NI Multisim.



## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

### Применение полупроводниковых диодов для выпрямления переменного тока

Выпрямление переменного тока – один из основных процессов в радиоэлектронике. В выпрямительном устройстве энергия переменного тока преобразуется в энергию постоянного тока. Полупроводниковые диоды находят здесь применение, поскольку они хорошо проводят ток в прямом направлении и плохо в обратном.

Однополупериодная схема выпрямления переменного тока показана на рис. 36.

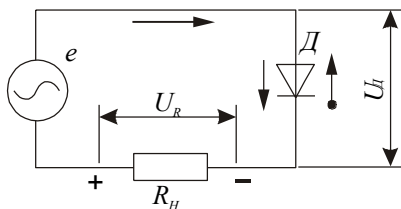


Рис. 36. Схема выпрямителя

В ней последовательно соединены генератор переменной ЭДС ( $e$ ), диод  $Д$  и нагрузочный резистор  $R_n$ .

Работа выпрямителя происходит следующим образом. Будем считать, что генератор дает синусоидальную ЭДС  $e = E_m \sin \omega t$ . В течение одного полупериода напряжение для диода является прямым и проходит ток, создающий на резисторе  $R_n$  падение напряжения  $U_R$ . В течение следующего полупериода напряжение является обратным, тока практически нет и  $U_R = 0$ . Таким образом, через диод, нагрузочный резистор и генератор проходит пульсирующий ток в виде импульсов, длящихся полпериода и разделенных промежутками также в полпериода. Этот ток называют выпрямленным током. Он создает на резисторе  $R_n$  выпрямленное напряжение.

На рис. 37 изображена синусоида с амплитудой  $E_m$ , что соответствует переменной ЭДС генератора. Как правило, сопротивление нагрузки  $R_n$  во много раз больше сопротивления

диода, и тогда нелинейностью диода можно пренебречь (рабочая характеристика близка к линейной). В этом случае выпрямленный ток имеет форму импульсов, близкую к полусинусоиде с максимальным значением  $I_{max}$ . Аналогичная кривая, но с другим масштабом, будет и для выпрямленного напряжения  $U_R$ , т.к.  $U_R = i \cdot R_n$  (рис. 37).

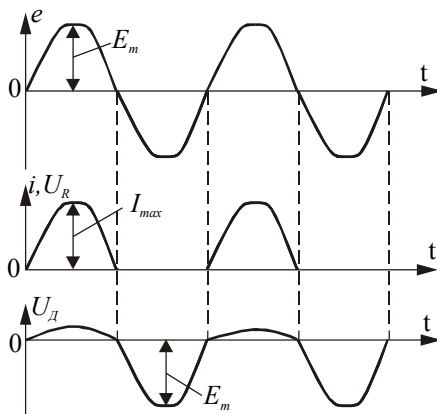


Рис. 37. Временные диаграммы работы выпрямителя

Напряжение на диоде (рис. 37) имеет несинусоидальную форму. У этого напряжения амплитуды положительных и отрицательных полувольт неодинаковы. Амплитуда положительных полувольт очень мала. Это объясняется тем, что когда проходит прямой ток, то большая часть напряжения источника падает на нагрузочном резисторе  $R_n$ , сопротивление которого значительно превышает сопротивление диода. В этом случае:

$$U_{np.max} = E_m - U_{Rmax} = E_m - I_{max}R_n < E_m.$$

Рассмотрим подробнее выпрямленное напряжение (все, что будет показано для него, относится и к выпрямленному току). Из рис. 37 видно, что это напряжение сильно пульсирует. Полпериода напряжения совсем нет. Полезной частью такого напряжения является его постоянная составляющая, или среднее значение  $U_{cp}$ . Найдём это значение:

$$U_{cp} = 2U_{max} / \pi = 0,636U_{max}.$$

Т.к. во втором полупериоде напряжения совсем нет, то за весь период среднее значение вдвое меньше:

$$U_{cp} = U_{max} / \pi = 0,318 U_{max}.$$

Таким образом приближенно  $U_{cp}$  считают равным 30 % максимального значения. Поскольку падение напряжения на диоде очень мало, можно считать:  $U_{max} \approx E_m$  и  $U_{cp} \approx 0,3E_m$ .

Вычтем из выпрямленного пульсирующего напряжения его среднее значение, получим переменную составляющую  $U_R$ , которая имеет несинусоидальную форму. Для нее нулевой осью является прямая линия, изображающая постоянную составляющую (рис. 38). Полувольты переменной составляющей на рис. 38 заштрихованы.

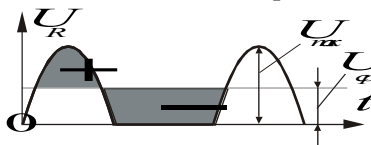


Рис. 38. Составляющие выпрямленного напряжения

Положительная полуволна представляет собой верхние две трети полусинусоиды, а отрицательная имеет форму, близкую к трапеции. Длительность этих полувольт неодинакова, но площади, ограниченные ими, равны, т.к. постоянной составляющей уже нет.

Переменная составляющая является «вредной» частью выпрямленного напряжения. Для ее уменьшения в нагрузочном резисторе, т.е. для сглаживания пульсации выпрямленного напряжения, применяют специальные сглаживающие фильтры.

### Последовательное и параллельное соединение диодов

При выпрямлении более высоких напряжений приходится соединять диоды последовательно с тем, чтобы обратное напряжение на каждом диоде не превышало предельного. Но вследствие разброса обратных сопротивлений у различных экземпляров диодов одного и того же типа на отдельных диодах обратное напряжение может оказаться выше предельного, что повлечет пробой диодов.

Пусть в некотором выпрямителе амплитуда обратного напряжения составляет  $U_{обр} = 1000 \text{ В}$  и применены диоды с  $U_{обр. max} = 400 \text{ В}$ . Очевидно, что необходимо соединить последовательно не менее трех диодов. Предположим, что обратные сопротивления диодов  $R_{обр1} = R_{обр2} = 1 \text{ МОм}$  и  $R_{обр3} = 3 \text{ МОм}$ . Обратное напряжение распределяется пропорционально обратным сопротивлениям, и поэтому получится  $U_{обр1} = U_{обр2} = 200 \text{ В}$  и  $U_{обр3} = 600 \text{ В}$ . Третий диод может быть пробит, поскольку  $U_{обр3} > U_{обр. max}$ . Если это произойдет, то напряжение  $1000 \text{ В}$  распределится между оставшимися диодами, что может повлечь за собой пробой одного или двух диодов.

Для того чтобы обратное напряжение распределялось равномерно между диодами независимо от их обратных сопротивлений, применяют шунтирование диодов резисторами (рис. 39). Сопротивления  $R_{ш}$  резисторов должны быть одинаковы и значительно меньше наименьшего из обратных сопротивлений диодов. Но вместе с тем  $R_{ш}$  не должно быть слишком малым, чтобы чрезмерно не возрос ток при обратном напряжении, т.е. чтобы не ухудшилось выпрямление. Для рассмотренного примера можно взять резисторы с сопротивлением  $100 \text{ кОм}$ . Тогда при обратном напряжении сопротивление каждого участка цепи, состоящего из диода и шунтирующего резистора, будет несколько меньше  $100 \text{ кОм}$  и общее обратное напряжение разделится между этими участками примерно на три равные части. На каждом участке это напряжение окажется меньше  $400 \text{ В}$  и диоды будут работать надежно.

