

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 переведения 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, находящиеся 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 секундометра 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 $R20$, $R22$, $R23$, $R1$, называемые плечами, образуют замкнутый четырехугольник, в одну диагональ которого включается нагрузка $R24$, а в другую – источник постоянного тока (рисунок 2.1).

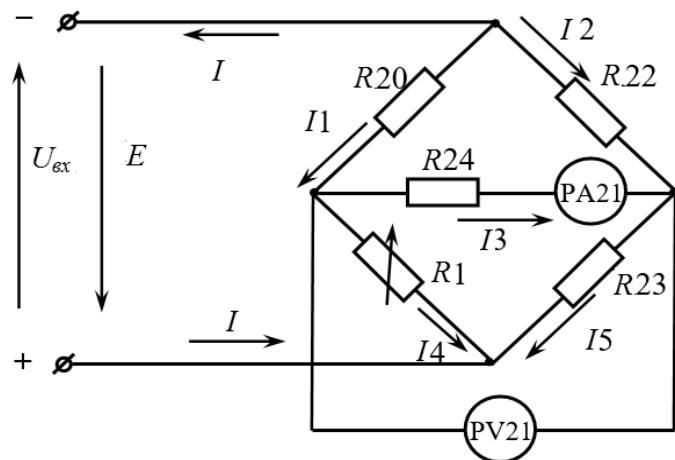


Рисунок 2.1 – Мост постоянного тока

Условие равновесия моста постоянного тока

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

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_{6yx} моста постоянного тока можно, используя метод эквивалентного генератора (рисунок 2.2):

$$U_{6yx} = I3 \cdot R24,$$

где

$$I3 = \frac{U_{x.x.}}{R24 + R_{k.3}};$$

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

$R_{k.3}$ – сопротивление относительно точек разрыва моста при закороченном источнике входного напряжения.

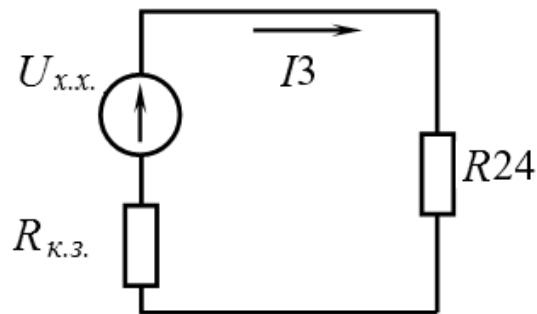


Рисунок 2.2 – Эквивалентная схема электрической цепи для расчета тока $I3$

Сопротивление $R_{k.3}$ можно определить экспериментально:

$$R_{k.3} = \frac{U_{x.x.}}{I_{k.3}}.$$

2.2 Исследуемые схемы

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

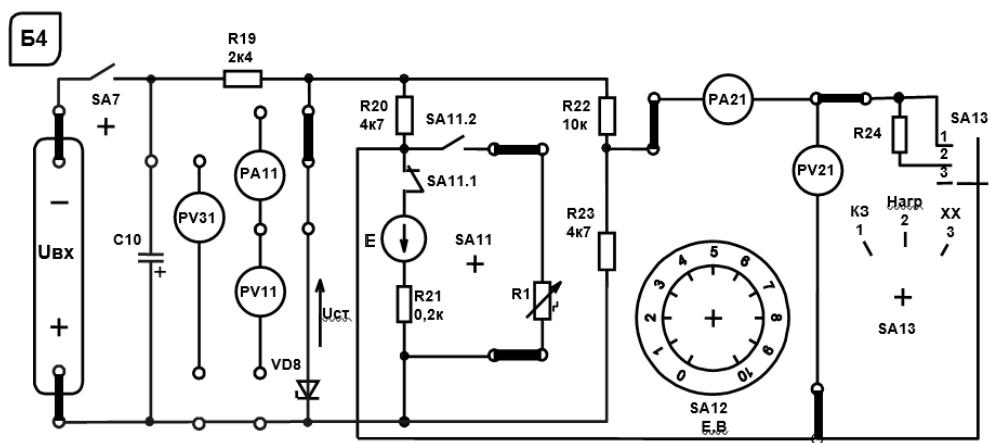


Рисунок 2.3 – Схема для экспериментального исследования электрической цепи постоянного тока с одним источником питания

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.

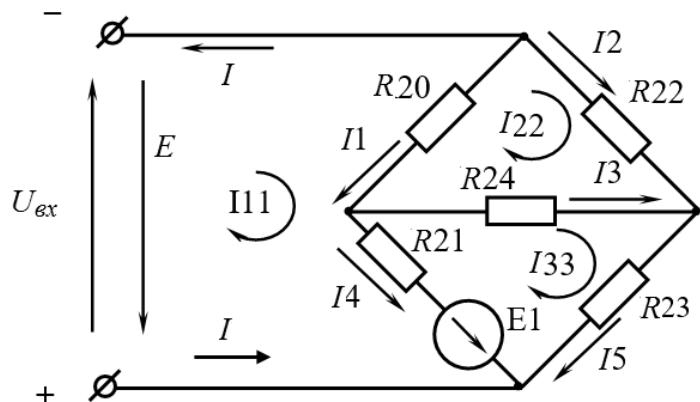


Рисунок 3.1 – Электрическая цепь постоянного тока с двумя источниками питания

Система уравнений для расчета контурных токов

$$\begin{cases} I11 \cdot (R20 + R21) - I22 \cdot R20 - I33 \cdot R21 = E1 - E; \\ -I11 \cdot R20 + I22 \cdot (R20 + R24 + R22) - I33 \cdot R24 = 0; \\ -I11 \cdot R21 - I22 \cdot R24 + I33 \cdot (R21 + R23 + R24) = -E1. \end{cases}$$

$I11, I22, I33$ – контурные токи; $I1, I2, I3, I4, I5, I$ – токи ветвей.

Решив систему уравнений, определяют значение тока $I3$:

$$I3 = I33 - I22.$$

Выходное напряжение моста

$$U_{\text{вых}} = I3 \cdot R24.$$

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 $U_{вых} = f(E1)$, изменения $E1$ 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.

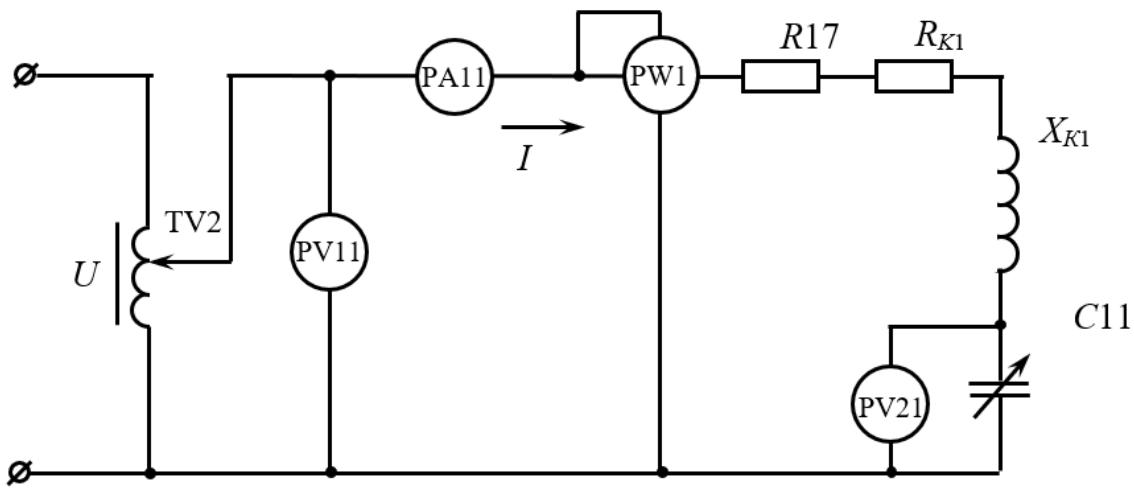


Рисунок 4.1 – Электрическая цепь переменного тока с последовательно соединенными R -, L -, C -элементами

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

Зная показания приборов, определяют значение параметров схемы замещения катушки:

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

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

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.

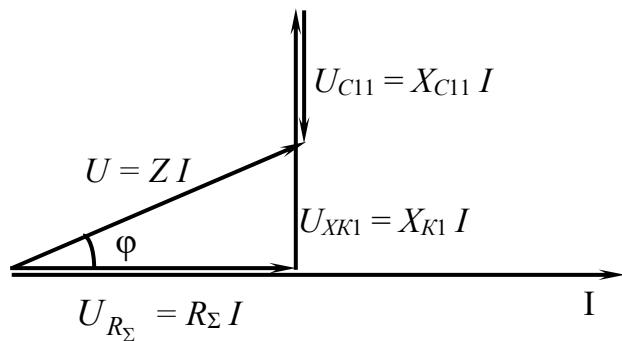


Рисунок 4.2 – Векторная диаграмма

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.

