

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

# ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

*Методические рекомендации к лабораторным работам  
для студентов специальности 6-05-0715-07  
«Эксплуатация наземных транспортных  
и технологических машин и комплексов»  
очной и заочной форм обучения*



Могилев 2026

УДК 621.3  
ББК 31.2:32.85  
Э45

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «1» сентября 2025 г.,  
протокол № 1

Составитель ст. преподаватель И. А. Черкасова

Рецензент канд. техн. наук, доц. Н. В. Герасименко

Методические рекомендации к лабораторным работам предназначены для  
студентов специальности 6-05-0715-07 «Эксплуатация наземных транспортных  
и технологических машин и комплексов» очной и заочной форм обучения.

Учебное издание

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

|                         |                  |
|-------------------------|------------------|
| Ответственный за выпуск | А. В. Хомченко   |
| Корректор               | И. В. Голубцова  |
| Компьютерная верстка    | Н. П. Полевничая |

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 36 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 07.03.2019.

Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский  
университет, 2026

## Содержание

|   |    |
|---|----|
| Введение.....   | 4  |
| 1 Лабораторная работа № 1. Техника безопасности при прохождении лабораторных работ. Изучение лабораторного оборудования .....   | 5  |
| 2 Лабораторная работа № 2. Исследование режимов работы и методов расчета линейных цепей постоянного тока с одним источником питания...  | 6  |
| 3 Лабораторная работа № 3. Исследование режимов работы и методов расчета линейных цепей постоянного тока с двумя источниками питания...   | 9  |
| 4 Лабораторная работа № 4. Определение параметров и исследование режимов работы электрической цепи переменного тока с последовательным соединением катушки индуктивности, резистора и конденсатора..... | 10 |
| 5 Лабораторная работа № 5. Исследование режимов работы линии электропередачи переменного тока при изменении коэффициента мощности нагрузки.....   | 14 |
| 6 Лабораторная работа № 6. Определение параметров и исследование режимов работы трехфазной цепи при соединении потребителей звездой...  | 17 |
| 7 Лабораторная работа № 7. Определение параметров и исследование режимов работы трехфазной цепи при соединении потребителей треугольником.....  | 21 |
| 8 Лабораторная работа № 8. Исследование процесса зарядки конденсатора от источника постоянного напряжения при ограничении тока с помощью резистора.....   | 23 |
| 9 Лабораторная работа № 9. Определение параметров и основных характеристик однофазного трансформатора.....  | 26 |
| 10 Лабораторная работа № 10. Исследование асинхронного трехфазного двигателя с короткозамкнутым ротором.....  | 32 |
| 11 Лабораторная работа № 11. Снятие характеристик полупроводникового диода и стабилитрона.....  | 38 |
| 12 Лабораторная работа № 12. Исследование работы логических элементов и триггеров.....  | 42 |
| Список литературы.....  | 48 |

## Введение

В учебные планы подготовки инженеров неэлектротехнических специальностей входит ряд общеобразовательных дисциплин, к которым относится и курс «Электротехника и электроника».

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

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

Целью электротехнических дисциплин является теоретическая и практическая подготовка инженеров неэлектротехнических специальностей в области электротехники и электроники в такой степени, чтобы они могли выбирать необходимые электротехнические устройства, электронные и электроизмерительные приборы, уметь их правильно эксплуатировать и составлять совместно с инженерами-электриками технические задания на разработку электрических частей автоматизированных установок для управления производственными процессами.

Лабораторные занятия по электротехнике и электронике имеют целью:

- закрепить теоретический материал;
- дать возможность подробно ознакомиться с устройствами и характеристиками наиболее важных электротехнических приборов, аппаратов, составляющих предмет лабораторной практики;
- помочь овладеть практическими способами управления электротехническими устройствами и настройки их на заданный режим;
- научить технике проведения экспериментального исследования физических моделей;
- научить выполнять определенные расчеты с использованием компьютерных программ;
- выработать умение выносить суждения о рабочих свойствах и степени пригодности исследованных и исследуемых устройств для решения тех или иных практических задач.

## **1 Лабораторная работа № 1. Техника безопасности при прохождении лабораторных работ. Изучение лабораторного оборудования**

**Цель работы:** ознакомление с основными требованиями при проведении лабораторных работ; изучение оборудования, используемого при проведении лабораторных работ.

Работа в лаборатории электротехники, связанная с эксплуатацией электрооборудования, находящегося под напряжением, требует организации и строгого соблюдения мер безопасности. Вопросы безопасности отражаются в инструкциях по эксплуатации, которыми снабжено поставляемое оборудование. Характерным видом поражения, которым может подвергаться работник, является поражение электрическим током. Во избежание возможности поражения электрическим током при работе с электрооборудованием необходимо соблюдать следующие меры безопасности.

1 К выполнению лабораторной работы допускаются студенты, прошедшие обучение мерам безопасности с последующей проверкой знаний и зарегистрированные в соответствующем протоколе.

2 Студенту разрешается выполнение только той лабораторной работы, задание на которую выдал преподаватель.

3 Приступая к работе, студент обязан ознакомиться с методикой ее выполнения.

4 Сборка электрической схемы лабораторной работы, изменение в схеме, производятся при отключенном напряжении питания лабораторной работы и переключения всех выключателей в положение «отключено».

5 Переносное оборудование, необходимое для выполнения данной лабораторной работы (осциллографы, компьютеры, электроизмерительные приборы) обязательно заземляются согласно требованиям завода-изготовителя, что проверяется преподавателем в обязательном порядке.

6 Включение питания оборудования для выполнения лабораторной работы производится только после разрешения преподавателя.

7 Включение измерительных приборов в цепь следует производить только одной рукой, не касаясь металлических частей.

8 При выполнении лабораторных работ в лаборатории запрещается:

- без разрешения преподавателя перемещать приборы и аппаратуру, выносить их из лаборатории;
- производить какие-либо работы по устранению неисправностей лабораторного оборудования;
- оставлять без присмотра электроприборы, включенные в сеть;
- загромождать посторонними предметами рабочие места, находиться в лаборатории в верхней одежде.

9 При возникновении любой неисправности лабораторного оборудования студент обязан немедленно отключить его от электросети и сообщить об этом преподавателю.

Экспериментальная часть лабораторных работ выполняется на лабораторном стенде НТЦ-01.100. В корпусе стенда размещены: блок питания +24 В 0,5 А, +5 В 0,5 А; плата резистивного моста с регулируемым источником ЭДС; плата секундомера с разрешающей способностью 0,1 с; плата транзисторного реле времени; плата транзисторных усилителей; плата измерителя частоты вращения электродвигателей; плата тиристорного управляемого выпрямителя и широтно-импульсного преобразователя; автотрансформатор 0,16 кВт; асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором и электродвигатель постоянного тока независимого возбуждения.

На лицевой панели изображены электрические схемы объектов исследования. Там же установлены коммутационные гнезда, индикаторы цифровых приборов, а также органы управления, позволяющие изменять параметры элементов при проведении лабораторной работы.

## 2 Лабораторная работа № 2. Исследование режимов работы и методов расчета линейных цепей постоянного тока с одним источником питания

**Цель работы:** закрепление навыков расчета линейных электрических цепей с одним источником питания; исследование мостовой цепи постоянного тока.

### 2.1 Основные теоретические сведения

Мост постоянного тока – это сложная электрическая цепь, в которой четыре резистора  $R_{20}$ ,  $R_{22}$ ,  $R_{23}$ ,  $R_1$ , называемые плечами, образуют замкнутый четырехугольник, в одну диагональ которого включается нагрузка  $R_{24}$ , а в другую – источник постоянного тока (рисунок 2.1).

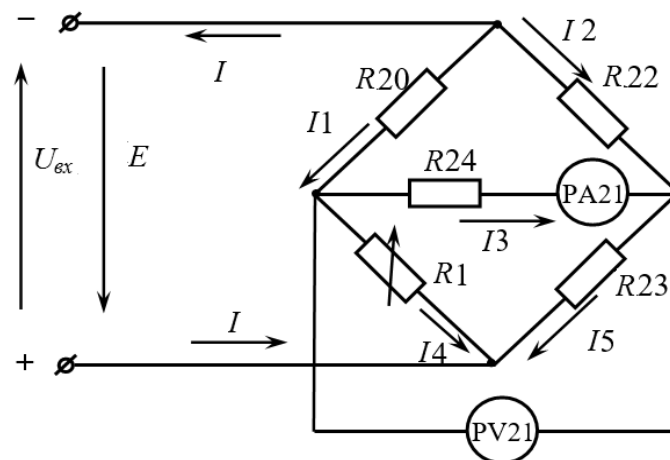


Рисунок 2.1 – Мост постоянного тока

Условие равновесия моста постоянного тока

$$R_1 \cdot R_{22} = R_{20} \cdot R_{23}.$$

Откуда

$$R1 = \frac{R20 \cdot R23}{R22}$$

при значении тока  $I3 = 0$ .

Величина сопротивления резистора  $R24$  определяется по закону Ома:

$$R24 = \frac{U_{PV21}}{I3}.$$

Рассчитать значение выходного напряжения  $U_{вых}$  моста постоянного тока можно, используя метод эквивалентного генератора (рисунок 2.2):

$$U_{вых} = I3 \cdot R24,$$

где

$$I3 = \frac{U_{x.x}}{R24 + R_{к.з}};$$

$U_{x.x}$  – напряжение холостого хода при разомкнутом резисторе  $R24$  (SA13 в положении «3», см. рисунок 2.2);

$R_{к.з}$  – сопротивление относительно точек разрыва моста при закороченном источнике входного напряжения.

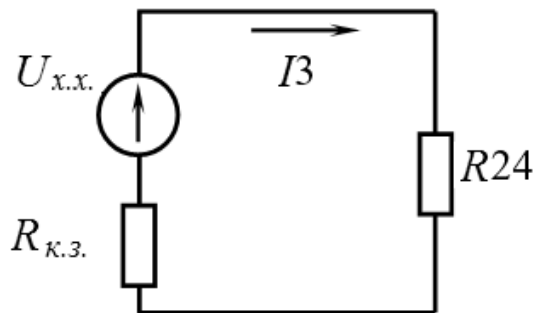


Рисунок 2.2 – Эквивалентная схема электрической цепи для расчета тока  $I3$

Сопротивление  $R_{к.з}$  можно определить экспериментально:

$$R_{к.з} = \frac{U_{x.x}}{I_{к.з}}.$$

## 2.2 Исследуемые схемы

Для выполнения лабораторной работы собирается исследуемая мостовая схема (рисунок 2.3).

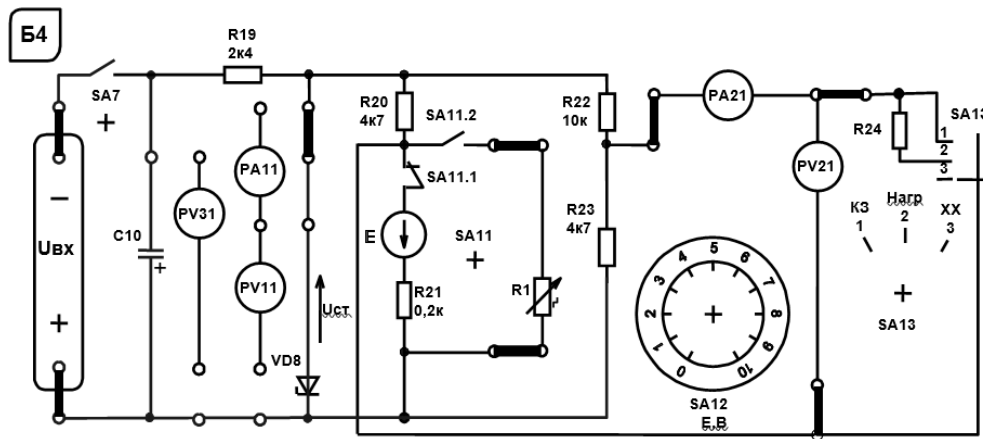


Рисунок 2.3 – Схема для экспериментального исследования электрической цепи постоянного тока с одним источником питания

Измерительный мост включается тумблером SA7.

Технические данные измерительного моста указаны на стенде.

### 2.3 Порядок выполнения лабораторной работы

- 1 Изучить схему измерительного моста. Рассчитать величину сопротивления резистора  $R1$  из условия равновесия моста постоянного тока.
- 2 Построить зависимость  $U_{вых} = f(R1)$ .
- 3 При максимальном  $U_{вых}$  рассчитать сопротивление резистора  $R24$ .
- 4 Методом эквивалентного генератора рассчитать величину выходного напряжения моста при значении сопротивления  $R1$ , заданном преподавателем.
- 5 Экспериментально измерить ток  $I_{к.з}$  и рассчитать сопротивление  $R_{к.з}$ .
- 6 Провести моделирование работы схемы (см. рисунок 2.1) в среде Multisim.
- 7 Сделать выводы по результатам работы.

### Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать цель работы, схему моста постоянного тока, основные расчетные формулы, результаты эксперимента и моделирования, выводы по работе.

### Контрольные вопросы

- 1 Охарактеризуйте мостовую схему постоянного тока.
- 2 Порядок расчета электрических цепей методом эквивалентного генератора напряжения.



### 3 Лабораторная работа № 3. Исследование режимов работы и методов расчета линейных цепей постоянного тока с двумя источниками питания

**Цель работы:** закрепление на практике основных методов расчета цепей постоянного тока с несколькими источниками постоянного напряжения; исследование моста постоянного тока с генераторным датчиком.

#### 3.1 Основные теоретические сведения

Для расчета цепей постоянного тока с несколькими источниками напряжения широко используют метод контурных токов. Этот метод заключается в том, что вместо токов в ветвях определяются на основании второго закона Кирхгофа так называемые контурные токи (рисунок 3.1), замыкающиеся в контурах. Число уравнений, записываемых для контурных токов по второму закону Кирхгофа, равно числу независимых контуров.

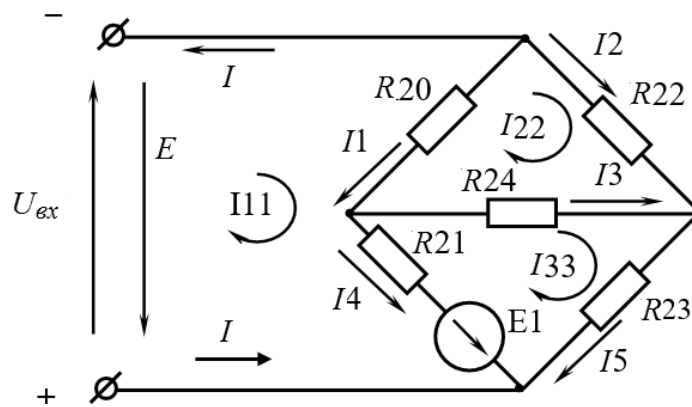


Рисунок 3.1 – Электрическая цепь постоянного тока с двумя источниками питания

Система уравнений для расчета контурных токов

$$\begin{cases} I_{11} \cdot (R_{20} + R_{21}) - I_{22} \cdot R_{20} - I_{33} \cdot R_{21} = E_1 - E; \\ -I_{11} \cdot R_{20} + I_{22} \cdot (R_{20} + R_{24} + R_{22}) - I_{33} \cdot R_{24} = 0; \\ -I_{11} \cdot R_{21} - I_{22} \cdot R_{24} + I_{33} \cdot (R_{21} + R_{23} + R_{24}) = -E_1. \end{cases}$$

$I_{11}$ ,  $I_{22}$ ,  $I_{33}$  – контурные токи;  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_4$ ,  $I_5$ ,  $I$  – токи ветвей.