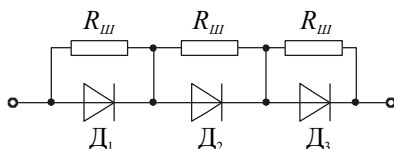


Рис. 39. Последовательное соединение диодов

Параллельное соединение диодов применяют тогда, когда нужно получить прямой ток, больший предельного тока одного диода. Но если диоды одного типа просто соединить параллельно, то вследствие

неодинаковости вольт – амперных характеристик они окажутся различно нагруженными и в некоторых ток будет больше предельного.

Рассмотрим характеристики прямого тока двух диодов одного и того же типа, у которых  $I_{пр. max} = 0,2 \text{ A}$  (рис. 40). Пусть от этих диодов требуется получить прямой ток  $0,4 \text{ A}$ . Если их соединить параллельно, то при токе  $0,2 \text{ A}$  на первом диоде напряжение равно  $0,4 \text{ В}$  (кривая 1, рис. 40). А на втором диоде при таком же напряжении ток будет лишь  $0,05 \text{ A}$  (кривая 2, рис. 40). Таким образом, общий ток составит  $0,25 \text{ A}$ , а не  $0,4 \text{ A}$ . Увеличивать напряжение на диодах нельзя, т.к. в первом диоде ток станет больше предельного.

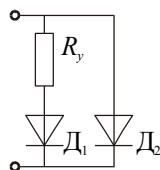
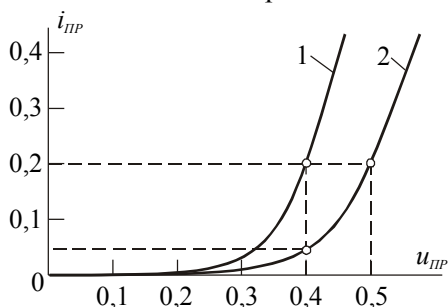


Рис. 40. Параллельное соединение диодов

Из характеристик видно, что для получения во втором диоде тока  $0,2 \text{ A}$  надо иметь на нем напряжение  $0,5 \text{ В}$ , т.е. на  $0,1 \text{ В}$  больше, чем на первом диоде. Поэтому, чтобы установить правильный режим работы диодов, надо подвести к ним напряжение  $0,5 \text{ В}$ , но последовательно с первым диодом включить уравнивающий резистор  $R_y$  (рис. 40) – с целью поглощения излишнего для первого диода напряжения  $0,1 \text{ В}$ . Сопротивление этого резистора:  $R_y = 0,1/0,2 = 0,5 \text{ Ом}$ .

При наличии такого резистора оба диода будут нагружены одинаково током в  $0,2 \text{ A}$ .

Практически редко включают параллельно больше трех диодов. Уравнивательные резисторы с сопротивлением в десятые доли Ома или единицы Ом обычно подбирают экспериментально до получения в

рабочем режиме одинаковых токов в диодах. Иногда включают уравнильные резисторы с сопротивлением, в несколько раз большим, чем прямое сопротивление диодов, для того чтобы ток в каждом диоде определялся главным образом сопротивлением  $R_y$ . Если нежелательно включать уравнильные резисторы, то надо подобрать диоды с примерно одинаковыми характеристиками. Однако рекомендуется по возможности не прибегать к параллельному соединению диодов.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

На выполнение лабораторной работы отводится 2 академических часа.

Порядок выполнения:

1. Изучить краткий теоретический материал.
2. Собрать однополупериодную схему выпрямителя по заданным данным.
3. Получить [временные диаграммы](#) на диоде и сопротивлении нагрузки.
4. На полученных временных диаграммах определить амплитудные значения положительных и отрицательных полувольт.
5. Оформить отчет.
6. Защитить выполненную работу у преподавателя.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Для [однополупериодной схемы](#) выпрямителя (рис.41), при заданных значениях  $R_n$ ,  $E_m$ ,  $\omega$ , получим [временные диаграммы](#) на диоде ( $DI$ ) и сопротивлении нагрузки ( $R_l$ ).

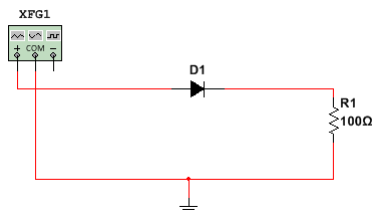


Рис. 41. Однополупериодная схемы выпрямителя

В качестве исходных данных примем:  $R_l = 100 \text{ Ом}$  ;  $E_m = 5 \text{ В}$  ;  
 $\omega = 31,41 \text{ рад/с}$  .

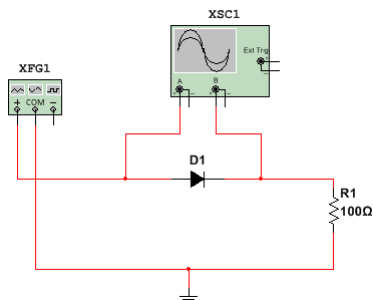


Рис. 42. Схема с подключенным осциллографом

В качестве источника переменного напряжения используется генератор (панель *Instruments*, пункт *Function Generator*).

### **Описание генератора (Function Generator).**

В генераторе можно задавать:

- форму выходного сигнала (три кнопки): синусоидальную, треугольную и прямоугольную;
- частоту выходного сигнала (окно *Frequency*);
- коэффициент заполнения в процентах (окно *Duty cycle*): для импульсов это отношение длительности импульса к периоду повторения – величина обратная скважности;
- амплитуду выходного сигнала (окно *Amplitude*);
- смещение постоянной составляющей выходного сигнала (окно *Offset*).

В генераторе имеется три клеммы: «+», «-», и *Common* – общий.

Значение частоты  $f$  определяется из соотношения:  $\omega = 2\pi f$  .

К диоду *D1* подключается осциллограф (панель *Instruments*, пункт *Oscilloscope*) для наблюдения входного напряжения и напряжения на диоде (рис. 42).

### **Описание осциллографа (*Oscilloscope*).**

Имеет два канала (*Channel*) *A* и *B*. Для каждого канала можно регулировать чувствительность в диапазоне от  $10\text{ мкВ/дел}$  ( $\text{mV/div}$ ) до  $5\text{ кВ/дел}$  ( $\text{kV/div}$ ), смещение по вертикали (*Y Position*) и выбирать режим – кнопки *AC*, *0*, *DC*.

*AC* – для наблюдения только сигналов переменного тока. *0* – вход замыкается на землю. *DC* – для измерения как постоянного, так и переменного тока. Для каждого канала рядом с кнопками расположен входной зажим.

Режим развертки выбирается кнопками: *Y/T*, *B/A*, *A/B*.

*Y/T* – режим, когда по вертикали напряжение сигнала, по горизонтали время.

*B/A* – режим, когда по вертикали сигнал канала *B*, по горизонтали сигнал канала *A*.

*A/B* – режим, когда по вертикали сигнал канала *A*, по горизонтали сигнал канала *B*.

В режиме *Y/T* задается:

- длительность развертки (*Timebase*) в диапазоне от  $0,1\text{ нс/дел}$  ( $\text{ns/div}$ ) до  $1\text{ с/дел}$  ( $\text{s/div}$ ) и смещение по горизонтали (*X Position*);
- ждущий режим (*Trigger*), в котором имеется возможность запуска развертки (*Edge*) по переднему или заднему фронту запускающего импульса (соответственно две кнопки) с регулировкой уровня запуска (окно *Level*).

