

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

*Методические рекомендации
к лабораторным работам для студентов
направления подготовки 15.03.01 «Машиностроение»
очной формы обучения*



Могилев 2021

УДК 621.313
ББК 32.85
Э45

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «15» декабря 2020 г.,
протокол № 4

Составители: канд. техн. наук, доц. С. В. Болотов;
ст. преподаватель И. В. Курлович;
канд. техн. наук, доц. А. А. Афанасьев

Рецензент канд. техн. наук, доц. Б. Б. Скарыно

Методические рекомендации предназначены для студентов очной формы
обучения направления подготовки 15.03.01 «Машиностроение» для выполнения
лабораторных работ по дисциплине «Электротехника и электроника».

Учебно-методическое издание

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Ответственный за выпуск	С. С. Сергеев
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	Е. В. Ковалевская

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, 2021

Содержание

1 Лабораторная работа № 1. Краткая характеристика целей и задач лабораторных исследований, ознакомление с оборудованием лаборатории, правилами техники безопасности, рациональными приемами работы и отчетности	4
2 Лабораторная работа № 2. Исследование режимов работы и методов расчета линейных цепей постоянного тока с одним источником питания	5
3 Лабораторная работа № 3. Определение параметров и исследование режимов работы электрической цепи переменного тока с последовательным соединением индуктивности, резистора и конденсатора	7
4 Лабораторная работа № 4. Определение параметров и исследование режимов работы трехфазной цепи при соединении потребителей звездой	10
5 Лабораторная работа № 5. Определение параметров и исследование режимов работы трехфазной цепи при соединении потребителей треугольником	13
6 Лабораторная работа № 6. Исследование процесса заряда конденсатора от источника постоянного напряжения при ограничении тока с помощью резистора	14
7 Лабораторная работа № 7. Определение параметров и основных характеристик однофазного трансформатора	17
8 Лабораторная работа № 8. Исследование асинхронного трехфазного двигателя с короткозамкнутым ротором	20
9 Лабораторная работа № 9. Исследование работы выпрямительного диода	24
10 Лабораторная работа № 10. Исследование характеристик биполярного транзистора	27
11 Лабораторная работа № 11. Исследование характеристик полевых транзисторов с управляющим переходом и изолированным затвором	31
12 Лабораторная работа № 12. Исследование транзисторных ключей	34
13 Лабораторная работа № 13. Исследование усилителя на биполярном транзисторе	39
14 Лабораторная работа № 14. Исследование работы однофазных неуправляемых выпрямителей	43
Список литературы	47

1 Лабораторная работа № 1. Краткая характеристика целей и задач лабораторных исследований, ознакомление с оборудованием лаборатории, правилами техники безопасности, рациональными приемами работы и отчетности

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, которой 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 переведении всех выключателей в положение «Отключено».

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

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

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

8 При выполнении лабораторных работ в лаборатории запрещается:

– без разрешения преподавателя перемещать приборы и аппаратуру, выносить их из лаборатории;

– производить какие-либо работы по устранению неисправностей лабораторного оборудования;

– оставлять без присмотра электроприборы, включенные в сеть;

– загромождать посторонними предметами рабочие места, находиться в лаборатории в верхней одежде.

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

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

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

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

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

2.1 Основные теоретические сведения

2.1.1 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 2.1).

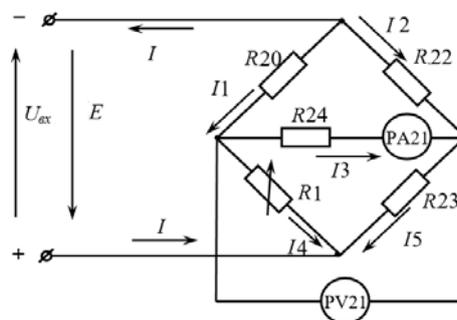


Рисунок 2.1 – Мост постоянного тока

2.1.2 Условие равновесия моста постоянного тока

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

Откуда

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

при значении тока $I3 = 0$.

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

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

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

$$U_{\text{вых}} = I3 \cdot R24;$$

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

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

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

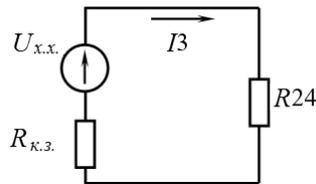


Рисунок 2.2 – Эквивалентная схема электрической цепи для расчёта тока $I3$

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

$$R_{к.з} = \frac{U_{x.x}}{I_{к.з}}$$

Исследуемые схемы

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

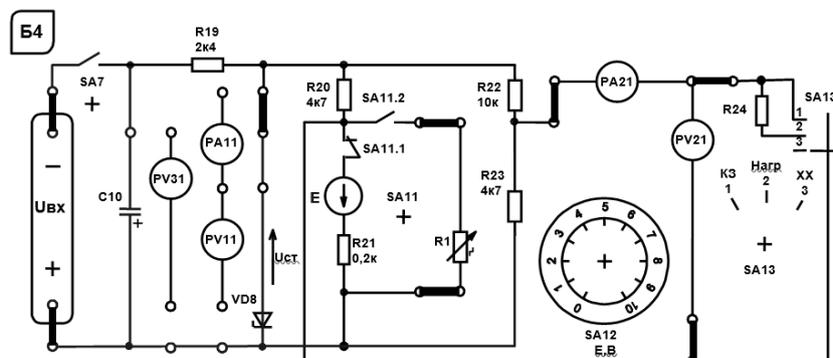


Рисунок 2.3 – Схема для экспериментального исследования электрической цепи постоянного тока с одним источником питания

Измерительный мост включается тумблером SA7.

Технические данные измерительного моста указаны на стенде.

2.2 Порядок выполнения лабораторной работы

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

2.2.2 Построить зависимость $U_{\text{вых}} = f(R1)$.

2.2.3 При максимальном $U_{\text{вых}}$ рассчитать сопротивление резистора $R24$.

2.2.4 Методом эквивалентного генератора рассчитать величину выходного напряжения моста при значении сопротивления $R1$, заданном преподавателем.

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

2.2.4.2 Провести моделирование работы схемы (см. рисунок 2.1) в среде Multisim.

2.2.4.3 Сделать выводы по результатам работы.

2.3 Содержание отчёта

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

Контрольные вопросы

1 Охарактеризуйте мостовую схему постоянного тока.

2 Порядок расчёта электрических цепей методом эквивалентного генератора напряжения.