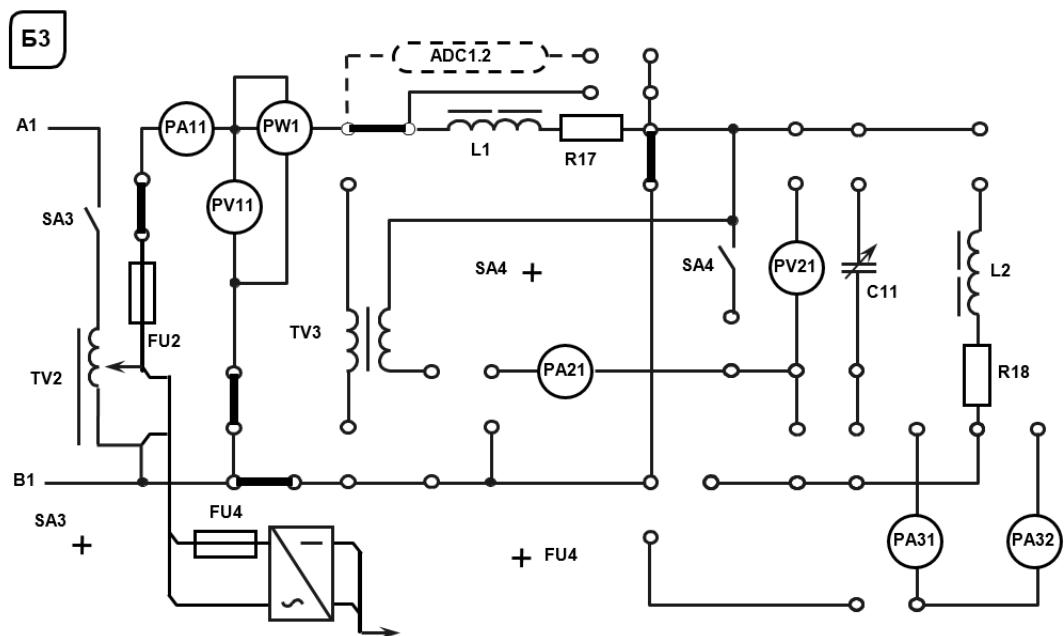


Рисунок 4.3 – Схема для экспериментального исследования параметров схемы замещения катушки индуктивности

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 $I_h = 1,0$ А, определить значения этих параметров.
 - 2 Определить величину емкости $C11$ конденсатора, при которой в цепи наступает резонанс напряжений.

- 3 Собрать на стенде схему (см. рисунок 4.4) для исследования схемы.
 - 4 Снять зависимости $I = f(C11)$ и $\cos\varphi = f(C11)$ при U_{\min} .
 - 5 Построить векторную диаграмму напряжений и тока.
 - 6 Провести моделирование работы схемы (см. рисунок 4.1) в среде Multisim.
 - 7 Сделать выводы по результатам работы.

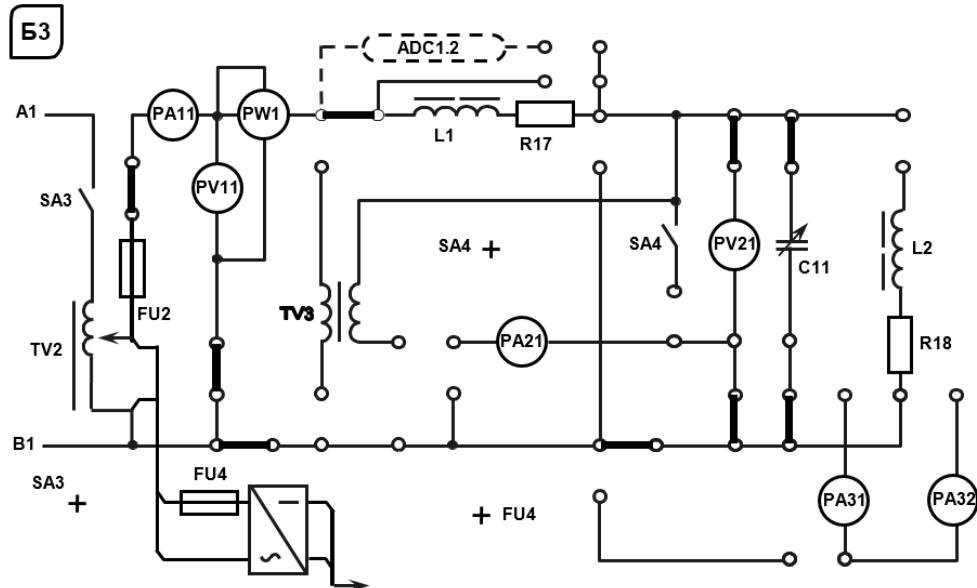


Рисунок 4.4 – Схема для экспериментального исследования резонанса напряжений

Содержание отчета

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.

Контрольные вопросы

- 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.

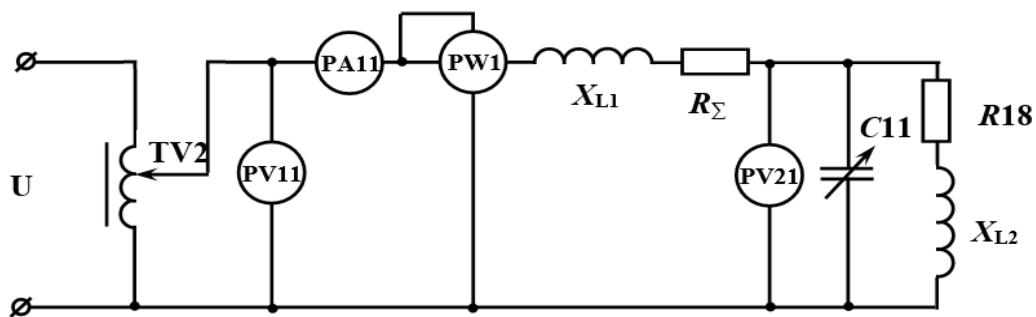


Рисунок 5.1 – Электрическая схема ЛЭП переменного тока с параллельно соединенными R -, L - и C -элементами в качестве нагрузки

Закоротив условно представленную ЛЭП (L_{K1}, R_{17}), определяют параметры катушки L_{K2} , сопротивление R_{18} и $\cos\phi$ при $U_{2h} = 110$ В (схема приведена на рисунке 5.2).

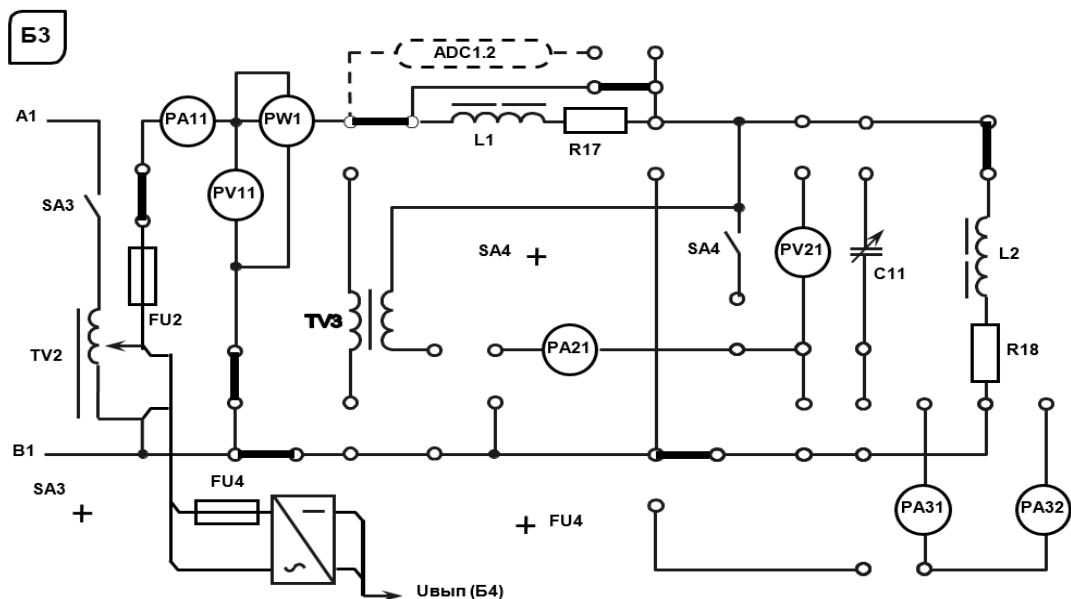


Рисунок 5.2 – Схема для экспериментального исследования параметров замещения катушки индуктивности

Рассчитывают величину емкости C_{11} для повышения коэффициента мощности нагрузки, а также для выполнения условия резонанса токов и проверяют значение тока I экспериментально (схема приведена на рисунке 5.3).