Кнопки *Auto*, *A*, *B*, *Ext* позволяют выбрать режимы запуска развертки:

- *Auto* – от канала *A* или *B*;
- *A* – от канала *A*;
- *B* – от канала *B*;
- *Ext* – от внешнего источника, который подключается к соответствующему зажиму на панели *Trigger*.



С помощью кнопки *Reverse* можно инвертировать изображение, кнопка *Save* предназначена для записи данных в файл.

На экране осциллографа (рис. 43) получим две временные диаграммы, соответствующие входному сигналу (рис. 43 – верхняя диаграмма) и напряжению на сопротивлении нагрузки (рис. 43 – нижняя диаграмма).

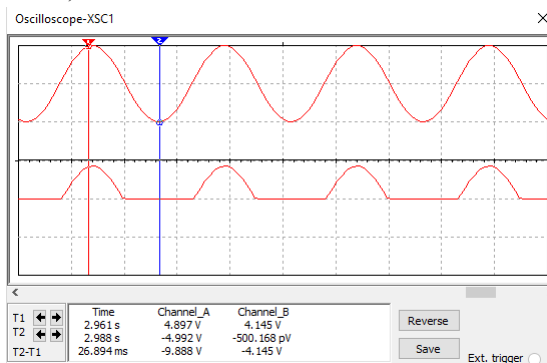


Рис. 43. Временные диаграммы

Из нижней диаграммы с помощью визирных линий определим амплитудное значение напряжения:  $U_{max} = 4,15 \text{ B}$ .

С помощью схемы, изображенной на рис. 44, получим временную диаграмму напряжения на диоде (рис. 45). Временная диаграмма на диоде *D1* соответствует соотношению:

$$U_D = E - U_R.$$

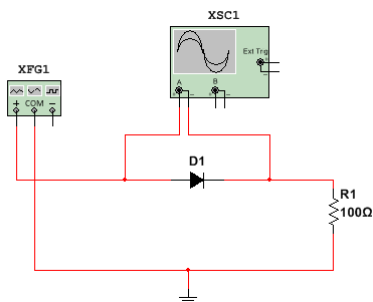


Рис. 44. Схема для получения временной диаграммы напряжения на диоде

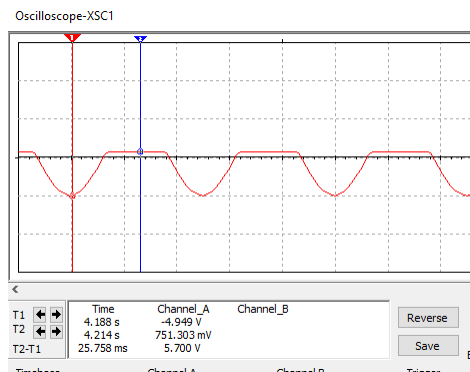


Рис. 45. Временная диаграмма напряжения на диоде

## ВАРИАНТЫ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ

$N_{\text{д}}$	$R_n(\text{Ом})$	$E_m(\text{В})$	$\omega(\text{рад/с})$
1	50	12	100
2	20	4	200
3	25	6	250
4	10	13	150
5	30	5	50
6	50	10	150
7	20	4	100
8	25	6	200
9	30	5	300
10	40	7	50
11	70	10	350
12	25	10	200
13	60	8	100
14	50	15	350
15	100	12	250

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Что понимается под выпрямлением переменного тока?
2. Какие элементы используются для выпрямления переменного тока?
3. Какие элементы входят в состав однополупериодной схемы выпрямления?

4. Для каких целей в схеме выпрямителя используется нагрузочный резистор?
5. Какой ток называют выпрямленным?
6. Почему схема выпрямителя называется однополупериодной?
7. Объясните временные диаграммы работы выпрямителя.
8. Какое среднее значение принимает напряжение за период в однополупериодной схеме выпрямления?
9. В каких случаях используется последовательное и параллельное соединение диодов?

### **ФОРМА ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ**

Номер варианта студенту выдается преподавателем. Отчет на защиту предоставляется в печатном виде.

Структура отчета (на отдельном листе(-ах)):

- титульный лист;
- цели и задачи работы;
- формулировка задания (вариант);
- схема однополупериодного выпрямителя;
- временные диаграммы, соответствующие всем элементам исследуемой схемы;
- амплитудные значения положительных и отрицательных полувольт для полученных временных диаграмм;
- выводы.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5** **ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ БИПОЛЯРНОГО** **ТРАНЗИСТОРА В СХЕМЕ С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ**

### **ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ,** **ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ЕЁ ВЫПОЛНЕНИЯ**

Целью выполнения лабораторной работы является формирование практических навыков расчета параметров биполярных транзисторов и других элементов, при включении транзистора в схему с общим эмиттером (ОЭ).

Основными задачами выполнения лабораторной работы являются:

1. расчет параметров транзистора и требуемых элементов схемы;
2. моделирование схемы, для подтверждения результатов расчета параметров биполярных транзисторов.

Результатами работы являются:

- уравнения для определения  $I_{Э}$  ,  $I_K$  ,  $U_{K-Э}$  , параметров транзистора и требуемых элементов схемы;
- схема электрической цепи с полученными, по показаниям приборов, значениями токов и напряжений;
- подготовленный отчет.

Необходимое оборудование для выполнения лабораторной работы:

- персональный компьютер с программным обеспечением NI Multisim.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

### Общие сведения о биполярных транзисторах

**Транзисторы** – это полупроводниковые приборы, пригодные для усиления мощности и имеющие три вывода или больше. В транзисторах может быть разное число переходов между областями с различной электропроводностью. Наиболее распространены транзисторы с двумя  $n-p$  – переходами, называемые **биполярными**, так как их работа основана на использовании носителей заряда обоих знаков.

Устройство плоскостного биполярного транзистора показано схематически на рис. 46.

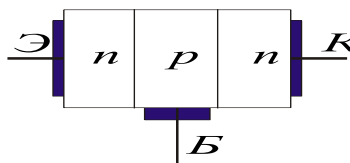


Рис. 46. Устройство плоскостного биполярного транзистора

Транзистор представляет собой пластину германия, или кремния, или другого полупроводника, в которой созданы три области с различной электропроводностью. Для примера взят транзистор типа  $n-p-n$ , имеющий среднюю область с дырочной, а две крайние области – с электронной электропроводностью. Широкое применение находят транзисторы типа  $p-n-p$ , в которых дырочной электропроводностью обладают две крайние области, а средняя имеет электронную электропроводность.

Средняя область транзистора называется **базой**, одна крайняя область – **эмиттером**, другая – **коллектором**. Таким образом, в транзисторе имеются два  $n-p$  – перехода: **эмиттерный** – между эмиттером и базой и **коллекторный** – между базой и коллектором. Расстояние между ними должно быть очень малым, не более единиц микрометров, т.е. область базы должна быть очень тонкой. Это является условием хорошей работы транзистора. Кроме того, концентрация примесей в базе всегда значительно меньше, чем в

коллекторе и эмиттере. От базы, эмиттера и коллектора сделаны выводы.

