

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

# ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

*Методические рекомендации к лабораторным работам  
для студентов специальности 1-36 07 02  
«Производство изделий на основе трехмерных технологий»  
очной и заочной форм обучения*



Могилев 2022

УДК 621.3  
ББК 31.2:32.85  
Э45

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «10» октября 2022 г.,  
протокол № 2

Составители: ст. преподаватель Н. В. Герасименко;  
ст. преподаватель И. А. Черкасова

Рецензент С. В. Болотов

Методические рекомендации предназначены для использования студентами специальности 1-36 07 02 «Производство изделий на основе трехмерных технологий» очной и заочной форм обучения при выполнении лабораторных работ.

Учебно-методическое издание

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Ответственный за выпуск	С. С. Сергеев
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 26 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, 2022

## Содержание

Введение.....	4
1 Лабораторная работа № 1. Исследование режимов работы и методов расчета линейных цепей постоянного тока с одним источником питания...	5
2 Лабораторная работа № 2. Исследование режимов работы и методов расчета линейных цепей постоянного тока с двумя источниками питания.....	10
3 Лабораторная работа № 3. Определение параметров и исследование режимов работы электрической цепи переменного тока с последовательным соединением индуктивности, резистора и конденсатора .....	13
4 Лабораторная работа № 4. Определение параметров и исследование режимов работы трехфазной цепи при соединении потребителей звездой...	18
5 Лабораторная работа № 5. Исследование процесса заряда конденсатора от источника постоянного напряжения при ограничении тока с помощью резистора.....	23
6 Лабораторная работа № 6. Определение параметров и основных характеристик однофазного трансформатора .....	27
7 Лабораторная работа № 7. Исследование асинхронного трехфазного двигателя с короткозамкнутым ротором .....	33
8 Лабораторная работа № 8. Исследование логических элементов и триггеров .....	38
Список литературы.....	44

## 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 данной дисциплине 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. 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.

## 1.1 Основные теоретические сведения

1.1.1 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 1.1).

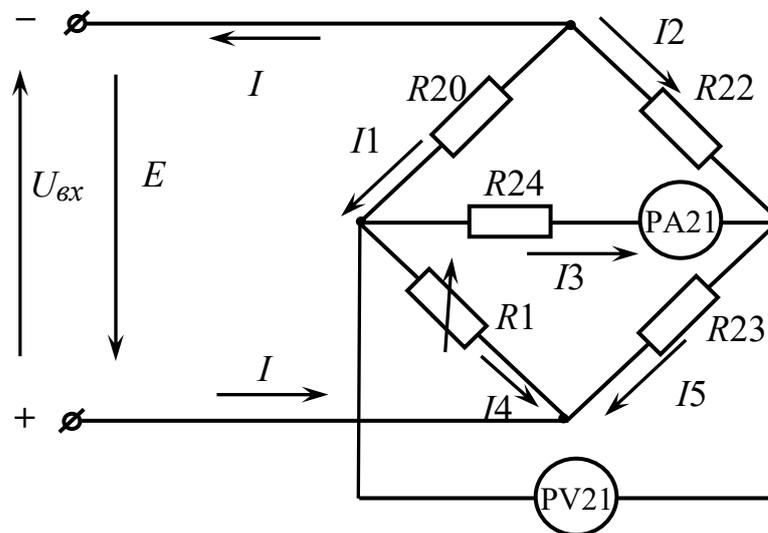


Рисунок 1.1 – Мост постоянного тока

Мостовая схема – это по существу два делителя напряжения  $R_{20}$ ,  $R_1$  и  $R_{22}$ ,  $R_{23}$ , параллельно подключенные к источнику питания. Выходной сигнал снимается между двумя выходами делителей напряжения.

Основное нейтральное состояние в мостовой схеме называется **равновесием моста**. Уравновешенный мост – это такой мост, выходное напряжение которого равно нулю. Такое состояние имеет место в том случае, когда выходное напряжение одного делителя напряжения равно выходному напряжению другого делителя напряжения, относительно минуса источника питания. Если ввести в мостовую схему резистивный элемент  $R_1$  с варьируемым сопротивлением, можно легко привести мост к такому уравновешенному состоянию.

Мосты постоянного тока широко применяют для измерения электрических и неэлектрических величин, т. к. вместо резистора  $R_1$  может использоваться элемент, изменяющий сопротивление под действием температуры (терморезистор), деформаций (тензорезистор), освещённости (фоторезистор).

Преимущества мостовых схем – в большей, чем присущей потенциометрическим измерительным схемам, точности и меньшей чувствительности к шумам и дрейфу параметров источника питания.

### 1.1.2 Условие равновесия моста постоянного тока

$$R1 \cdot R22 = R20 \cdot R23.$$

Откуда

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

при значении тока  $I3 = 0$ .

1.1.3 Величина сопротивления резистора  $R24$  определяется по закону Ома:

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

1.1.4 Значение выходного напряжения  $U_{вых}$  моста постоянного тока можно рассчитать, используя метод эквивалентного генератора (рисунок 1.2):

$$U_{вых} = I3 \cdot R24,$$

где

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

здесь  $U_{x.x}$  – напряжение холостого хода при разомкнутом резисторе  $R24$  (SA13 в положении 3 (рисунок 1.3));

$R_{к.з}$  – сопротивление относительно точек разрыва моста при замкнутом источнике входного напряжения (SA13 в положении 1 (рисунок 1.4)).

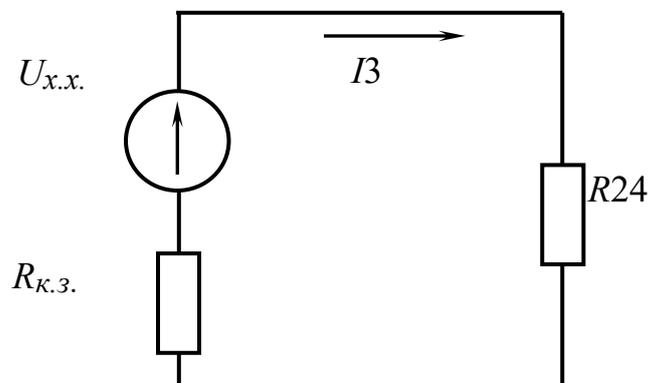


Рисунок 1.2 – Эквивалентная схема электрической цепи для расчёта тока  $I3$

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

$$R_{к.з} = \frac{U_{x.x}}{I_{к.з}}$$

Также сопротивление  $R_{к.з}$  можно определить, используя метод эквивалентных преобразований, предварительно закоротив источник ЭДС.

Режим холостого хода возникает при отключении нагрузки или обрыве цепи. На практике используется для измерения ЭДС источника.

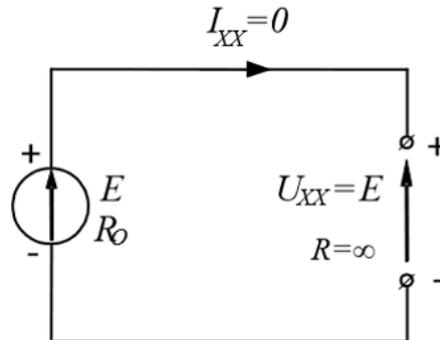


Рисунок 1.3 – Схема электрической цепи в режиме холостого хода

Режимом короткого замыкания цепи называется такой режим, при котором сопротивление нагрузки равно нулю, т. е. внешняя цепь замкнута накоротко.

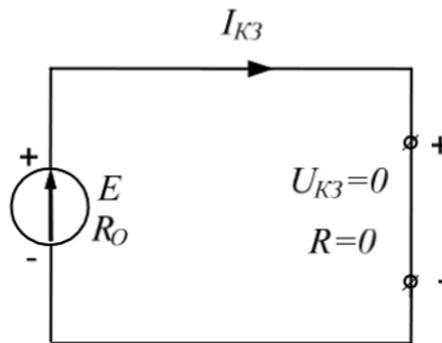


Рисунок 1.4 – Схема электрической цепи в режиме короткого замыкания

## 1.2 Исследуемые схемы

Для выполнения лабораторной работы собирается схема (рисунок 1.5).

Измерительный мост включается тумблером SA7.

Технические данные измерительного моста указаны на стенде.

Для исследования моста постоянного тока в среде Multisim устанавливаются в диалоговых окнах компонентов их параметры (рисунок 1.6). Источник напряжения  $E$  считается идеальным ( $R_{em} = 0$ ). Вольтметр PV21: род тока (mode) – постоянный (DC), внутреннее сопротивление (Resistance)  $R_V = 1$  Мом, ампер-

метр PA21: род тока (mode) – постоянный (DC), внутреннее сопротивление (Resistance)  $R_A = 1 \text{ нОм}$ .

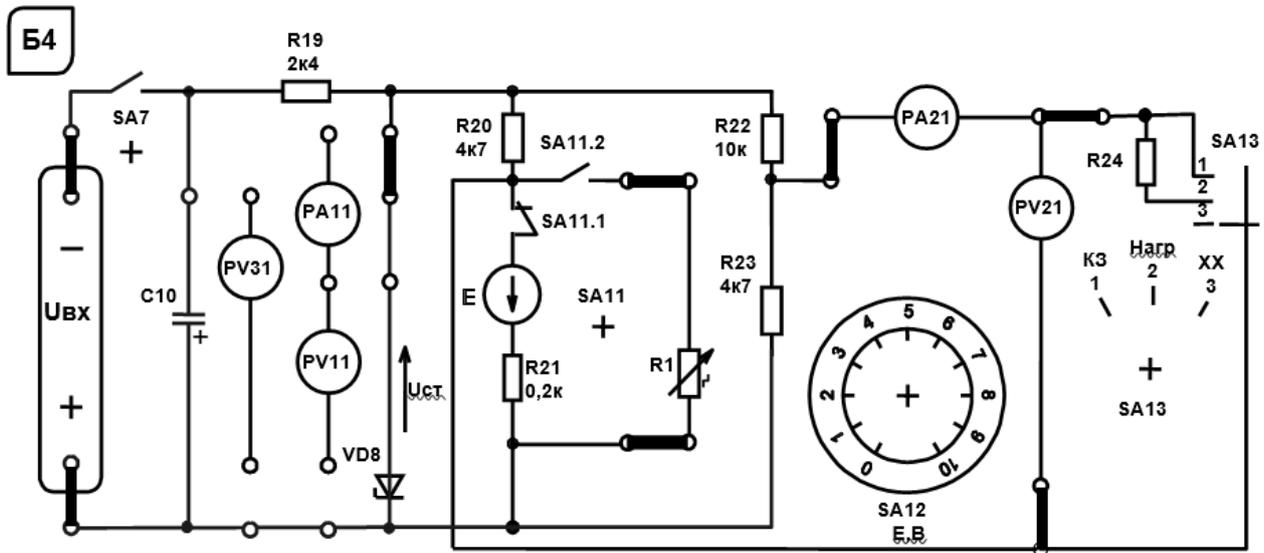


Рисунок 1.5 – Схема для экспериментального исследования электрической цепи постоянного тока с одним источником питания

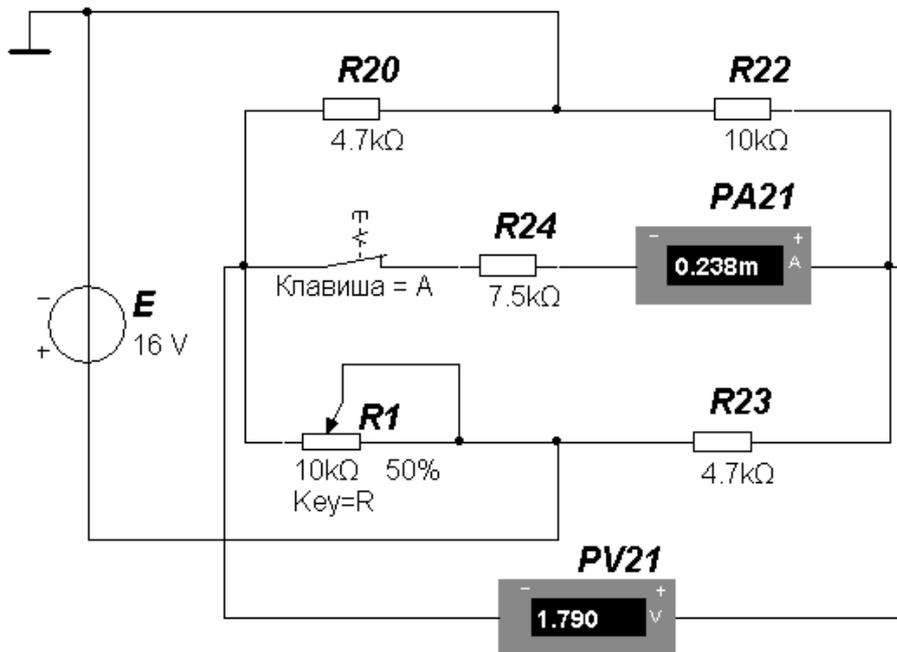


Рисунок 1.6 – Модель моста постоянного тока

### 1.3 Порядок выполнения лабораторной работы

1.3.1 Изучить схему измерительного моста. Рассчитать величину сопротивления резистора  $R1$  из условия равновесия моста постоянного тока.

1.3.2 Построить зависимости  $U_{\text{вых}} = f(R1)$  экспериментально и по результатам моделирования (на одном графике), заполнив таблицу 1.1. Сравнить полученные результаты.

1.3.3 При максимальном рассогласовании моста (максимальном  $U_{вых}$ ) с помощью показаний вольтметра и амперметра рассчитать величину сопротивления резистора  $R_{24}$ .