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 последовательно соединёнными резистивным, индуктивным и ёмкостным элементами приведена на рисунке 3.1.

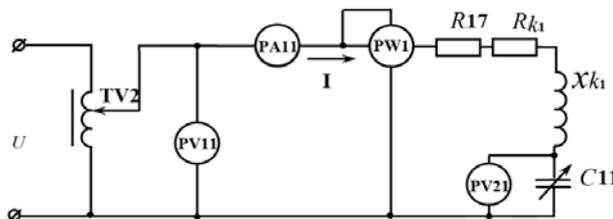


Рисунок 3.1 – Электрическая цепь переменного тока с последовательно соединёнными R -, L -, C -элементами

Для определения параметров схемы замещения катушки индуктивности с магнитопроводом L_{K1} и R_{K1} в номинальном режиме $I_H = 1,0$ 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:

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

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:

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

3.1.3 Коэффициент мощности цепи

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

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

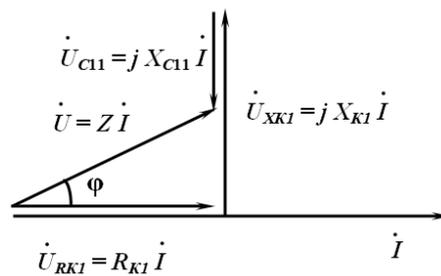


Рисунок 3.2 – Векторная диаграмма

Исследуемые схемы

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

3.2 Порядок выполнения лабораторной работы

3.2.1 Собрать на стенде схему (см. рисунок 3.3) для расчета параметров схемы замещения катушки индуктивности L_{K1} и R_{K1} для номинального режима работы $I_H = 1,0$ А, определить значения этих параметров.

3.2.2 Определить величину емкости $C11$ конденсатора, при которой в цепи наступает резонанс напряжений.

3.2.3 Снять зависимости $I = f(C11)$ и $\cos \varphi = f(C11)$ при $U_{\text{мин}}$.

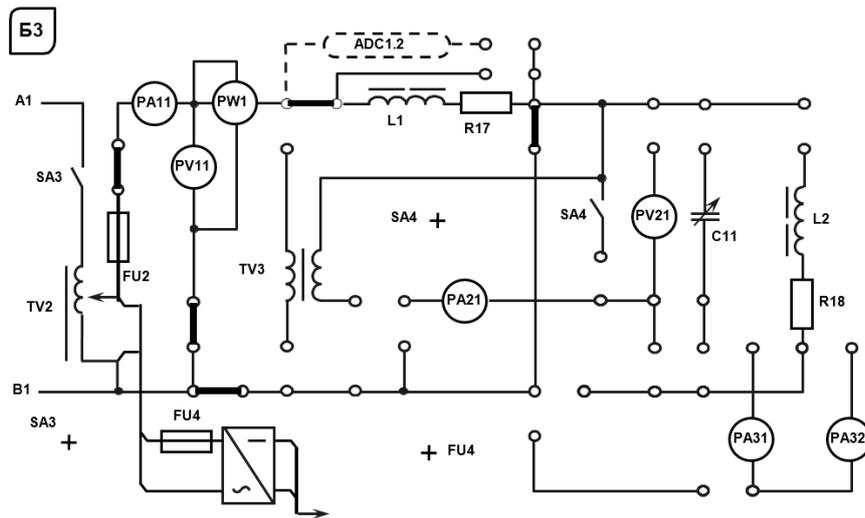


Рисунок 3.3 – Схема для экспериментального исследования параметров схемы замещения катушки индуктивности

3.2.4 Построить векторную диаграмму напряжений и тока.

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

3.2.6 Сделать выводы по результатам работы.

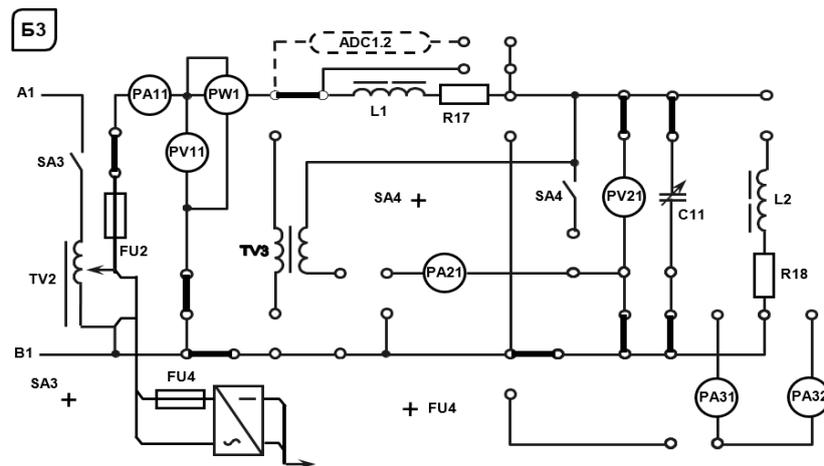


Рисунок 3.4 – Схема для экспериментального исследования резонанса напряжений

3.3 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 Каково условие резонанса напряжений?

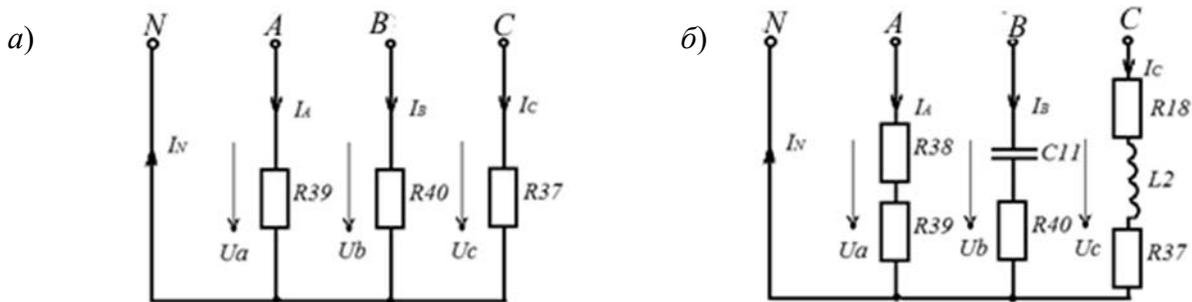
2 Чему равен коэффициент мощности цепи в режиме резонанса, почему?