Для величин, относящихся к базе, эмиттеру и коллектору, применяют в качестве индексов буквы «б», «э» и «к». Токи в проводах базы, эмиттера и коллектора обозначают соответственно  $i_b$ ,  $i_e$ ,  $i_k$ . Напряжения между электродами обозначают двойными индексами, например напряжение между базой и эмиттером  $U_{б-э}$ , между коллектором и базой  $U_{к-б}$ . На условном графическом обозначении (рис. 47) транзисторов  $p-n-p$  и  $n-p-n$  стрелка показывает условное (от плюса к минусу) направление тока в проводе эмиттера при прямом напряжении на эмиттерном переходе.

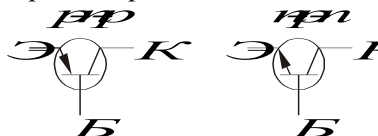


Рис. 47. Условное графическое обозначение транзисторов

Транзистор может работать в трех режимах в зависимости от напряжения на его переходах.

**Активный режим** – напряжение на эмиттерном переходе прямое, а на коллекторном – обратное.

**Режим отсечки** (запирания) – обратное напряжение подано на оба перехода.

**Режим насыщения** – на обоих переходах прямое напряжение.

Основным является активный режим. Он используется в большинстве усилителей и генераторов. Режимы отсечки и насыщения характерны для импульсной работы транзистора.

В схемах с транзисторами обычно образуются две цепи: **входная** (управляющая) – в нее включают источник усиливаемых сигналов и **выходная** (управляемая) – в нее включается нагрузка.

### Принцип действия $n-p-n$ транзистора

Рассмотрим принцип работы транзистора, на примере  $n-p-n$  транзистора в режиме без нагрузки, когда включены только источники постоянных питающих напряжений  $E_1$  и  $E_2$  (рис. 48).

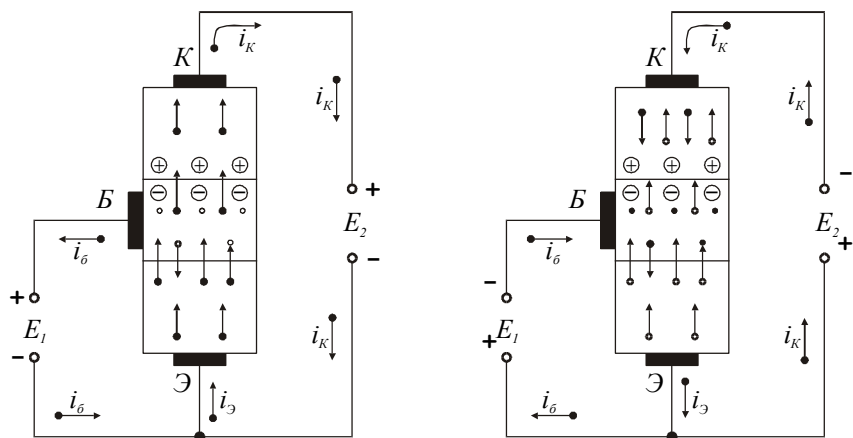


Рис. 48. Схема включения  $n-p-n$  и  $p-n-p$  транзистора без нагрузки

Полярность их такова, что на эмиттерном переходе напряжение прямое, а на коллекторном – обратное. Поэтому сопротивление эмиттерного перехода мало и для получения нормального тока в этом переходе достаточно напряжения  $E_1$  в десятые доли вольта. Сопротивление коллекторного перехода велико, и напряжение  $E_2$  обычно составляет единицы или десятки вольт. Из схемы на рис. 48 видно, что напряжения между электродами транзистора связаны простой зависимостью  $U_{K-Э} = U_{K-Б} + U_{Б-Э}$ .

При работе транзистора в активном режиме обычно всегда  $U_{Б-Э} \ll U_{K-Б}$  и, следовательно,  $U_{K-Э} \approx U_{K-Б}$ .

Вольт–амперная характеристика эмиттерного перехода представляет собой характеристику полупроводникового диода при прямом токе, а вольт–амперная характеристика коллекторного перехода подобна характеристике диода при обратном токе.

Принцип работы транзистора заключается в том, что прямое напряжение эмиттерного перехода, т.е. участка база – эмиттер ( $U_{Б-Э}$ ), существенно влияет на токи эмиттера и коллектора. Чем больше это напряжение, тем больше токи эмиттера и коллектора. При этом изменения тока коллектора лишь незначительно меньше изменений тока эмиттера. Таким образом, напряжение  $U_{Б-Э}$ , т.е. входное

напряжение, управляет током коллектора. Усиление электрических колебаний с помощью транзистора основано именно на этом явлении.

Физические процессы в транзисторе происходят следующим образом. При увеличении прямого входного напряжения  $U_{б-э}$  понижается потенциальный барьер в эмиттерном переходе и соответственно возрастает ток через этот переход – ток эмиттера  $i_э$ . Электроны этого тока инжектируются из эмиттера в базу и благодаря диффузии проникают сквозь базу в коллекторный переход, увеличивая ток коллектора. Т.к. коллекторный переход работает при обратном напряжении, то в этом переходе возникают объемные заряды, показанные на рисунке кружками со знаками «+» и «-». Между ними возникает электрическое поле. Оно способствует продвижению (экстракции) через коллекторный переход электронов, пришедших сюда из эмиттера, т.е. втягивают электроны в область коллекторного перехода.

Если толщина базы достаточно мала и концентрация дырок в ней невелика, то большинство электронов, пройдя через базу, не успевает рекомбинировать с дырками базы и достигает коллекторного перехода. Лишь небольшая часть электронов рекомбинирует в базе с дырками. В результате рекомбинации возникает ток базы. В установившемся режиме число дырок в базе должно быть неизменным. Вследствие рекомбинации каждую секунду сколько-то дырок исчезает, но столько же новых дырок возникает за счет того, что из базы уходит в направлении к плюсу источника  $E_1$  такое же число электронов. Иначе говоря, в базе не может накапливаться много электронов. Если некоторое число инжектированных в базу из эмиттера электронов не доходит до коллектора, а остается в базе, рекомбинируя с дырками, то точно такое же число электронов должно уходить из базы в виде тока  $i_б$ . Поскольку ток коллектора получается меньше тока эмиттера, то в соответствии с первым законом Кирхгофа всегда существует следующее соотношение между токами:

$$i_э = i_к + i_б .$$



Ток базы является бесполезным и даже вредным. Желательно, чтобы он был как можно меньше. Обычно  $i_{\delta}$  составляет малую долю (проценты) тока эмиттера, т. е.  $i_{\delta} \gg i_{\delta}$ , а следовательно, ток коллектора лишь незначительно меньше тока эмиттера и можно считать  $i_{\delta} \approx i_{\kappa}$ . Именно для того, чтобы ток  $i_{\delta}$  был как можно меньше, базу делают очень тонкой и уменьшают в ней концентрацию примесей, которая определяет концентрацию дырок. Тогда меньшее число электронов будет рекомбинировать в базе с дырками.

**Важное свойство транзистора – приблизительно линейная зависимость между его токами**, т.е. все три тока транзистора изменяются почти пропорционально друг другу.

Подобные же процессы происходят в транзисторе типа  $p-n-p$ , но в нем меняются ролями электроны и дырки, а также изменяются полярности напряжений и направления токов (рис. 48). В транзисторе типа  $p-n-p$  из эмиттера и базу инжектируются не электроны, а дырки, которые являются для базы неосновными носителями. С увеличением тока эмиттера больше таких дырок проникает через базу к коллекторному переходу. Это вызывает уменьшение его сопротивления и возрастание тока коллектора.