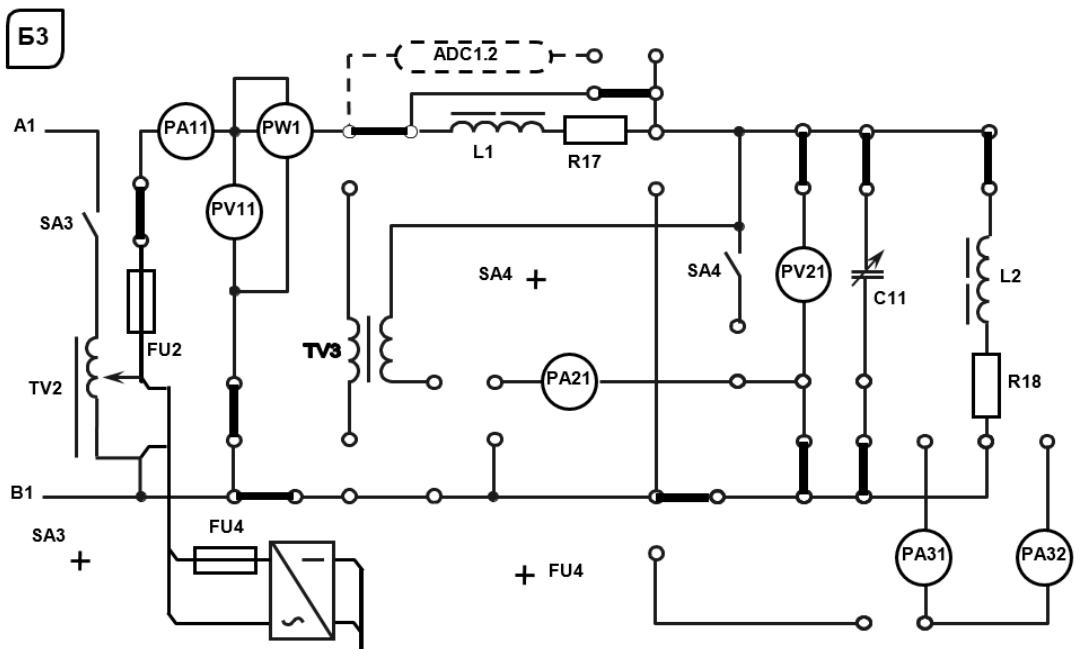


Рисунок 5.3 – Схема для экспериментального исследования резонанса токов

5.2 Основные теоретические сведения

1 Определение сопротивлений нагрузки для ЛЭП.

При расчете сопротивлений нагрузки R_{18} и X_{L2} необходимо зашунтировать перемычкой ЛЭП (L_{k1} , R_{17}), установить автотрансформатором TV2 номинальное напряжение $U_n = 110$ В и снять показания приборов PW1 и PA11.

$$R_{18} = \frac{P}{I^2}; \quad Z_{L2} = \frac{U_{2n}}{I}; \quad L = \frac{X_{L2}}{2\pi f}; \quad X_{L2} = \sqrt{Z_{L2}^2 - R_{18}^2}.$$

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

$$\cos \varphi_{2n} = \frac{R_{18}}{Z_{L2}}.$$

3 Расчет значения емкости C_{11} для повышения $\cos \varphi_{2n}$ до значения $\cos \varphi_{2TP}$:

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

4 Расчет значения емкости C_{11} , при котором в цепи наступит резонанс токов:

$$b_L = b_C; \quad \omega \cdot C_{11} = \frac{X_{L2}}{Z_{L2}^2}; \quad C_{11} = \frac{X_{L2}}{\omega \cdot Z_{L2}^2},$$

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 η 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

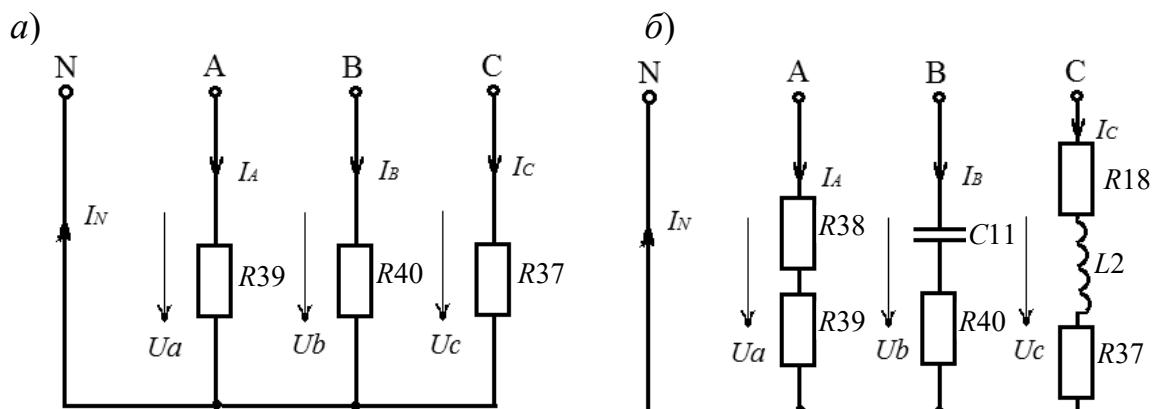
- 1 В какой цепи и при каких условиях возникает резонанс токов?
- 2 От каких параметров цепи зависит резонансная частота?

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 $R37 = R39 = R40$ необходимо перемычками закоротить следующие элементы: $R38$, $C11$, L_{K2} и $R18$ (рисунок 6.2).

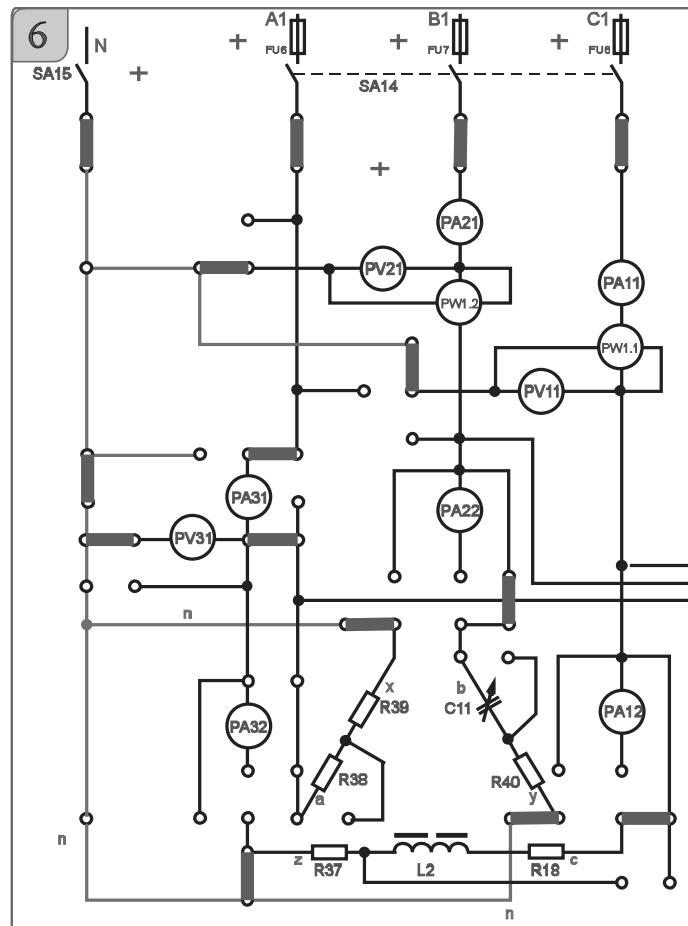


Рисунок 6.2 – Схема для экспериментального исследования трехфазной электрической цепи при соединении нагрузки звездой

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:

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

Мощность, потребляемую симметричной нагрузкой, найти по формуле

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

2 Расчет значения емкости $C11$ для получения равномерной нагрузки:

$$Z_a = R38 + R39;$$

$$Z_b = \sqrt{R40^2 + X_{C11}^2};$$

$$Z_c = \sqrt{(R37 + R18)^2 + X_{L2}^2}.$$

Приняв $Z_a = Z_b = Z_c$, определяют значение $C11$ для получения равномерной нагрузки:

$$R40^2 + X_{C11}^2 = (R37 + R18)^2 + X_{L2}^2,$$

где $R18=59$ Ом; $X_{L2}=140$ Ом;

$$X_{C11} = \sqrt{(R37 + R18)^2 + X_{L2}^2 - R40^2}.$$

Откуда

$$C11 = \frac{1}{\omega \cdot X_{C11}}.$$

Значение сопротивления резистора $R38$ определяется из соотношения

$$R38 = Z_c - R39.$$

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

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-

метрическая 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 A, B, C 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), В	U_c (PV11), В	I_A , А	I_B (PA21), А	I_C (PA11), А	I_N (PA31), А	P , Вт
<i>Симметрическая нагрузка (эксперимент)</i>							
<i>Моделирование</i>							
<i>Равномерная нагрузка (эксперимент)</i>							
<i>Расчет</i>							
<i>Моделирование</i>							

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).

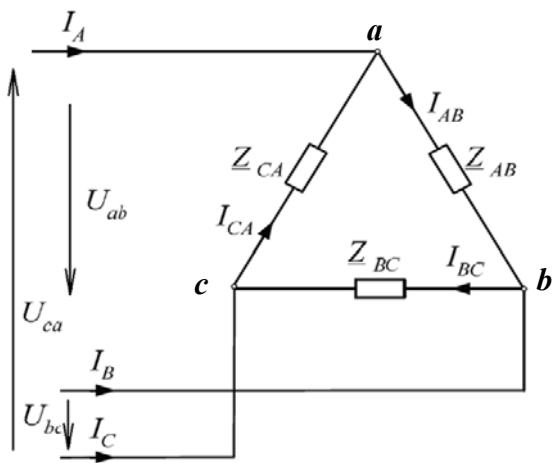


Рисунок 7.1 – Исследуемая трехфазная схема при соединении потребителей треугольником

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:

$$I_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\underline{Z}_{AB}}; \quad I_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{\underline{Z}_{BC}}; \quad I_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{\underline{Z}_{CA}}.$$

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.