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 трехфазных цепей при соединении потребителей звездой.

Исследуемые схемы

В 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

4.1 Основные теоретические сведения

4.1.1 Исследование симметричной резистивной нагрузки при наличии нейтрального провода.

Для получения симметричной нагрузки $R_{37} = R_{39} = R_{40}$ необходимо переключателями закоротить следующие элементы: R_{38} , C_{11} , L_{K2} и R_{18} (рисунок 4.2).

Измерить фазные напряжения U_b и U_c при помощи вольтметров PV_{21} , PV_{11} и фазные токи в фазах B и C при помощи амперметров PA_{21} и PA_{11} .

Убедиться в отсутствии тока в нейтральном проводе: $I_N = 0$ (PA_{31}).

Определить значения сопротивлений резисторов по закону Ома:

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

Мощность, потребляемую симметричной нагрузкой, найти по формуле

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

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

$$\begin{aligned} Z_a &= R_{38} + R_{39}; \\ Z_b &= \sqrt{R_{40}^2 + X_{C_{11}}^2}; \\ Z_c &= \sqrt{(R_{37} + R_{18})^2 + X_{L_2}^2}. \end{aligned}$$

Ток в нейтральном проводе

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

4.2 Порядок выполнения лабораторной работы

4.2.1 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 4.1 (симметричная нагрузка).

4.2.2 Рассчитать сопротивления фаз симметричной нагрузки (п. 4.1.1).

4.2.3 Рассчитать значения емкости C_{11} и сопротивления резистора R_{38} для обеспечения равномерной нагрузки (п. 4.1.2).

4.2.4 Исследовать равномерную нагрузку с нейтральным проводом, измерив фазные напряжения, мощность и ток в нейтральном проводе, подключив его тумблером SA_{15} . Рассчитать комплексные значения токов в фазах A , B , C и определить ток в нейтральном проводе. Сравнить расчетные значения тока с экспериментальными. Заполнить таблицу 4.1 (равномерная нагрузка).

Таблица 4.1 – Результаты измерений

$U_A, В$	$U_B, В$ (PV_{21})	$U_C, В$ (PV_{11})	$I_A, А$	$I_B, А$ (PA_{21})	$I_C, А$ (PA_{11})	$I_N, А$ (PA_{31})	$P, Вт$
Симметричная нагрузка эксперимент							
Моделирование							
Равномерная нагрузка эксперимент							
Расчёт							
Моделирование							

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

4.2.6 Провести моделирование работы схемы (рисунок 4.1) в среде Multisim.

4.2.7 Сделать выводы по результатам работы.

4.3 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 Каково назначение нулевого провода?

2 Как вычислять мощность, потребляемую трёхфазной цепью при соединении приёмников звездой?

5 Лабораторная работа № 5. 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.

Исследуемые схемы

В лабораторной работе исследуются трехфазные схемы с симметричной, несимметричной и равномерной нагрузками при соединении потребителей треугольником (рисунки 5.1 и 5.2).

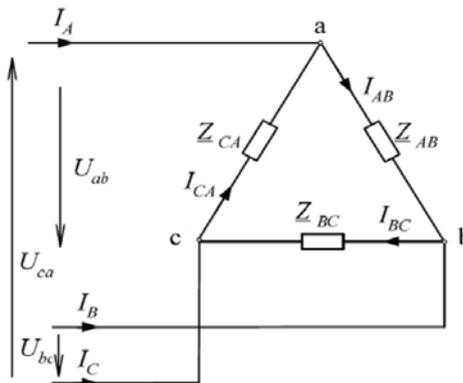


Рисунок 5.1 – Исследуемая трёхфазная схема при соединении потребителей треугольником

5.1 Порядок выполнения лабораторной работы

5.1.1 Установить равномерную нагрузку во всех трех фазах. Определить активную мощность нагрузки и линейный ток в линии С нагрузки. Напряжение U_{ab} измерить прибором $PV21$, напряжения U_{bc} , U_{ac} измерить прибором $PV11$.

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

Ток в фазах определяют по закону Ома для каждой фазы:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}}; \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}}; \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}}.$$

Линейные токи определяют по первому закону Кирхгофа:

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

5.1.3 Построить векторную диаграмму токов и напряжений.

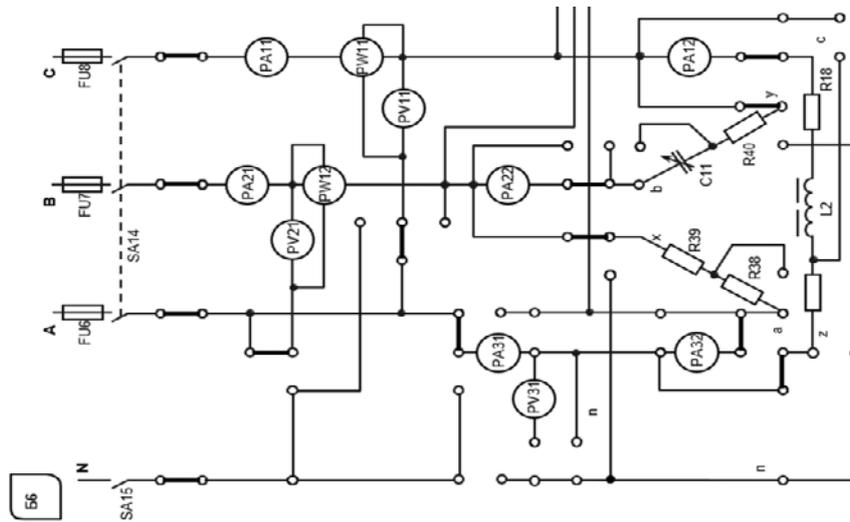


Рисунок 5.2 – Трёхфазная электрическая цепь при соединении нагрузки треугольником

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

5.1.5 Сделать выводы по результатам работы.

5.2 Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать цель работы, схему трёхфазной цепи, основные расчётные формулы, результаты эксперимента, моделирования и расчёта, векторную диаграмму напряжений и токов, выводы по работе.

Контрольные вопросы

1 Расчёт трёхфазной цепи переменного тока при соединении треугольником с симметричной нагрузкой.

2 Как изменятся фазные токи при отключении одного из линейных проводов в симметричном приемнике?

6 Лабораторная работа № 6. Исследование процесса заряда 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.

6.1 Основные теоретические сведения

Схема для исследования переходного процесса зарядки конденсатора $C12$ при ограничении тока с помощью сопротивления $R1$ приведена на рисунке 6.1.