Решив систему уравнений, определяют значение тока  $I_3$ :

$$I_3 = I_{33} - I_{22}.$$

Выходное напряжение моста

$$U_{\text{вых}} = I_3 \cdot R_{24}.$$

### **3.2 Исследуемые схемы**

Для выполнения лабораторной работы используется схема, в которой вместо резистора  $R1$  включается источник  $E1$  (тумблер SA11 выключен). Схема включается тумблером SA7. Величину ЭДС источника  $E1$  устанавливают с помощью переключателя  $E1$ . Технические данные измерительного моста указаны на стенде.

### **3.3 Порядок выполнения лабораторной работы**

- 1 Методом контурных токов рассчитать токи в ветвях  $I1, I2, I3, I4, I5$  и величину выходного напряжения моста  $U_{вых}$  при заданном ЭДС  $E1$ .
- 2 Снять экспериментально зависимость  $U_{вых} = f(E1)$ , изменяя  $E1$  от 1 до 10 В. Сопоставить  $U_{вых}$  для заданного значения  $E1$  с расчетным.
- 3 Провести моделирование работы схемы (см. рисунок 3.1) в среде Multisim.
- 4 Сделать выводы по результатам работы.

### **Содержание отчета**

Отчет по работе должен содержать цель работы, схему электрической цепи постоянного тока с двумя источниками питания, систему уравнений для расчета контурных токов, результаты расчета, моделирования и эксперимента, зависимость  $U_{вых} = f(E1)$ , выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Опишите метод расчета цепей постоянного тока с двумя источниками питания.
- 2 Порядок расчета методом контурных токов.

## **4 Лабораторная работа № 4. Определение параметров и исследование режимов работы электрической цепи переменного тока с последовательным соединением катушки индуктивности, резистора и конденсатора**

**Цель работы:** определение параметров схемы замещения катушки индуктивности с магнитопроводом; изучение основных режимов работы, расчетов электрической цепи переменного тока при последовательном соединении  $R$ -,  $L$ -,  $C$ -элементов.

### **4.1 Основные теоретические сведения**

Схема для изучения цепи переменного тока с последовательно соединенными резистивным, индуктивным и емкостным элементами приведена на рисунке 4.1.

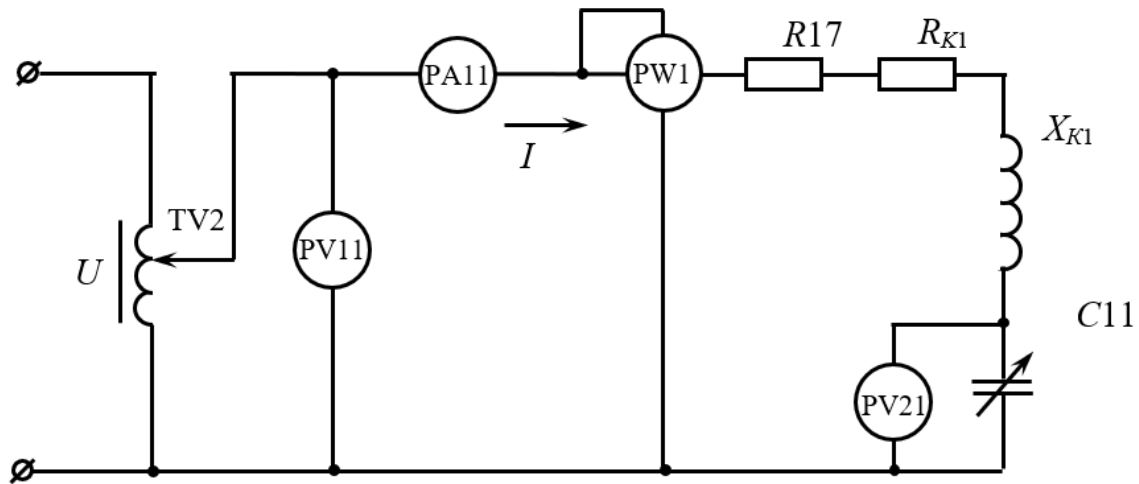


Рисунок 4.1 – Электрическая цепь переменного тока с последовательно соединенными  $R$ -,  $L$ -,  $C$ -элементами

Для определения параметров схемы замещения катушки индуктивности с магнитопроводом  $L_{K1}$  и  $R_{K1}$  в номинальном режиме  $I_n = 1,0$  А снимают показания приборов:  $PA11$  – ток  $I_n$  через катушку;  $PW1$  – активную мощность  $P$ , потребляемую катушкой;  $PV11$  – напряжение  $U$  на катушке.

Зная показания приборов, определяют значение параметров схемы замещения катушки:

$$R_{\Sigma} = \frac{P}{I_n^2}; \quad Z_{\Sigma} = \frac{U}{I_n}; \quad L_{K1} = \frac{X_{K1}}{2\pi f}; \quad X_{K1} = \sqrt{Z_{\Sigma}^2 - R_{\Sigma}^2};$$

$$R_{K1} = R_{\Sigma} - R17; \quad Z_{K1} = \sqrt{R_{K1}^2 + X_{K1}^2},$$

где  $R17 = 17$  Ом;  $f = 50$  Гц.

Величина емкости  $C11$ , при которой в цепи наступает резонанс напряжений, определяется исходя из условия возникновения резонанса напряжений:

$$C11 = \frac{1}{2\pi f X_{K1}}.$$

Коэффициент мощности цепи

$$\cos \varphi = \frac{P}{U \cdot I}.$$

Пример построения векторной диаграммы цепи при активно-индуктивном характере цепи приведен на рисунке 4.2.

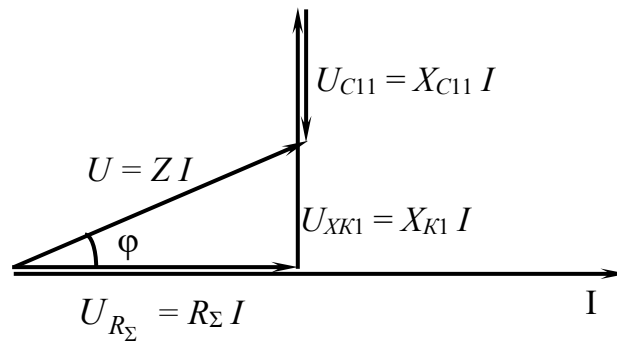


Рисунок 4.2 – Векторная диаграмма

## 4.2 Исследуемые схемы

Для определения параметров схемы замещения катушки индуктивности собирают схему, приведенную на рисунке 4.3. Номинальный ток  $I_n = 1,0$  А выставляют с помощью лабораторного автотрансформатора TV2. Для исследования резонанса напряжения собирают схему, приведенную на рисунке 4.4.

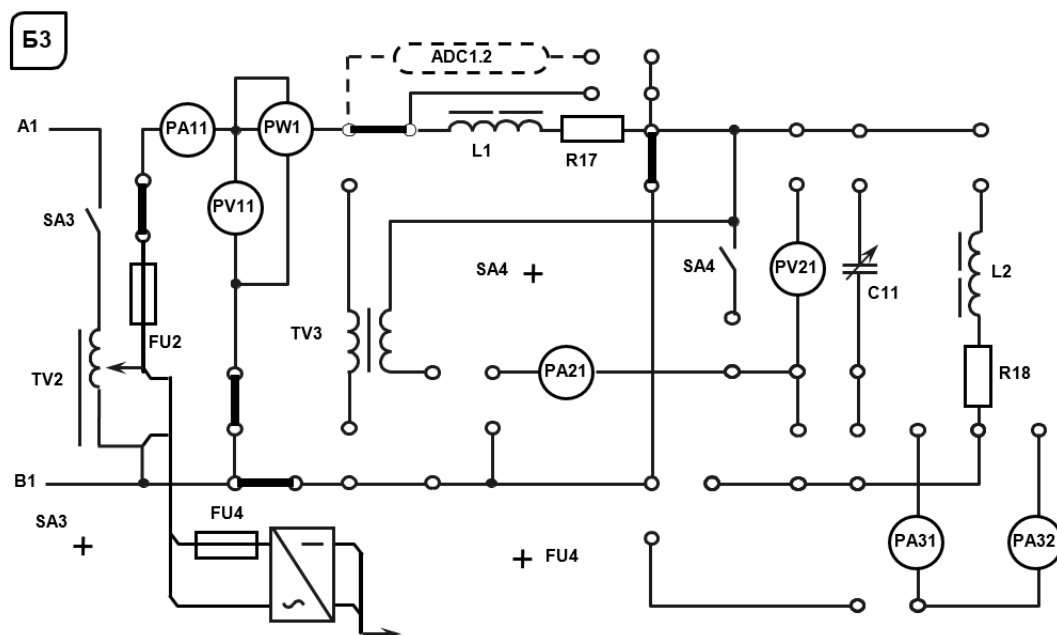


Рисунок 4.3 – Схема для экспериментального исследования параметров схемы замещения катушки индуктивности

## 4.3 Порядок выполнения лабораторной работы

1 Собрать на стенде схему (см. рисунок 4.3) для расчета параметров схемы замещения катушки индуктивности  $L_{K1}$  и  $R_{K1}$  для номинального режима работы  $I_n = 1,0$  А, определить значения этих параметров.

2 Определить величину емкости  $C_{11}$  конденсатора, при которой в цепи наступает резонанс напряжений.



Отчет по работе должен содержать цель работы, схему исследуемой цепи переменного тока с последовательно соединенными  $R$ -,  $L$ -,  $C$ -элементами, основные расчетные формулы, результаты эксперимента и моделирования, зависимости  $I = f(C11)$  и  $\cos \varphi = f(C11)$ , векторную диаграмму напряжений и тока, выводы по работе.

- 1 Каково условие резонанса напряжений?
- 2 Чему равен коэффициент мощности цепи в режиме резонанса, почему?

## 5 Лабораторная работа № 5. Исследование режимов работы линии электропередачи переменного тока при изменении коэффициента мощности нагрузки

**Цель работы:** изучение эксплуатационных характеристик линии электропередачи (ЛЭП) переменного тока; определение параметров нагрузки; исследование режимов работы ЛЭП при изменении коэффициента мощности нагрузки.

### 5.1 Исследуемые схемы

Схема для изучения ЛЭП с нагрузкой в виде параллельно соединенных резистивным, индуктивным и емкостным элементами приведена на рисунке 5.1.

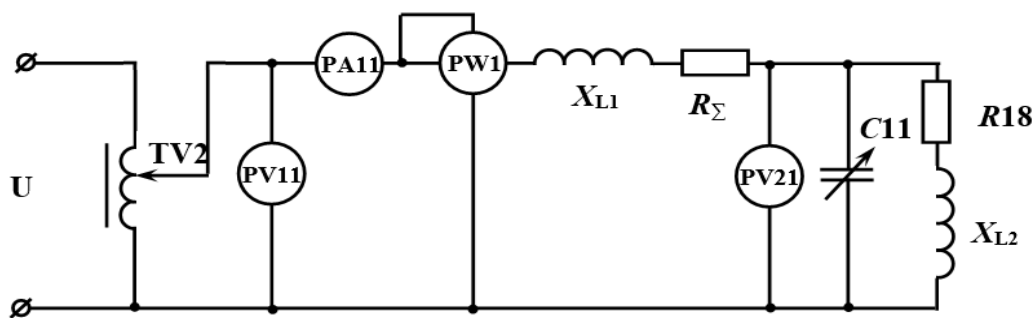


Рисунок 5.1 – Электрическая схема ЛЭП переменного тока с параллельно соединенными  $R$ -,  $L$ - и  $C$ -элементами в качестве нагрузки

Закоротив условно представленную ЛЭП ( $L_{K1}$ ,  $R17$ ), определяют параметры катушки  $L_{K2}$ , сопротивление  $R18$  и  $\cos\varphi$  при  $U_{2H} = 110$  В (схема приведена на рисунке 5.2).

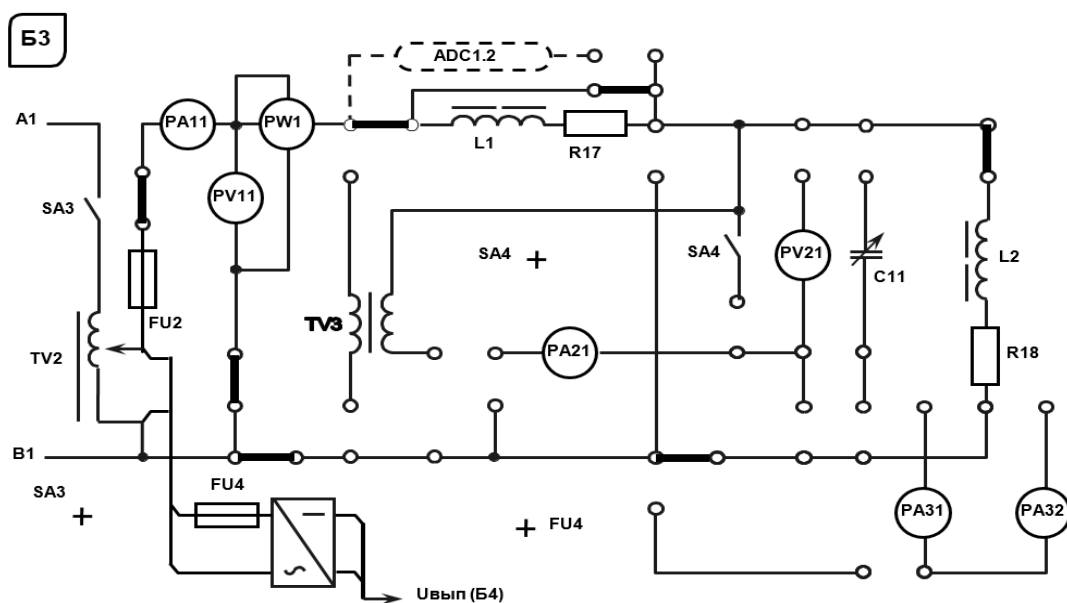


Рисунок 5.2 – Схема для экспериментального исследования параметров схемы замещения катушки индуктивности

Рассчитывают величину емкости  $C11$  для повышения коэффициента мощности нагрузки, а также для выполнения условия резонанса токов и проверяют значение тока  $I$  экспериментально (схема приведена на рисунке 5.3).