Таблица 1.1 – Результаты измерений выходного напряжения

$R1$ , кОм	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Эксперимент											
$U_{вых}$ , В											
Моделирование											
$U_{вых}$ , В											

1.3.4 Методом эквивалентного генератора рассчитать величину выходного напряжения моста при значении сопротивления  $R1$ , заданном преподавателем, и сопоставить с экспериментальными данными и результатом моделирования.

1.3.4.1 Определить  $U_{x.x}$  в результате моделирования, разомкнув ключ (клавиша А, см. рисунок 1.4), и сравнить с результатом экспериментального измерения при заданных значениях  $R1$  и  $U_{вх}$ .

1.3.4.2 Экспериментально измерить ток  $I_{кз}$  и рассчитать сопротивление  $R_{к.з}$ .

1.3.4.3 Смоделировать схему для расчета  $R_{к.з}$  (рисунок 1.7), замкнув коротко источник питания и подключив к выводам мультиметр в режиме измерения сопротивления.

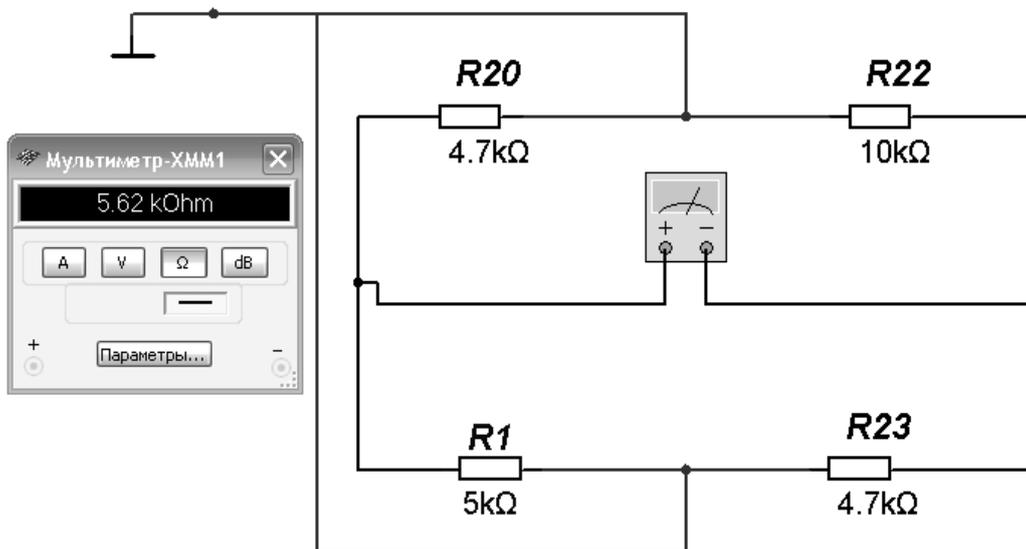


Рисунок 1.7 – Модель для измерения  $R_{к.з}$

1.3.4.4 Определить величины тока  $I_3$ . Сравнить результаты расчётов, моделирования и экспериментальные данные. Заполнить таблицу 1.2.

1.3.4.5 Сделать выводы по результатам работы.

Таблица 1.2. Результаты применения метода эквивалентного генератора

Задано		Результат					
$R1$ , кОм	$U_{вх}$ , В	$R_{24}$ , кОм	$U_{х.х}$ , В	$I_{к.з}$ , А	$R_{к.з}$ , кОм	$I_3$ , А	$U_{вых}$ , В
		Расчёт					
		Моделирование					
		Эксперимент					

### 1.4 Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать: цель работы, схему моста постоянного тока, основные расчётные формулы, результаты эксперимента и моделирования (зависимости  $U_{вых} = f(R1)$ , см. таблицы 1.1 и 1.2), выводы по работе.

#### Контрольные вопросы

- 1 Охарактеризуйте мостовую схему постоянного тока.
- 2 Чему равен ток  $I_3$  при равновесии моста и почему?
- 3 Укажите порядок расчёта электрических цепей методом эквивалентного генератора напряжения.
- 4 Перечислите типовые режимы работы электрических цепей.

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

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

### 2.1 Основные теоретические сведения

2.1.1 Для расчёта 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 (рисунки 2.1), замыкающиеся в контурах.

Число уравнений, записываемых для контурных токов по второму закону Кирхгофа, равно числу независимых контуров.

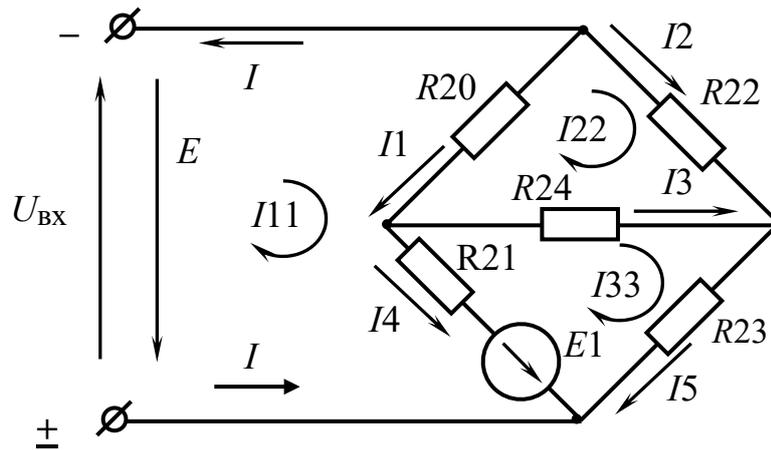


Рисунок 2.1 – Электрическая цепь постоянного тока с двумя источниками питания

$I_{11}, I_{22}, I_{33}$  – контурные токи;

$I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I$  – токи ветвей.

Система уравнений для расчета контурных токов:

$$I_{11} \cdot (R_{20} + R_{21}) - I_{22} \cdot R_{20} - I_{33} \cdot R_{21} = E_1 - E;$$

$$- I_{11} \cdot R_{20} + I_{22} \cdot (R_{20} + R_{24} + R_{22}) - I_{33} \cdot R_{24} = 0;$$

$$- I_{11} \cdot R_{21} - I_{22} R_{24} + I_{33} \cdot (R_{21} + R_{23} + R_{24}) = - E_1.$$

Решив систему уравнений и определив значение контурных токов, определяют значение тока  $I_3$ :

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

Выходное напряжение моста

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

Величина сопротивления  $R_{24}$  определена в лабораторной работе № 1.

## 2.2 Исследуемые схемы

Для выполнения лабораторной работы используется схема, приведенная на рисунке 1.3. Вместо резистора  $R_1$  включается тумблером SA11 источник  $E_1$  (тумблер SA11 должен находиться в нижнем положении).

Измерительный мост включается тумблером SA7. Величину ЭДС источника  $E_1$  устанавливают с помощью переключателя  $E_1$ .

Технические данные измерительного моста:

$$R_{20} = 4,7 \text{ кОм}; R_{22} = 10 \text{ кОм}; R_{23} = 4,7 \text{ кОм}; R_{21} = 0,2 \text{ кОм};$$

$$U_{вх} = E = U_{см} = 16 \text{ В.}$$

Модель исследуемой схемы в среде Multisim представлена на рисунке 2.2.

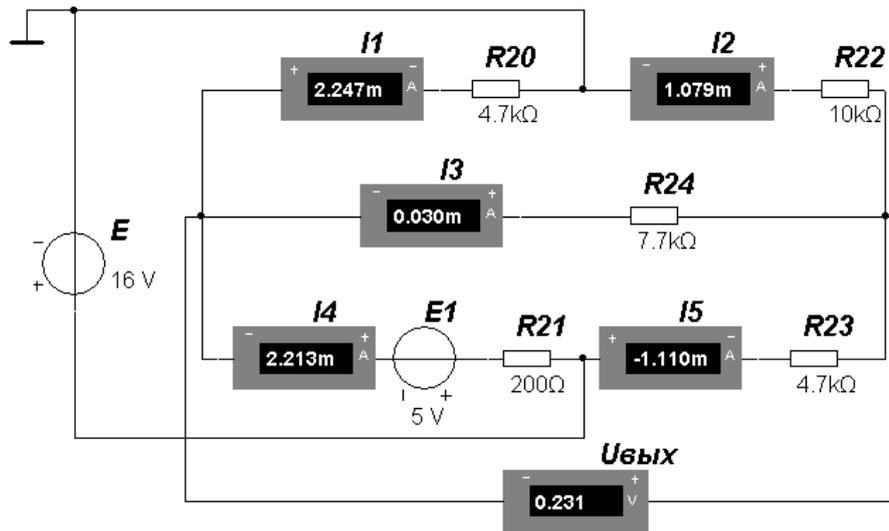


Рисунок. 2.2 – Модель исследуемой схемы

### 2.3 Порядок выполнения лабораторной работы

2.3.1 Методом контурных токов рассчитать токи в ветвях  $I_1$ – $I_5$  и величину выходного напряжения моста  $U_{вых}$  при значении ЭДС  $E_1$ , заданном преподавателем. Заполнить таблицу 2.1 (расчёт).

Таблица 2.1 – Результаты работы

Задано		Результат					
$E_1$ , В	$R_{24}$ , кОм	$I_1$ , А	$I_2$ , А	$I_3$ , А	$I_4$ , А	$I_5$ , А	$U_{вых}$ , В
Расчёт							
Моделирование							
Эксперимент							
		–	–		–	–	

2.3.2 Промоделировать работу схемы, определив токи в ветвях и  $U_{вых}$ , и сравнить с результатами расчётов. Заполнить таблицу 2.1 (моделирование).

2.3.3 Снять экспериментально зависимость  $U_{вых} = f(E_1)$ , изменяя  $E_1$  от 1 до 10 В. Сопоставить  $U_{вых}$  для заданного значения  $E_1$  с расчетным.

2.3.4 Сделать выводы по результатам работы.

## 2.4 Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать: цель работы, схему электрической цепи постоянного тока с двумя источниками питания, систему уравнений для расчета контурных токов, результаты расчёта, моделирования и эксперимента (см. таблицу 2.1, зависимость  $U_{вых} = f(E1)$ ), выводы по работе.

### Контрольные вопросы

- 1 Опишите методы расчёта цепей постоянного тока с двумя источниками питания.
- 2 Порядок расчёта методом контурных токов.
- 3 Опишите моделирование сложных цепей постоянного тока в среде Multisim.

## 3 Лабораторная работа № 3. Определение параметров и исследование режимов работы электрической цепи переменного тока с последовательным соединением индуктивности, резистора и конденсатора

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

### 3.1 Основные теоретические сведения

3.1.1 Схема для изучения цепи переменного тока с резистивным, индуктивным и ёмкостным элементами приведена на рисунке 3.1.

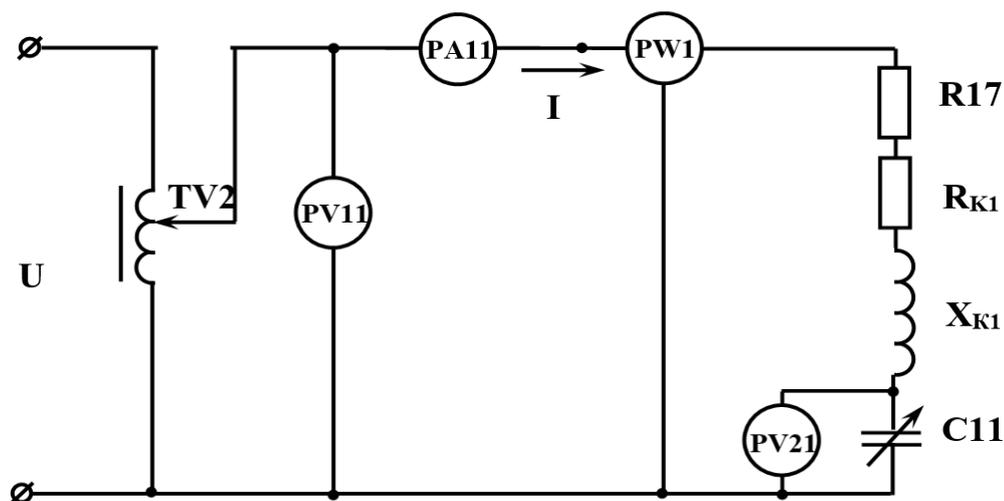


Рисунок 3.1 – Электрическая цепь переменного тока с последовательно соединёнными  $R$ -,  $L$ -,  $C$ -элементами

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:

$$R_{\Sigma} = \frac{P}{I_n^2}; \quad Z_{\Sigma} = \frac{U}{I_n}; \quad L_{K1} = \frac{X_{K1}}{2\pi f}; \quad X_{K1} = \sqrt{Z_{\Sigma}^2 - R_{\Sigma}^2}; \quad R_{K1} = R_{\Sigma} - R17,$$

где  $R17 = 17$  Ом;

$f = 50$  Гц.

3.1.2 Определение величины емкости  $C11$ , при которой в цепи наступает резонанс напряжений. Значение  $C11$  определяется исходя из условия возникновения резонанса напряжений:

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

Резонансом в электрических цепях называется явление увеличения амплитуды гармонических колебаний энергии, наблюдаемое при совпадении частоты собственных колебаний с частотой вынужденных колебаний, сообщаемых источником энергии.

Резонанс напряжений возникает в последовательном колебательном контуре при равенстве реактивных сопротивлений элементов.

3.1.3 Определение коэффициента мощности цепи:

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

Пример построения векторной диаграммы цепи при активно-индуктивном характере цепи дан на рисунке 3.2.