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 $\tau = R1 \cdot C12$.

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

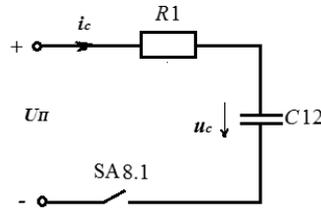


Рисунок 6.1 – Исследуемая схема зарядки конденсатора

Исследуемые схемы

Схема для экспериментального исследования процесса заряда конденсатора представлена на рисунке 6.2.

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

$$U_C = N \cdot U_{оп} + 0,6,$$

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

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

Напряжение на эмиттере транзистора $VT3$ определяют как:

$$U_{ЭVT3} = U_C - U_{БЭVT3} = U_C - 0,6.$$

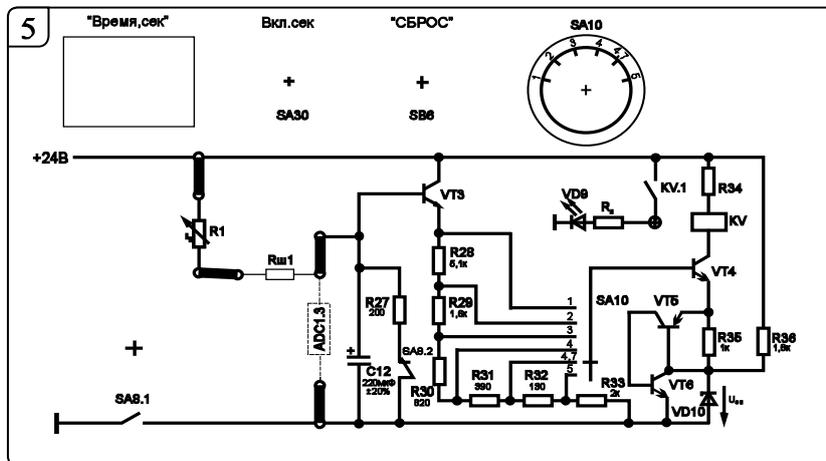


Рисунок 6.2 – Схема для экспериментального исследования процесса заряда конденсатора

6.2 Порядок выполнения лабораторной работы

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

6.2.1 Собрать схему, приведенную на рисунке 6.2.

6.2.2 Установить заданное преподавателем сопротивление R_1 в блоке 8.

6.2.3 Тумблером SA30 включить секундомер.

6.2.4 Сбросить значение секундомера в нулевые показания кнопкой SB6.

6.2.5 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 6.1.

Таблица 6.1 – Результаты измерений

Положение переключателя SA10	t , с	Эксперимент U_c , В	Расчёт U_c , В

6.2.6 Выключить тумблер SA8.1.

6.2.7 Сбросить показания секундомера кнопкой SB6.

6.2.8 Провести остальные опыты аналогично (пункты 6.2.5–6.2.7) для всех остальных положений тумблера SA10.

6.2.9 Для полученных значений t рассчитать напряжения на конденсаторе и сравнить с экспериментальными. Данные расчетов занести в таблицу 6.1.

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

6.2.11 Воспользовавшись полученной при эксперименте кривой заряда C12, определить постоянные времени τ и сравнить с расчетным.

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

6.2.13 Сделать выводы по результатам работы.

6.3 Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать цель работы, схему исследования процесса заряда конденсатора, основные расчётные формулы, результаты эксперимента, моделирования и расчёта (см. таблицу 6.1), графики заряда конденсатора с определённой постоянной времени, выводы по работе.

Контрольные вопросы

1 Расчёт переходного процесса зарядки конденсатора от источника постоянного напряжения.

2 Порядок измерения напряжения при зарядке конденсатора компенсационным методом.

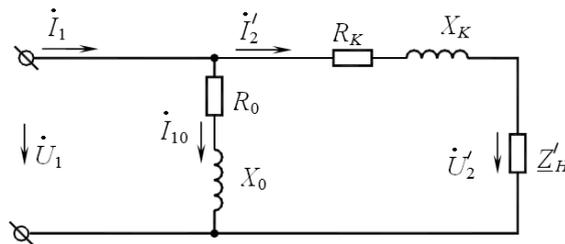
7 Лабораторная работа № 7. Определение параметров и основных характеристик однофазного трансформатора

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

7.1 Основные теоретические сведения

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

Схема замещения трансформатора представлена на рисунке 7.1.



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 7.1 – Схема замещения однофазного трансформатора

Схема опыта холостого хода представлена на рисунке 7.2.

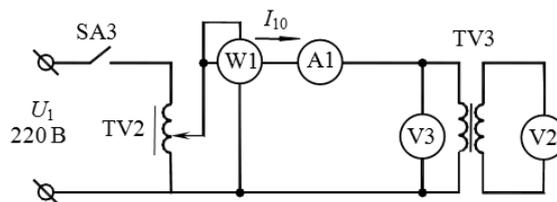


Рисунок 7.2 – Опыт холостого хода трансформатора

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 7.3.

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

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

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

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

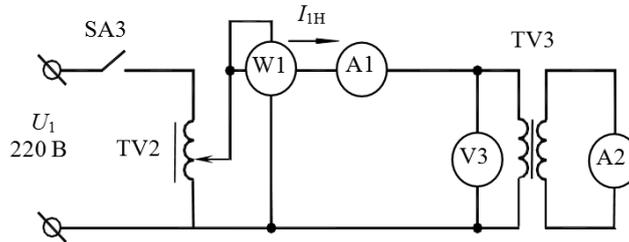


Рисунок 7.3 – Опыт короткого замыкания трансформатора
КПД трансформатора

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

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

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

Исследуемые схемы

Исследование однофазного трансформатора производится по схеме, представленной на рисунке 7.4.

Таблица 7.1 – Показания приборов в опыте холостого хода трансформатора

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	$\cos \varphi$,	φ , град
220									

7.2.5 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 7.2.

Таблица 7.2 – Показания приборов 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	$\cos \varphi$	φ , град
	0,8								

7.2.6 Измерить вторичное напряжение при нагрузке R18, L_2 (см. рисунок 7.5).

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

7.2.8 Провести моделирование работы трансформатора в среде Multisim.

7.2.9 Сделать выводы по результатам работы.

7.3 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 7.1 и 7.2), 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.