Работу транзистора можно наглядно представить с помощью потенциальной диаграммы, которая приведена на рис. 49 для транзистора типа  $n-p-n$ . Потенциал эмиттера принят за нулевой. В эмиттерном переходе имеется небольшой потенциальный барьер. Чем больше напряжение  $U_{\delta-э}$ , тем ниже этот барьер. Коллекторный переход имеет значительную разность потенциалов, ускоряющую электроны.

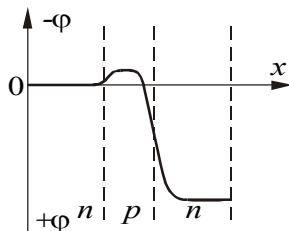


Рис. 49. Потенциальная диаграмма работы  $n-p-n$  транзистора

Помимо рассмотренных основных физических процессов в транзисторах приходится учитывать еще ряд явлений.

Существенно влияет на работу транзисторов сопротивление базы  $r_{б0}$ , т.е. сопротивление, которое база оказывает току базы  $i_b$  (ноль в индексе здесь означает, что данная величина относится к постоянному току.) Этот ток протекает к выводу базы в направлении, перпендикулярном направлению эмиттер–коллектор. Так как база очень тонкая, то в направлении от эмиттера к коллектору, т.е. для тока  $i_k$  ее сопротивление очень мало и не принимается во внимание. А в направлении к выводу базы сопротивление базы  $r_{б0}$  (его называют поперечным) достигает сотен Ом, т.к. в этом направлении база аналогична очень тонкому проводнику. Напряжение на эмиттерном переходе всегда меньше, чем напряжение  $U_{б-э}$  между выводами базы и эмиттера, т.к. часть подводимого напряжения теряется на сопротивлении базы. С учетом сопротивления  $r_{б0}$  можно изобразить эквивалентную схему транзистора для постоянного тока (рис. 50).

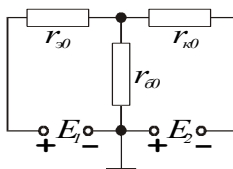


Рис. 50. Эквивалентная схема транзистора для постоянного тока

На рис. 50,  $r_{э0}$  – сопротивление эмиттера, в которое входят сопротивление эмиттерного перехода и эмиттерной области. Значение  $r_{э0}$  у маломощных транзисторов достигает десятков Ом, поскольку напряжение на эмиттерном переходе не превышает десятых долей вольта, а ток эмиттера в таких транзисторах составляет единицы миллиампер. У более мощных транзисторов больше и  $r_{э0}$  соответственно меньше. Сопротивление  $r_{э0}$  определяется формулой (в Омах)  $r_{э0} \approx 25/i_э$ , где ток  $i_э$  выражается в миллиамперах.

Сопротивление коллектора  $r_{к0}$  представляет собой практически сопротивление коллекторного перехода и составляет единицы и

десятки кОм. В него входит также сопротивление коллекторной области, но оно сравнительно мало и им можно пренебречь.

Рассмотренная эквивалентная схема является весьма приближенной, т.к. на самом деле эмиттер, база и коллектор имеют между собой контакт не в одной точке, а во множестве точек по всей площади переходов. Тем не менее, эта схема может применяться для рассмотрения многих процессов в транзисторе.

При повышении напряжения на коллекторном переходе в нем происходит лавинное размножение носителей заряда, из-за ударной ионизации. Это явление и туннельный эффект способны вызвать **электрический пробой**, который при возрастании тока может перейти в **тепловой пробой перехода**. Электрический и тепловой пробой коллекторного перехода в транзисторе происходит в основном так же, как и в диоде. Но в транзисторе при чрезмерном коллекторном токе может возникать тепловой пробой без предварительного электрического пробоя, т.е. без повышения напряжения на коллекторном переходе до пробивного. Это явление, связанное с перегревом коллекторного перехода называется **вторичным пробоем**.

Изменение напряжений на коллекторном и эмиттерном переходах сопровождается изменением толщины этих переходов. В результате изменяется толщина базы. Такое явление называют **модуляцией толщины базы**. Его особенно надо учитывать при повышении напряжения коллектор–база, т.к. тогда толщина коллекторного перехода возрастает, а толщина базы уменьшается.

При очень тонкой базе может произойти **эффект смыкания** («прокол» базы) – соединение коллекторного перехода с эмиттерным. В этом случае область базы исчезает, и транзистор перестает нормально работать.

При увеличении инжекции носителей из эмиттера в базу происходит накопление неосновных носителей заряда в базе, т.е. увеличение концентрации и суммарного заряда этих носителей. И, наоборот, при уменьшении инжекции происходит уменьшение концентрации и суммарного заряда неосновных носителей в базе. Этот

процесс называют **рассасыванием неосновных носителей заряда в базе**.

Рассмотрим соотношения между токами в транзисторе. Ток эмиттера управляется напряжением на эмиттерном переходе, но до коллектора доходит несколько меньший ток, который можно назвать **управляемым коллекторным током**  $i_{к.упр.}$ . Часть инжектированных из эмиттера в базу носителей рекомбинирует, поэтому  $i_{к.упр.} = \alpha i_{э}$ , где  $\alpha$  – **коэффициент передачи тока эмиттера**, являющийся основным параметром транзистора. При нормальных токах он может иметь значения от 0,950 до 0,998. Чем слабее рекомбинация инжектированных носителей в базе, тем ближе  $\alpha$  к 1.

Через коллекторный переход всегда проходит очень небольшой (не более единиц микроампер) **неуправляемый обратный ток**  $i_{к0}$  (рис. 51). Этот ток называют еще начальным током коллектора. Он неуправляем потому, что не проходит через эмиттерный переход. Таким образом, полный коллекторный ток:

$$i_k = \alpha i_{э} + i_{к0} \quad (2)$$

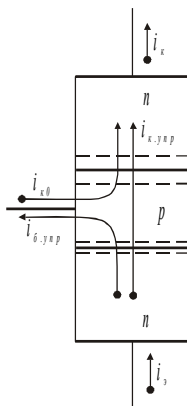


Рис. 51. Направления токов в транзисторе

Во многих случаях  $i_{э} > i_{к0}$  и поэтому можно считать, что  $i_{к} \approx \alpha i_{э}$ .

Преобразуем формулу (2):  $i_{э} = i_{э} + i_{к}$ ,  $i_{к} = \alpha (i_{э} + i_{к}) + i_{к0}$ .

Выразим:  $i_{к} = i_{э} \alpha / (1 - \alpha) + i_{к0} / (1 - \alpha)$ .

Обозначим  $\alpha/(1-\alpha)=\beta$  и  $i_{\kappa 0}/(1-\alpha)=i_{\kappa-э 0}$  тогда

$$i_{\kappa} = \beta i_{\sigma} + i_{\kappa-э 0} \quad (3)$$

здесь  $\beta$  – **коэффициент передачи тока базы** и составляет несколько десятков.

Например, если  $\alpha=0,95$ ,  $\beta=\alpha/(1-\alpha)=0,95/(1-0,95)=19$ , а если  $\alpha=0,99$ , то  $\beta=0,99/(1-0,99)=99$ .