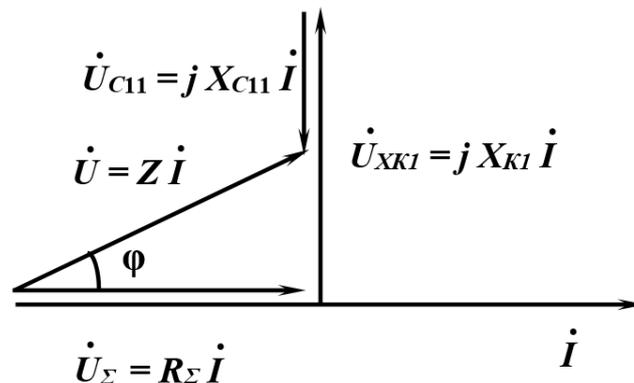


Рисунок 3.2 – Векторная диаграмма

### 3.2 Исследуемые схемы

Для определения параметров схемы замещения катушки индуктивности собирают схему, приведенную на рисунке 3.3. Номинальный ток  $I_n = 1,0$  А выставляют с помощью лабораторного автотрансформатора TV2. Для исследования резонанса напряжения собирают схему, приведенную на рисунке 3.4.

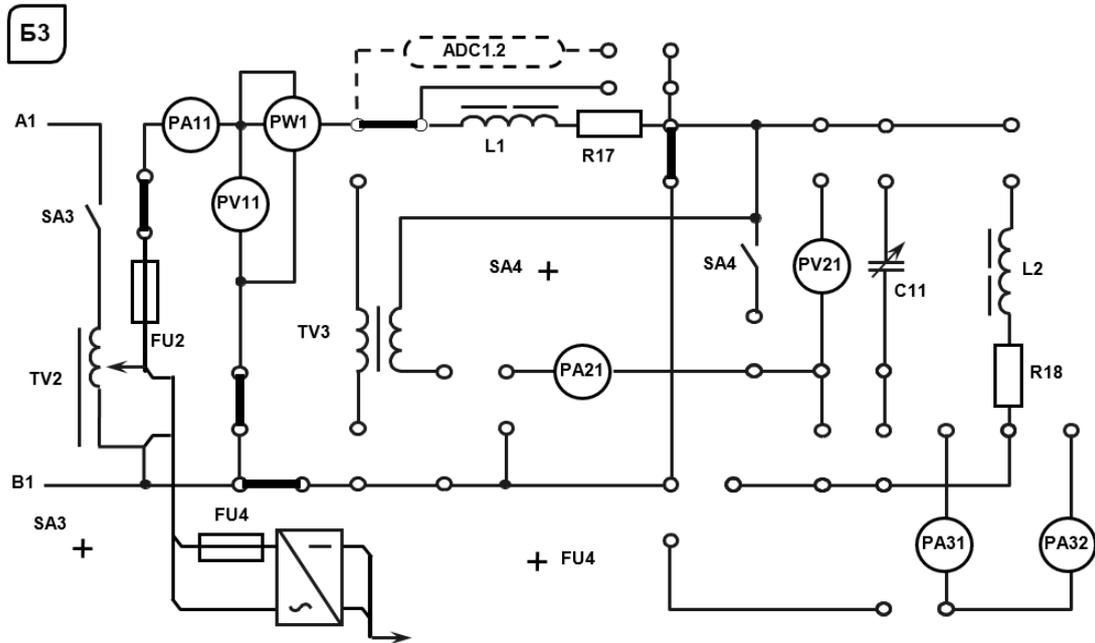


Рисунок 3.3 – Схема для экспериментального исследования параметров схемы замещения катушки индуктивности

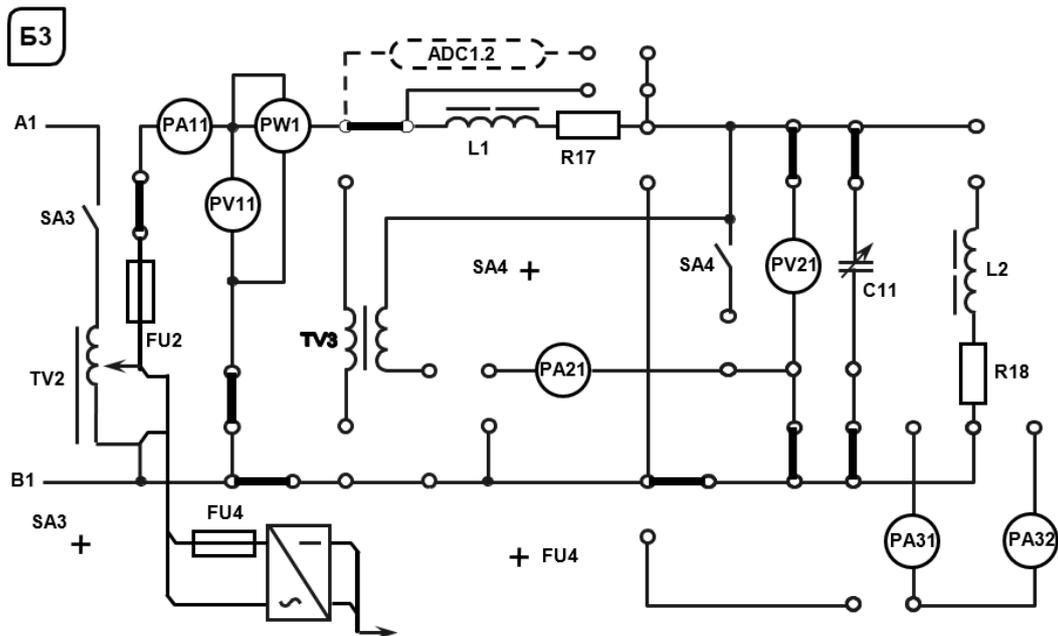


Рисунок 3.4 – Схема для экспериментального исследования резонанса напряжений

Модель исследуемой схемы в среде Multisim представлена на рисунке 3.5.

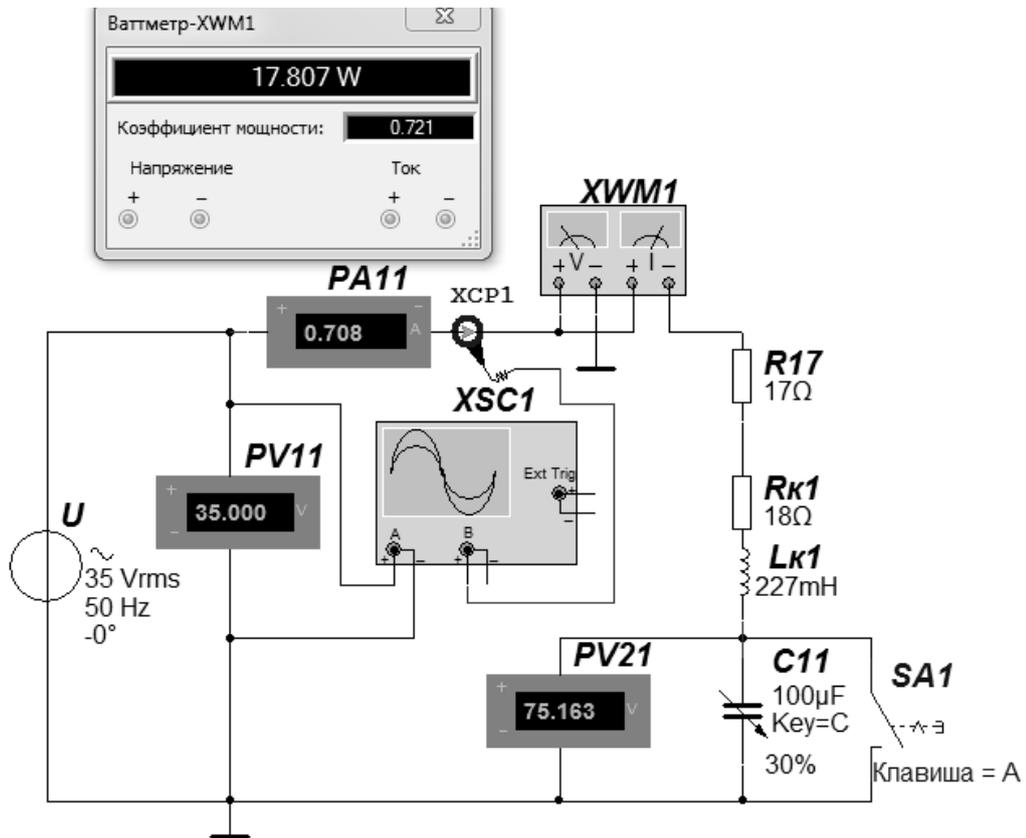


Рисунок 3.5 – Модель исследуемой схемы

При её построении устанавливаются в диалоговых окнах компонентов их параметры. Для источника переменного напряжения  $E1$  устанавливается действующее значение напряжения  $RMS$  и частота  $f$ . Вольтметры и амперметр в режиме род тока (mode) – переменный (AC), внутреннее сопротивление (Resistance)  $R_V = 1 \text{ МОм}$ ,  $R_A = 1 \text{ нОм}$ . Для измерения мощности используется ваттметр XWM1. Форма напряжения и тока наблюдается с помощью осциллографа XSC1 (рисунок 3.6).

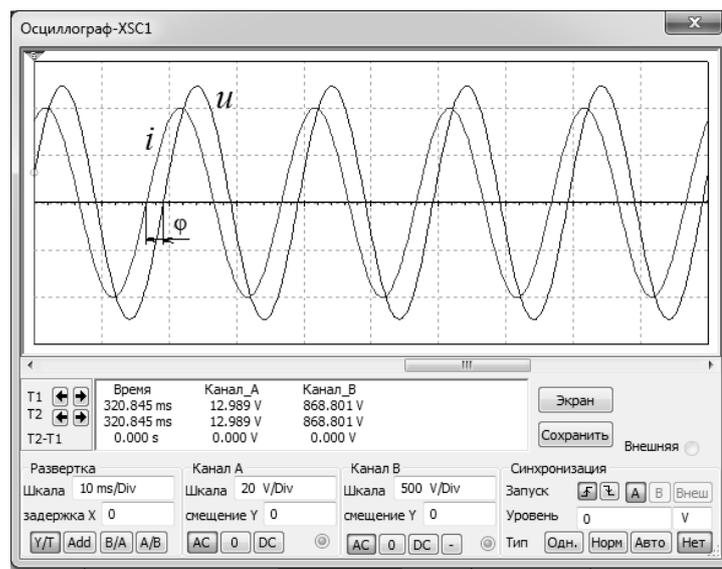


Рисунок 3.6 – Осциллограммы входного напряжения и тока

### 3.3 Порядок выполнения лабораторной работы

3.3.1 Собрать на стенде схему (см. рисунок 3.3) 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. Заполнить таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Определение параметров схемы замещения катушки индуктивности

Эксперимент			Расчёт				
$I_n$ , А	$U$ , В	$P$ , Вт	$Z_{\Sigma}$ , Ом	$R_{\Sigma}$ , Ом	$X_{K1}$ , Ом	$L_{K1}$ , Гн	$R_{K1}$ , Ом
1,0							

3.3.2 Используя параметры схемы замещения катушки индуктивности, определить величину емкости  $C11$  конденсатора, при которой в цепи наступает резонанс напряжений.

3.3.3 Снять зависимости  $I = f(C11)$  и  $\cos\varphi = f(C11)$  при  $U_{\min}$ . Заполнить таблицу 3.2. Выделить в таблице значения параметров, соответствующие резонансу напряжений.

Таблица 3.2 – Результаты измерений

$C11$ , мкФ	Способ исследования	$U$ (PV11), В	$P$ (PW1), Вт	$I$ (PA11), А	$\cos\varphi$
	Моделирование				
	Эксперимент				

3.3.4 Построить векторную диаграмму напряжений и тока.

3.3.5 Провести моделирование работы схемы (см. рисунок 3.1) в среде Multisim.

3.3.6 Сделать выводы по результатам работы.

### 3.4 Содержание отчёта

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

#### Контрольные вопросы

- 1 Какое явление называется резонансом в электрической цепи?
- 2 Каким условиям должна удовлетворять схема, чтобы в ней мог возникнуть резонанс напряжений?
- 3 Какие параметры элементов контура можно изменять, чтобы создать режим резонанса?
- 4 Чему равен коэффициент мощности цепи в режиме резонанса, почему?

5 Как рассчитать резонансную частоту контура?

6 Докажите, что в режиме резонанса напряжений ток в схеме принимает максимальное значение.