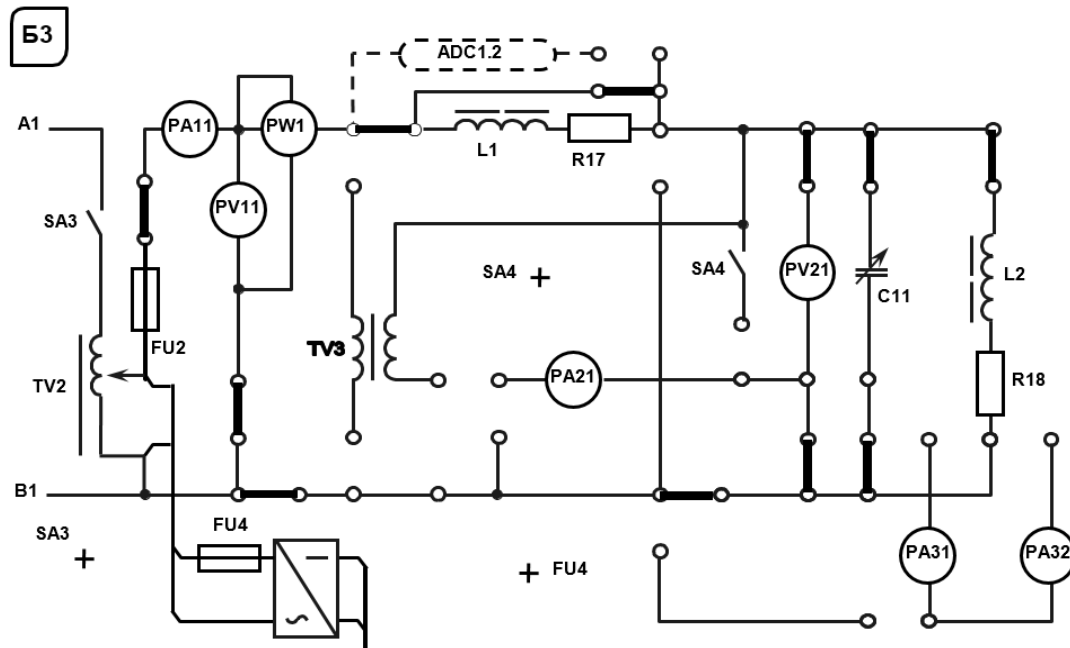


Рисунок 5.3 – Схема для экспериментального исследования резонанса токов

## 5.2 Основные теоретические сведения

### 1 Определение сопротивлений нагрузки для ЛЭП.

При расчете сопротивлений нагрузки  $R18$  и  $X_{L2}$  необходимо зашунтировать перемычкой ЛЭП ( $L_{K1}$ ,  $R17$ ), установить автотрансформатором TV2 номинальное напряжение  $U_n = 110$  В и снять показания приборов PW1 и PA11.

$$R18 = \frac{P}{I^2}; \quad Z_{L2} = \frac{U_{2n}}{I}; \quad L = \frac{X_{L2}}{2\pi f}; \quad X_{L2} = \sqrt{Z_{L2}^2 - R18^2}.$$

### 2 Определение коэффициента мощности $\cos \varphi_{2n}$ нагрузки:

$$\cos \varphi_{2n} = \frac{R18}{Z_{L2}}.$$

### 3 Расчет значения емкости $C11$ для повышения $\cos \varphi_{2n}$ до значения $\cos \varphi_{2TP}$ :

$$C11 = \frac{P_2}{\omega U_{11}^2} (\operatorname{tg} \varphi_{2n} - \operatorname{tg} \varphi_{2TP}).$$

### 4 Расчет значения емкости $C11$ , при котором в цепи наступит резонанс токов:

$$b_L = b_C; \quad \omega \cdot C11 = \frac{X_{L2}}{Z_{L2}^2}; \quad C11 = \frac{X_{L2}}{\omega \cdot Z_{L2}^2},$$

где  $b_L$  – реактивная проводимость катушки индуктивности, См,

$$b_L = \frac{X_{L2}}{Z_{L2}^2};$$

$b_C$  – реактивная проводимость конденсатора, См,  $b_C = \omega C_2$ .

5 Построение графика зависимости  $\eta = f(C11)$ . Расчет  $\eta$  при различных значениях  $C11$  необходимо осуществлять по формуле

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{P_2 \cdot R_{\Sigma}}{U_{2H}^2 \cdot \cos^2 \varphi_2}}.$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{q}{y},$$

где  $q$  – активная проводимость нагрузки, См,

$$q = \frac{R18}{Z_{L2}^2};$$

$y$  – полная проводимость нагрузки, См,

$$y = \sqrt{\left(\frac{R18}{Z_{L2}^2}\right)^2 + \left(\frac{X_{L2}}{Z_{L2}^2} - \omega \cdot C_2\right)^2};$$

$P_2$  – активная мощность, потребляемая нагрузкой, Вт,

$$P_2 = P - P_1 = P - I^2 \cdot (R17 + R_{K1});$$

$P$  – показания ваттметра PW2, Вт.

### 5.3 Порядок выполнения лабораторной работы

1 Определить параметры схемы замещения катушки индуктивности. Зашунтировав ЛЭП и установив  $U_{2H} = 110$  В, определить значения сопротивлений нагрузки  $X_{L2}$ ,  $R18$ , а также коэффициент мощности нагрузки  $\cos \varphi_{2H}$ .

2 Рассчитать значение емкости конденсатора  $C11$  для повышения коэффициента мощности нагрузки до значения  $\cos \varphi_{2TP}$ , заданного преподавателем.

3 Изменяя емкость  $C11$ , снять зависимость  $\eta = f(C11)$ .

4 Рассчитать значение емкости  $C11$ , при котором в цепи наступит резонанс токов, и проверить на стенде.

5 Провести моделирование работы схемы (см. рисунок 5.1) в среде Multisim.

6 Сделать выводы по результатам работы.



## Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать цель работы, схему исследуемой цепи переменного тока с параллельно соединенными  $R$ -,  $L$ -,  $C$ -элементами, основные расчетные формулы, результаты эксперимента и моделирования, зависимости  $I = f(C11)$  и  $\cos \varphi = f(C11)$ , выводы по работе.

### Контрольные вопросы

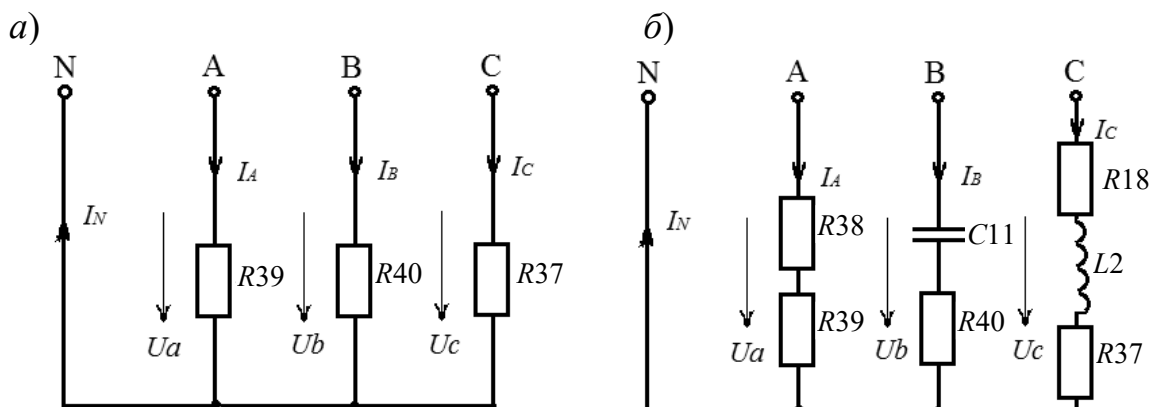
- 1 В какой цепи и при каких условиях возникает резонанс токов?
- 2 От каких параметров цепи зависит резонансная частота?

## 6 Лабораторная работа № 6. Определение параметров и исследование режимов работы трехфазной цепи при соединении потребителей звездой

**Цель работы:** исследование трехфазной цепи при соединении потребителей звездой; изучение методов расчета трехфазных цепей при соединении потребителей звездой.

### 6.1 Исследуемые схемы

В лабораторной работе исследуются трехфазные схемы с симметричной (рисунок 6.1, а) и несимметричной (рисунок 6.1, б) нагрузками при наличии нейтрального провода и без него.



а – нагрузка симметричная; б – нагрузка несимметричная

Рисунок 6.1 – Исследуемые трехфазные схемы

## 6.2 Основные теоретические сведения

1 Исследование симметричной резистивной нагрузки при наличии нейтрального провода.

Для получения симметричной нагрузки  $R_{37} = R_{39} = R_{40}$  необходимо перемычками закоротить следующие элементы:  $R_{38}$ ,  $C_{11}$ ,  $L_{K2}$  и  $R_{18}$  (рисунок 6.2).

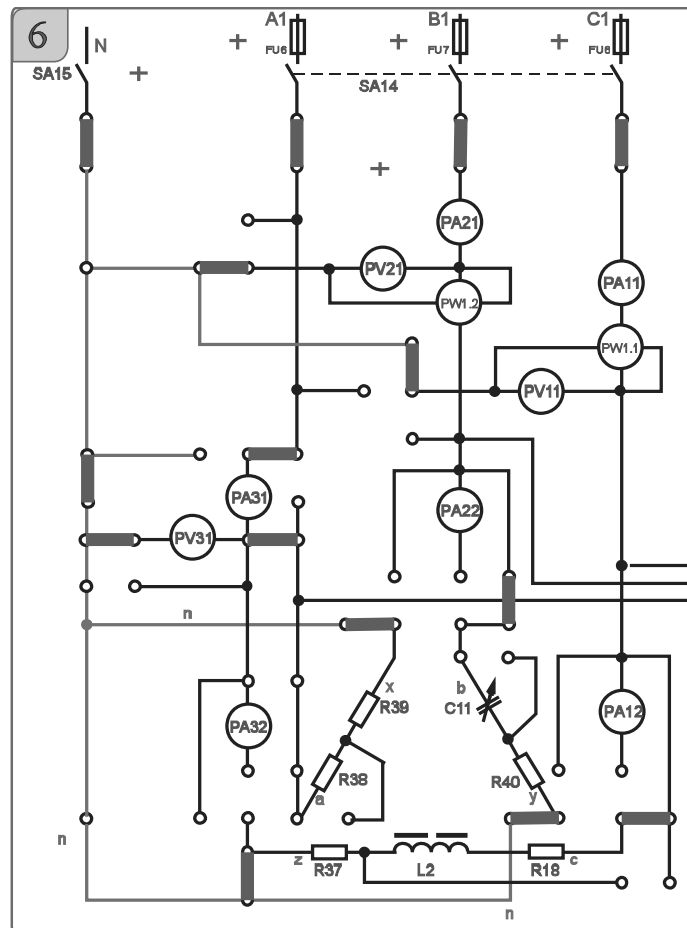


Рисунок 6.2 – Схема для экспериментального исследования трехфазной электрической цепи при соединении нагрузки звездой

Измерить фазные напряжения  $U_b$  и  $U_c$  при помощи вольтметров PV21, PV11 и фазные токи в фазах В и С при помощи амперметров PA21 и PA11.

Убедиться в отсутствии тока в нейтральном проводе  $I_N = 0$  (PA31).

Определить значения сопротивлений резисторов по закону Ома:

$$R_{37} = \frac{U_c}{I_c}.$$

Мощность, потребляемую симметричной нагрузкой, найти по формуле

$$P = 3 \cdot I_c^2 \cdot R_{37}.$$

2 Расчет значения емкости  $C_{11}$  для получения равномерной нагрузки:

$$Z_a = R_{38} + R_{39};$$

$$Z_b = \sqrt{R_{40}^2 + X_{C_{11}}^2};$$

$$Z_c = \sqrt{(R_{37} + R_{18})^2 + X_{L_2}^2}.$$

Приняв  $Z_a = Z_b = Z_c$ , определяют значение  $C_{11}$  для получения равномерной нагрузки:

$$R_{40}^2 + X_{C_{11}}^2 = (R_{37} + R_{18})^2 + X_{L_2}^2,$$

где  $R_{18}=59 \text{ Ом}$ ;  $X_{L_2}=140 \text{ Ом}$ ;

$$X_{C_{11}} = \sqrt{(R_{37} + R_{18})^2 + X_{L_2}^2 - R_{40}^2}.$$

Откуда

$$C_{11} = \frac{1}{\omega \cdot X_{C_{11}}}.$$

Значение сопротивления резистора  $R_{38}$  определяется из соотношения

$$R_{38} = Z_c - R_{39}.$$

3 Исследование несимметричной равномерной нагрузки с нейтральным проводом (общая точка ваттметров соединена с нейтралью).

В этом случае

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

где  $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$  – фазные напряжения нагрузок,

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A; \quad \dot{U}_b = \dot{U}_B; \quad \dot{U}_c = \dot{U}_C; \quad I_a = I_b = I_c.$$

Ток в нейтральном проводе

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C.$$

### 6.3 Порядок выполнения лабораторной работы

1 Исследовать экспериментально симметричную нагрузку с нейтральным проводом, измерив фазные токи  $I_A, I_B, I_C$ , напряжения  $U_a, U_b, U_c$  и мощность нагрузки  $P$ , а также ток в нейтральном проводе  $I_N$ . Заполнить таблицу 6.1 (сим-

метричная нагрузка).

2 Рассчитать сопротивления фаз симметричной нагрузки (подразд. 6.2, п. 1).

3 Рассчитать значения емкости  $C_{11}$  и сопротивления резистора  $R_{38}$  для обеспечения равномерной нагрузки (см. подразд. 6.2, п. 2).

4 Исследовать равномерную нагрузку с нейтральным проводом, измерив фазные напряжения, мощность и ток в нейтральном проводе, подключив его тумблером SA15. Рассчитать комплексные значения токов в фазах А, В, С и определить ток в нейтральном проводе. Сравнить расчетные значения тока с экспериментальными. Заполнить таблицу 6.1 (равномерная нагрузка).

Таблица 6.1 – Результаты измерений

| $U_a$ , В                                  | $U_b$ (PV21),<br>В | $U_c$ (PV11),<br>В | $I_A$ ,<br>А | $I_B$ (PA21),<br>А | $I_C$ (PA11),<br>А | $I_N$ (PA31),<br>А | $P$ ,<br>Вт |
|--|--------------------|--------------------|--------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------|
| <i>Симметричная нагрузка</i> (эксперимент) |                    |                    |              |                    |                    |                    |             |
|  |                    |                    |              |                    |                    |                    |             |
| Моделирование                              |                    |                    |              |                    |                    |                    |             |
|  |                    |                    |              |                    |                    |                    |             |
| <i>Равномерная нагрузка</i> (эксперимент)  |                    |                    |              |                    |                    |                    |             |
|  |                    |                    |              |                    |                    |                    |             |
| Расчет                                     |                    |                    |              |                    |                    |                    |             |
|  |                    |                    |              |                    |                    |                    |             |
| Моделирование                              |                    |                    |              |                    |                    |                    |             |
|  |                    |                    |              |                    |                    |                    |             |

5 Построить векторную диаграмму токов и напряжений для равномерной нагрузки с нейтральным проводом.

6 Провести моделирование работы схемы (см. рисунок 6.1) в среде Multisim.

7 Сделать выводы по результатам работы.

### ***Содержание отчета***

Отчет по работе должен содержать цель работы, схемы трехфазной цепи при симметричной и несимметричной нагрузках, основные расчетные формулы, результаты эксперимента, моделирования и расчета (см. таблицу 6.1), векторную диаграмму напряжений и токов, выводы по работе.

### ***Контрольные вопросы***

1 Каково назначение нулевого провода?

2 Как вычислять мощность, потребляемую трехфазной цепью при соединении приемников звездой?

## 7 Лабораторная работа № 7. Определение параметров и исследование режимов работы трехфазной цепи при соединении потребителей треугольником

**Цель работы:** исследование трехфазной цепи при соединении потребителей треугольником; изучение методов расчета работы трехфазных цепей при соединении потребителей треугольником.

### 7.1 Исследуемые схемы

В лабораторной работе исследуются трехфазные схемы с симметричной, несимметричной и равномерной нагрузками при соединении потребителей треугольником (рисунок 7.1).

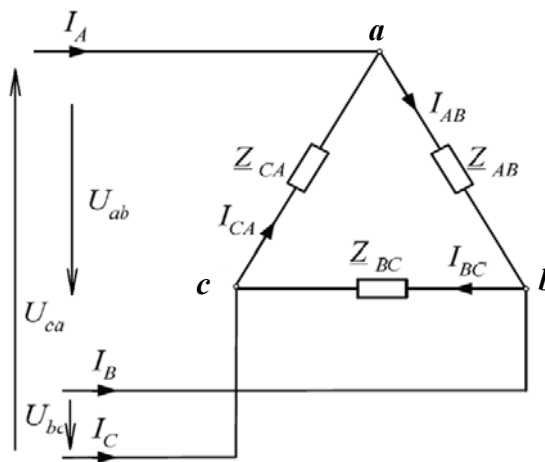


Рисунок 7.1 – Исследуемая трехфазная схема при соединении потребителей треугольником

### 7.2 Порядок выполнения лабораторной работы

1 Установить равномерную нагрузку во всех трех фазах (рисунок 7.2). Определить в активную мощность нагрузки и линейный ток в линии С нагрузки. Напряжение  $U_{ab}$  измерить прибором PV21, напряжение  $U_{bc}$ ,  $U_{ac}$  – прибором PV11.