Т. е. при увеличении  $\alpha$  на  $0,04$ ,  $\beta$  увеличился в пять раз.

Выразим  $\alpha$  через  $\beta$ :  $\alpha = \beta/(1+\beta)$

Следует заметить, что коэффициент  $\alpha$  не является строго постоянным. Он зависит от режима работы транзистора, в частности от тока эмиттера. При малых и больших токах  $\alpha$  уменьшается, а при некотором среднем значении тока достигает максимума. В пределах рабочих значений тока эмиттера изменяется сравнительно мало.

Коэффициент  $\beta$  изменяется в зависимости от режима работы транзистора гораздо больше, нежели коэффициент  $\alpha$ . При некотором среднем значении тока эмиттера коэффициент  $\beta$  максимален, а при меньших и больших токах он снижается, причем иногда в несколько раз.

Ток  $i_{\kappa-э 0}$  называют **начальным сквозным током**, т.к. он протекает сквозь весь транзистор (через три его области и через оба  $n-p$  – перехода) в том случае, если  $i_{\sigma}=0$ , т.е. оборван провод базы. Из (3) при  $i_{\sigma}=0$  получаем  $i_{\kappa}=i_{\kappa-э 0}$ . Сквозной ток составляет десятки или сотни микроампер и значительно превосходит начальный ток коллектора  $i_{\kappa 0}$ .

$$i_{\kappa-э 0} = i_{\kappa 0}/(1-\alpha) \quad \text{или} \quad i_{\kappa-э 0} = (\beta+1)i_{\kappa 0}, \quad \text{а т.к. } \beta \gg 1, \quad \text{то} \\ i_{\kappa-э 0} \approx \beta i_{\kappa 0}.$$

Сравнительно большой ток  $i_{\kappa-э 0}$  объясняется тем, что некоторая часть напряжения  $U_{\kappa-э}$ , приложена к эмиттерному переходу в качестве прямого напряжения. Вследствие этого возрастает ток эмиттера, а он в данном случае и является сквозным током.

При значительном повышении напряжения  $U_{к-э}$ , ток  $i_{к-э0}$  резко возрастает и происходит электрический пробой.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

На выполнение лабораторной работы отводится 3 академических часа.

Порядок выполнения:

1. Изучить краткий теоретический материал.
2. Произвести расчет параметров транзистора и требуемых элементов схемы.
3. Собрать схему электрической цепи и определить требуемые значения токов и напряжений.
4. Оформить отчет.
5. Защитить выполненную работу у преподавателя.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Схема включения транзистора для всех вариантов имеет вид, показанный на рис. 52.

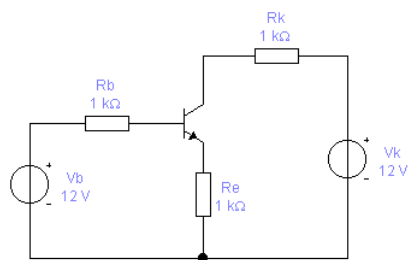


Рис. 52. Схема включения транзистора

Номиналы элементов, входящих в схему для каждого варианта различны.

В схеме на рис. 52. в качестве биполярного транзистора используется элемент *BJT\_NPN* из группы *Transistors\_Virtual*. Его параметры можно изменить с помощью контекстного меню, пункт

*Properties*. Необходимо выбрать вкладку *Value* и через кнопку *Edit Model* можно изменять параметры транзистора.

Для определения параметров транзистора используются следующие расчетные формулы:

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha};$$

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta};$$

$$I_K = \alpha I_{\text{э}} + I_{\text{кб0}};$$

$$I_{\text{э}} = I_K + I_{\text{б}};$$

$$I_{\text{кэ0}} = (\beta + 1) I_{\text{кб0}};$$

$$\alpha = \frac{I_K - I_{\text{кб0}}}{I_{\text{э}}};$$

$$\beta = \frac{I_K - I_{\text{кэ0}}}{I_{\text{б}}};$$

где  $\beta$  – статический коэффициент усиления по току ([коэффициент передачи тока базы](#)) для схемы ОЭ;

$\alpha$  – статический коэффициент усиления по току ([коэффициент передачи тока эмиттера](#)) для схемы ОБ;

$I_K$  – ток коллектора;

$I_{\text{э}}$  – ток эмиттера;

$I_{\text{б}}$  – ток базы;

$I_{\text{кб0}}$  – начальный ток коллектора (неуправляемый обратный ток);

$I_{\text{кэ0}}$  – начальный сквозной ток.

Кроме основных формул, для входного и выходного контура можно использовать [законы Кирхгофа](#). Например, для выходного контура схемы, изображенной на рис. 52, можно составить уравнение

$$V_K = U_{K-\text{э}} + R_K I_K + R_E I_{\text{э}}.$$

Для всех вариантов используются одинаковые значения:

$$U_{\text{б-э}} = 0,7 \text{ В}, I_{\text{б}} = 40 \text{ мкА}, I_{\text{кб0}} = 0.$$

С учетом полученных значений параметров элементов произвести моделирование схемы и определить значения токов в цепях включения транзистора и напряжений между выводами транзистора.

Значения параметров  $\beta$  и  $U_{\sigma-\sigma}$  задаются в таблице *Edit Model*. Параметру  $\beta$  соответствует строка с именем *BF Ideal maximum forward beta*. Значению  $U_{\sigma-\sigma}$  соответствует строка с именем *VJE B-E built in potential*.

### ВАРИАНТЫ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ

№	$\alpha$	$\beta$	$R_K$ (кОм)	$R_E$ (кОм)	$R_B$ (кОм)	$V_K(B)$	$V_B(B)$
1	?	85	3	1	?	15	10
2	0,987	?	2	?	60	16	8
3	?	80	2	1	?	14	8
4	?	100	3	2	?	25	15
5	0,976	?	3	?	50	15	8
6	?	90	2	?	40	20	12
7	0,956	?	5	8	?	22	14
8	?	120	3	1	?	20	6
9	0,988	?	2	?	60	20	8
10	?	100	1	?	40	15	8
11	0,978	?	2	4	?	13	10
12	?	95	4	3	?	30	14
13	0,998	?	1	?	87	25	5
14	?	120	2	?	50	25	7
15	0,986	?	4	3	?	22	10



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. В какой области биполярного транзистора самая низкая концентрация примеси?
2. Площадь какого перехода больше: эмиттерного или коллекторного?
3. Какие режимы работы биполярного транзистора вам известны?
4. Каково соотношение между токами в транзисторе?
5. Что предпринимается для уменьшения тока базы?
6. Какие явления способны вызвать электрический пробой коллекторного перехода?
7. Что называется вторичным пробоем коллекторного перехода?
8. В каком случае может возникнуть модуляция толщины базы?

## ФОРМА ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Номер варианта студенту выдается преподавателем. Отчет на защиту предоставляется в печатном виде.

Структура отчета (на отдельном листе(-ах)):

- титульный лист;
- цели и задачи работы;
- формулировка задания (вариант);
- расчетные формулы для определения параметров транзистора и других элементов схемы;
- схема исследования транзистора с указанием значений токов и напряжений;
- выводы.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6**  
**ПОСТРОЕНИЕ КОМБИНАЦИОННЫХ ЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ И**  
**ИХ ИССЛЕДОВАНИЕ**  
**ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ, ТРЕБОВАНИЯ К**  
**РЕЗУЛЬТАТАМ ЕЁ ВЫПОЛНЕНИЯ**

Целью выполнения лабораторной работы является формирование практических навыков построения логических схем на основе булевых выражений и упрощение булевых выражений с использованием карт Карно.