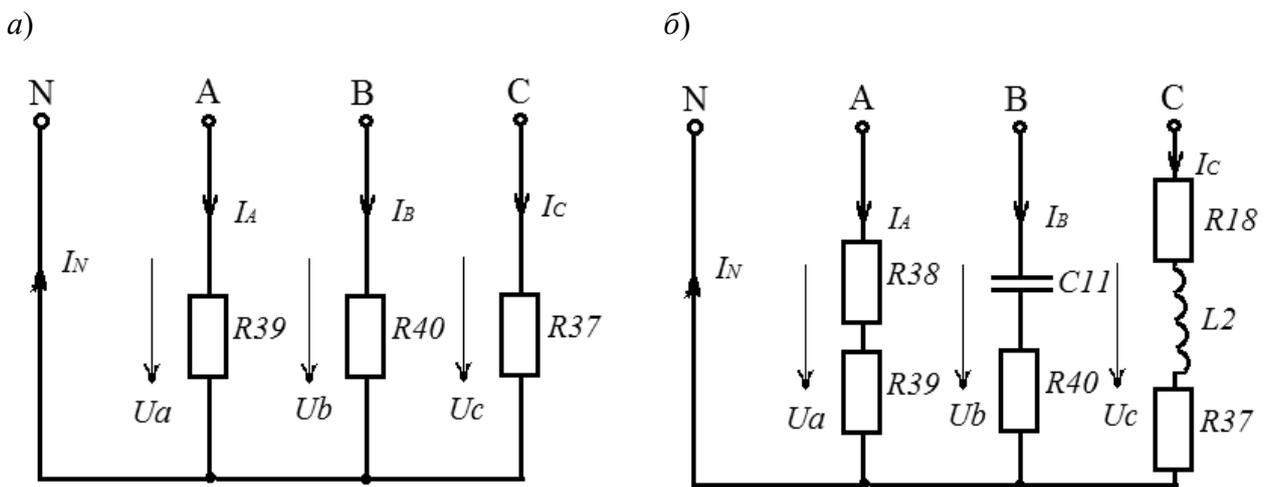
#### 4 Лабораторная работа № 4. Определение параметров и исследование режимов работы трехфазной цепи при соединении потребителей звездой

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

##### 4.1 Основные теоретические сведения

Трехфазная цепь – это совокупность трех электрических цепей, в которых действуют синусоидальные ЭДС, одинаковые по амплитуде и частоте, смещенные по фазе одна от другой на угол  $120^\circ$  и создаваемые общим источником энергии. Каждую отдельную цепь, входящую в трехфазную цепь, принято называть фазой

В данной лабораторной работе исследуются трехфазные схемы с симметричной (рисунок 4.1, а) и несимметричной (рисунок 4.1, б) нагрузками при наличии нейтрального провода и без него.



а – нагрузка симметричная; б – нагрузка несимметричная

Рисунок 4.1 – Исследуемые трёхфазные схемы

На рисунке 4.2 представлена схема для проведения экспериментальных исследований.

Модель исследуемой схемы в среде Multisim представлена на рисунке 4.3. При её построении устанавливаются в диалоговых окнах компонентов их пара-

метры. ЭДС фазы источника переменного напряжения  $FG E_\phi = 125 \text{ В}$  и частота  $f = 50 \text{ Гц}$ . Вольтметры и амперметр в режиме род тока (mode) – переменный (AC), внутреннее сопротивление (Resistance)  $R_V = 1 \text{ МОм}$ ,  $R_A = 1 \text{ нОм}$ . Для измерения мощности используются ваттметры XWM1, XWM2.

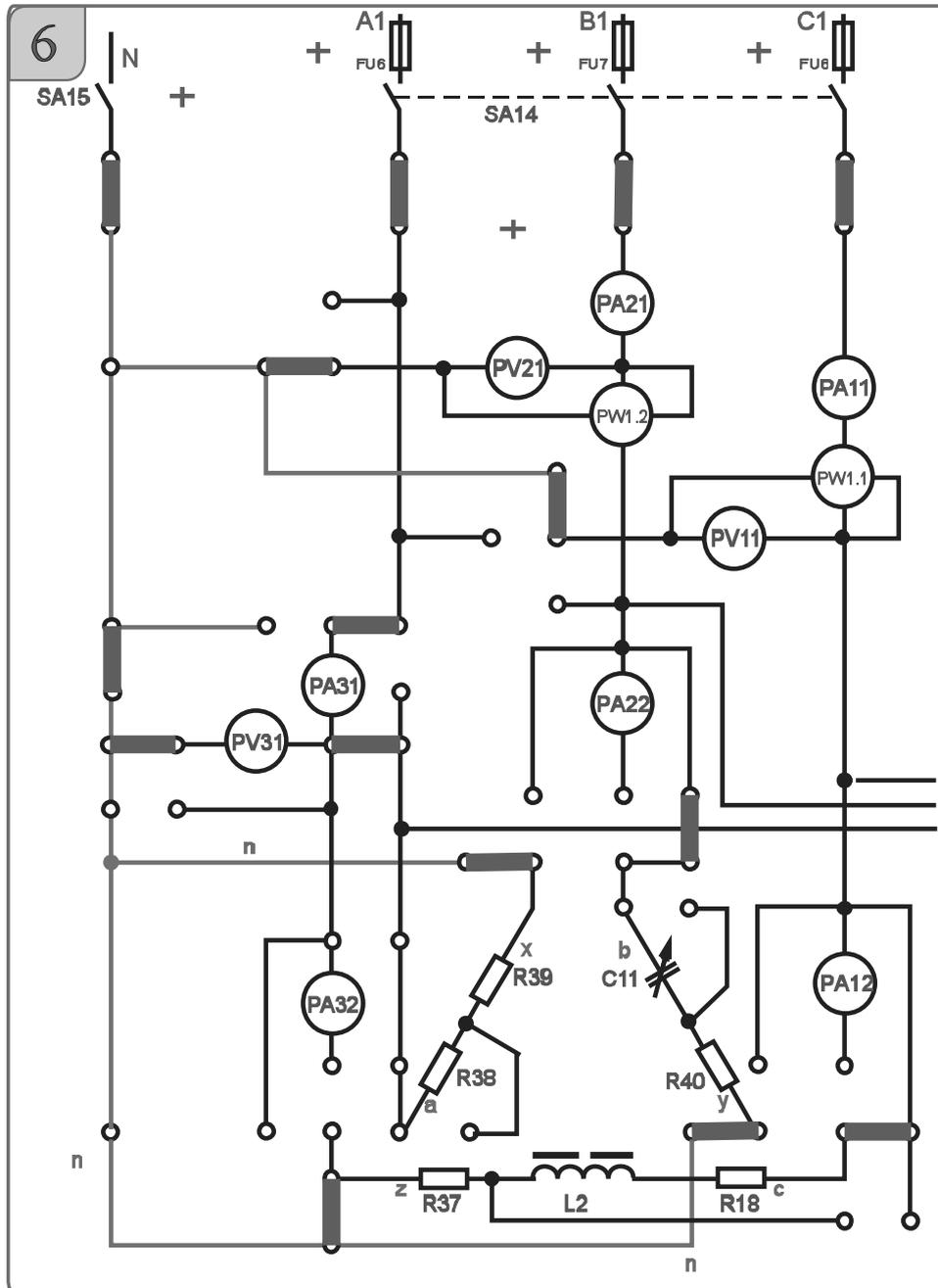


Рисунок 4.2 – Схема для экспериментального исследования трехфазной электрической цепи при соединении нагрузки звездой

Изменение нагрузки в фазах осуществляется кнопками SA1, SA2, SA3 (клавиши 1, 2, 3), отключение нейтрального провода – кнопкой SA4 (клавиша 4), обрыв фазы А – кнопкой SA5 (клавиша 5).

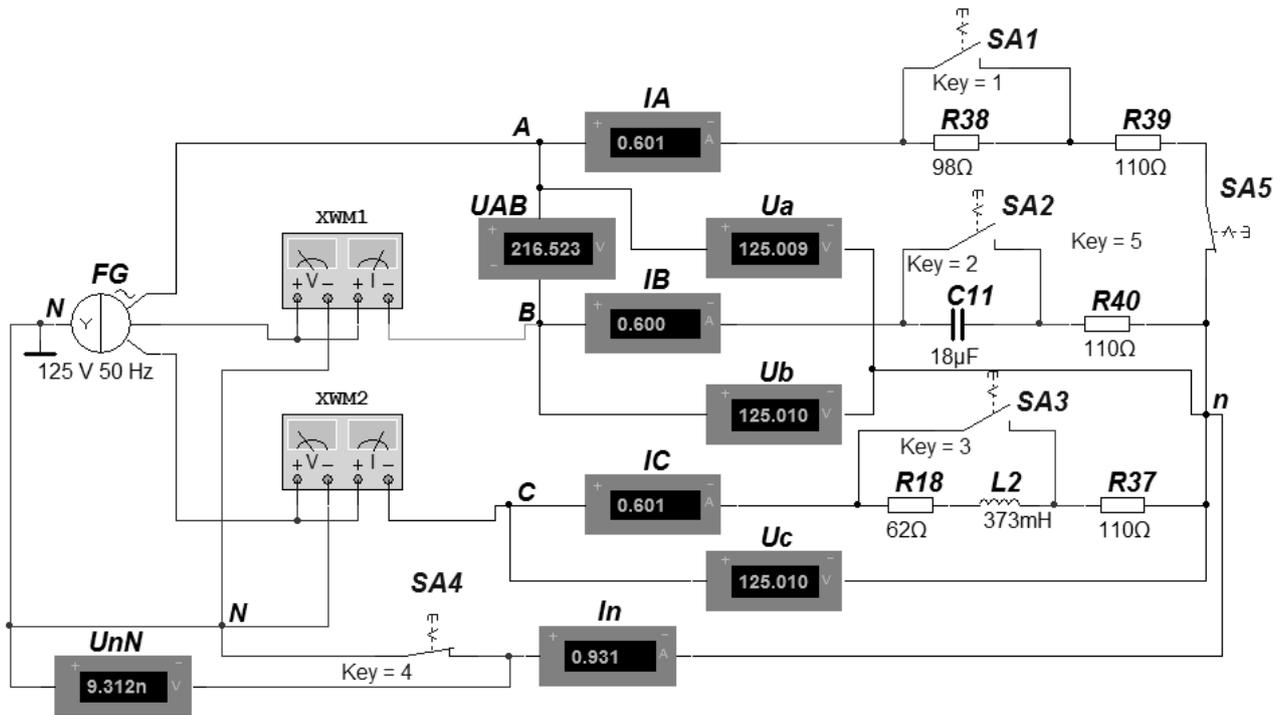


Рисунок 4.3 – Модель исследуемой схемы

## 4.2 Исследуемые схемы

4.2.1 Исследование симметричной резистивной нагрузки при наличии нейтрального провода.

В общем случае для симметричной нагрузки требуется соблюдение равенства комплексных полных сопротивлений каждой фазы. Для получения симметричной нагрузки в данной лабораторной работе

$$R37 = R39 = R40$$

необходимо перемычками замкнуть следующие элементы:  $R38$ ,  $C11$ ,  $L_{K2}$  и  $R18$  (см. рисунок 4.2).

Измерить фазные напряжения  $U_b$  и  $U_c$  при помощи вольтметров PV21, PV11 и фазные токи в фазах B и C при помощи амперметра PA21 и PA11.

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

Определить значения сопротивлений резисторов  $R37$ ,  $R39$ ,  $R40$  по закону Ома:

$$R37 = \frac{U_c}{I_c}.$$

Мощность, потребляемую симметричной нагрузкой, определить по формуле

$$P = 3 \cdot I_c^2 \cdot R37.$$

4.2.2 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 значения  $R_{18} = 59$  Ом и  $X_{L_2} = 140$  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

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

т. к. нагрузка в данной фазе носит резистивный характер.

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

В этом случае

$$\dot{U}_a = U_a; \quad \dot{U}_b = U_b \cdot e^{-j120^\circ}; \quad \dot{U}_c = U_c \cdot e^{-j240^\circ};$$

$$\underline{Z}_a = R_{38} + R_{39}; \quad \underline{Z}_b = R_{40} - jX_{C_{11}}; \quad \underline{Z}_c = R_{37} + R_{18} + jX_{L_2},$$

а

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{\underline{Z}_a}; \quad \dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{\underline{Z}_b}; \quad \dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{\underline{Z}_c},$$

где  $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$  – комплексные значения фазных напряжений на нагрузке;  
 $\underline{Z}_a, \underline{Z}_b, \underline{Z}_c$  – комплексные значения полных сопротивлений;

$\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$  – комплексные значения фазных токов.

Ток в нейтральном проводе

$$\dot{I}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c.$$

4.2.4 Исследование несимметричной равномерной нагрузки без нейтрального провода.

Для выполнения данного пункта отключить нейтральный провод ( $I_2 = 0$ ), а общую точку ваттметров PW11, PW21 подключить к фазе А.

Набрать рассчитанное значение  $C11$  при помощи выключателей. Разомкнуть переключки, шунтирующие элементы  $R38, C11, L2, R18$ , и таким образом получить равномерную нагрузку.

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

Убедиться в неравенстве фазных напряжений.

### 4.3 Порядок выполнения лабораторной работы

4.3.1 Исследовать на модели и 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 4.1 (симметричная нагрузка).

Таблица 4.1 – Результаты измерений

$U_a, В$	$U_b (PV21), В$	$U_c (PV11), В$	$I_A, А$	$I_B (PA21), А$	$I_C (PA11), А$	$I_N (PA31), А$	$P, Вт$
<b>Симметричная нагрузка</b>							
Моделирование							
Эксперимент							
<b>Равномерная нагрузка</b>							
Моделирование							
Эксперимент							
Расчёт							

4.3.2 Рассчитать сопротивления фаз симметричной нагрузки (п. 4.2.1).

3.3.3 Рассчитать значения емкости  $C11$  и сопротивления резистора  $R38$  для обеспечения равномерной нагрузки (п. 4.2.2).

4.3.4 Исследовать равномерную нагрузку с нейтральным проводом, измерив экспериментально и в результате моделирования фазные напряжения,

мощность и ток в нейтральном проводе, подключив его тумблером SA15 (общая точка ваттметров) – к нейтрали. Рассчитать комплексные значения токов в фазах А, В, С и определить ток в нейтральном проводе. Сравнить расчетные значения тока с результатами моделирования и экспериментальными. Заполнить таблицу 4.1 (равномерная нагрузка).

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

4.3.6 Исследовать несимметричную равномерную нагрузку без нейтрального провода, измерив экспериментально и в результате моделирования фазные напряжения и токи. Убедиться в неравенстве фазных напряжений.

4.3.7 Смоделировать аварийные режимы работы трёхфазной сети: обрыв нейтрального провода при несимметричной нагрузке, обрыв фазы.