8 Лабораторная работа № 8. 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.

8.1 Основные теоретические сведения

Частота вращающегося магнитного поля статора АД

$$n_0 = 60f_1 / p,$$

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.).

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

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

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, $M_K = \lambda \cdot M_H$ (здесь λ – коэффициент перегрузки двигателя, $\lambda = 1,5-2,5$);

M_K – 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.

Коэффициент мощности двигателя

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

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

Исследуемые схемы

Для выполнения лабораторной работы собирается схема, представленная на рисунке 8.1.

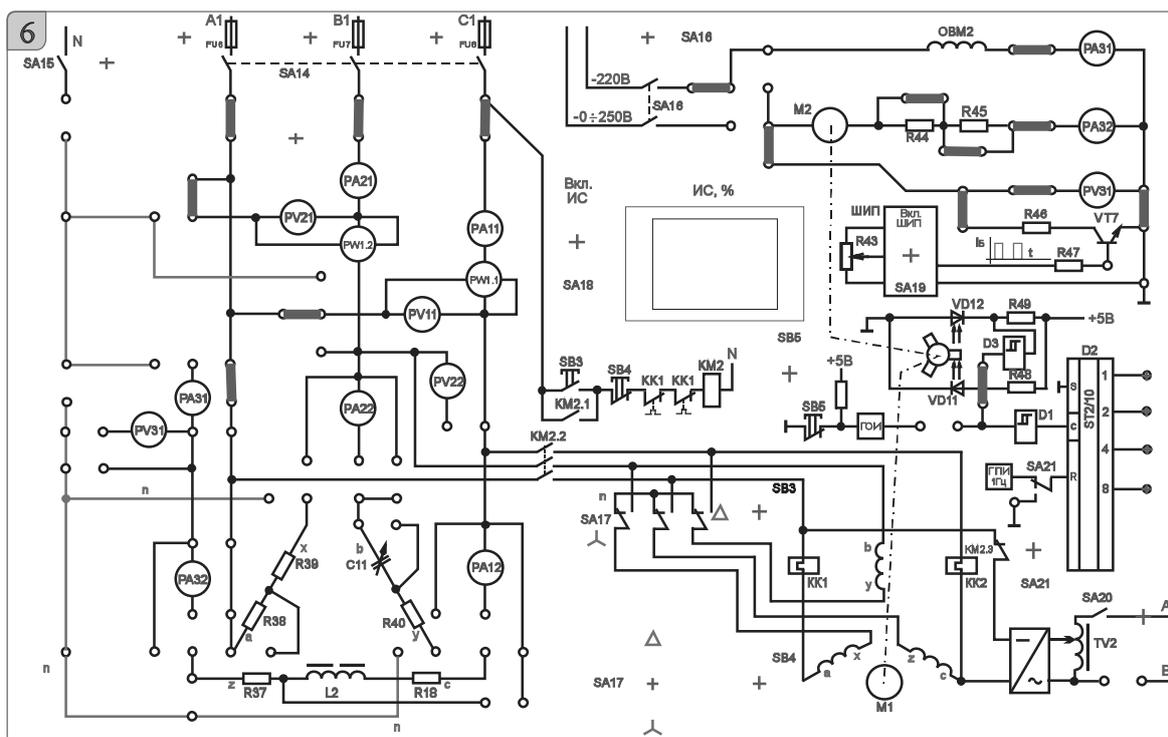


Рисунок 8.1 – Схема исследования трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Паспортные данные асинхронного двигателя следующие.

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; $\lambda = M_K/M_H = 2,2$; $K_i = I_{II}/I_H = 5$; $K_{II} = M_{II}/M_H = 1,2$.

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.

8.2 Порядок выполнения лабораторной работы

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

Номинальный момент двигателя

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

8.2.2 Собрать схему, приведенную на рисунке 8.1.

8.2.14 По результатам измерений и расчетов построить:

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

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

8.2.16 Сделать выводы по результатам работы.

8.3 Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать цель работы, основные расчётные формулы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, результаты эксперимента и расчёта (см. таблицы 8.1, 8.2), 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 трёхфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

2 Механическая характеристика трёхфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

3 Рабочие характеристики трёхфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

9 Лабораторная работа № 9. Исследование работы выпрямительного диода

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

9.1 Основные теоретические сведения

Полупроводниковый прибор, который имеет два электрода и один (или несколько) р–n-переход, называется диодом.

На рисунке 9.1, а приведено условное графическое обозначение полупроводникового диода на электрических схемах, его структура – на рисунке 9.1, б. Электрод диода, подключенный к области р, называют анодом, а электрод, подключенный к области n, – катодом [5 – 8].

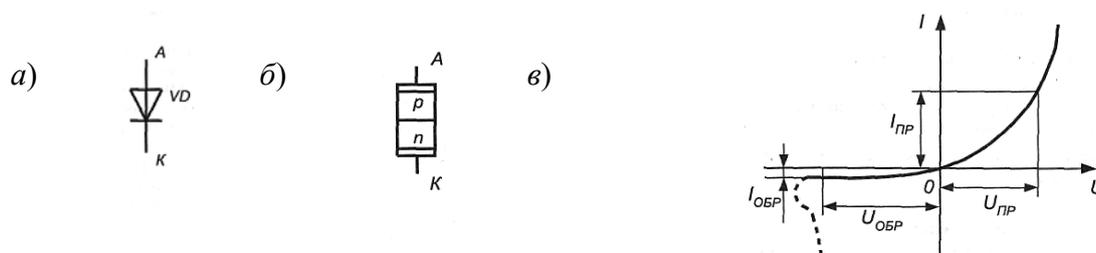


Рисунок 9.1 – Условное обозначение (а), структура (б) и статическая вольтамперная характеристика (в) полупроводникового диода

Выпрямительные диоды предназначены для преобразования переменного тока в постоянный. Они являются одним из наиболее распространённых типов

9.2 Порядок выполнения лабораторной работы

9.2.1 Выписать из справочника основные параметры заданного преподавателем выпрямительного диода [9].