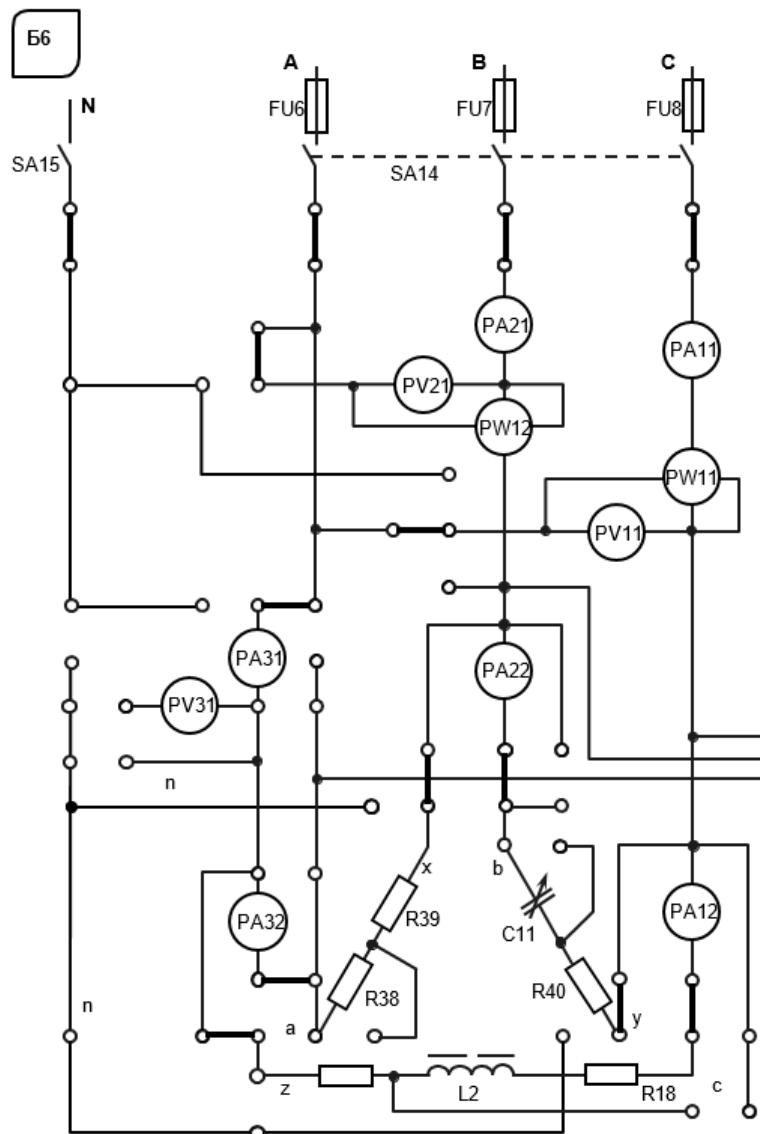


Рисунок 7.2 – Трехфазная электрическая цепь при соединении нагрузки треугольником

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.

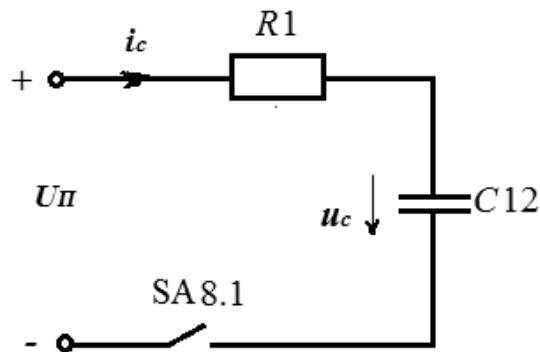


Рисунок 8.1 – Исследуемая схема зарядки конденсатора

При подключении конденсатора $C12$ к источнику питания $U_{пит} = 24$ 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 $\tau = R1 \cdot C12$;

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

8.2 Исследуемые схемы

Схема для экспериментального исследования процесса заряда конденсатора представлена на рисунке 8.2.

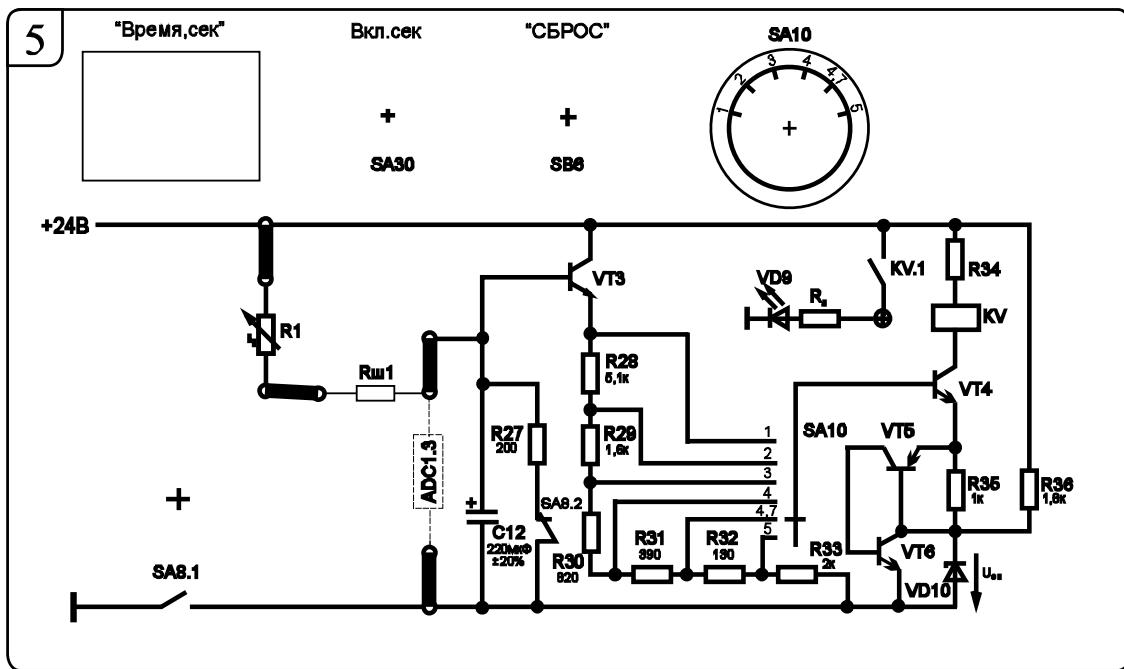


Рисунок 8.2 – Схема для экспериментального исследования процесса заряда конденсатора

Схема представляет собой компаратор, который фиксирует момент достижения конденсатором определенного напряжения и срабатывает в зависимости от положения переключателя SA10 при $1 \cdot U_{on}$, $2 \cdot U_{on}$, $3 \cdot U_{on}$, $4 \cdot U_{on}$, $4,7 \cdot U_{on}$, $5 \cdot U_{on}$ в вольтах. Таким образом, напряжение на емкости определяют как

$$U_C = N \cdot U_{on} + 0,6,$$

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

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

Напряжение на эмиттере транзистора $VT3$ определяют как

$$U_{\text{Э}VT3} = U_C - U_{\text{Б}ЭVT3} = U_C - 0,6.$$

8.3 Порядок выполнения лабораторной работы

Для заданного преподавателем значения постоянной времени τ цепи снять зависимость напряжения от времени заряда конденсатора.

1 Собрать схему, приведенную на рисунке 8.2.

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	$t, \text{ с}$	Эксперимент $U_c, \text{ В}$	Расчет $U_c, \text{ В}$

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 τ 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.

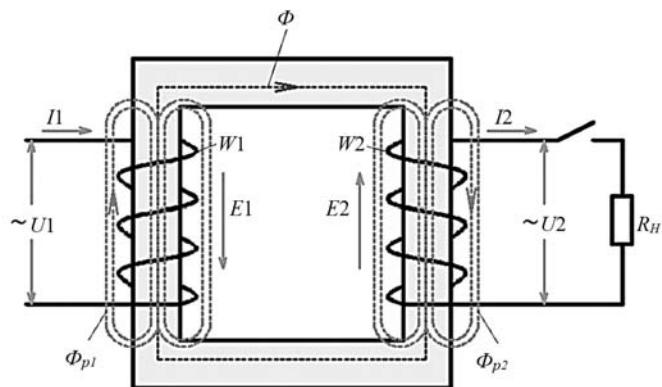


Рисунок 9.1 – Схема трансформатора

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 Φ . 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.

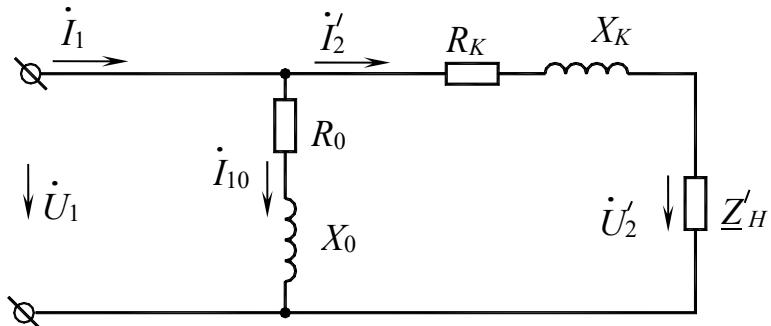
Отношение ЭДС первичной обмотки трансформатора к ЭДС вторичной его обмотки, равное отношению соответствующих чисел витков обмоток, называют коэффициентом трансформации трансформатора:

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

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.