2 Рассчитать комплексные значения фазных токов и определить линейный ток в линии С. Рассчитать активную мощность потребителя. Результаты вычислений сравнить с экспериментальными данными.

Ток в фазах определяют по закону Ома для каждой фазы:

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{Z_{AB}}; \quad \dot{I}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{Z_{BC}}; \quad \dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{Z_{CA}}.$$

Линейные токи определяют по первому закону Кирхгофа:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}; \quad \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0.$$

3 Построить векторную диаграмму токов и напряжений.

4 Провести моделирование работы схемы (см. рисунок 7.1) в среде Multisim.

5 Сделать выводы по результатам работы.

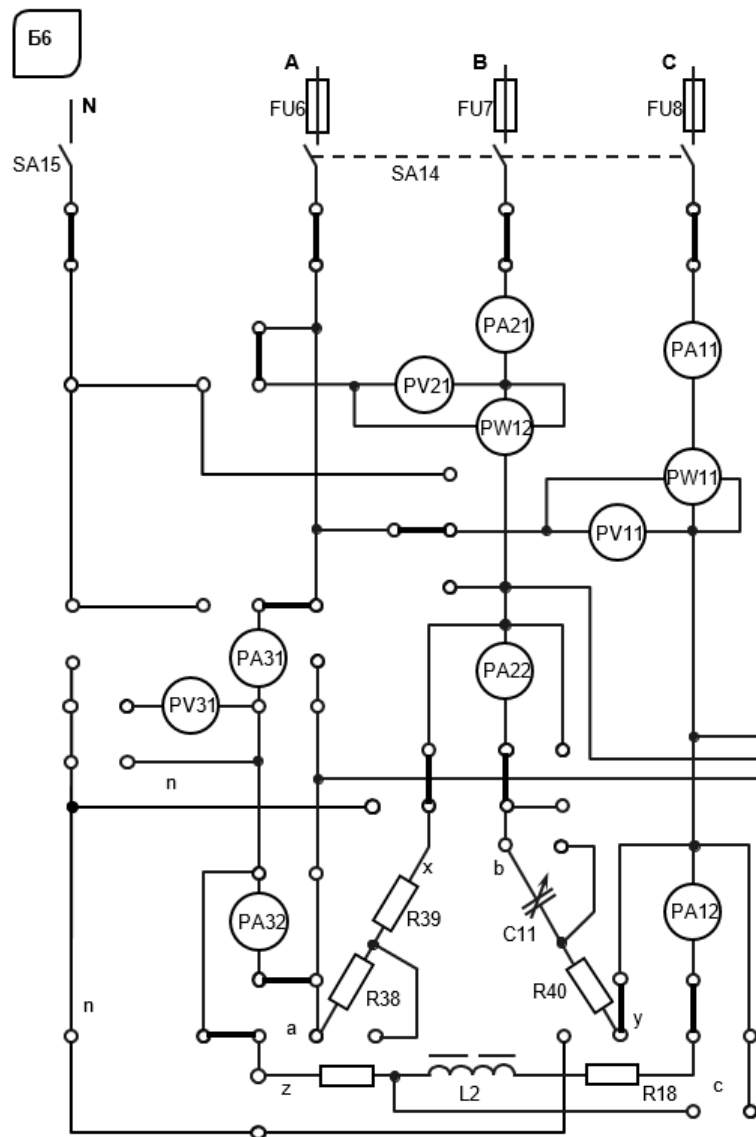


Рисунок 7.2 – Трехфазная электрическая цепь при соединении нагрузки треугольником

### ***Содержание отчета***

Отчет по работе должен содержать цель работы, схему трехфазной цепи, основные расчетные формулы, результаты эксперимента, моделирования и расчета, векторную диаграмму напряжений и токов, выводы по работе.

### Контрольные вопросы

- 1 Расчет трехфазной цепи переменного тока при соединении треугольником с симметричной нагрузкой.
- 2 Как изменятся фазные токи при отключении одного из линейных проводов в симметричном приемнике?

## 8 Лабораторная работа № 8. Исследование процесса зарядки конденсатора от источника постоянного напряжения при ограничении тока с помощью резистора

**Цель работы:** изучение процесса изменения напряжения на конденсаторе при зарядке его от источника постоянного напряжения; закрепление навыков измерения напряжения компенсационным методом.

### 8.1 Основные теоретические сведения

Схема для исследования переходного процесса зарядки конденсатора  $C12$  при ограничении тока с помощью сопротивления  $R1$  приведена на рисунке 8.1.

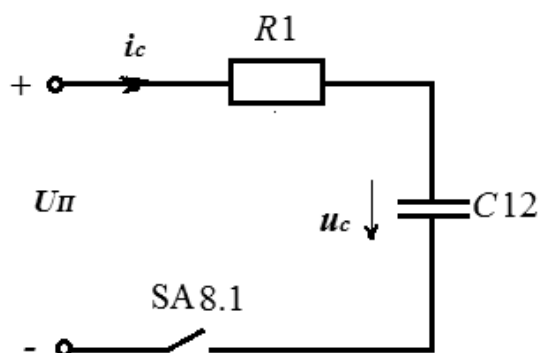


Рисунок 8.1 – Исследуемая схема зарядки конденсатора

При подключении конденсатора  $C12$  к источнику питания  $U_{\text{пит}} = 24\text{ В}$  закон изменения напряжения на  $C12$  получают, решая дифференциальное уравнение вида

$$U_{\text{пит}} = R \cdot C \cdot \frac{du_c}{dt} + U_c.$$

Решение имеет свободную  $A = e^{-t/\tau}$  и вынужденную  $U_c = U_{\text{пит}}$  составляющие. Окончательно

$$U_c = U_{\text{пит}} \cdot (1 - e^{-t/\tau}),$$

где  $\tau = R1 \cdot C12$ ;

$A$  – постоянная интегрирования, определяется из начальных условий,  $A = -U_{\text{пит}}$ .

2 Установить заданное преподавателем сопротивление  $R1$  в блоке 8.



3 Тумблером SA30 включить секундомер.

4 Сбросить значение секундомера в нулевые показания кнопкой SB6.

5 Провести первый опыт заряда конденсатора при положении «1» переключателя SA10 блока 5. Для этого переключить тумблер SA8.1 в верхнее положение. Когда засветится светодиод VD9 в блоке 5, записать показания секундомера в таблицу 8.1.

Таблица 8.1 – Результаты измерений

| Положение переключателя SA10 | $t$ , с | Эксперимент $U_c$ , В | Расчет $U_c$ , В |
|------------------------------|---------|-----------------------|------------------|
|                              |         |                       |                  |
|                              |         |                       |                  |

6 Выключить тумблер SA8.1.

7 Сбросить показания секундомера кнопкой SB6.

8 Провести остальные опыты аналогично (пп. 5–7) для всех остальных положений тумблера SA10.

9 Для полученных значений  $t$  рассчитать напряжения на конденсаторе и сравнить с экспериментальными. Данные расчетов занести в таблицу 8.1.

10 По результатам измерений и расчетов построить график изменения напряжения на конденсаторе  $U_c = f(t)$ .

11 Воспользовавшись полученной при эксперименте кривой заряда C12, определить постоянные времени  $\tau$  и сравнить с расчетным.

12 Провести моделирование работы схемы (см. рисунок 8.1) в среде Multisim.

13 Сделать выводы по результатам работы.

### ***Содержание отчета***

Отчет по работе должен содержать цель работы, схему исследования процесса заряда конденсатора, основные расчетные формулы, результаты эксперимента, моделирования и расчета (см. таблицу 8.1), графики заряда конденсатора с определенной постоянной времени, выводы по работе.

### ***Контрольные вопросы***

1 Расчет переходного процесса зарядки конденсатора от источника постоянного напряжения.

2 Порядок измерения напряжения при зарядке конденсатора компенсационным методом.

## 9 Лабораторная работа № 9. Определение параметров и основных характеристик однофазного трансформатора

**Цель работы:** изучение устройства и принципа действия однофазного трансформатора; определение параметров схем замещения трансформатора.

### 9.1 Основные теоретические сведения

Трансформатор – это статический (неподвижный) электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты. Схема трансформатора представлена на рисунке 9.1.

На замкнутом сердечнике, собранном из листовой стали, расположены две изолированные обмотки. К одной из них с числом витков  $W_1$  подводится электрическая энергия от источника переменного тока. Эта обмотка носит название первичной. От другой, вторичной, обмотки с числом витков  $W_2$ , энергия отводится к нагрузке.

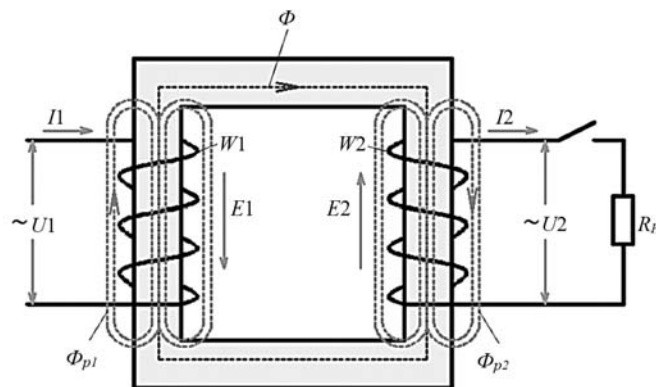


Рисунок 9.1 – Схема трансформатора

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. При подключении первичной обмотки к источнику переменного тока в витках этой обмотки протекает переменный ток  $i_1$ , который создает в магнитопроводе переменный магнитный поток  $\Phi$ . Замыкаясь в магнитопроводе, этот поток пронизывает обе обмотки, индуцируя в них ЭДС:

$$e_1 = -W_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_2 = -W_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Значения ЭДС  $e_1$  и  $e_2$  могут отличаться друг от друга в зависимости от числа витков в обмотках. Применяя обмотки с различным соотношением витков, можно изготовить трансформатор на любое отношение напряжений.

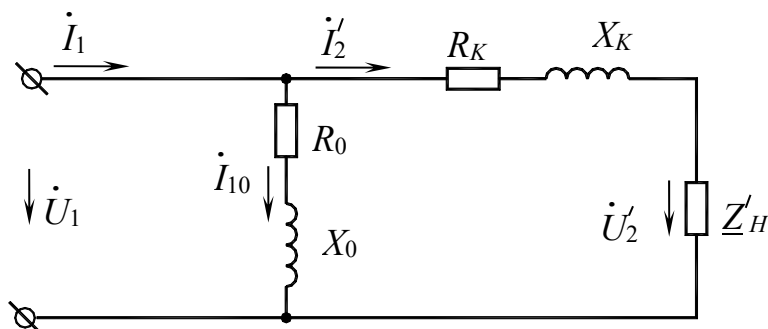
Отношение ЭДС первичной обмотки трансформатора к ЭДС вторичной его обмотки, равное отношению соответствующих чисел витков обмоток, называют коэффициентом трансформации трансформатора:

$$n = E_1 / E_2 = W_1 / W_2.$$

При подключении ко вторичной обмотке нагрузки  $Z_H$  в цепи потечет ток  $i_2$  и на выводах вторичной обмотки установится напряжение  $u_2$ .

Схема замещения трансформатора представлена на рисунке 9.2.

Схема опыта холостого хода представлена на рисунке 9.3.



$R_0$ ,  $X_0$  – параметры намагничивающей цепи трансформатора в схеме замещения трансформатора, определяемые из опыта холостого хода трансформатора;  $R_0$  – активное сопротивление намагничивающей цепи, обусловленное потерями мощности в стальном магнитопроводе;  $X_0$  – индуктивное сопротивление намагничивающей цепи, обусловленное основным магнитным потоком;  $R_K$ ,  $X_K$  – параметры схемы замещения, определяемые из опыта короткого замыкания трансформатора

Рисунок 9.2 – Схема замещения однофазного трансформатора

Для определения коэффициента трансформации  $n$ , а также параметров схемы замещения и потерь мощности в трансформаторе проводят опыт холостого хода (ХХ) и опыт короткого замыкания (КЗ) трансформатора.

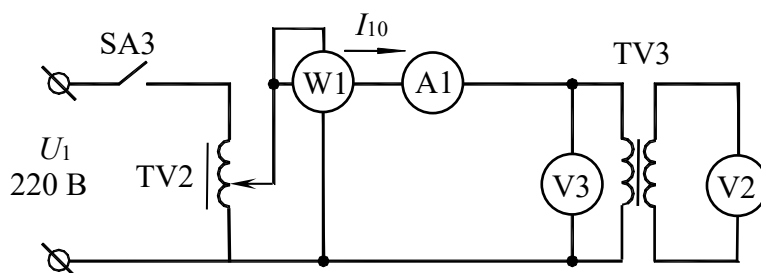


Рисунок 9.3 – Опыт холостого хода трансформатора

Показания приборов  $PW1$ ,  $PA1$ ,  $PV3$ ,  $PV2$  дают возможность определить параметры схемы замещения трансформатора в режиме холостого хода:

$$R_0 = \frac{P_0}{I_{10}^2}; \quad Z_0 = \frac{U_{1H}}{I_{10}}; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}; \quad n = \frac{U_{1H}}{U_{20}},$$

где  $n$  – коэффициент трансформации трансформатора.

Схема опыта короткого замыкания представлена на рисунке 9.4.

Показания приборов PW1, PV3, PA1, PA2 дают возможность определить параметры схемы замещения в режиме короткого замыкания:

$$R_K = \frac{P_K}{I_{1H}^2}; \quad Z_K = \frac{U_{1K}}{I_{1H}}; \quad X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2},$$

а также активные и реактивные сопротивления первичной и вторичной обмотки трансформатора ( $R_1, R_2, X_1, X_2$ ):

$$R_1 = R_2' = \frac{R_K}{2}; \quad X_1 = X_2' = \frac{X_K}{2}; \quad R_2 = \frac{R_2'}{n^2}; \quad X_2 = \frac{X_2'}{n^2}.$$

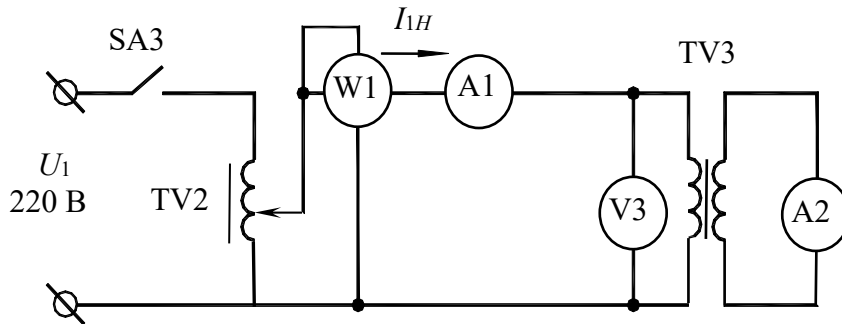


Рисунок 9.4 – Опыт короткого замыкания трансформатора

КПД трансформатора

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_H \cdot \cos \varphi_{2H}}{\beta \cdot S_H \cdot \cos \varphi_{2H} + P_0 + \beta^2 \cdot P_K},$$

где  $\beta$  – коэффициент загрузки трансформатора,  $\beta = \frac{I_1}{I_{1H}} = \frac{I_2}{I_{2H}}$ ;

$S_H$  – полная мощность трансформатора,

$$S_H = U_{1H} \cdot I_{1H} = U_{2H} \cdot I_{2H}.$$

Внешняя характеристика трансформатора  $U_2 = f(\beta)$  строится по следующему уравнению:

$$U_2 = U_{2H} \left( 1 - \frac{\Delta U_2 \%}{100 \%} \right),$$

где  $\Delta U_2 \% = \beta (U_{\kappa.a} \% \cos \varphi_2 + U_{\kappa.p} \% \sin \varphi_2)$ ;

$U_{\kappa.a} \%$  – активная составляющая напряжения короткого замыкания трансформатора,  $U_{\kappa.a} \% = \frac{I_{1H} R_K}{U_{1H}} 100 \% = \frac{P_K}{S_H} 100 \%$ ;

$U_{\kappa.p} \%$  – реактивная составляющая напряжения короткого замыкания

трансформатора,  $U_{к.р} \% = \frac{I_{1H} X_K}{U_{1H}} 100 \% .$

## 9.2 Исследуемые схемы

Для определения параметров схемы замещения трансформатора  $U_2 = f(\beta)$  проводят опыты холостого хода (SA4 выключен) и короткого замыкания (SA4 включен) (рисунок 9.5).