4.3.8 Сделать выводы по результатам работы.

#### **4.4 Содержание отчёта**

Отчёт по работе должен содержать: цель работы, схемы трёхфазной цепи при симметричной и несимметричной нагрузках, основные расчётные формулы, результаты эксперимента, моделирования и расчёта (см. таблицу 4.1), векторную диаграмму напряжений и токов, выводы по работе.

#### **Контрольные вопросы**

- 1 Дать определение трехфазной цепи.
- 2 Что такое симметричная и равномерная нагрузка трехфазной цепи?
- 3 При каком условии наличие или отсутствие нулевого провода не влияет на режим работы нагрузки?
- 4 Как проводят расчет трехфазной цепи при симметричной и несимметричной нагрузке?

### **5 Лабораторная работа № 5. Исследование процесса зарядки 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.

#### **5.1 Основные теоретические сведения**

Переходные процессы в электрической цепи – это электромагнитные процессы, происходящие при изменении её состояния в течение некоторого промежутка времени.

Причиной того, что состояние цепи не может измениться мгновенно, является наличие энергии в электрических и магнитных полях, запас которой в переходном процессе должен перераспределиться между полями или быть преобразованным в неэлектрические виды энергии. Невозможность скачкообразного изменения состояния полей следует из необходимости использования для решения этой задачи источника электрической энергии бесконечной мощности, т. к. в этом случае

$$p = \frac{dW}{dt} = \infty.$$

Мгновенное изменение схемы соединения или параметров элементов электрической цепи называется коммутацией.

Схема для исследования переходного процесса зарядки конденсатора  $C12$  при ограничении тока с помощью сопротивления  $R1$  приведена на рисунке 5.1.

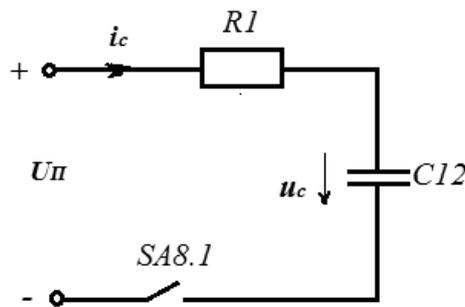


Рисунок 5.1 – Исследуемая схема зарядки конденсатора

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

$$U_{пит} = R \cdot C \cdot \frac{du_C}{dt} + U_C.$$

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

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

где  $\tau = R1C12$ .

$A = -U_{пит}$  – постоянная интегрирования, определяется из начальных условий:  $U_C$  до коммутации равно  $U_C$  после коммутации и равно 0 (второй закон коммутации).

## 5.2 Исследуемые схемы

Схема для экспериментального исследования процесса заряда конденсатора представлена на рисунке 5.2.

Делитель  $R28-R33$  рассчитан таким образом, что реле, включенное в цепь коллектора транзистора VT4, срабатывает в зависимости от положения переключателя SA10 при  $1 \cdot U_{оп}$ ,  $2 \cdot U_{оп}$ ,  $3 \cdot U_{оп}$ ,  $4 \cdot U_{оп}$ ,  $4,7 \cdot U_{оп}$ ,  $5 \cdot U_{оп}$  в вольтах. Таким образом, напряжение на емкости определяют как

$$U_C = N \cdot U_{оп} + 0,6 \text{ В},$$

где  $N$  – номер положения переключателя SA10,  $N = 1; 2; 3; 4; 4,7; 5$ ;  
 $U_{оп} = 4 \text{ В}$ .

Транзисторы VT5, VT6 выполняют роль тиристора, который открывается, когда на базе VT4  $U_{оп} = U_{ст} + 1,2 \text{ В}$ , и шунтирует стабилитрон, в результате ток эмиттера VT4 скачком возрастает – срабатывает реле KV.

Напряжение на эмиттере транзистора VT3 определяют как

$$U_{эVT3} = U_C - U_{бэVT3} = U_C - 0,6 \text{ В}.$$

Модель исследуемой схемы в среде Multisim представлена на рисунке 5.3. Вольтметр  $U_C$  в режиме род тока (mode) – постоянный (DC), внутреннее сопротивление (Resistance)  $R_V = 1 \text{ МОм}$ . Форма напряжения регистрируется с помощью осциллографа XSC1

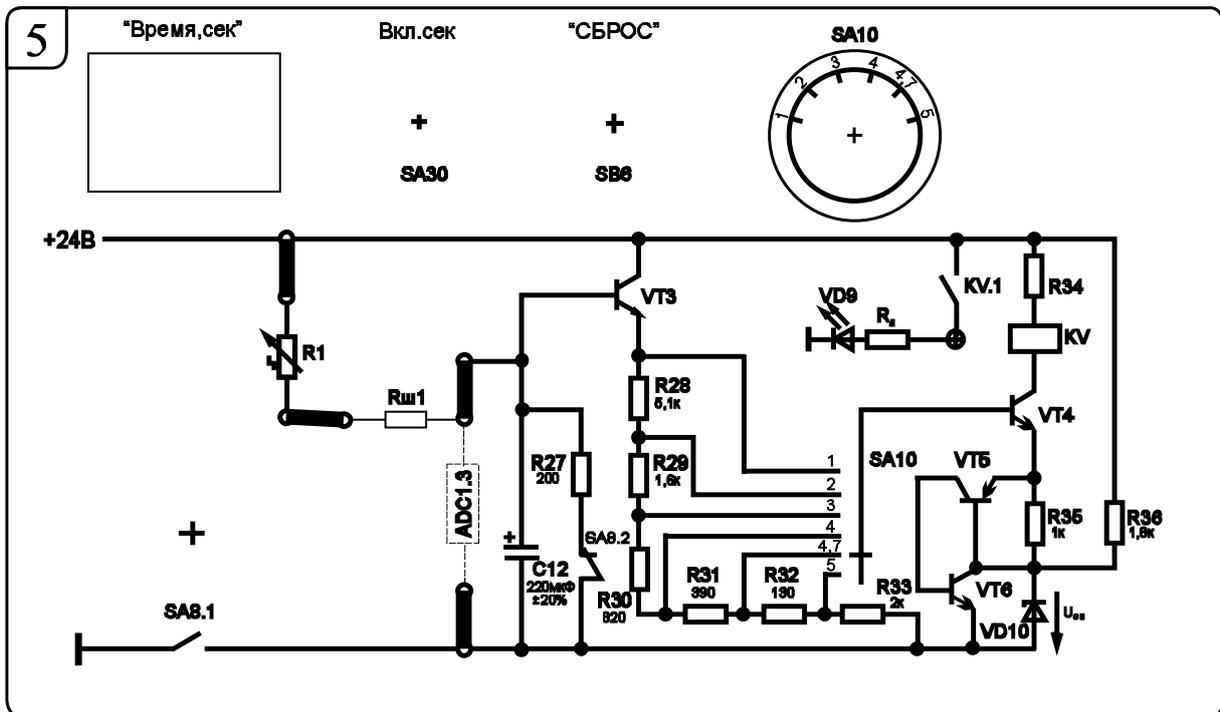


Рисунок 5.2 – Схема для экспериментального исследования процесса заряда конденсатора

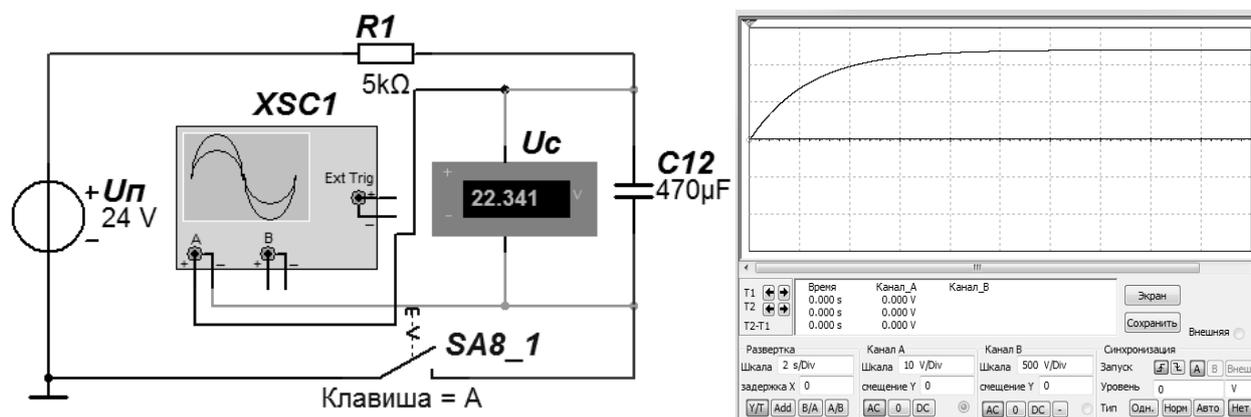


Рисунок 5.3 – Модель процесса заряда конденсатора и осциллограмма напряжения на конденсаторе в среде Multisim

### 5.3 Порядок выполнения лабораторной работы

Для заданного преподавателем значения  $R1$  снять зависимость напряжения от времени заряда конденсатора.

5.3.1 Собрать схему, приведенную на рисунке 5.2.

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

5.3.3 Тумблером SA30 включить секундомер.

5.3.4 Сбросить значение секундомера в нулевые показания кнопкой SB6.

5.3.5 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 5.1.

Таблица 5.1 – Результаты измерений

Положение переключателя SA10	$t$ , с	Эксперимент $U_c$ , В	Расчёт $U_c$ , В
1			
2			
3			
4			
4,7			
5			

5.3.6 Выключить тумблер SA8.1.

5.3.7 Сбросить показания секундомера кнопкой SB6.

5.3.8 Перевести тумблер SA10 в положение 2;

5.3.9 Провести остальные опыты аналогично (пп. 5.3.5–5.3.7) для всех остальных положений тумблера SA10.

5.3.10 Для полученных значений  $t$  рассчитать напряжения на конденсаторе и сравнить с экспериментальными. Данные расчетов занести в таблицу 5.1.

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

5.3.12 Произвести моделирование процесса заряда конденсатора  $C_{12}$  (см. рисунок 5.3), замкнув ключ SA8.1.

5.3.13 Воспользовавшись полученной при моделировании и экспериментальной кривой заряда  $C_{12}$ , определить постоянные времени  $\tau$  и сравнить с расчетным:

$$\tau = R_1 C_{12}.$$

Дополнительно можно снять экспериментальную осциллограмму заряда конденсатора, используя программу «Осциллограф».

5.3.14 Сделать выводы по результатам работы.

#### **5.4 Содержание отчёта**

Отчёт по работе должен содержать: цель работы, схему исследования процесса заряда конденсатора, основные расчётные формулы, результаты эксперимента и расчёта (см. таблицу 5.1), графики заряда конденсатора с определённой постоянной времени, выводы по работе.

#### **Контрольные вопросы**

- 1 Почему состояние электрической цепи не может измениться мгновенно?
- 2 Дайте определение коммутации, переходного процесса.
- 3 Сформулируйте 1 и 2 законы коммутации.
- 4 Как определяют длительность переходного процесса?

## **6 Лабораторная работа № 6. Определение параметров и основных характеристик однофазного трансформатора**

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

### **6.1 Основные теоретические сведения**

Трансформатором называется электромагнитное статическое устройство, предназначенное для преобразования параметров электрической энергии в цепях переменного тока.

Простейший трансформатор состоит из магнитопровода, набранного из листов электротехнической стали, и двух расположенных на нем обмоток (рисунок 6.1). Обмотки электрически не связаны друг с другом. Одна из обмоток – *первичная*, подключена к источнику переменного тока. К другой обмотке – *вторичной* подключают потребитель.

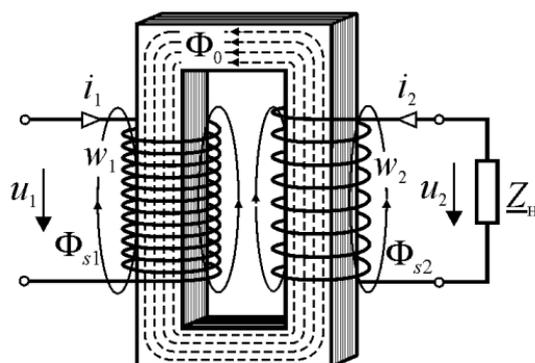


Рисунок 6.1 – Схема трансформатора

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. Переменный синусоидальный ток  $i$ , протекающий по первичной обмотке трансформатора, возбуждает в магнитопроводе переменный магнитный поток  $\Phi_0$ , который пронизывает витки обеих обмоток и наводит в них ЭДС  $E_1$  и  $E_2$  с амплитудами, пропорциональными числам витков  $w_1$  и  $w_2$ .

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 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.

Электрическая цепь вторичной обмотки трансформатора изолирована от цепи первичной обмотки. Энергия от источника питания передаётся в нагрузку посредством магнитного поля, возбуждаемого в магнитопроводе и единого для обеих обмоток. Таким образом, с помощью трансформатора можно не только создать любое напряжение в нагрузке, но и гальванически разделить электрические цепи переменного тока друг от друга.

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

Схема замещения трансформатора представлена на рисунке 6.2.