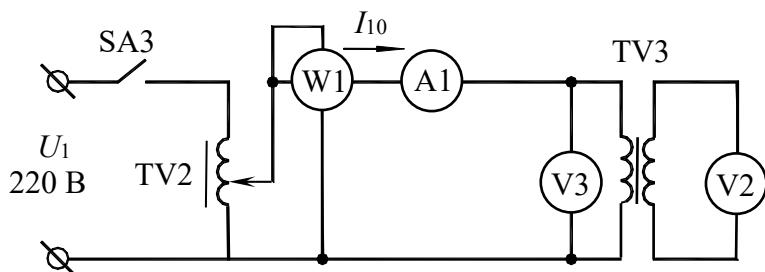


Рисунок 9.3 – Опыт холостого хода трансформатора

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:

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

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

$$R_1 = R'_2 = \frac{R_K}{2}; \quad X_1 = X'_2 = \frac{X_K}{2}; \quad R_2 = \frac{R'_2}{n^2}; \quad X_2 = \frac{X'_2}{n^2}.$$

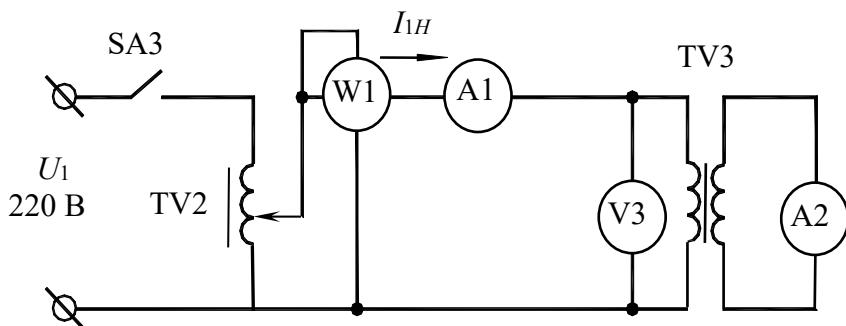


Рисунок 9.4 – Опыт короткого замыкания трансформатора

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 β – 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, $U_{\kappa.a}\% = \frac{I_{1H}R_K}{U_{1H}}100\% = \frac{P_K}{S_H}100\%$;

$U_{k,p}\%$ – реактивная составляющая напряжения короткого замыкания

$$\text{трансформатора, } U_{\kappa.p} \% = \frac{I_{1H} X_K}{U_{1H}} 100 \% .$$

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).

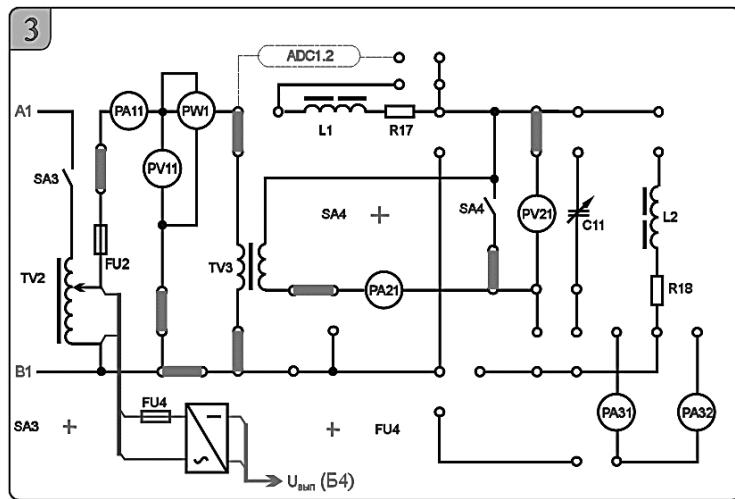


Рисунок 9.5 – Схема исследования трансформатора в режиме холостого хода и короткого замыкания

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

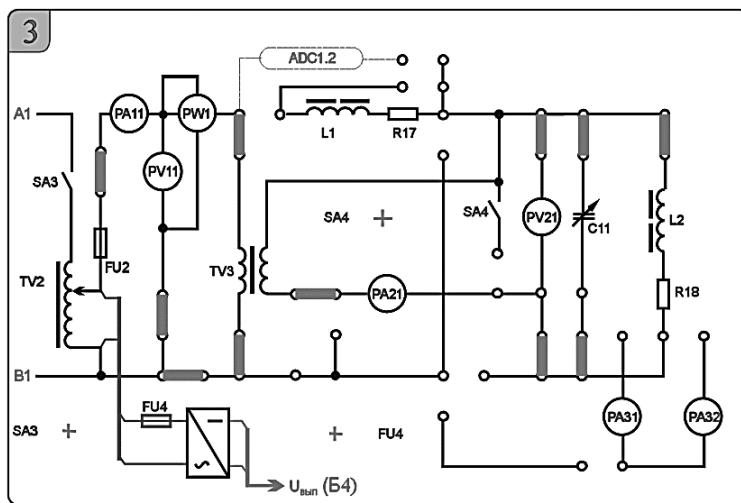


Рисунок 9.6 – Схема исследования однофазного трансформатора

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 $C11$.

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 \leftarrow 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 (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	$\cos \varphi$	φ , 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 (PV11)	I_{1H} , А (PA11)	P_K , Вт (PW1)	U_2 , В (PV21)	S , В·А	Z_K , Ом	X_K , Ом	R_K , Ом	$\cos \varphi$	φ , 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.

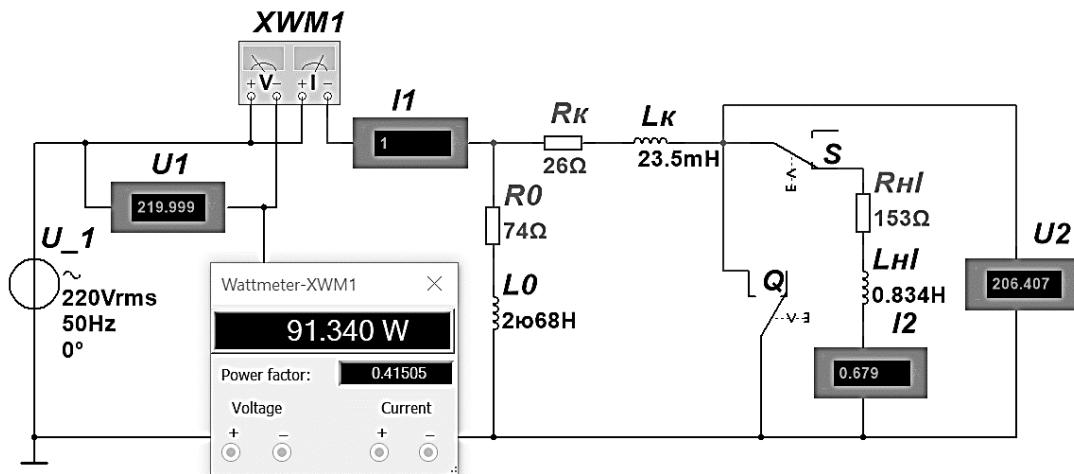


Рисунок 9.7 – Моделирование работы трансформатора в среде Multisim

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, отдаленные 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°. 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 $S = 0,001...0,005$, при номинальной нагрузке $S = 0,03...0,07$.

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, $M_K = \lambda \cdot M_H$;

λ – 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;

ω_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 ротора, $R'_2 = n^2 R_2$;

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_{ϕ} 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 АИР56А4У3; $P_H = 0,12$ кВт; $\eta_H = 58\%$; $\cos \varphi = 0,66$; $n_H = 1350$ мин⁻¹; $I_H = 0,44$ А; $U_H = 220$ В; $\lambda = M_K/M_H = 2,2$; $K_i = I_P/I_H = 5$; $K_P = M_P/M_H = 1,2$.