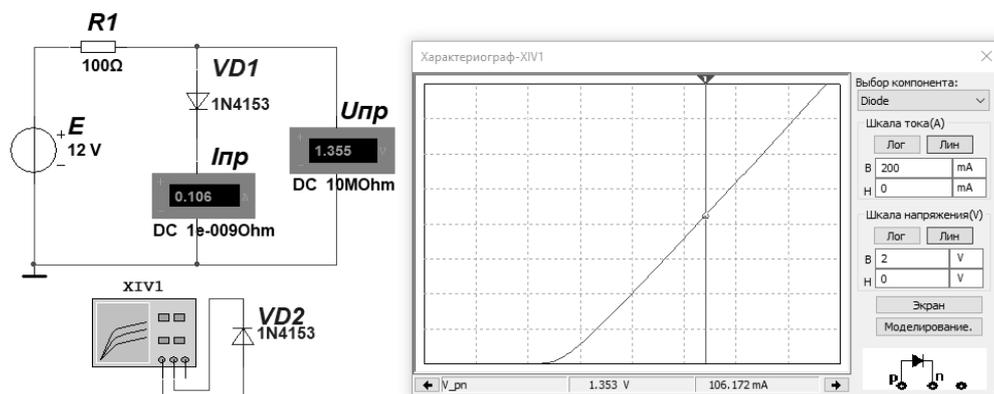


Рисунок 9.2 – Схема для снятия ВАХ в среде Multisim

9.2.2 Рассчитать параметры и выбрать ограничивающее сопротивление R_1 для исследования параметров выпрямительного диода (см. рисунок 9.2):

$$R_1 = \frac{E}{I_{PP\max} / 2}, \quad P_{R1} = \frac{(E - U_{PP})^2}{R_1}.$$

9.2.3 Для построения вольтамперной характеристики диода (ВАХ) в программе Multisim собрать схему, указанную на рисунке 9.2 [2,7]. Осуществить моделирование её работы, изменяя ЭДС источника питания. Для снятия обратной ветви ВАХ необходимо изменить полярность источника питания, ограничивающее сопротивление R_1 взять порядка 1 кОм. ВАХ можно получить с помощью характериографа XIV1 (см. рисунок 9.2).

9.2.4 Для экспериментального получения ВАХ диода на макетной плате из полученного набора элементов собрать схему, приведенную на рисунке 9.2.

Постоянное напряжение на вход схемы подаётся от источника питания НУ3002-D2. Прямое падение напряжения на диоде U_{PP} поступает на дифференциальный канал АП1, а напряжение на ограничивающем резисторе R_1 на дифференциальный канал АИ2 устройства сбора данных NI USB-6009. Для определения тока I_{PP} необходимо применить закон Ома:

$$I_{PP} = \frac{U_{R1}}{R_1} = \frac{E - U_{PP}}{R_1}.$$

9.2.5 По полученным ВАХ диода определить:

– прямое статическое сопротивление диода при прямом токе, равном $0,5 I_{PP\max}$:

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

– обратное статическое сопротивление диода при $U_{OBR} = 0,5 U_{OBR\max}$:

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

– прямое дифференциальное сопротивление диода

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

Результаты занести в таблицу 9.1.

9.2.6 Сделать выводы по результатам работы.

9.3 Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать цель работы, схемы для моделирования работы выпрямительного диода в среде Multisim, блок-диаграмму виртуального прибора для экспериментального исследования и диалоговое окно, ВАХ диода по результатам моделирования и экспериментальную, основные параметры диода в виде таблицы, выводы по работе.

Контрольные вопросы

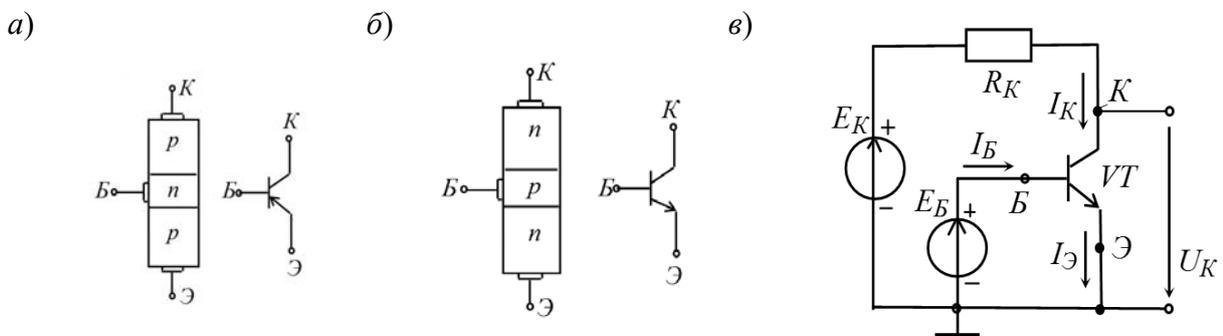
- 1 Приведите основные параметры выпрямительного диода.
- 2 Опишите порядок получения ВАХ диода по результатам моделирования и экспериментально.
- 3 Как по ВАХ определить статические и динамические сопротивления диода?

10 Лабораторная работа № 10. Исследование характеристик биполярного транзистора

Цель работы: получение входных и выходных характеристик биполярного транзистора; определение h -параметров.

10.1 Основные теоретические сведения

Биполярный транзистор представляет собой кристалл полупроводника, состоящий из трех слоев с чередующейся проводимостью и снабженный тремя выводами для подключения к внешней цепи (рисунок 10.1, а) [5–8,10].



Э – эмиттер; К – коллектор; Б – база

Рисунок 10.1 – Структура, обозначение биполярных транзисторов разных типов, схема включения с общим эмиттером

Схема включения транзистора с ОЭ (рисунок 10.1, в) является наиболее распространенной вследствие малого тока базы во входной цепи и усиления входного сигнала как по напряжению, так и по току.

Полярность внешних источников E_B и E_K выбирается так, чтобы на эмиттерном переходе было прямое напряжение, а на коллекторном – обратное.