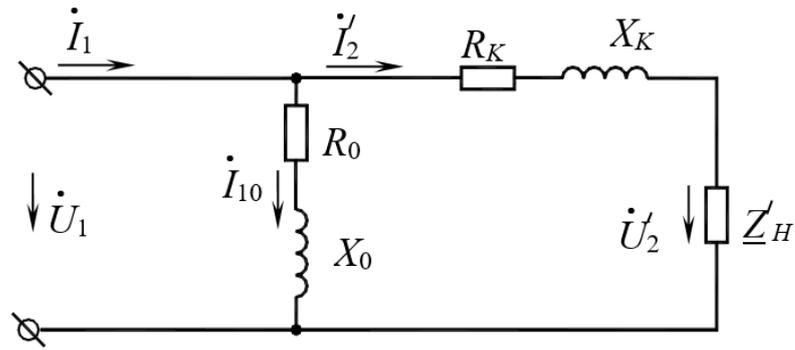


Рисунок 6.2 – Схема замещения однофазного трансформатора

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

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

Схема опыта холостого хода представлена на рисунке 6.3.

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

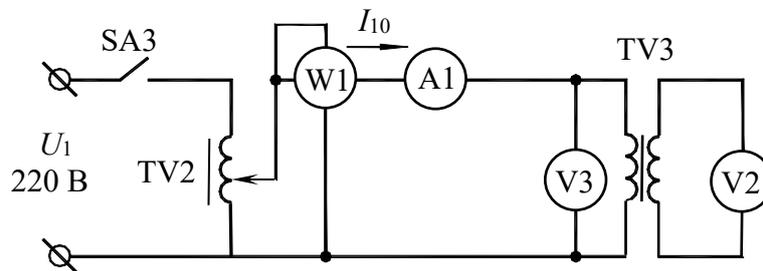


Рисунок 6.3 – Опыт холостого хода трансформатора

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

Схема опыта короткого замыкания представлена на рисунке 6.4.

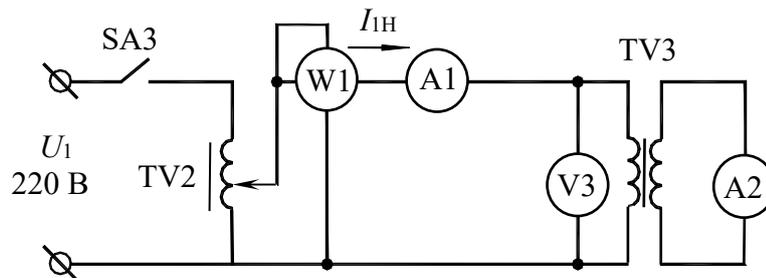


Рисунок 6.4 – Опыт короткого замыкания трансформатора

КПД трансформатора

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

где  $\beta$  – коэффициент загрузки трансформатора,

$$\beta = \frac{I_1}{I_{1H}} = \frac{I_2}{I_{2H}}; \beta_{\max} = \sqrt{\frac{P_0}{P_K}}.$$

$S_H$  – 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  $\Delta U_2 \% = \beta \cdot (U_{к.а} \cdot \cos \varphi_2 + U_{к.р} \cdot \sin \varphi_2)$ ;

$U_{к.а}$  – активная составляющая напряжения короткого замыкания трансформатора,

$$U_{к.а} \% = \frac{I_{1H} R_K}{U_{1H}} 100 \% = \frac{P_K}{S_H} 100 \%;$$

$U_{к.р}$  – реактивная составляющая напряжения короткого замыкания трансформатора,

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

## 6.2 Исследуемые схемы

Для определения параметров схемы замещения трансформатора  $U_2 = f(\beta)$  проводят опыты холостого хода (SA4 выключен) и короткого замыкания (SA4 включен) (рисунок 6.5).

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

Исследование однофазного трансформатора производится по схеме, представленной на рисунке 6.6.

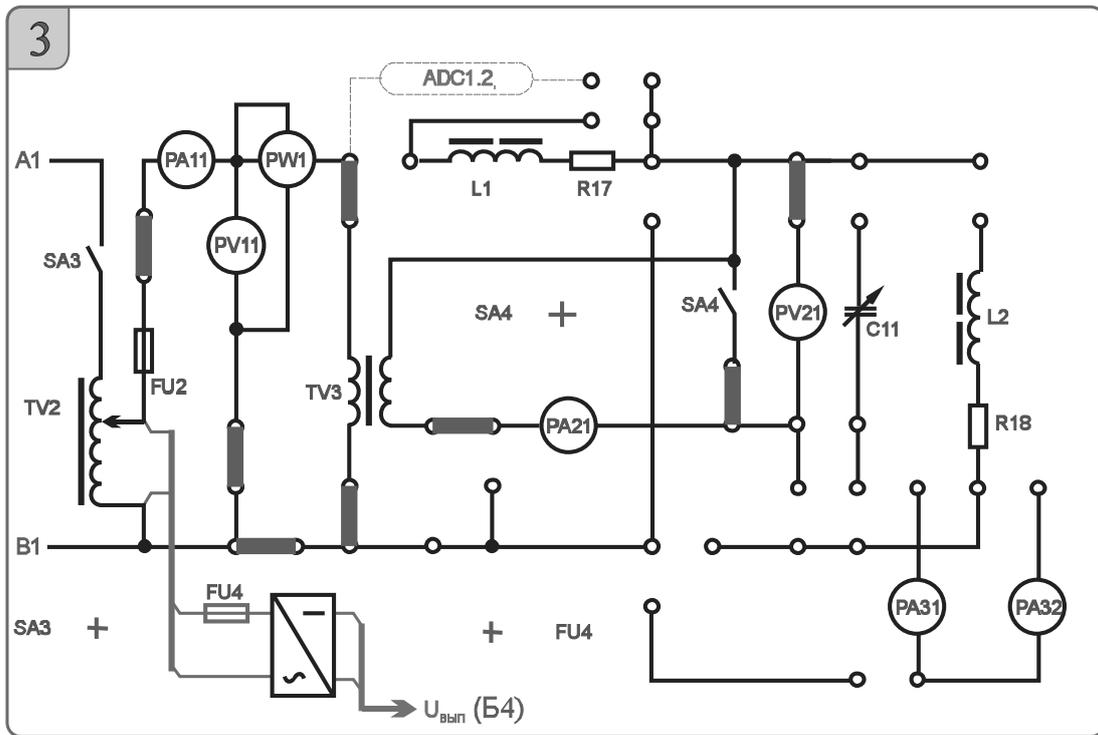


Рисунок 6.5 – Схема исследования трансформатора в режиме холостого хода и короткого замыкания

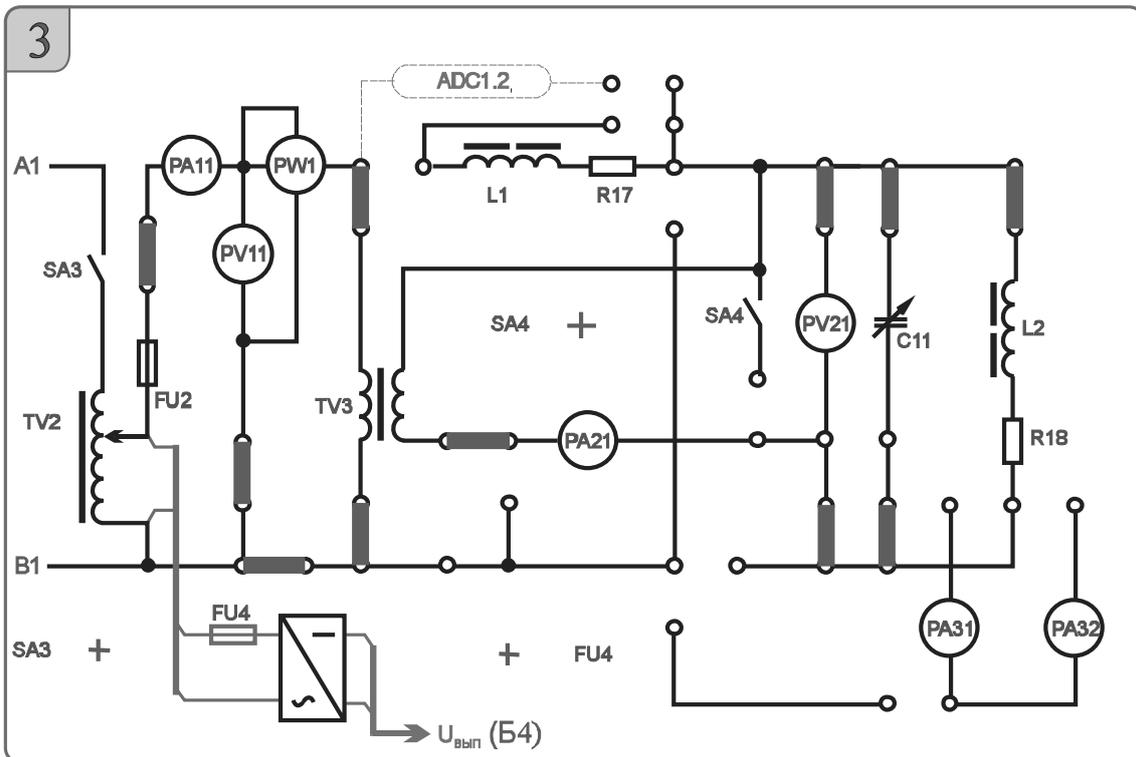


Рисунок 6.6 – Схема исследования однофазного трансформатора с нагрузкой

### 6.3 Порядок выполнения лабораторной работы

6.3.1 Собрать схему, приведенную на рисунке 6.5, для проведения опыта холостого хода и короткого замыкания.

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

6.3.3 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 ( $U_{20}$ ), рассчитать параметры трансформатора в режиме холостого хода и занести их в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Параметры трансформатора в опыте холостого хода

Экспериментальные данные				Расчетные значения					
$U_{1H}$ , В (PV11)	$I_{10}$ , А (PA11)	$P_0$ , Вт (PW1)	$U_{20}$ , В (PV21)	$S$ , В·А	$Z_0$ , Ом	$X_0$ , Ом	$R_0$ , Ом	$\cos \varphi$	$\varphi$ , град
220									

6.3.4 Собрать схему, приведенную на рисунке 6.6, для проведения опыта короткого замыкания.

6.3.5 Снять параметры короткого замыкания, для чего включить тумблеры SA4 и SA3, установив во вторичной обмотке трансформатора TV3 ток 0,8 А (по прибору PA21). Рассчитать параметры трансформатора в режиме короткого замыкания и занести их в таблицу 6.2.

Таблица 6.2 – Параметры трансформатора в опыте короткого замыкания

Экспериментальные данные				Расчетные значения					
$U_{1K}$ , В (PV11)	$I_{1H}$ , А (PA11)	$P_K$ , Вт (PW1)	$I_2$ , В (PA21)	$S$ , В·А	$Z_K$ , Ом	$X_K$ , Ом	$R_K$ , Ом	$\cos \varphi$	$\varphi$ , град
	0,8								

6.3.6 Измерить параметры трансформатора TV3, подключенного к нагрузке  $R_{18}$ ,  $L_2$  (см. рисунок 6.6) при напряжении питания 220 В (по прибору PV11). Снять показания приборов PA11 ( $I_{1H}$ ), PV11 ( $U_{1H}$ ), PA21 ( $I_{2H}$ ), PV21 ( $U_{2H}$ ), PW1 ( $P$ ), рассчитать параметры трансформатора и занести в таблицу 6.3.

Таблица 6.3 – Параметры трансформатора под нагрузкой

Экспериментальные данные				Расчетные значения		
$U_{1K}$ , В (PV11)	$I_{1H}$ , А (PA11)	$P_K$ , Вт (PW1)	$I_2$ , В (PA21)	$S_H$ , В·А	$\cos \varphi$	$n$
	0,8					

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

- 6.3.8 Рассчитать максимальный КПД трансформатора
- 6.3.9 Провести моделирование работы трансформатора в среде Multisim.
- 6.3.10 Сделать выводы по результатам работы.

#### **6.4 Содержание отчёта**

Отчёт по работе должен содержать: цель работы, схему трансформатора в режиме холостого хода и короткого замыкания, основные расчётные формулы, результаты эксперимента, моделирования и расчёта (см. таблицы 6.1 и 6.2), внешнюю характеристику трансформатора, выводы по работе.

#### **Контрольные вопросы**

- 1 Для чего предназначен трансформатор?
- 2 Как устроен трансформатор?
- 3 Что такое коэффициент трансформации?
- 4 Как проводят опыт холостого хода и короткого замыкания трансформатора?
- 5 Что такое внешняя характеристика трансформатора? Как построить внешнюю характеристику трансформатора, используя процентное изменение напряжения?
- 6 Запишите уравнение для расчета КПД трансформатора. Какие потери возникают при работе трансформатора, как их уменьшают?

### **7 Лабораторная работа № 7. Исследование асинхронного трехфазного двигателя с короткозамкнутым ротором**

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

#### **7.1 Основные теоретические сведения**

Наибольшее применение в промышленности получили трёхфазные асинхронные двигатели. Это объясняется тем, что они просты по конструкции, дешевы, надёжны в работе, имеют высокий КПД при номинальной нагрузке, выдерживают значительные перегрузки, не требуют сложных пусковых устройств.

Основными частями АД являются статор и ротор, отдалённые 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 поверхности ротора выштампованы пазы, в которые уложены обмотки. Сердечник статора помещён в корпус, на котором закреплены клеммы статорной обмотки, состоящей из трёх 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 её часть).

*Частота* вращающегося магнитного поля статора АД

$$n_0 = \frac{60 f_1}{p},$$

где  $f_1$  – частота напряжения сети;

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

Рассматриваемая машина называется асинхронной потому, что в ней частота вращения ротора  $n$  не равна частоте вращающегося магнитного поля статора  $n_0$ . Если бы эти частоты были одинаковые, то магнитный поток статора был бы неподвижен относительно вращающегося ротора, и в обмотках ротора не индуцировались бы ЭДС, не было бы в них токов и не возникал бы вращающий момент на валу.