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

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

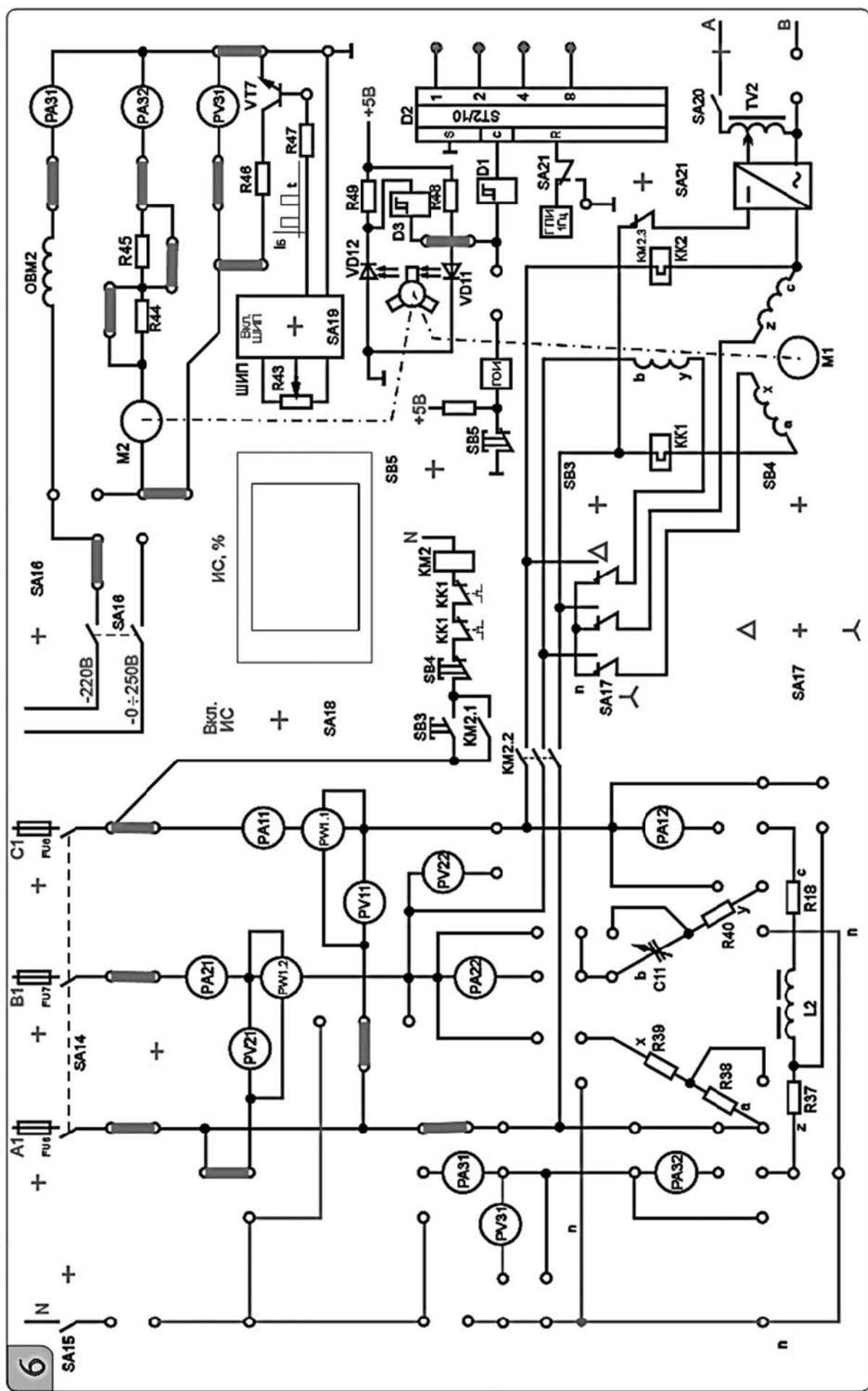


Рисунок 10.1 – Схема исследования трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

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_{1L}), PW1 ($P1$), PA31 (I_B), PA32 (I_α), ИС.
- 15 Вернуть рукоятку резистора R_{43} в начальное положение «min».
- 16 Считая M_0 независимым от частоты вращения и изменения I_α (PA32), с помощью R_{43} снять показания приборов PA11 (I'_1), PV11 (U_{1L}), PW1 ($P1$), PA31(I_B), PA32(I_α), ИС с различной величиной нагрузки на валу. Данные опыта записать в таблицу 10.1.

Таблица 10.1 – Результаты исследования

Номер опыта	$n, \%$	I_α (PA32), А	$P1$ (PW1), Вт	$U_{1\phi} \left(\frac{PV11}{\sqrt{3}} \right)$, В	I_ϕ (PA11), А
1					
2					
3					
4					
5					

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

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

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

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

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	η , %	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, *a* 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.

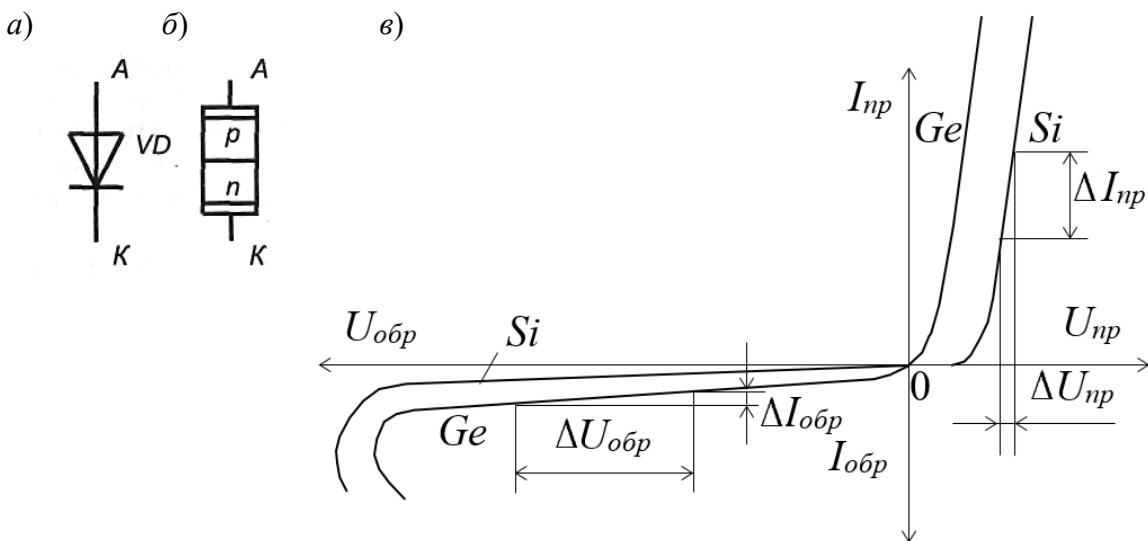


Рисунок 11.1 – Условное обозначение (*а*), структура (*б*) и статическая вольт-амперная характеристика (*в*) полупроводникового диода

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

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

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

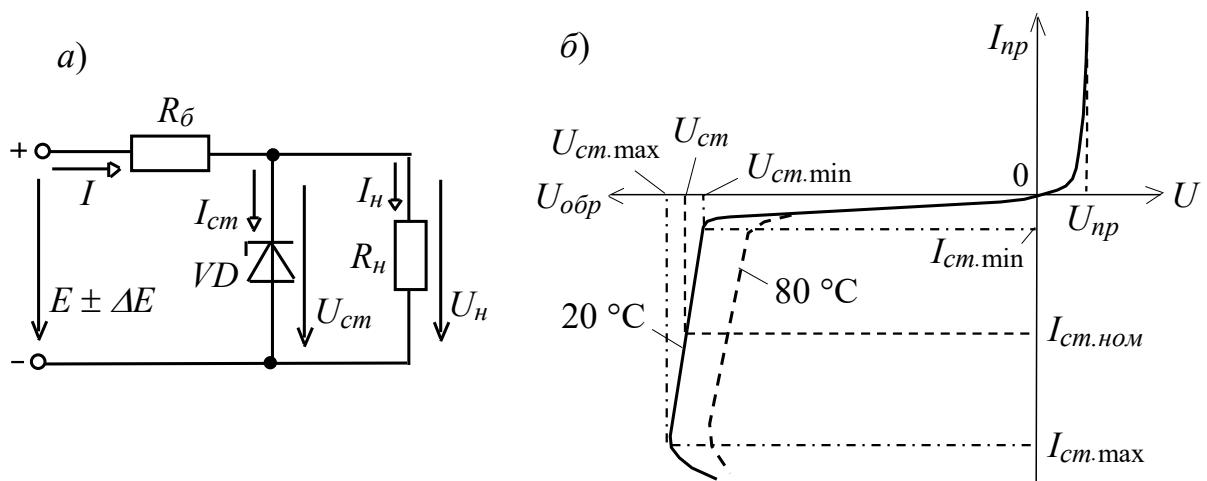


Рисунок 11.2 – Параметрический стабилизатор (а) и статическая вольт-амперная характеристика (б) стабилитрона

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, изменения ЭДС источников питания.

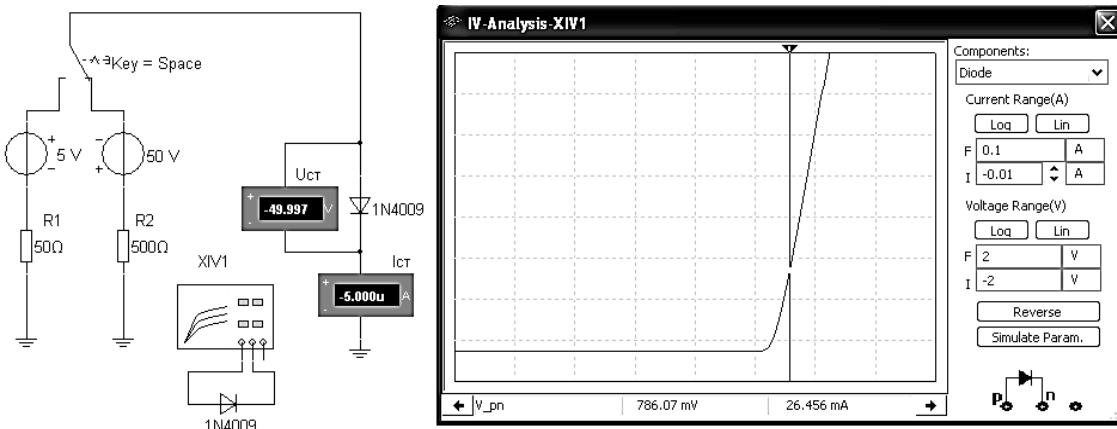


Рисунок 11.3 – Схема для снятия ВАХ в среде Multisim

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 харктериографа 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

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

Результаты занести в таблицу 11.1.