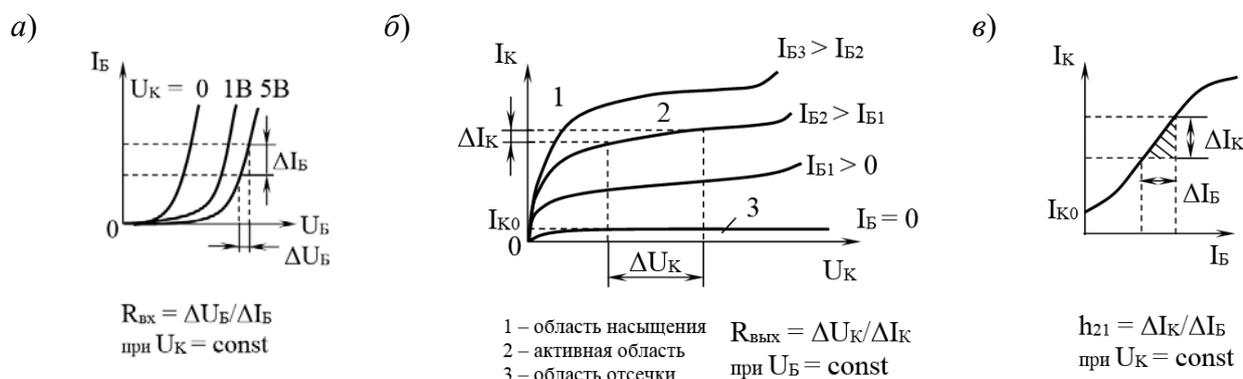


Рисунок 10.2 – Вольтамперные характеристики биполярного транзистора при включении в режиме «с общим эмиттером»

Важнейшими характеристиками биполярного транзистора являются его входные и выходные вольтамперные характеристики (ВАХ). Входные характеристики транзистора с ОЭ (рисунок 10.2, а) отражают зависимость тока базы от напряжения, приложенного между базой и эмиттером, при $U_{KЭ} = \text{const}$. Они мало зависят от $U_{KЭ}$, поэтому обычно приводят одну характеристику $I_B(U_{BЭ})$, которая подобна ВАХ диода. Выходные характеристики отражают зависимость тока коллектора от напряжения между коллектором и эмиттером при $I_B = \text{const}$ (рисунок 10.2, б). Статические вольтамперные характеристики транзистора могут быть получены в результате эксперимента или расчёта. В справочниках (каталогах) транзисторов обычно приводятся входные и выходные характеристики транзистора. Справочники широко используют для анализа работы транзисторов и для расчета схем при больших сигналах.

В режиме усиления *малых сигналов* транзистор в схеме с ОЭ часто представляют в виде линейного четырехполюсника, входные и выходные параметры которого связаны следующими уравнениями:

$$\Delta U_B = h_{11Э} \Delta I_B + h_{12Э} \Delta U_K;$$

$$\Delta I_K = h_{21Э} \Delta I_B + h_{22Э} \Delta U_K,$$

где $h_{11Э} = \left. \frac{\Delta U_B}{\Delta I_B} \right|_{U_K = \text{const}} (\Delta U_K = 0)$ – входное динамическое сопротивление транзистора ($h_{11Э} = 100 \dots 1000 \text{ Ом}$);

$h_{12Э} = \left. \frac{\Delta U_B}{\Delta U_K} \right|_{I_B = \text{const}} (\Delta I_B = 0)$ – безразмерный коэффициент внутренней

обратной связи по напряжению, значение которого лежит в пределах $0,002 \dots 0,0002$ (при расчётах им часто пренебрегают, т. е. полагают равным нулю);

$$h_{21\varepsilon} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \right|_{U_K = \text{const}} \quad (\Delta U_K = 0) - \text{коэффициент передачи (усиления) тока при}$$

постоянном напряжении на коллекторе; его также обозначают K_i или $\beta = 10 \dots 200$;

$$h_{22\varepsilon} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta U_K} \right|_{I_B = \text{const}} \quad (\Delta I_B = 0) - \text{выходная проводимость транзистора при}$$

постоянном токе базы ($h_{22\varepsilon} = 10^{-4} \dots 10^{-6} \text{ см}$).

Параметры схемы замещения транзистора с ОЭ в h -форме определяют по его входным и выходным характеристикам (рисунок 10.2). Зная входные и выходные характеристики транзистора, можно рассчитать параметры электронных устройств, собранных на его базе, – усилителей, ключей и т. д.

Задание к лабораторной работе

На основании заданного преподавателем типа биполярного транзистора, рассчитать сопротивление ограничивающих резисторов R_1 , R_2 (рисунок 10.3), Заполнить таблицу 10.1.

Снять входные и выходные ВАХ биполярного транзистора и определить h -параметры, результаты занести в таблицу 10.2.

Таблица 10.1 – Исходные данные

Тип транзистора	Параметры источников ЭДС		Параметры транзистора и ограничивающих резисторов				
	E_1 , В	E_2 , В	$I_{K \max}$, мА	$U_{КЭ \max}$, В	$h_{21\varepsilon}$ (β)	R_1 , Ом	R_2 , Ом

Таблица 10.2 – h -параметры биполярного транзистора

Тип транзистора	Результаты вычислений			
	$h_{11\varepsilon}$, Ом	$h_{12\varepsilon}$	$h_{21\varepsilon}$	$h_{22\varepsilon}$, см
Моделирование				
Эксперимент				

10.2 Порядок выполнения лабораторной работы

10.2.1 Выписать из справочника основные параметры заданного преподавателем биполярного транзистора [9].

10.2.2 Для построения вольтамперных входной и выходной характеристик биполярного n - p - n -транзистора в программе Multisim собрать схему, указанную на рисунке 10.3 [2,7]. На базу подается напряжение от источника ЭДС E_B , который задает ток базы, измеряемый амперметром I_B . Напряжение «эмиттер–коллектор» задается источником ЭДС E_K , ток в цепи коллектора измеряется амперметром I_K , напряжение – вольтметром $U_{КЭ}$.

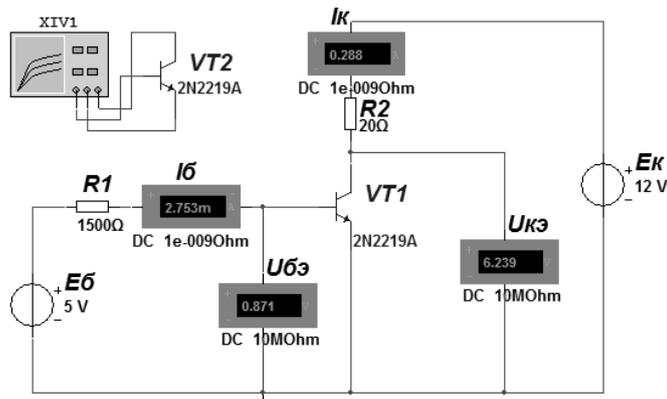


Рисунок 10.3 – Схема для снятия входных и выходных ВАХ биполярного транзистора

Величина резисторов R_1 и R_2 рассчитывается исходя из ограничения тока базы I_B и тока коллектора $I_K < 0,5 I_{K \max}$ при заданных преподавателем значениях ЭДС. Выходную ВАХ можно получить с помощью характеристикиографа XIV1.