Разность частот вращения поля статора и ротора называют частотой скольжения, а её отношение к частоте  $n_0$  – *скольжением*  $S$ :

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

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,  $M_K = \lambda M_H$  (здесь  $\lambda$  – 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,  $S_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0}$ .

## Расчет КПД двигателя

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

где  $P_2$  – мощность на валу двигателя,

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

здесь  $M$  – текущее значение момента на валу двигателя;

$n_2$  – текущее значение частоты вращения двигателя;

$P_1$  – мощность, потребляемая двигателем из сети.  $P_1$  определяется по показаниям ваттметров [1].

### 7.2 Исследуемая схема

Для выполнения лабораторной работы собирается схема, представленная на рисунке 7.1.

В работе исследуют и строят механическую  $M = f(S)$  и рабочие характеристики  $\eta = f(P_2)$  и  $\cos\varphi = f(P_2)$  при включении обмоток статора звездой. 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.

### 7.3 Порядок выполнения лабораторной работы

7.3.1 Собрать схему, приведенную на рисунке 7.1.

7.3.2 Рассчитать по паспортным данным номинальный ток двигателя и номинальный момент. Пересчитать полученные значения для фазного напряжения 127 В.

Номинальный момент двигателя

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

7.3.3 Установить тумблер SA17 в положение Y, резистор R43 установить в положение min.

7.3.4 Тумблер SA21 должен находиться в положении ВКЛ.

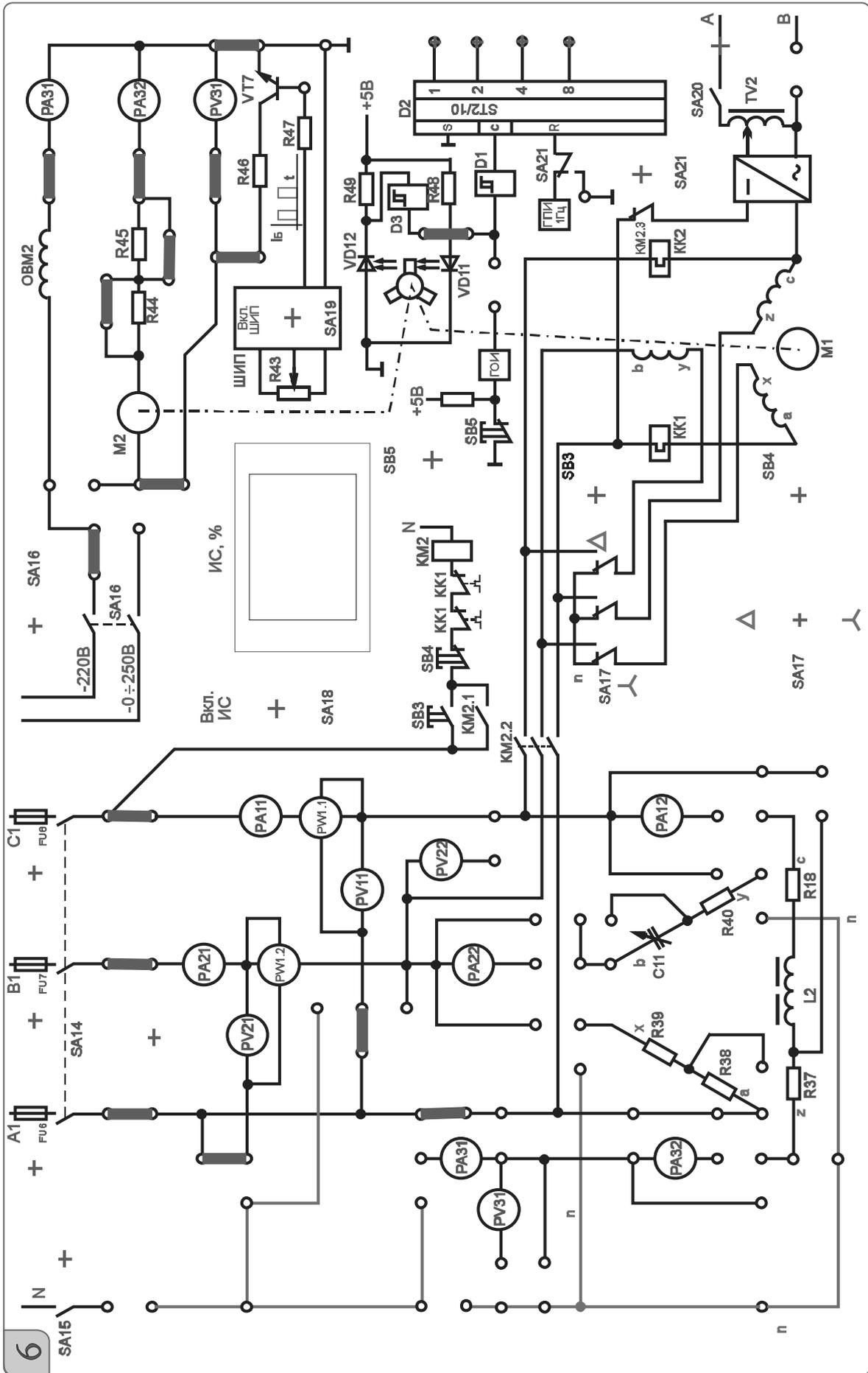


Рисунок 7.1 – Схема исследования трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

7.3.5 Включить стенд автоматическими выключателями QF1, QF2, QF3, включить измеритель скорости тумблером SA18, включить тумблер SA14, нажать на кнопку SB3 для подключения асинхронного двигателя к сети через пускатель KM2.

7.3.6 Для нагрузки используется генератор постоянного тока ПЛ-062. Для подключения обмотки возбуждения включить тумблер SA16.

7.3.7 Включить ШИП при помощи тумблера SA19.

7.3.8 Установить номинальный ток для пониженного напряжения  $I'_H$  (контролировать по прибору PA11), увеличивая нагрузку резистором R43, плавно поворачивая его в сторону max.

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

7.3.10 Вернуть рукоятку резистора R43 в начальное положение min.

7.3.11 Считая  $M_0$  независимым от частоты вращения и изменяя  $I_A$  (PA32), с помощью R43 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 7.1.

Таблица 7.1 – 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

7.3.12 Считая, что к валу асинхронного двигателя (АД) была приложена номинальная мощность, определить  $M_0$  по экспериментальным данным п. 7.3.11.

$$M_0 = M'_H - M_G = M'_H - C_M \Phi \cdot I_A,$$

где  $M_0$  – статический момент нагрузки холостого хода;

$M_G$  – момент генератора постоянного тока;

$I_{AG}$  – ток якоря генератора постоянного тока (прибор PA32);

$C_M \Phi$  – магнитная постоянная нагрузочного генератора,

$$C_M \Phi = \frac{M_{HG}}{I_{AH}} = \frac{0,573}{0,76} = 0,753947.$$

7.3.13 Рассчитать для каждой нагрузки момент на валу  $M$ , КПД, скольжение  $S$ , полную мощность двигателя  $S_1$ , мощность на валу  $P_2$  и  $\cos \phi$ . Данные расчетов занести в таблицу 7.2.

7.3.14 По результатам измерений и расчетов построить механическую характеристику  $M = f(S)$ , рабочие характеристики  $\eta = f(P_2)$  и  $\cos \phi = f(P_2)$ .

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

7.3.16 Сделать выводы по результатам работы.

Таблица 7.2 – Результаты расчета

Номер опыта	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$s$	$M$ , Н·м	$P_2$ , Вт	$\eta$ , %	$S_1$ , В·А	$\cos\varphi$

#### 7.4 Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать: цель работы, основные расчётные формулы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, результаты эксперимента и расчёта, механическую характеристику  $M = f(S)$ , рабочие характеристики  $\eta = f(P_2)$  и  $\cos\varphi = f(P_2)$ , выводы по работе.

#### Контрольные вопросы

- 1 Дайте определение трёхфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
- 2 Опишите принцип работы трёхфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
- 3 Как строится механическая характеристика трёхфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором?

## 8 Лабораторная работа № 8. Исследование логических элементов и триггеров

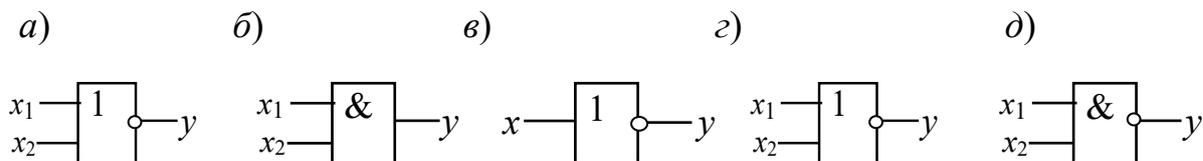
**Цель работы:** изучение принципа функционирования и характеристик логических элементов и триггеров.

### 8.1 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 8.1, а–в). К базовым логическим элементам относятся элементы Пирса и Шеффера (рисунок 8.1, г, д). 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*.

*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.

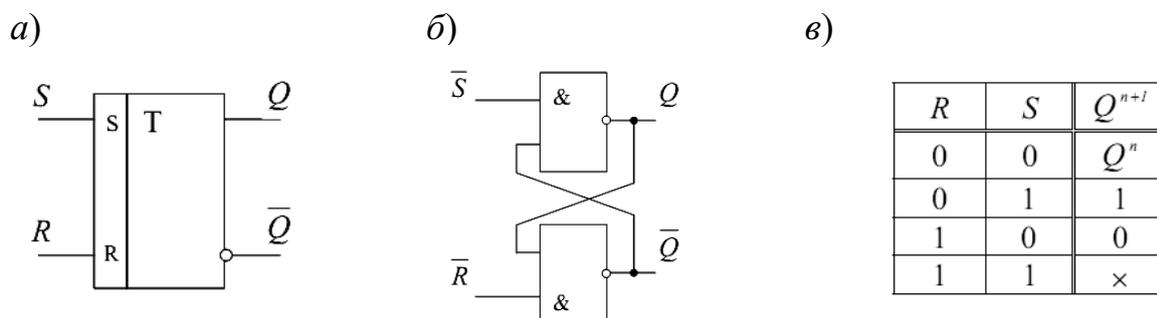


а – элемент ИЛИ; б – элемент И; в – элемент НЕ; г – элемент ИЛИ-НЕ; д – элемент И-НЕ

Рисунок 8.1 – Условное графическое обозначение логических элементов

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 счётный  $T$  вход, а триггеры задержки – информационный вход  $D$ .

Наибольшее распространение в цифровых устройствах получили триггеры  $RS$  (рисунок 8.2),  $D$  (рисунок 8.3),  $T$  (рисунок 8.4) и  $JK$  (рисунок 8.5).



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

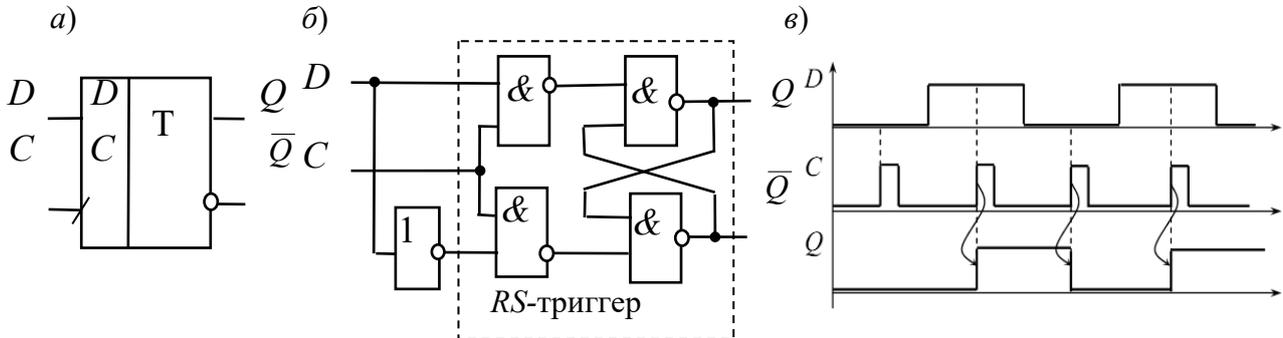
Рисунок 8.2 – Асинхронный  $RS$ -триггер

Схемотехнически  $RS$ -триггер может быть реализован на элементах 2ИЛИ-НЕ (см. рисунок 8.2, 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 8.3.

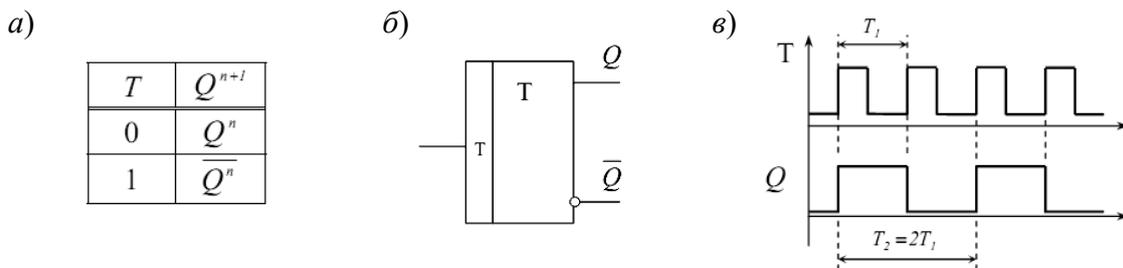
$T$ -триггеры иначе называются счетными и применяются для построения

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 8.4.