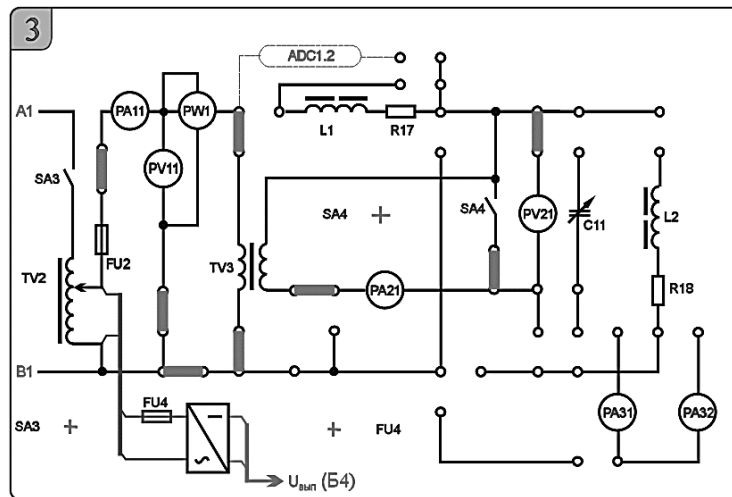


Рисунок 9.5 – Схема исследования трансформатора в режиме холостого хода и короткого замыкания

Исследование однофазного трансформатора производится по схеме, представленной на рисунке 9.6.

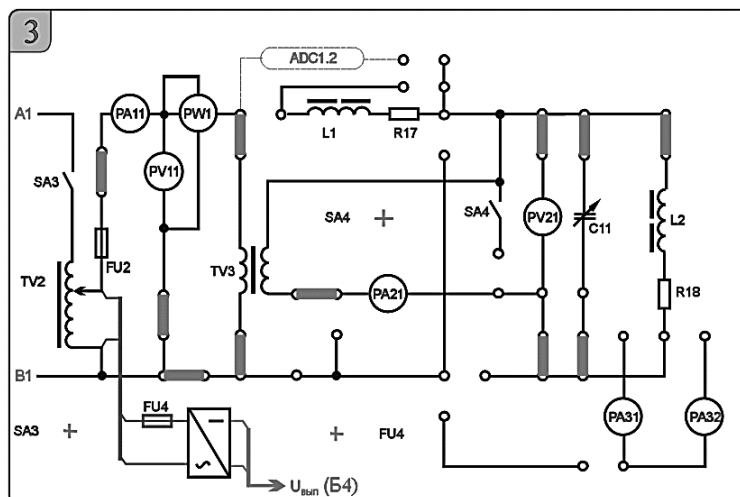


Рисунок 9.6 – Схема исследования однофазного трансформатора

Опыт короткого замыкания производят при пониженном напряжении на первичной обмотке трансформатора (выключатель SA4 включен).

Исследуется и строится внешняя характеристика трансформатора при различном характере и величине нагрузки. Характер нагрузки изменяется при различных значениях емкости конденсатора  $C_{11}$ .

Изучаются методы повышения коэффициента мощности нагрузки и КПД трансформатора.

### 9.3 Порядок выполнения лабораторной работы

1 Собрать схему, приведенную на рисунке 9.5, для проведения опыта холостого хода.

2 Подключить питание ЛАТРа TV2 (тумблер переключения пределов регулирования напряжения ЛАТРа SA70 в блоке 10 – в положение «100 ← 0 В»; тумблер SA3 в блоке 3 – в положение «включено»).

3 Снять параметры холостого хода трансформатора TV3 при напряжении питания 220 В (по прибору PV11). Снять показания приборов PA11 ( $I_{10}$ ), PV11 ( $U_{1X.X}$ ), PW1 ( $P_0$ ), PV21 ( $U_{20}$ ) и занести их в таблицу 9.1.

Таблица 9.1 – Показания приборов в опыте холостого хода трансформатора

| Экспериментальные данные |                        |                     |                        | Расчетное значение |               |               |               |                |                     |
|--------------------------|------------------------|---------------------|------------------------|--------------------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------------|
| $U_{1H}$ , В<br>(PV11)   | $I_{10}$ , А<br>(PA11) | $P_0$ , Вт<br>(PW1) | $U_{20}$ , В<br>(PV21) | $S$ ,<br>В·А       | $Z_0$ ,<br>Ом | $X_0$ ,<br>Ом | $R_0$ ,<br>Ом | $\cos \varphi$ | $\varphi$ ,<br>град |
| 220                      |                        |                     |                        |                    |               |               |               |                |                     |

4 Рассчитать параметры трансформатора в режиме холостого хода и занести их в таблицу 9.1.

5 Собрать схему, приведенную на рисунке 9.5, для проведения опыта короткого замыкания.

6 Снять параметры короткого замыкания, для чего включить тумблеры SA4 и SA3, установив во вторичной обмотке трансформатора TV3 ток 0,8 А (по прибору PA21). Снять показания приборов PA11 ( $I_{1H}$ ), PV11 ( $U_{1K}$ ), PW1 ( $P_K$ ) и занести их в таблицу 9.2.

Таблица 9.2 – Показания приборов в опыте короткого замыкания

| Экспериментальные данные |                        |                     |                     | Расчетное значение |               |               |               |                |                     |
|--------------------------|------------------------|---------------------|---------------------|--------------------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------------|
| $U_{1K}$ , В<br>(PV11)   | $I_{1H}$ , А<br>(PA11) | $P_K$ , Вт<br>(PW1) | $U_2$ , В<br>(PV21) | $S$ ,<br>В·А       | $Z_K$ ,<br>Ом | $X_K$ ,<br>Ом | $R_K$ ,<br>Ом | $\cos \varphi$ | $\varphi$ ,<br>град |
|                          | 0,8                    |                     |                     |                    |               |               |               |                |                     |

7 Рассчитать параметры трансформатора в режиме короткого замыкания и холостого хода и занести их в таблицу 9.2.

8 Измерить вторичное напряжение при нагрузке  $R_{18}$ ,  $L_2$  (см. рисунок 9.6).

9 Построить внешнюю характеристику трансформатора  $U_2 = f(\beta)$ .

10 Осуществить моделирование работы трансформатора в среде Multisim (рисунок 9.7), используя параметры схемы замещения (см. таблицы 9.1 и 9.2).

В режиме холостого хода разомкнуть ключ Q и S. В режиме короткого замыкания ключ Q замкнут (напряжение на первичной обмотке изменить на  $U_K$ ).

Сравнить результаты моделирования с расчетными значениями и результатами эксперимента.

11 Сделать выводы по результатам работы.

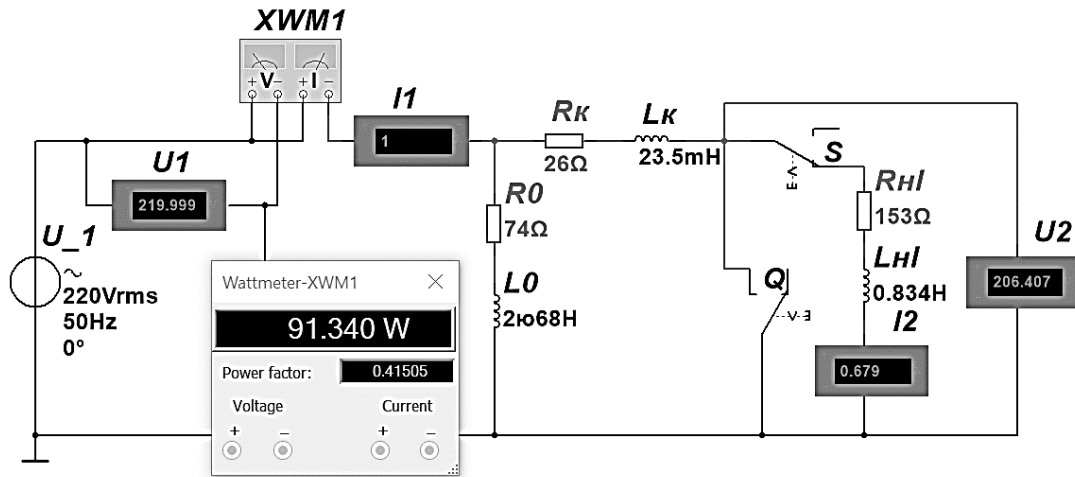


Рисунок 9.7 – Моделирование работы трансформатора в среде Multisim

### **Содержание отчета**

Отчет по работе должен содержать цель работы, схему трансформатора в режиме холостого хода и короткого замыкания, основные расчетные формулы, результаты эксперимента и расчета (см. таблицы 9.1 и 9.2), внешнюю характеристику трансформатора, выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Опишите принцип работы однофазного трансформатора.
- 2 Определение параметров схемы замещения трансформатора с помощью опытов холостого хода и короткого замыкания.
- 3 Опишите моделирование работы трансформатора в среде Multisim.

## 10 Лабораторная работа № 10. Исследование асинхронного трехфазного двигателя с короткозамкнутым ротором

**Цель работы:** изучение принципа действия трехфазного асинхронного двигателя (АД) с короткозамкнутым ротором; построение механической характеристики двигателя  $M = f(S)$ .

### 10.1 Основные теоретические сведения

Наибольшее применение в промышленности получили трехфазные асинхронные двигатели.

Основными частями АД являются статор и ротор, отделенные друг от друга воздушным зазором (0,3...0,5 мм). Их сердечники собраны из листов электротехнической стали. На внутренней части поверхности статора и на внешней ротора выштампованы пазы, в которые уложены обмотки. Сердечник статора помещен в корпус, на котором закреплены клеммы статорной обмотки, состоящей из трех отдельных катушек, сдвинутых в пространстве на  $120^\circ$ . Сердечник ротора укреплен непосредственно на валу двигателя или на ступице, надетой на вал.

Обмотка ротора чаще всего выполняется короткозамкнутой в виде «беличьего колеса», состоящего из стержней и замыкающих их на торцах колец.

Принцип действия АД основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля статора (неподвижная часть машины) с токами, индуцируемыми в роторе (подвижная ее часть).

Частота вращающегося магнитного поля статора

$$n_0 = 60f / p,$$

где  $f$  – частота напряжения сети;

$p$  – число пар полюсов машины (в частности, три обмотки статора создают одну пару полюсов, шесть обмоток – две пары и т. д.).

Разность частот вращения поля статора и ротора называют частотой скольжения  $n_s = n_0 - n$ , а ее отношение к частоте  $n_0$  – скольжением  $S$ , т. е.

$$S = \frac{n_0 - n}{n_0}.$$

Диапазон изменения скольжения в асинхронном двигателе  $1 \geq S \geq 0$ ; при пуске  $S = 1$ , при холостом ходе  $S = 0,001 \dots 0,005$ , при номинальной нагрузке  $S = 0,03 \dots 0,07$ .

Одной из основных характеристик АД является механическая характеристика. Уравнение механической характеристики  $M = f(S)$  (формула Клосса)

$$M = \frac{2 \cdot M_K}{\frac{S}{S_K} + \frac{S_K}{S}},$$



где  $M_K$  – максимальный момент, развиваемый двигателем,  $M_K = \lambda \cdot M_H$ ;

$\lambda$  – коэффициент перегрузки двигателя,  $\lambda = 1,5 \dots 2,5$ ;

$M_H$  – номинальный момент двигателя,  $M_H = 9,55 P_H / n_H$ ;

$S_K$  – критическое скольжение,  $S_K = S_H (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1})$ ;

$S_H$  – номинальное скольжение,  $S_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0}$ ;

$p$  – число пар полюсов двигателя.

Вращающий момент двигателя также можно определить через параметры схемы замещения:

$$M = \frac{3U_{1\phi}^2 R'_2}{\omega_0 S \left[ \left( R_1 + \frac{R'_2}{S} \right)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right]},$$

где  $U_{1\phi}$  – фазное напряжение двигателя;

$\omega_0$  – угловая частота вращения магнитного поля статора двигателя,

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p};$$

$R_1$  – активное сопротивление обмотки отдельной фазы статора двигателя;

$R'_2$  – приведенное активное сопротивление отдельной фазы обмотки рото-

ра,  $R'_2 = n^2 R_2$ ;

$X_1$  – индуктивное сопротивление отдельной фазы обмотки статора;

$X'_2$  – приведенное индуктивное сопротивление отдельной фазы обмотки

ротора,  $X'_2 = n^2 X_2$ ;

$n$  – коэффициент трансформации асинхронного двигателя.

Приведенное значение тока ротора  $I'_2 = I_1$  определяют из выражения вида

$$I_1 = I'_2 = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left( R_1 + \frac{R'_2}{S} \right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}}.$$

Из последних двух выражений следует, что при снижении напряжения  $U_{1\phi}$  момент двигателя изменяется пропорционально  $U_{1\phi}^2$ , а ток –  $U_{1\phi}$ .

Расчет КПД двигателя производится следующим образом:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1},$$

где  $P_2$  – мощность на валу двигателя,

$$P_2 = \frac{\pi \cdot n_2}{30} \cdot M;$$

$M$  – текущее значение момента на валу двигателя;

$n_2$  – текущее значение частоты вращения двигателя;

$P_1$  – мощность, потребляемая двигателем из сети, определяется по показаниям ваттметров.

Коэффициент мощности двигателя

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1},$$

где  $S_1$  – полная мощность двигателя,  $S_1 = 3 \cdot U_{1\phi} \cdot I_{\phi}$  ( $U_{1\phi}$  и  $I_{\phi}$  измеряются приборами PV11 и PA11 при соединении обмоток двигателя звездой).

## 10.2 Исследуемая схема

Для выполнения лабораторной работы собирается схема, представленная на рисунке 10.1.

*Паспортные данные асинхронного двигателя.*

Тип АИР56А4УЗ;  $P_H = 0,12$  кВт;  $\eta_H = 58$  %;  $\cos \varphi = 0,66$ ;  $n_H = 1350$  мин<sup>-1</sup>;  $I_H = 0,44$  А;  $U_H = 220$  В;  $\lambda = M_K/M_H = 2,2$ ;  $K_i = I_{\Pi}/I_H = 5$ ;  $K_{\Pi} = M_{\Pi}/M_H = 1,2$ .