Таблица 11.1 – Результаты измерений и вычислений

Результат измерения						Результат вычисления		
U_{np} , В	I_{np} , мА	$U_{обр}$, В	$I_{обр}$, мА	ΔU_{np} , В	ΔI_{np} , мА	R_{np} , 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	$U_{ст\ nom}$, 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_{cp} , В	R_H , Ом	I_H , мА	U_{cm} , В	I_{cm} , мА	R_b , Ом

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

6 По полученным ВАХ стабилитрона определить U_{cm} , I_{cm} , 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.

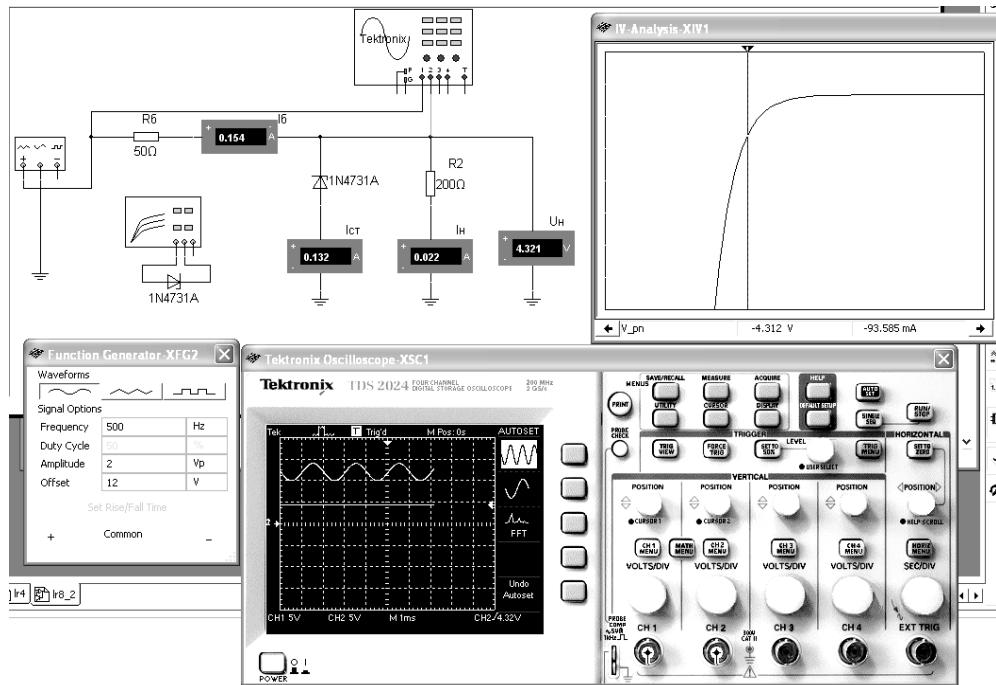


Рисунок 11.4 – Схема для снятия ВАХ стабилитрона и исследования параметрического стабилизатора напряжения в среде Multisim

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

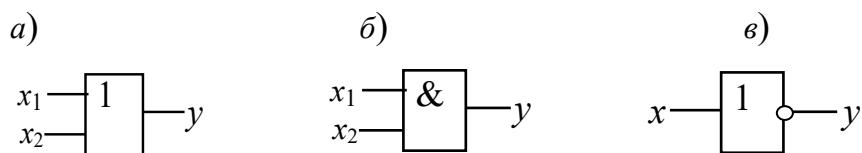
- 1 Приведите основные параметры выпрямительного диода и стабилитрона.
- 2 Опишите порядок получения ВАХ диода и стабилитрона по результатам моделирования и экспериментально.
- 3 Как по ВАХ определить статические и динамические сопротивления диода и стабилитрона?

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

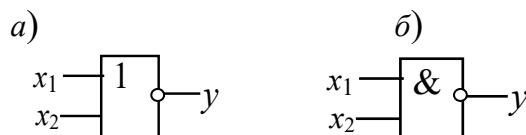
В ЭВМ, импульсных и других цифровых устройствах широко применяются логические элементы. Каждый логический элемент выполняет вполне определенную логическую операцию. Основными логическими операциями являются: логическое отрицание НЕ (инверсия), логическое сложение ИЛИ (дизъюнкция), логическое умножение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

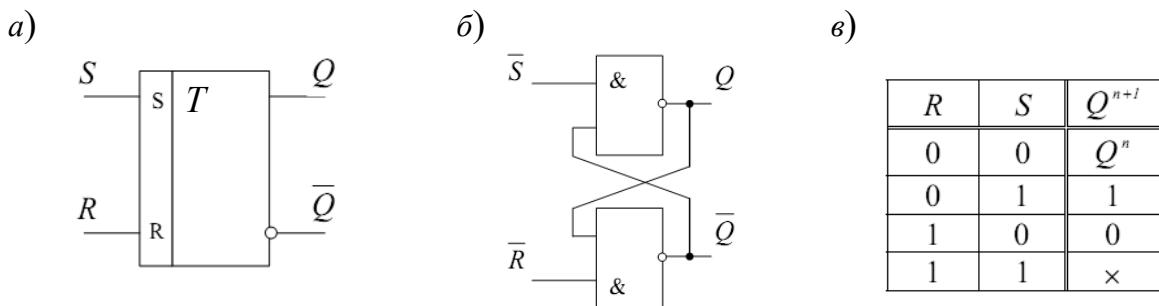
входов зависит от структуры и функций, выполняемых триггером. Например, асинхронные *RS*-триггеры имеют два входа: вход *S* установки в единичное состояние прямого выхода *Q* и вход *R* установки в нулевое состояние выхода *Q*. Синхронные триггеры для занесения в них информации, помимо информационных 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.

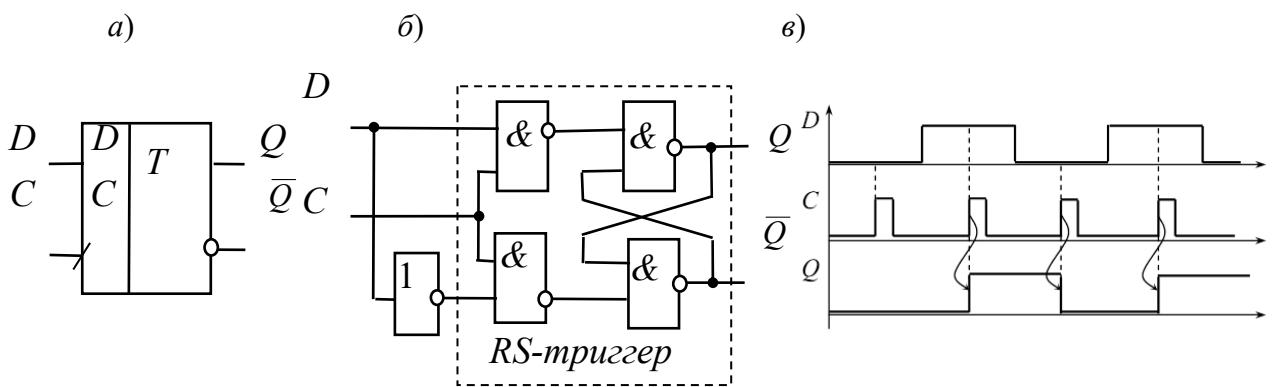
T-триггеры иначе называются счетными и применяются для построения счетчиков и делителей частоты. Такой триггер имеет один тактовый вход и его состояние меняется каждый раз при подаче счетного импульса $T = 1$ и остается неизменным при $T = 0$. Таблица состояния триггера, его обозначение и диаграммы работы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



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

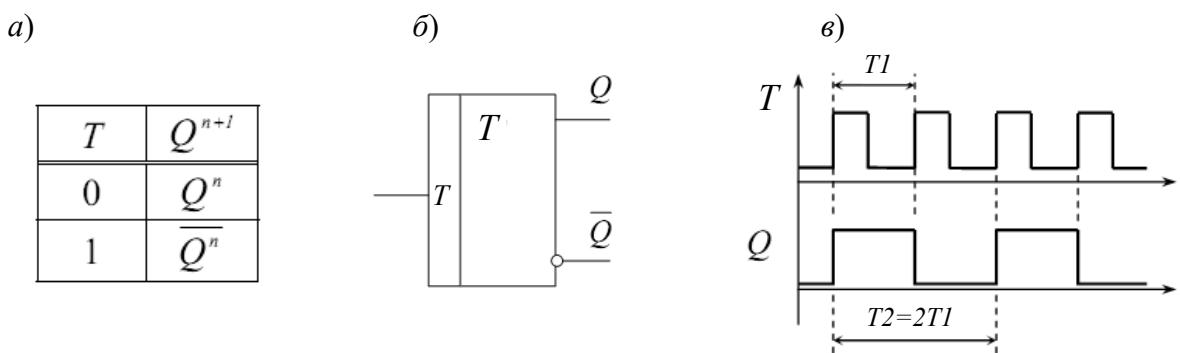
Рисунок 12.3 – Асинхронный *RS*-триггер

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.