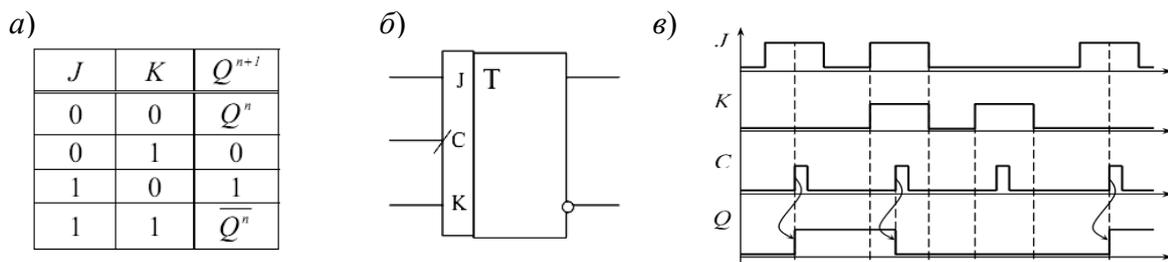
$a$  – условное графическое изображение;  $b$  – схема реализации  $D$ -триггера на базовых элементах И-НЕ;  $c$  – временная диаграмма, иллюстрирующая работу триггера

Рисунок 8.3 –  $D$ -триггер



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

Рисунок 8.4 –  $T$ -триггер



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

Рисунок 8.5 –  $JK$ -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 8.5, а). На рисунке 8.5, б, в показаны условное обозначение *JK*-триггера с синхронизацией по переднему фронту и его временные диаграммы работы.

## 8.2 Порядок выполнения работы

8.2.1 В программе Multisim собрать схему для испытания основных и базовых логических элементов (рисунок 8.6) OR (ИЛИ), AND (И), NOT (НЕ), NAND (И-НЕ) и XOR (ИЛИ-НЕ), расположенных в библиотеке Misc Digital/TIL с уровнем высокого 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 8.1.

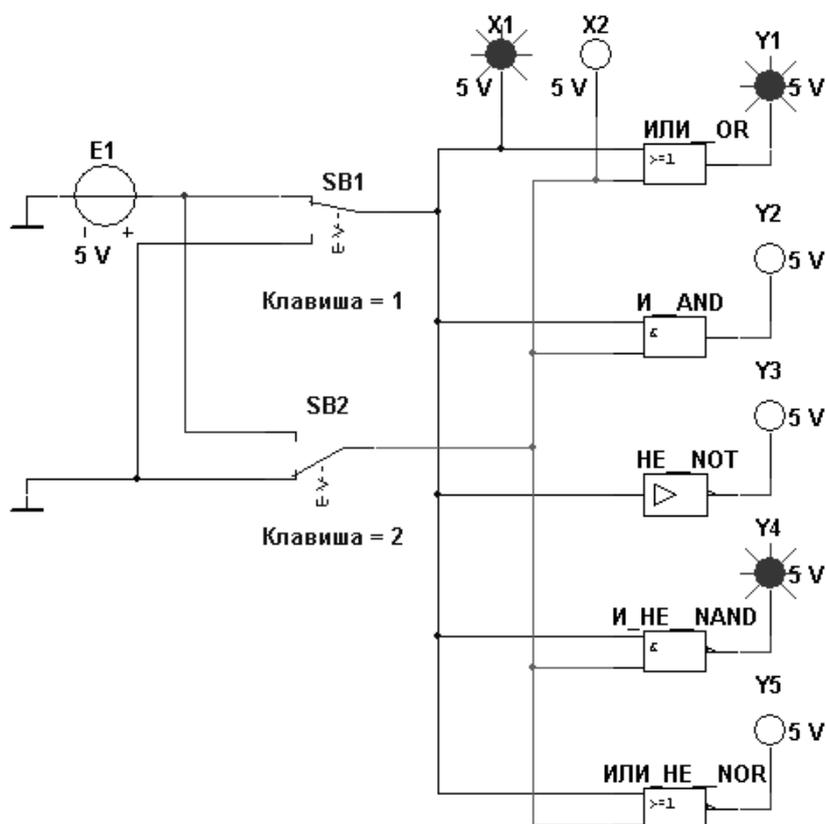


Рисунок 8.6 – Схема для исследования основных и базовых логических элементов

Таблица 8.1 – Результаты моделирования

Дизъюнктор [ИЛИ (OR)]			Конъюнктор [И (AND)]			Инвертор [НЕ (NOT)]		Штрих Шеффера [И-НЕ (NAND)]			Стрелка Пирса [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	

8.2.2 По заданию преподавателя исследовать работу трех логических элементов одной из серий интегральных микросхем (рисунок 8.7), предварительно выписав из справочника их параметры и условное обозначение. Составить таблицу истинности для данных элементов.

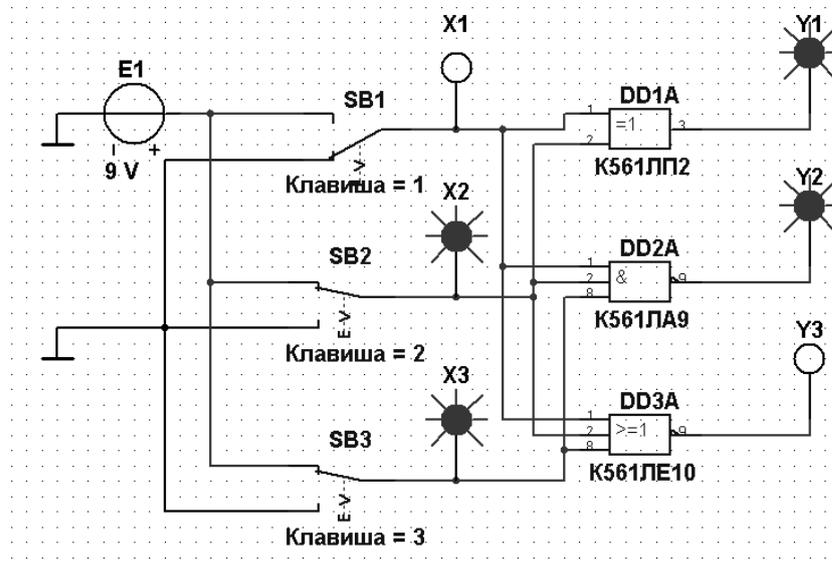


Рисунок 8.7 – Схема для исследования логических элементов серии K561

8.2.3 В программе Multisim собрать схему исследования *RS*-триггера на логических элементах И-НЕ заданной преподавателем серии (рисунок 8.8).

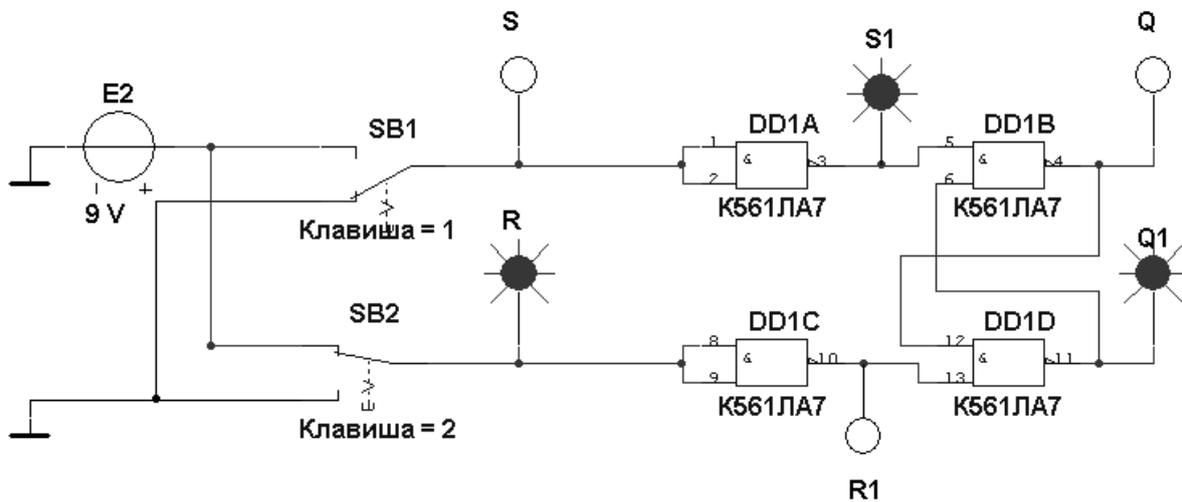


Рисунок 8.8 – Схема *RS*-триггера на логических элементах серии K561

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

8.2.4 В программе Multisim собрать схему испытания триггеров *JK* и *D* (рисунок 8.9) по заданию преподавателя. В схему включены: генератор XWG1 (частота  $f_2 = 500$  кГц); логический анализатор XLA1.

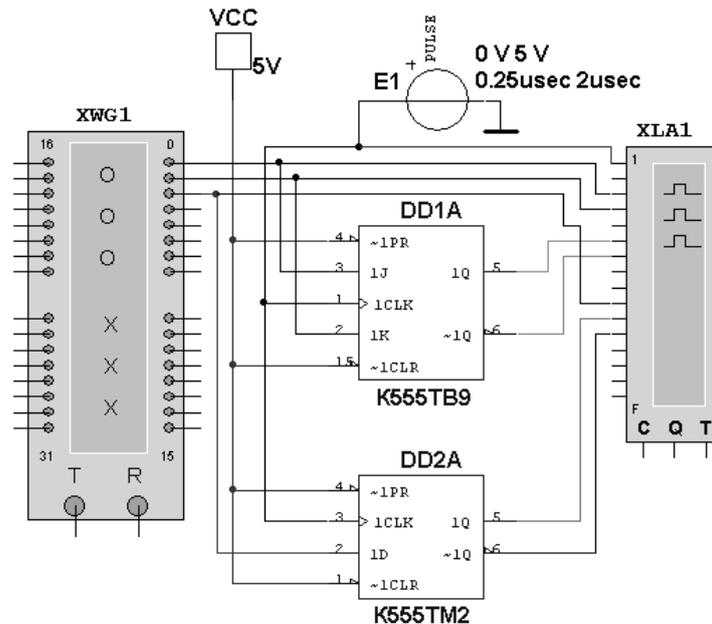


Рисунок 8.9 – Схема для исследования  $JK$ - и  $D$ -триггеров

На  $\overline{1CLR}$ - и  $\overline{1PR}$ -входы триггеров подаётся 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 введём в первые шесть ячеек памяти генератора трёхразрядные кодовые комбинации (рисунок 8.10): 010, 100, 111, 001, 100, 010.

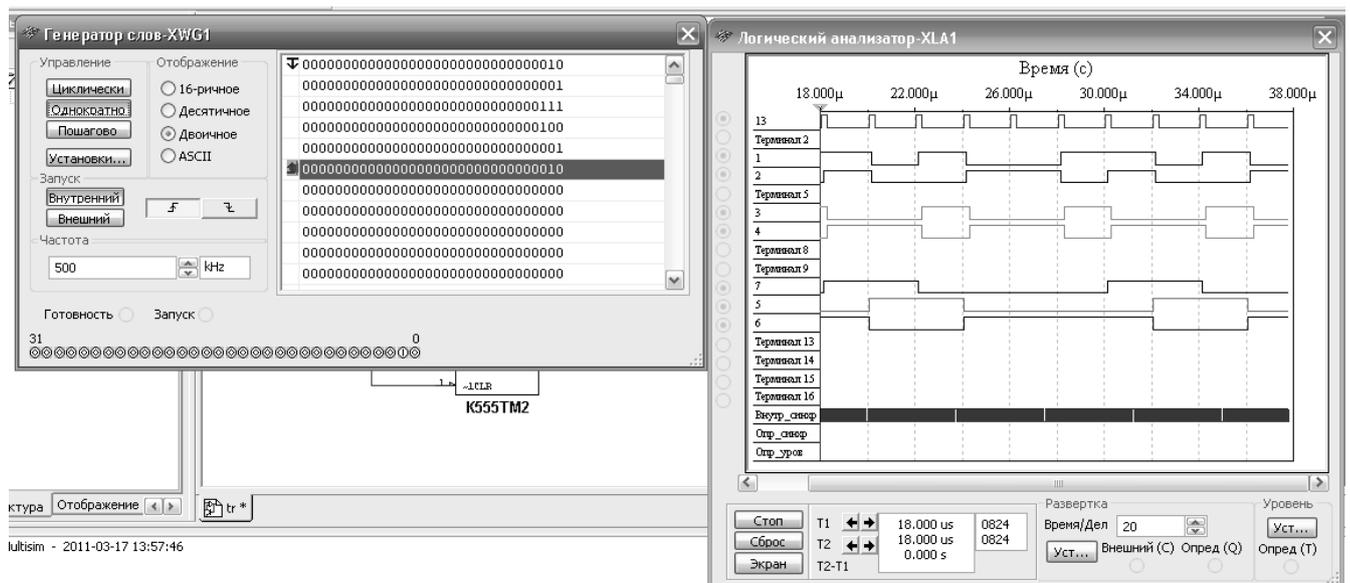


Рисунок 8.10 – Цифровые комбинации и временные диаграммы триггеров

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

8.2.6 Сделать выводы по результатам работы.

### **8.3 Содержание отчёта**

Отчёт 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. – Москва: ИНФРА-М, 2018. – 574 с.

2 **Гальперин, М. В.** Электротехника и электроника: учебник / М. В. Гальперин. – 2-е изд. – Москва: ФОРУМ; ИНФРА-М, 2017. – 480 с.

3 **Вольдек, А. И.** Электрические машины: учебник / А. И. Вольдек. – 3-е изд., перераб. – Москва: Альянс, 2018. – 832 с.

4 **Кузовкин, В. А.** Схемотехническое моделирование электрических устройств в Multisim: учебное пособие / В. А. Кузовкин, В. В. Филатов. – Старый Оскол: ТНТ, 2017. – 336 с.