В работе исследуют и строят механическую характеристику  $M = f(S)$  и рабочие характеристики  $\eta = f(P_2)$  и  $\cos \varphi = f(P_2)$  при включении обмоток статора звездой. Фазное напряжение при этом оказывается в  $\sqrt{3}$  раз меньше номинального.

Частоту вращения вала двигателя  $n_2$  измеряют цифровым измерителем (ИС) в относительных единицах. Для определения истинного значения нужно воспользоваться формулой

$$n_2 = \frac{N \cdot 3000}{100},$$

где  $N$  – текущее показание измерителя.

## 10.3 Порядок выполнения лабораторной работы

11 Рассчитать по паспортным данным номинальный ток двигателя и номинальный момент.

Номинальный момент двигателя

$$M_H = 9,55 \cdot \frac{P_H}{n_H}.$$

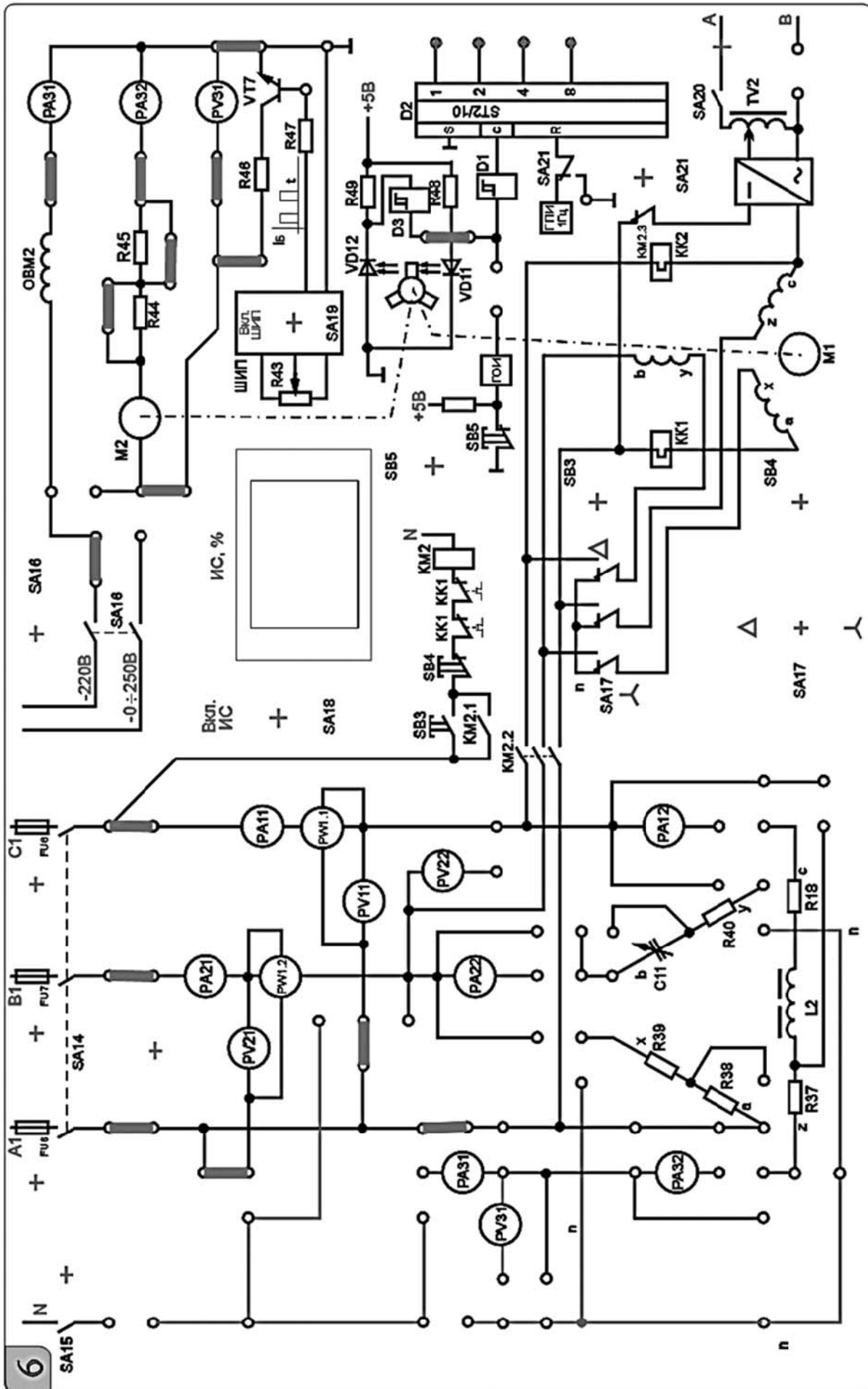


Рисунок 10.1 – Схема исследования трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

При номинальной частоте вращения и пониженном напряжении питания

$$M'_H = \frac{M_H}{3}; \quad I'_H = \frac{I_H}{\sqrt{3}},$$

где  $M'_H$  – момент при снижении напряжения в  $\sqrt{3}$  раз;

$I'_H$  – ток в обмотке статора при снижении напряжения в  $\sqrt{3}$  раз.

2 Собрать схему, приведенную на рисунке 10.1.

3 Установить тумблер SA17 в положение Y.

4 Резистор  $R_{43}$  установить в положение «min».

5 Тумблер SA21 должен находиться в положении «ВКЛ».

6 Включить стенд автоматическими выключателями QF1, QF2, QF3.

7 При помощи «Задатчика» выбрать профиль отображения приборов L8.

8 Включить измеритель скорости тумблером SA18.

9 Включить тумблер SA14.10 Нажать на кнопку SB3 для подключения асинхронного двигателя к сети через пускатель KM2.

10 Для нагрузки используется генератор постоянного тока ПЛ-062.

11. Для подключения обмотки возбуждения включить тумблер SA16.

12 Включить ШИП при помощи тумблера SA19.

13 Установить номинальный ток для пониженного напряжения  $I'_H$  (контролировать по прибору PA11), увеличивая нагрузку резистором  $R_{43}$ , плавно поворачивая его в сторону «max».

14 Снять показания приборов PA11 ( $I'_H$ ), PV11 ( $U_{1Л}$ ), PW1 ( $P_1$ ), PA31 ( $I_B$ ), PA32 ( $I_A$ ), ИС.

15 Вернуть рукоятку резистора  $R_{43}$  в начальное положение «min».

16 Считая  $M_0$  независимым от частоты вращения и изменяя  $I_A$  (PA32), с помощью  $R_{43}$  снять показания приборов PA11 ( $I'_1$ ), PV11 ( $U_{1Л}$ ), PW1 ( $P_1$ ), PA31 ( $I_B$ ), PA32 ( $I_A$ ), ИС с различной величиной нагрузки на валу. Данные опыта записать в таблицу 10.1.

Таблица 10.1 – Результаты исследования

| Номер опыта | $n, \%$ | $I_A$ (PA32), А | $P_1$ (PW1), Вт | $U_{1\phi} \left( \frac{PV11}{\sqrt{3}} \right), В$ | $I_\phi$ (PA11), А |
|-------------|---------|-----------------|-----------------|---|--------------------|
| 1           |         |                 |                 |   |                    |
| 2           |         |                 |                 |   |                    |
| 3           |         |                 |                 |   |                    |
| 4           |         |                 |                 |   |                    |
| 5           |         |                 |                 |   |                    |

17 Считая, что к валу АД была приложена номинальная нагрузка для номинального режима, определить  $M_0$  по экспериментальным данным п. 16.

$$M_0 = M'_H - M_\Gamma = M'_H - C_M \Phi \cdot I_{яг},$$

где  $M_0$  – статический момент нагрузки холостого хода;  
 $M_{\Gamma}$  – момент генератора постоянного тока;  
 $I_{\text{яГ}}$  – ток якоря генератора постоянного тока (прибор РА32);  
 $C_M \Phi$  – магнитная постоянная нагрузочного генератора,

$$C_M \Phi = \frac{M_{\text{НГ}}}{I_{\text{яН}}} = \frac{0,573}{0,76} = 0,753947.$$

18 Рассчитать для каждой нагрузки момент на валу  $M$ , КПД, скольжение  $S$ , полную мощность двигателя  $S_1$ , мощность на валу  $P_2$  и  $\cos\varphi$ . Данные расчетов занести в таблицу 10.2.

19 По результатам измерений и расчетов построить:

- механическую характеристику  $M = f(S)$ ;
- рабочие характеристики  $\eta = f(P_2)$  и  $\cos\varphi = f(P_2)$ .

20 Рассчитать механическую характеристику по формуле Клосса для пониженного напряжения и сравнить с результатами эксперимента.

Таблица 10.2 – Результаты расчета

| Номер опыта | $S$ | $M$ , Н·м | $P_2$ , Вт | $\eta$ , % | $S_1$ , В·А | $\cos\varphi$ |
|-------------|-----|-----------|------------|------------|-------------|---------------|
| 1           |     |           |            |            |             |               |
| 2           |     |           |            |            |             |               |
| 3           |     |           |            |            |             |               |
| 4           |     |           |            |            |             |               |
| 5           |     |           |            |            |             |               |

21 Сделать выводы по результатам работы.

### ***Содержание отчета***

Отчет по работе должен содержать цель работы, основные расчетные формулы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, результаты эксперимента и расчета (см. таблицы 10.1 и 10.2), механическую характеристику  $M = f(S)$ , рабочие характеристики  $\eta = f(P_2)$  и  $\cos\varphi = f(P_2)$ , выводы по работе.

### ***Контрольные вопросы***

1 Опишите принцип работы трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

2 Механическая характеристика трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

3 Рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

## 11 Лабораторная работа № 11. Снятие характеристик полупроводникового диода и стабилитрона

**Цель работы:** изучение принципа функционирования, характеристик и параметров выпрямительных диодов и стабилитронов.

### 11.1 Основные теоретические сведения

Полупроводниковый прибор, который имеет два электрода и один  $p$ - $n$ -переходов (или несколько), называется диодом.

На рисунке 11.1, *а* приведено условное графическое обозначение полупроводникового диода на электрических схемах, на рисунке 11.1, *б* – его структура. Электрод диода, подключенный к области  $p$ , называют анодом, а электрод, подключенный к области  $n$ , – катодом.

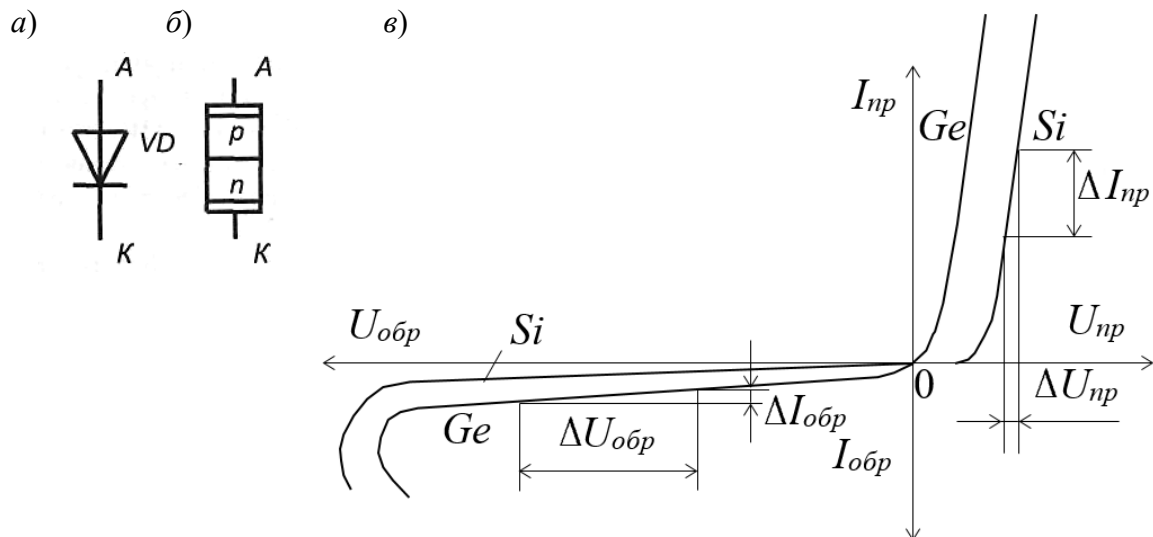


Рисунок 11.1 – Условное обозначение (*а*), структура (*б*) и статическая вольт-амперная характеристика (*в*) полупроводникового диода

Стабилитрон – это сильно легированный кремниевый диод, на котором напряжение сохраняется с определенной точностью при изменении протекающего через него тока в заданном диапазоне. Стабилитроны в основном используют в параметрических стабилизаторах напряжения (рисунок 11.2, *а*), в которых максимальное напряжение на нагрузке  $U_H$  ограничено некоторой заданной величиной.

Сопротивление балластного резистора определяют по формуле

$$R_0 = \frac{E_{cp} - U_{cm}}{I_{cm, cp} + I_H},$$

где  $E_{cp}$ ,  $I_{cm, cp}$  – средние значения ЭДС входного источника напряжения и тока стабилизации соответственно.

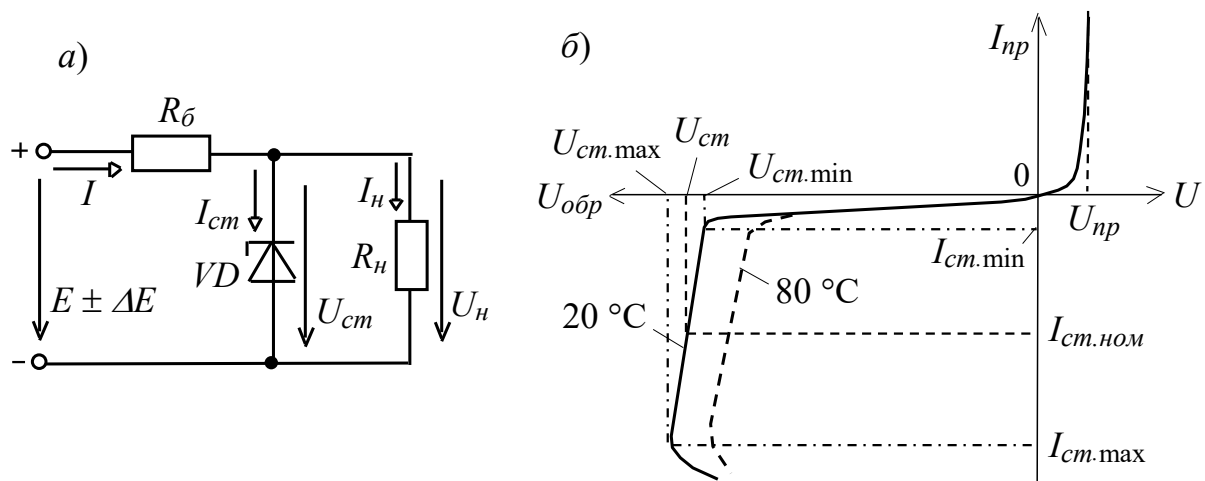


Рисунок 11.2 – Параметрический стабилизатор (а) и статическая вольт-амперная характеристика (б) стабилитрона

### 11.2 Порядок выполнения работы

1 Для заданных преподавателем диодов выписать из справочника их основные параметры.

2 Для построения вольт-амперной характеристики (ВАХ) диода в программе Multisim собрать схему, указанную на рисунке 11.3. Осуществить моделирование ее работы, изменяя ЭДС источников питания.