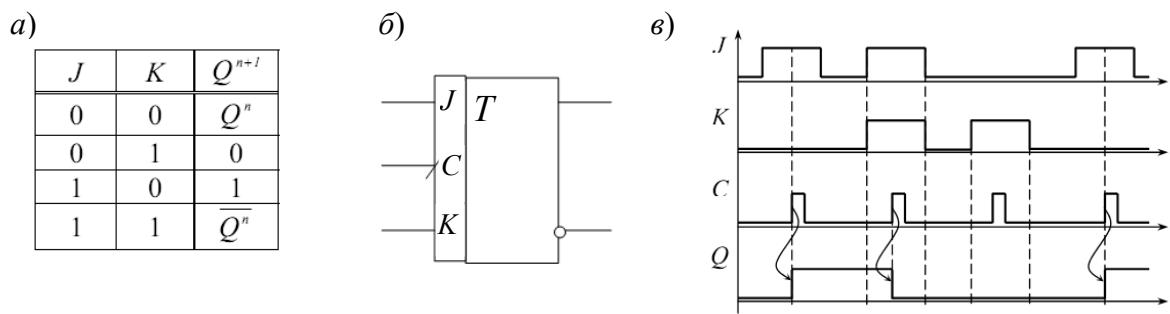
а – условное графическое изображение; б – схема реализации D -триггера на базовых элементах И-НЕ; в – временная диаграмма, иллюстрирующая работу триггера

Рисунок 12.4 – D -триггер



а – таблица истинности; б – условное графическое изображение; в – временная диаграмма, иллюстрирующая работу триггера

Рисунок 12.5 – T -триггер



а – таблица истинности; б – условное графическое изображение; в – 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 [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	

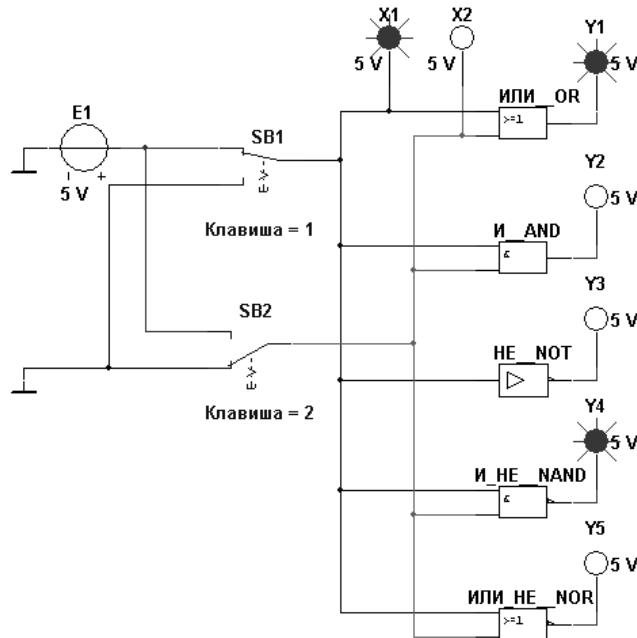


Рисунок 12.7 – Схема для исследования основных и базовых логических элементов

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 $f_e = 500$ кГц); логический анализатор XLA1.

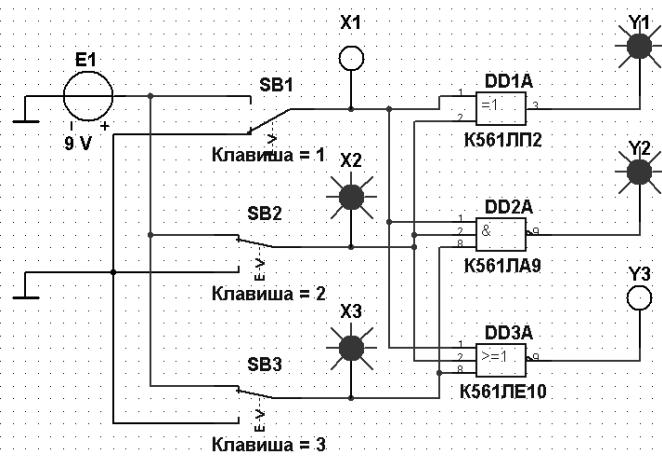


Рисунок 12.8 – Схема для исследования логических элементов серии K561

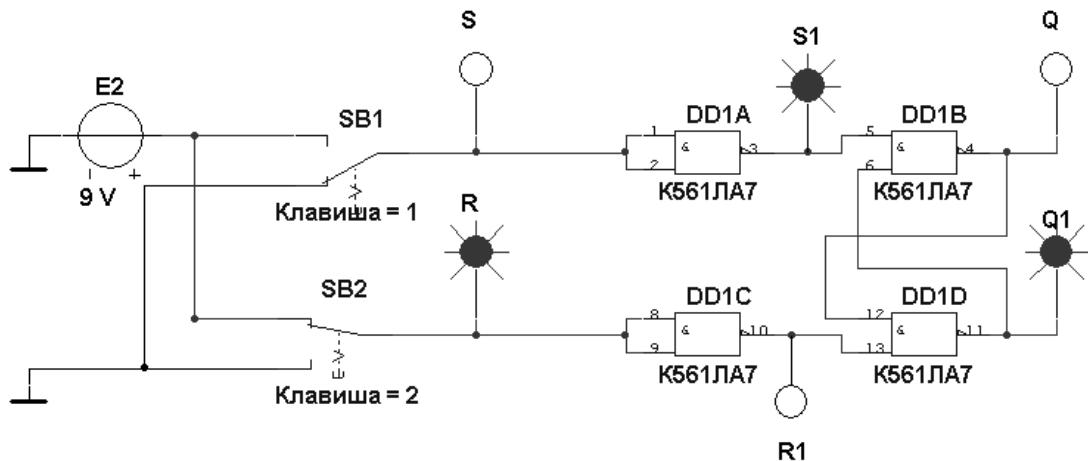


Рисунок 12.9 – Схема *RS*-триггера на логических элементах серии K561

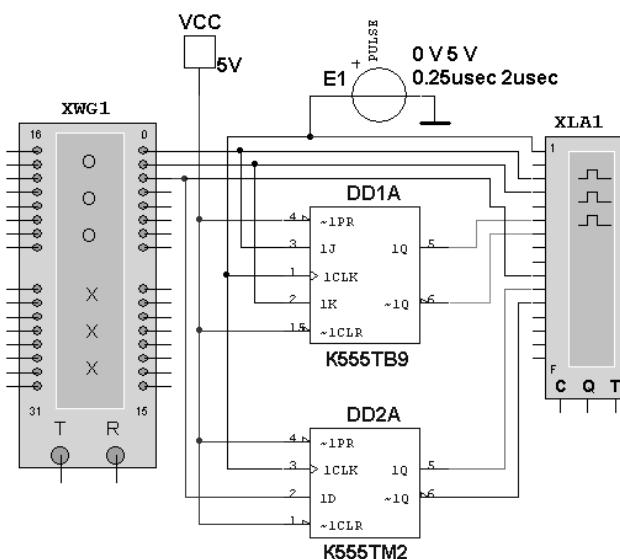


Рисунок 12.10 – Схема для исследования JK - и D -триггеров

На 1CLR- и 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 трехразрядные кодовые комбинации (рисунок 12.11): 010, 100, 111, 001, 100, 010.

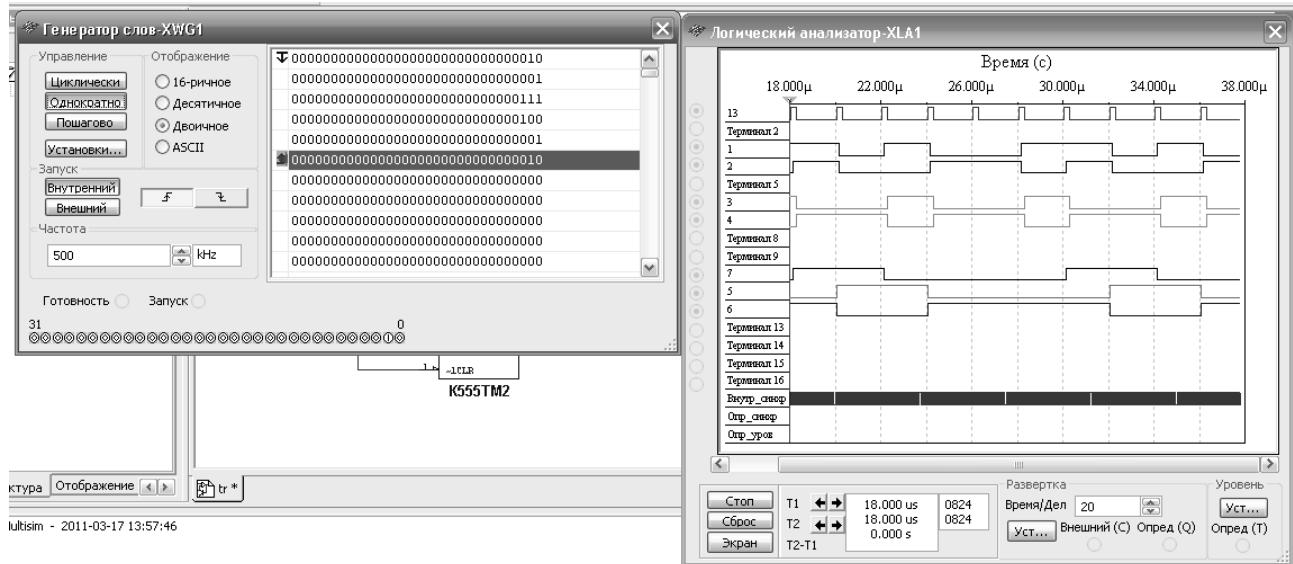


Рисунок 12.11 – Цифровые комбинации и временные диаграммы триггеров

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.