Основными задачами выполнения лабораторной работы являются:

1. построение булевых выражений по таблицам истинности;
2. построения логических схем на основе булевых выражений;
3. упрощение булевых выражений с использованием карт Карно.

Результатами работы являются:

- булево выражение, полученное по заданной таблице истинности;
- логическая схема, построенная по булеву выражению;
- результат упрощения булева выражения с помощью карт Карно;
- логическая схема, построенная по упрощенному булеву выражению;
- сравнение результатов работы двух логических схем;
- подготовленный отчет.

Необходимое оборудование для выполнения лабораторной работы:

- персональный компьютер с программным обеспечением NI Multisim.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

### Построение комбинационных логических схем

**Комбинационными** называются функциональные узлы, логическое состояние выходов которых зависит только от комбинации логических сигналов на входах в данный момент времени.

Состояние входов и выходов логической схемы может быть описано таблицей истинности или булевым выражением.

Булево выражение в **дизъюнктивной нормальной форме** – это функция, представляющая собой сумму, каждое слагаемое которой является произведением всех входных переменных или их инверсий:

$$Y = A \cdot B \cdot C + A \cdot B \cdot \bar{C} + \bar{A} \cdot B \cdot \bar{C} + \bar{A} \cdot \bar{B} \cdot \bar{C}.$$

Данное выражение можно упростить, используя аксиомы и законы булевой алгебры, и получить так называемую минимальную сумму:

$$Y = (C + \bar{C}) \cdot A \cdot B + (B + \bar{B}) \cdot \bar{A} \cdot \bar{C} = A \cdot B + \bar{A} \cdot \bar{C},$$

поскольку  $C + \bar{C} = 1$  и  $B + \bar{B} = 1$

**Конъюнктивная нормальная форма** – это функция, представляющая собой произведение членов, каждый из которых является суммой всех переменных или их инверсий:

$$Y = (\bar{A} + B + \bar{C}) \cdot (\bar{A} + B + C) \cdot (A + \bar{B} + C) \cdot (A + B + C).$$

Данное выражение можно упростить и получить минимальное произведение:

$$Y = ((A + \bar{B}) + C \cdot \bar{C}) \cdot ((A + C) + B \cdot \bar{B}) = (A + \bar{B}) \cdot (A + C),$$

т.к.  $C \cdot \bar{C} = 0$  и  $B \cdot \bar{B} = 0$ .

Рассмотрим, как можно преобразовать информацию, представленную в форме таблицы истинности, в булево выражение. В табл. 1 показаны все возможные комбинации трех входов ( $A, B, C$ ) и выхода ( $Y$ ). Из табл. 1 видно, что только три из восьми возможных комбинаций двоичных сигналов на входах  $A, B, C$  дают на выходе логическую 1. Эти комбинации представлены выражениями:  $\bar{C} \cdot \bar{B} \cdot A$  (читается как: не  $C$  и не  $B$  и  $A$ ),  $\bar{C} \cdot B \cdot A$  и  $C \cdot B \cdot \bar{A}$ . В булевом

выражении эти три комбинации связываются логической функцией или т.о. булево выражение имеет вид:

$$Y = \bar{C} \cdot \bar{B} \cdot A + \bar{C} \cdot B \cdot A + C \cdot B \cdot \bar{A}.$$

Таблица 1. Таблица истинности

ВХОДЫ			ВЫХОД
<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>Y</i>
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	0

Заметим, что полученное булево выражение можно упростить:

$$Y = \bar{C} \cdot A \cdot (\bar{B} + B) + C \cdot B \cdot \bar{A} = \bar{C} \cdot A + C \cdot B \cdot \bar{A}.$$

Это выражение содержит две комбинации входов, но в столбце выхода (табл. 1) имеется три логические 1.

Построим логическую схему для булева выражения, соответствующую табл. 1. На выходе логической схемы должен быть логический элемент *ИЛИ* (OR). Кроме этого, схема (рис. 53) содержит два элемента *И* (AND) и два инвертора (NOT).

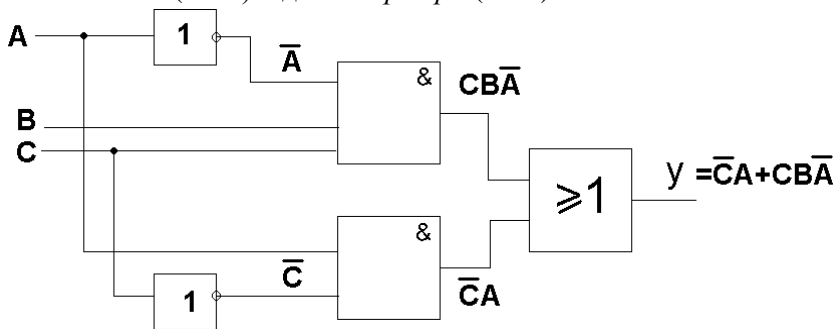


Рис. 53. Логическая схема, соответствующая табл. 1

Легко произвести обратное преобразование – по булеву выражению построить таблицу истинности. Для выражения:

$Y = C \cdot \bar{B} \cdot A + \bar{C} \cdot B \cdot \bar{A}$  в табл.2, находим комбинации входов  $A, B, C$  и проставляем логические 1 в столбце значений выхода.

Таблица 2. Таблица истинности

ВХОДЫ			ВЫХОД
$C$	$B$	$A$	$Y$
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	0

На рис. 54 представлена логическая схема для табл. 2.

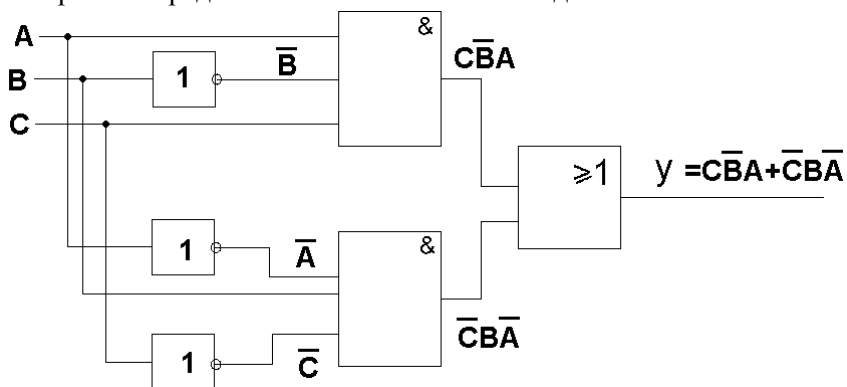


Рис. 54. Логическая схема, соответствующая табл. 3

Рассмотрим булево выражение:  $Y = \bar{A} \cdot B + A \cdot \bar{B} + A \cdot B$ .

Для реализации логической схемы, соответствующей этому выражению, необходимы три элемента И, два инвертора и один элемент ИЛИ с тремя входами (рис. 55).