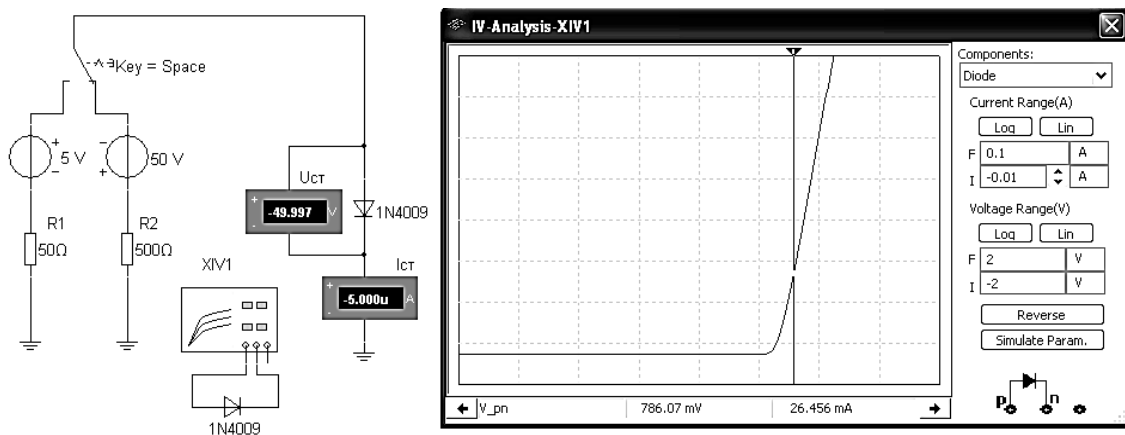


Рисунок 11.3 – Схема для снятия ВАХ в среде Multisim

Диод выбирается из библиотеки элементов согласно заданию и подключается к источнику постоянного напряжения. Для снятия обратной ветви ВАХ с помощью ключа меняется полярность источника ЭДС.

ВАХ можно получить с помощью характериографа XIV1.

3 По полученным ВАХ диода определить:

– прямое статическое сопротивление при токе, равном  $0,5 I_{np \max}$ ,

$$R_{np} = \frac{U_{np}}{I_{np}};$$

– обратное статическое сопротивление при напряжении, равном половине от  $U_{обр\ max}$ ,

$$R_{обр} = \frac{U_{обр}}{I_{обр}};$$

– прямое дифференциальное сопротивление диода

$$R_{диф} = \frac{\Delta U_{пр}}{\Delta I_{пр}}.$$

Результаты занести в таблицу 11.1.

Таблица 11.1 – Результаты измерений и вычислений

| Результат измерения |               |               |                |                     |                      | Результат вычисления |                |                |
|---------------------|---------------|---------------|----------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------|----------------|
| $U_{пр}$ , В        | $I_{пр}$ , мА | $U_{обр}$ , В | $I_{обр}$ , мА | $\Delta U_{пр}$ , В | $\Delta I_{пр}$ , мА | $R_{пр}$ , Ом        | $R_{обр}$ , Ом | $R_{диф}$ , Ом |
|                     |               |               |                |                     |                      |                      |                |                |

4 На основании заданного типа стабилитрона, параметров источника входного напряжения  $E_{min}$ ,  $E_{max}$  параметров нагрузки  $U_H$ ,  $R_H$  необходимо рассчитать сопротивление балластного резистора  $R_b$  (см. рисунок 11.2). Заполнить таблицы 11.2 и 11.3.

Таблица 11.2 – Параметры стабилитрона

| Данные            | $U_{ст\ ном}$ , В | $U_{ст\ min}$ , В | $U_{ст\ max}$ , В | $I_{ст\ min}$ , мА | $I_{ст\ max}$ , мА | $I_{ст\ ср}$ , мА | $R_{диф}$ , Ом |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|----------------|
| Паспортные данные |                   |                   |                   |                    |                    |                   |                |
| Моделирование     |                   |                   |                   |                    |                    |                   |                |

Таблица 11.3 – Параметры параметрического стабилизатора

| $E_{min}$ , В | $E_{max}$ , В | $E_{ср}$ , В | $R_H$ , Ом | $I_H$ , мА | $U_{ст}$ , В | $I_{ст}$ , мА | $R_b$ , Ом |
|---------------|---------------|--------------|------------|------------|--------------|---------------|------------|
|               |               |              |            |            |              |               |            |

5 Получить вольт-амперную характеристику стабилитрона (ВАХ) в программе Multisim с помощью характериографа XIV1 (рисунок 11.4). Стабилитрон выбирается из библиотеки элементов согласно заданию.

6 По полученным ВАХ стабилитрона определить  $U_{ст}$ ,  $I_{ст}$ , дифференциальное сопротивление стабилитрона на участке стабилизации  $R_{диф}$ .

7 На основании выбранных элементов схемы параметрического стабилизатора напряжения осуществить моделирование его работы (см. рисунок 11.4). Входное напряжение формируется функциональным генератором XFG2, напряжения и токи в схеме отображаются с помощью виртуальных вольтметров, ам-



перметров и осциллографа Tektronix-XSC1.

8 Сделать выводы по результатам работы.

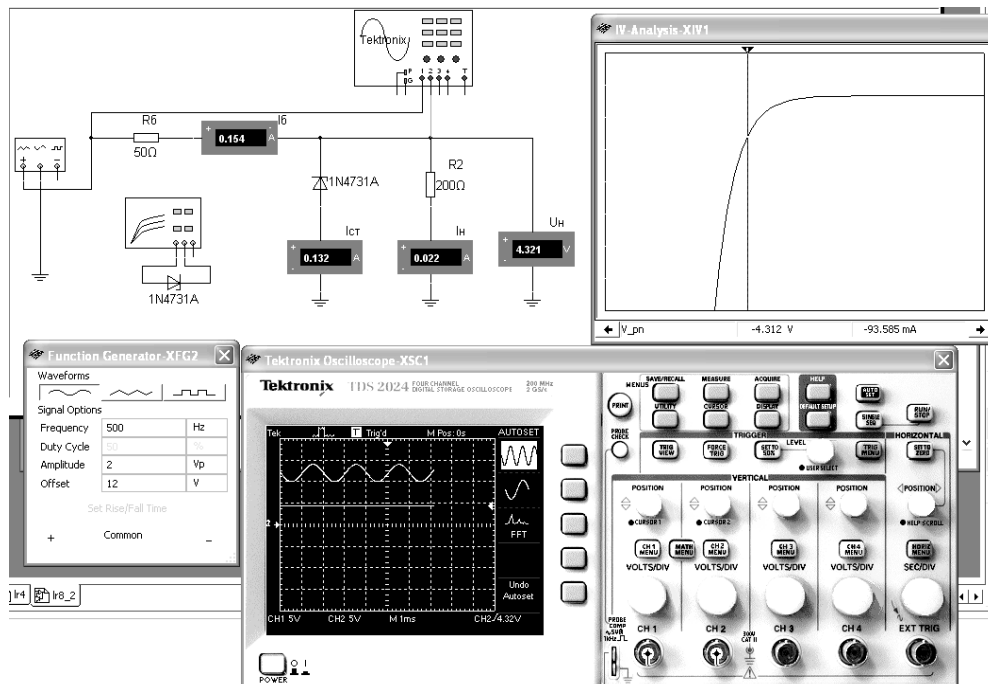


Рисунок 11.4 – Схема для снятия ВАХ стабилитрона и исследования параметрического стабилизатора напряжения в среде Multisim

### Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать цель работы, схемы для моделирования работы выпрямительного диода и параметрического стабилизатора напряжения в среде Multisim, вольт-амперные характеристики диодов и стабилитрона, полученные в результате моделирования, основные параметры диода, стабилитрона, параметрического стабилизатора в виде таблиц, выводы по работе.

### Контрольные вопросы

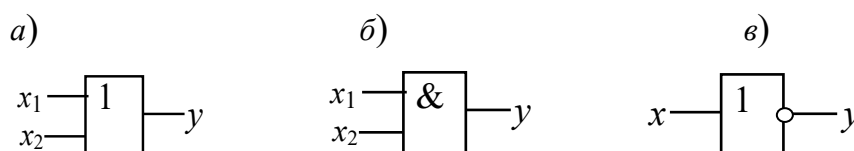
- 1 Приведите основные параметры выпрямительного диода и стабилитрона.
- 2 Опишите порядок получения ВАХ диода и стабилитрона по результатам моделирования и экспериментально.
- 3 Как по ВАХ определить статические и динамические сопротивления диода и стабилитрона?

## 12 Лабораторная работа № 12. Исследование работы логических элементов и триггеров

**Цель работы:** изучение принципа функционирования и характеристик логических элементов и триггеров.

### 12.1 Основные теоретические сведения

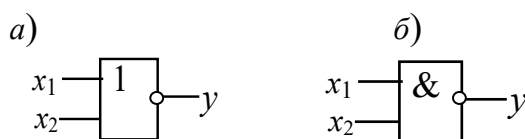
В ЭВМ, импульсных и других цифровых устройствах широко применяются логические элементы. Каждый логический элемент выполняет вполне определенную логическую операцию. Основными логическими операциями являются: логическое отрицание НЕ (инверсия), логическое сложение ИЛИ (дизъюнкция), логическое умножение И (конъюнкция) (рисунок 12.1).



а – элемент ИЛИ; б – элемент И; в – элемент НЕ

Рисунок 12.1 – Условное графическое обозначение логических элементов

К базовым логическим элементам относятся элементы Пирса и Шеффера (рисунок 12.2). На основе этих простых операций могут строиться и более сложные. Для описания логических операций используется алгебра логики. Алгебра логики широко применяется в теории цифровой техники, в которой используются устройства, имеющие два устойчивых состояния равновесия. При этом одно из состояний, соответствующее, например, высокому уровню напряжения, обозначается единицей, а соответствующее низкому уровню напряжения – нулем.



а – элемент ИЛИ-НЕ; б – элемент И-НЕ

Рисунок 12.2 – Условное графическое обозначение логических элементов

Триггер – это устройство последовательного типа с двумя устойчивыми состояниями равновесия, предназначенное для записи и хранения информации. Под действием входных сигналов триггер может переключаться из одного устойчивого состояния в другое. При этом напряжение на его выходе скачкообразно изменяется с низкого уровня на высокий или наоборот.

Как правило, триггер имеет два выхода: прямой  $Q$  и инверсный  $\bar{Q}$ . Число

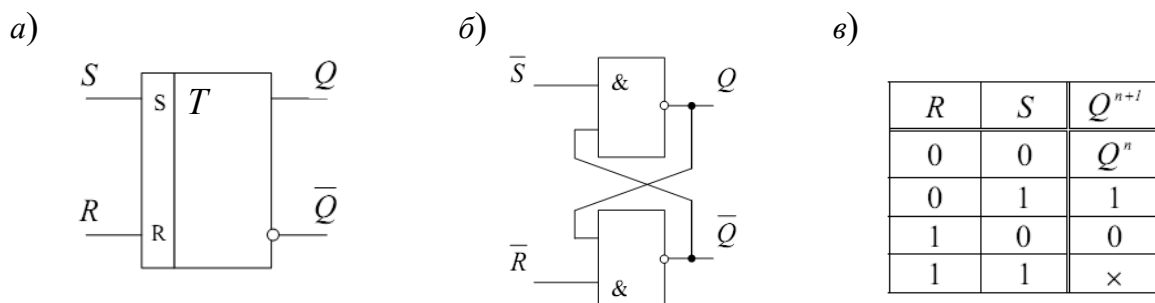
входов зависит от структуры и функций, выполняемых триггером. Например, асинхронные  $RS$ -триггеры имеют два входа: вход  $S$  установки в единичное состояние прямого выхода  $Q$  и вход  $R$  установки в нулевое состояние выхода  $Q$ . Синхронные триггеры для занесения в них информации, помимо информационных входов  $S$  ( $J$ ) и  $R$  ( $K$ ), имеют синхронизирующий  $C$  или счетный  $T$  вход, а триггеры задержки – информационный вход  $D$ .

Наибольшее распространение в цифровых устройствах получили триггеры  $RS$  (рисунок 12.3),  $D$  (рисунок 12.4),  $T$  (рисунок 12.5) и  $JK$  (рисунок 12.6).

Схемотехнически  $RS$ -триггер может быть реализован на элементах 2ИЛИ-НЕ (см. рисунок 12.3, б) и 2И-НЕ с использованием перекрестных положительных обратных связей. В триггере на элементах 2И-НЕ изменение состояния происходит при низких уровнях сигналов  $S$  и  $R$ .

Отличительной особенностью  $D$ -триггера (триггера задержки) является то, что он сохраняет информацию, поступившую на  $D$ -вход в предыдущем такте работы до прихода синхроимпульса, т. е. его состояние может изменяться с задержкой на один такт. Условное обозначение  $D$ -триггера с синхронизацией по переднему фронту и диаграммы его работы показаны на рисунке 12.4.

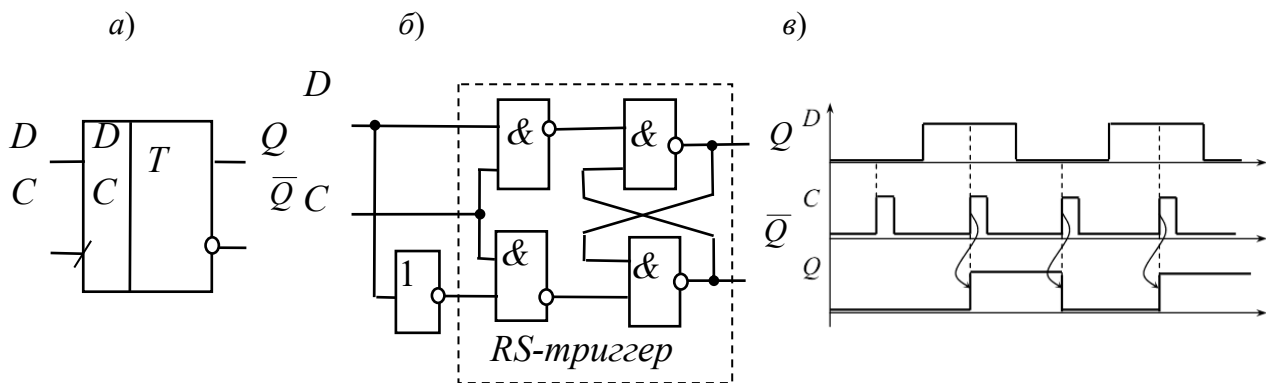
$T$ -триггеры иначе называются счетными и применяются для построения счетчиков и делителей частоты. Такой триггер имеет один тактовый вход и его состояние меняется каждый раз при подаче счетного импульса  $T = 1$  и остается неизменным при  $T = 0$ . Таблица состояния триггера, его обозначение и диаграммы работы приведены на рисунке 12.5.