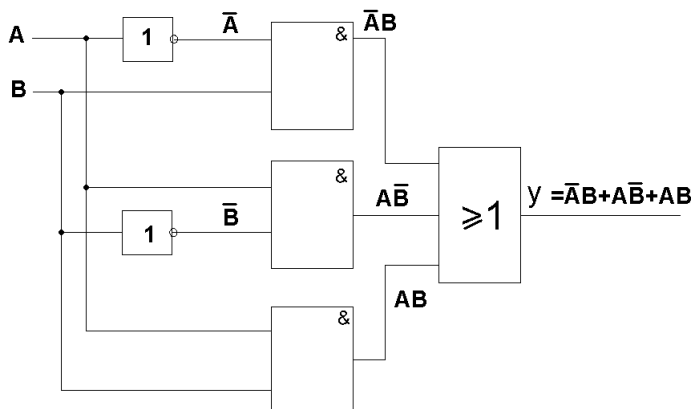


Рис. 55. Логическая схема

Составим таблицу истинности для логической схемы, изображённой на рис. 55.

Таблица 3. Таблица истинности

ВХОДЫ		ВЫХОД
<i>B</i>	<i>A</i>	<i>Y</i>
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Анализ табл. 3 показывает, что она соответствует таблице истинности логического элемента *ИЛИ*. Булево выражение для элемента *ИЛИ* имеет вид:  $Y = A + B$ , а логическая схема изображена на рис. 56.

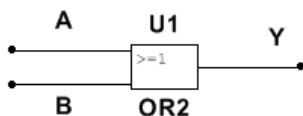


Рис. 56. Логическая схема, соответствующая табл. 3

Приведённый пример показывает, что для реализации исходного булева выражения нет необходимости использовать шесть логических элементов (рис. 55). Используя упрощения булева выражения можно получить более простую логическую схему (рис. 56). Для упрощения

булевых выражений можно воспользоваться методами, использующими карты Карно.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

На выполнение лабораторной работы отводится 4 академических часов: 3 часов на выполнение и сдачу лабораторной работы и 1 час на подготовку отчета.

Порядок выполнения:

1. Изучить краткий теоретический материал.
2. Получить [булево выражение](#) по [таблице истинности](#).
3. По булеву выражению построить [логическую схему](#).
4. Упростить булево выражение с помощью карты Карно.
5. Построить логическую схему для упрощенного булева выражения.
6. Сравнить результаты работы двух логических схем.
7. Оформить отчет.
8. Защитить выполненную работу у преподавателя.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Задано логическое выражение:

$$Y = \overline{A}\overline{B}\overline{C}\overline{D} + \overline{A}BC\overline{D} + ABC\overline{D} + \overline{A}BC\overline{D} + \\ + ABCD + \overline{A}BCD + AB\overline{C}D + \overline{A}\overline{B}CD$$

Карта Карно для выражения показано на рис. 57.

	$\overline{C}\overline{D}$	$\overline{C}D$	$CD$	$C\overline{D}$
$\overline{A}\overline{B}$		1		1
$\overline{A}B$				1
$AB$		1	1	1
$A\overline{B}$			1	1

Рис. 57. Карта Карно

На карте можно построить три контура, что даст в упрощенном выражение три члена и одна единица не входит ни в один контур и

поэтому даст ещё один член, содержащий четыре переменные. Упрощенное булево выражение примет вид:

$$Y = C\overline{D} + AC + ABD + \overline{A}\overline{B}\overline{C}\overline{D}.$$

На рис. 58 приведена логическая схема, соответствующая упрощенному булеву выражению.

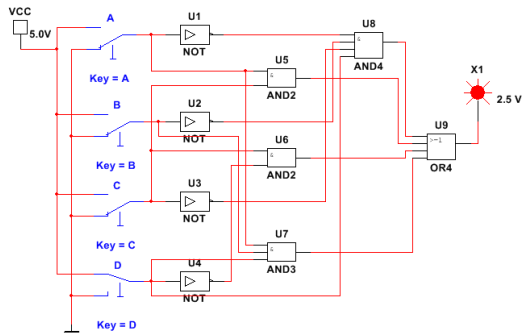


Рис. 58. Логическая схема

На рис. 58 показан результат проверки упрощенного логического выражения: на выходе схемы получена логическая 1, что соответствует комбинации входов  $\overline{A}\overline{B}\overline{C}\overline{D}$ .

### ВАРИАНТЫ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ

D	C	B	A	Значение выхода Y для различных вариантов														
				№ варианта														
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1
0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0
0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1
0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0
0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1
0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0
0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1
1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1



1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1
1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1
1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0
1	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0
1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Перечислите основные двоичные элементы и выполняемые ими функции.
2. Какие булевы функции используются для описания связи входов и выходов основных двоичных логических элементов?
3. Какие функциональные узлы называются комбинационными?
4. Упростите логическое выражение  $Y = \overline{A}BC + A\overline{B}C + ABC$ , используя основные аксиомы и законы булевой алгебры.
5. Для логического выражения  $Y = \overline{A}BC + \overline{A}B\overline{C} + A\overline{B}C$  составьте таблицу истинности.
6. Для логического выражения  $Y = \overline{A}B\overline{C} + ABC + A\overline{B}C$  постройте логическую схему.
7. Упростите логическое выражение  $Y = \overline{A}B\overline{C} + ABC + A\overline{B}C$ , используя основные аксиомы и законы булевой алгебры и, постройте логическую схему.
8. Упростите логическое выражение  $Y = \overline{A}B\overline{C} + ABC + A\overline{B}C$ , используя карту Карно.
9. Используя карту Карно упростите логическое выражение  $Y = \overline{A}BCD + \overline{A}BC\overline{D} + A\overline{B}C\overline{D} + A\overline{B}CD$ .

## ФОРМА ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Номер варианта студенту выдается преподавателем. Отчет на защиту предоставляется в печатном виде.

Структура отчета (на отдельном листе(-ах)):

- титульный лист;

- цели и задачи работы;
- формулировка задания (вариант);
- логическая схема для исходного булева выражения;
- карта Карно для исходного булева выражения;
- упрощенное выражение;
- выводы.

## ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов, И.И. Электротехника и основы электроники / И.И. Иванов, Г.И. Соловьев, В.Я. Фролов – СПб.:Изд-во «Лань», 2012. –736 с.
2. Марченко, А.Л. Основы электроники: учебное пособие / А.Л. Марченко. – М.: ДМК Пресс, 2016. – 296 с.
3. Судоплатов, С.В. Дискретная математика: учебник / С.В. Судоплатов, Е.В. Овчинникова. - 4-е изд. - Новосибирск : НГТУ, 2012. - 278 с. [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=135675>.
4. Новиков, Ю.В. Введение в цифровую схемотехнику / Ю.В. Новиков. – М.: Интернет-Университет Информационных Технологий (ИНТУИТ), 2016.– 392 с. [Электронный ресурс] – URL: <http://www.iprbookshop.ru/52187.html> – ЭБС «IPRbooks».

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

5. Аристов, А.В. Физические основы электроники. Сборник задач и примеры их решения : учебно-методическое пособие / А.В. Аристов, В.П. Петрович ; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Министерство образования и науки Российской Федерации. - Томск : Издательство Томского политехнического университета, 2015. - 100 с. [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=442087>.
6. Федоров, С.В. Электроника: учебник / С.В. Федоров, А.В. Бондарев; Министерство образования и науки Российской Федерации. - Оренбург: ОГУ, 2015. - 218 с. [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=438991>.