а – условное графическое изображение; б – схема реализации  $RS$ -триггера на базовых элементах И-НЕ; в – таблица истинности

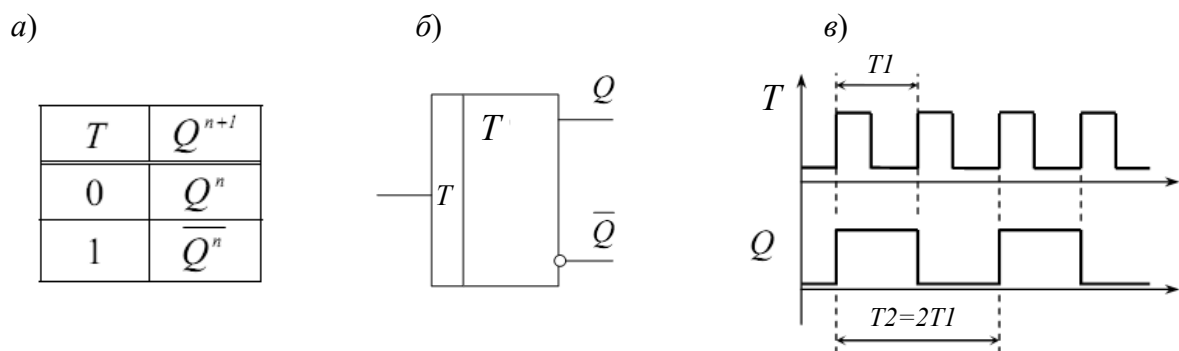
Рисунок 12.3 – Асинхронный  $RS$ -триггер

$JK$ -триггер имеет два управляющих входа  $J$  (jump) и  $K$  (keep) и функционирует подобно  $RS$ -триггеру, но при этом не имеет запрещенных комбинаций управляющих сигналов.  $J$ -вход подобен  $S$ -входу, а  $K$ -вход подобен  $R$ -входу. При всех комбинациях сигналов на входе, кроме  $J = K = 1$ , он действует подобно  $RS$ -триггеру. При  $J = K = 1$  в каждом такте происходит «опрокидывание» триггера и его состояние меняется на противоположное (см. рисунок 12.6, а). На рисунке 12.6, б, в показаны условное обозначение  $JK$ -триггера с синхронизацией по переднему фронту и его временные диаграммы работы.



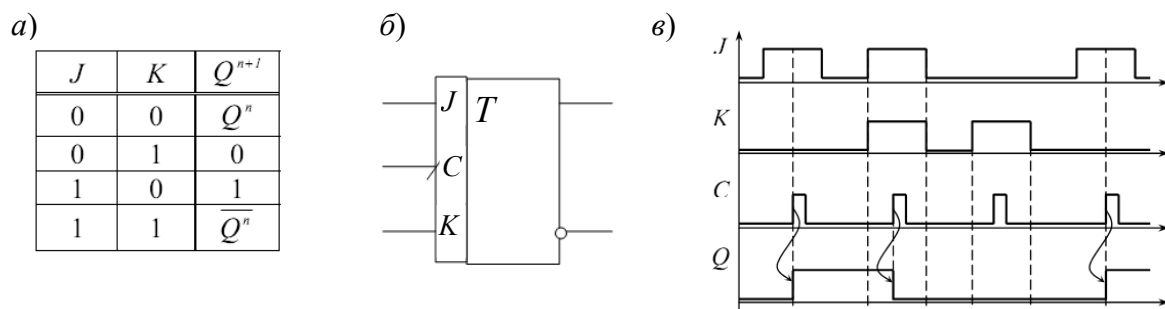
$a$  – условное графическое изображение;  $b$  – схема реализации  $D$ -триггера на базовых элементах И-НЕ;  $c$  – временная диаграмма, иллюстрирующая работу триггера

Рисунок 12.4 –  $D$ -триггер



$a$  – таблица истинности;  $b$  – условное графическое изображение;  $c$  – временная диаграмма, иллюстрирующая работу триггера

Рисунок 12.5 –  $T$ -триггер



$a$  – таблица истинности;  $b$  – условное графическое изображение;  $c$  – временная диаграмма, иллюстрирующая работу триггера

Рисунок 12.6 –  $JK$ -триггер

## 12.2 Порядок выполнения работы

1 В программе Multisim собрать схему для испытания основных и базовых логических элементов (рисунок 12.7) OR (ИЛИ), AND (И), NOT (НЕ), NAND (И-НЕ) и XOR (ИЛИ-НЕ), расположенных в библиотеке Misc Digital/TIL с уровнем высо-

кого напряжения 5 В. В схему включены ключи SB1 и SB2, пробники X1, X2 и Y1–Y5 с пороговыми напряжениями 5 В. Если входной или выходной сигнал элемента равен логической единице, то включенный на выходе этого элемента пробник светится. Результаты моделирования занести в таблицу 12.1.

2 По заданию преподавателя исследовать работу трех логических элементов одной из серий интегральных микросхем (рисунок 12.8), предварительно выписав из справочника их параметры и условное обозначение. Составить таблицу истинности для данных элементов.

3 В программе Multisim собрать схему исследования RS-триггера на логических элементах И-НЕ заданной преподавателем серии (рисунок 12.9).

Таблица 12.1 – Результаты моделирования

| Дизъюнктор<br>[ИЛИ (OR)] |       |     | Конъюнктор<br>[И (AND)] |       |     | Инвертор<br>[НЕ (NOT)] |     | Штрих Шеффера<br>[И-НЕ (NAND)] |       |     | Стрелка Пирса<br>[ИЛИ-НЕ (NOR)] |       |     |
|--------------------------|-------|-----|-------------------------|-------|-----|------------------------|-----|--------------------------------|-------|-----|---------------------------------|-------|-----|
| $x_1$                    | $x_2$ | $y$ | $x_1$                   | $x_2$ | $y$ | $x$                    | $y$ | $x_1$                          | $x_2$ | $y$ | $x_1$                           | $x_2$ | $y$ |
| 0                        | 0     |     | 0                       | 0     |     | 0                      |     | 0                              | 0     |     | 0                               | 0     |     |
| 0                        | 1     |     | 0                       | 1     |     |                        |     | 0                              | 1     |     | 0                               | 1     |     |
| 1                        | 0     |     | 1                       | 0     |     | 1                      |     | 1                              | 0     |     | 1                               | 0     |     |
| 1                        | 1     |     | 1                       | 1     |     |                        |     | 1                              | 1     |     | 1                               | 1     |     |

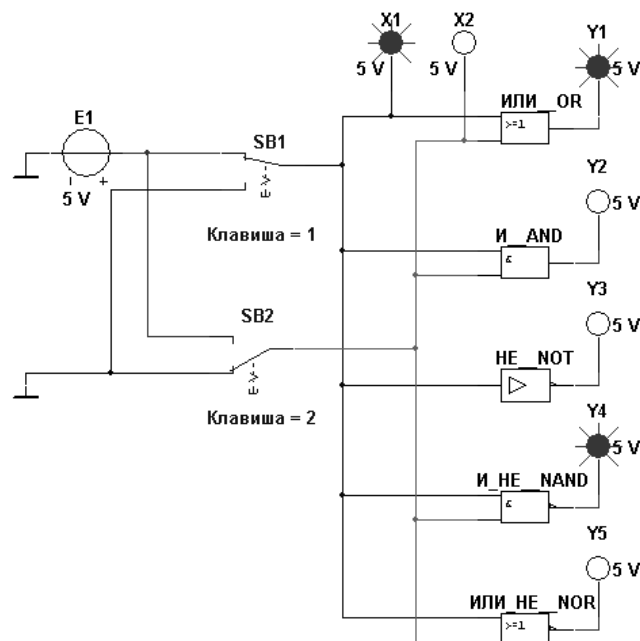


Рисунок 12.7 – Схема для исследования основных и базовых логических элементов

Воспользовавшись порядком засвечивания пробников и задавая коды (00, 01, 10) состояния ключей SB1 и SB2 (входных сигналов), составить таблицу истинности RS-триггера.

4 В программе Multisim собрать схему испытания триггеров JK и D (рисунок 12.10) по заданию преподавателя. В схему включены: генератор XWG1 (частота  $f_c = 500$  кГц); логический анализатор XLA1.

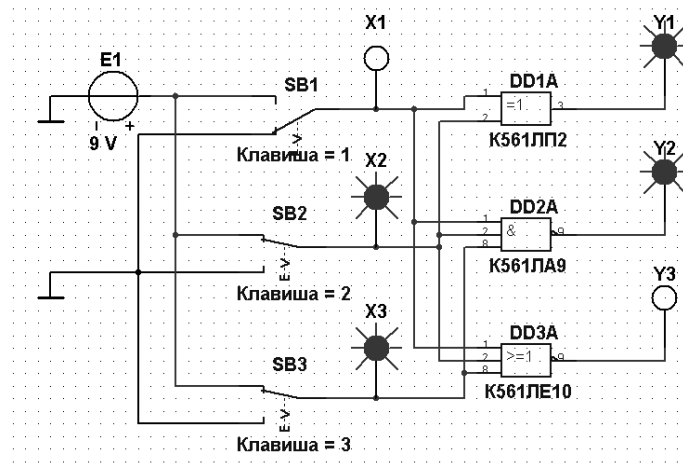


Рисунок 12.8 – Схема для исследования логических элементов серии K561

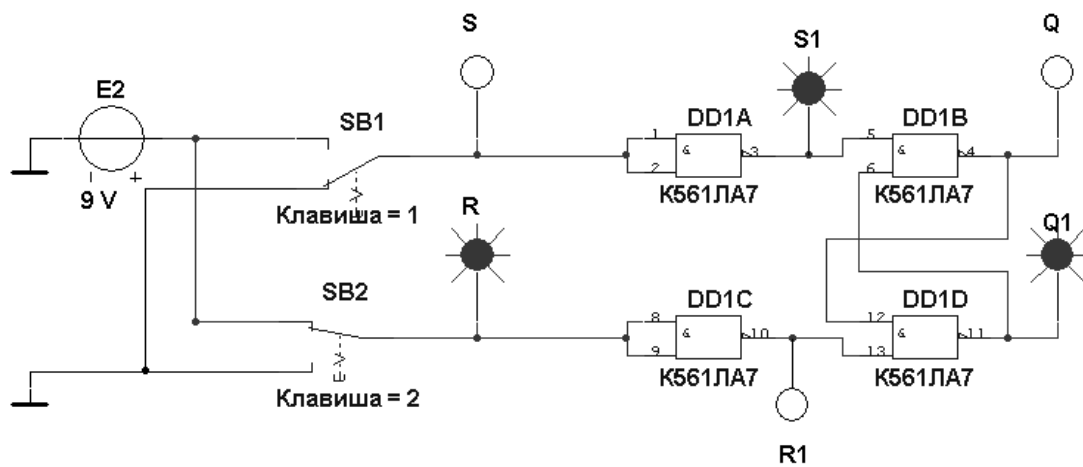


Рисунок 12.9 – Схема RS-триггера на логических элементах серии K561

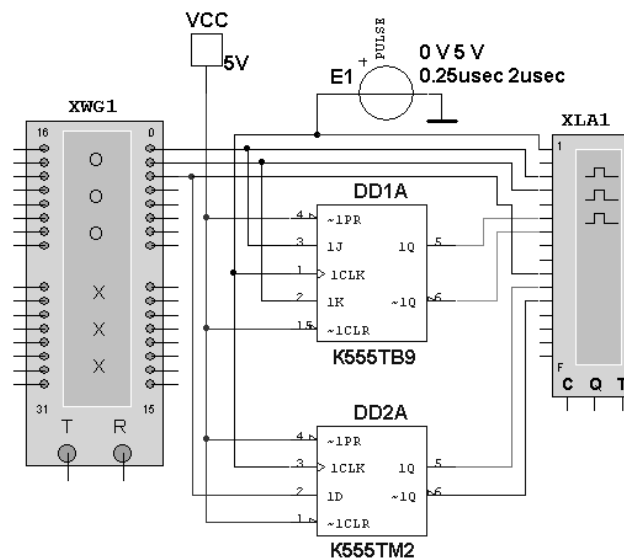


Рисунок 12.10 – Схема для исследования JK- и D-триггеров

На  $\overline{1CLR}$ - и  $\overline{1PR}$ -входы триггеров подается постоянное напряжение 5 В (имитирующее сигнал 1) источника VCC, а на 1CLK-входы триггеров и на вход 1

анализатора XLA1 поступают тактовые импульсы с амплитудой 5 В и частотой 500 кГц, сформированные генератором E1. С выходов 1 и 2 генератора XWG1 сигналы подаются на управляющие входы 1J и 1K *JK*-триггера, с выхода 3 – на вход 1D *D*-триггера.

В качестве примера введем в первые шесть ячеек памяти генератора трех-разрядные кодовые комбинации (рисунок 12.11): 010, 100, 111, 001, 100, 010.

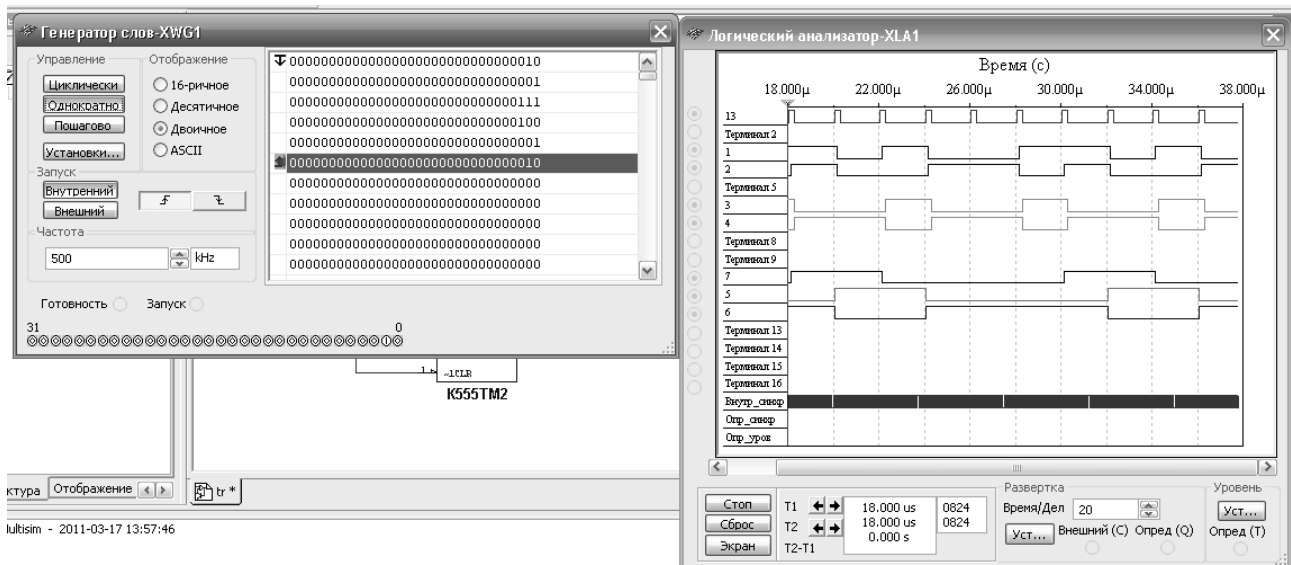


Рисунок 12.11 – Цифровые комбинации и временные диаграммы триггеров

5 Провести моделирование работы триггеров, по временным диаграммам составить и заполнить для них таблицы истинности.

6 Сделать выводы по результатам работы.

### *Содержание отчета*

Отчет по работе должен содержать цель работы, схемы для моделирования работы логических элементов и триггеров в среде Multisim, выводы по работе.

### *Контрольные вопросы*

- 1 Назовите основные логические операции и приведите их таблицы истинности.
- 2 Что такое триггер?
- 3 Чем отличается синхронный триггер от несинхронного?
- 4 Что обозначают понятия «логический ноль» и «логическая единица»?

## Список литературы

- 1 **Марченко, А. Л.** Электротехника и электроника : учебник / А. Л. Марченко. – М. : ИНФРА-М, 2015. – 574 с.
- 2 **Гальперин, М. В.** Электротехника и электроника: учебник / М. В. Гальперин. – 2-е изд. – М. : ФОРУМ ; ИНФРА-М, 2017. – 480 с.
- 3 **Жаворонков, М. А.** Электротехника и электроника : учеб. пособие / М. А. Жаворонков, А. В. Кузин. – М. : Академия, 2013. – 400 с.
- 4 **Кузовкин, В. А.** Схемотехническое моделирование электрических устройств в Multisim : учеб. пособие / В. А. Кузовкин, В. В. Филатов. – Старый Оскол : ТНТ, 2017. – 336 с.