10.2.3 Для экспериментального получения характеристик биполярного транзистора на макетной плате из полученного набора элементов собрать схему, приведенную на рисунке 10.3. ЭДС для питания входной и выходной цепей E_B и E_K подаются от двухканального источника питания NY3002-D2. Входное напряжение $U_{БЭ}$ снимается каналом A11 устройства сбора данных NI USB-6009, а входной ток I_B снимается каналом A12 через падение напряжения на резисторе R_1 . Выходное напряжение $U_{КЭ}$ снимается каналом A13 устройства сбора данных NI USB-6009, а выходной ток I_K снимается каналом A14 через падение напряжения на R_2 .

10.2.4 Снять входные и выходные ВАХ биполярного транзистора для нескольких значений тока базы I_B , сравнить их с полученными при моделировании.

10.2.5 Заполнить таблицу 10.2.

10.2.6 Сделать выводы по результатам работы.

10.3 Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать цель работы, схему для снятия характеристик биполярного транзистора в среде Multisim, блок-диаграмму виртуального прибора для экспериментального исследования и диалоговое окно, характеристики и h -параметры биполярного транзистора по результатам моделирования и экспериментальные, выводы по работе.

Контрольные вопросы

- 1 Приведите основные параметры биполярного транзистора.
- 2 Опишите порядок построения входных и выходных ВАХ транзистора по результатам моделирования и экспериментально.
- 3 Охарактеризуйте h -параметры транзистора и порядок их вычисления.

11 Лабораторная работа № 11. Исследование характеристик полевых транзисторов с управляющим переходом и изолированным затвором

Цель работы: получение стокзатворных, выходных характеристик и параметров полевого транзистора с изолированным затвором и управляющим $p-n$ -переходом.

11.1 Основные теоретические сведения

Полевой транзистор – полупроводниковый прибор, в котором ток стока (C) через полупроводниковый канал n - или p - типа управляется электрическим полем, возникающим при приложении напряжения между затвором ($З$) и истоком ($И$).

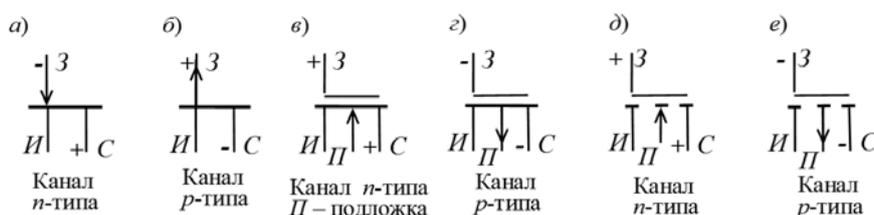


Рисунок 11.1 – Условное обозначение полевых транзисторов

Полевые транзисторы производят:

– с управляющим $p-n$ -переходом для использования в высокочастотных (до 12...18 ГГц) преобразовательных устройствах (условное их обозначение на схемах приведено на рисунке 11.1, а и б);

– с изолированным затвором для использования в устройствах, работающих с частотой до 1...2 ГГц. Их производят или со встроенным каналом в виде МДП-структуры (их условное обозначение на рисунке 11.1, в и г), или с индуцированным каналом в виде МОП-структуры (условное обозначение на схемах на рисунке 1, д и е) [5–8,10].

Схема включения полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом и каналом n -типа, его семейство выходных характеристик $I_C = f(U_C)$, $U_3 = \text{const}$ и стоко-затворная характеристика $I_C = f(U_3)$, $I_C = \text{const}$ изображены на рисунке 11.2.

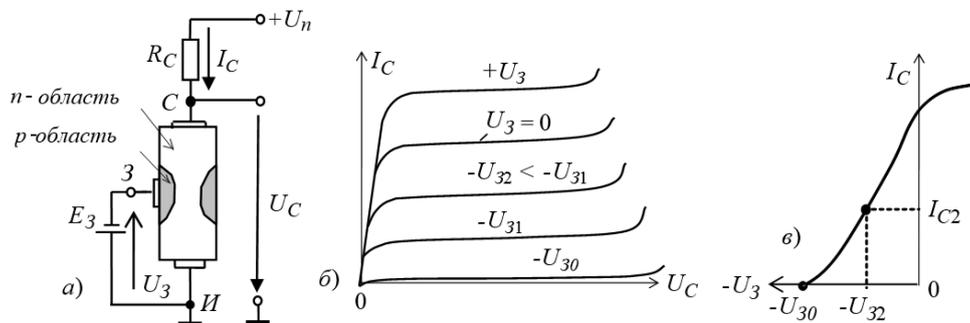


Рисунок 11.2 – Схема включения и характеристики полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом

Управление током стока I_C происходит при подаче обратного напряжения на p - n -переход затвора 3. В связи с малостью обратных токов в цепи «затвор–исток» мощность, необходимая для управления током стока, оказывается ничтожно малой.

При напряжении $-U_3 = -U_{30}$, называемом *напряжением отсечки*, сечение канала полностью перекрывается обеднёнными носителями заряда барьерным слоем, и ток стока I_{C0} (ток отсечки) определяется неосновными носителями заряда p - n -перехода (рисунок 11.2, б).

Для полевого транзистора с изолированным затвором, в результате проникновения электрического поля через диэлектрический слой в полупроводник, при напряжениях на затворе, больших U_3 пор, у поверхности полупроводника под затвором возникает инверсионный слой, который и является каналом, соединяющим исток со стоком. Толщина и поперечное сечение канала изменяются с изменением напряжения на затворе, соответственно, будет изменяться ток стока.

В полевом транзисторе со встроенным каналом при нулевом напряжении на затворе ток стока имеет начальное значение I_{C0} . Такой транзистор может работать как в режиме обогащения, так и в режиме обеднения: при увеличении напряжения на затворе канал обогащается носителями зарядов и ток стока растёт, а при уменьшении напряжения на затворе канал обедняется и ток стока снижается.

Важнейшими особенностями полевых транзисторов являются высокое входное сопротивление (десятки-сотни мегаом) и малый входной ток. Одним из основных параметров полевых транзисторов является *крутизна стоко-затворной характеристики* (рисунок 11.2, в), выражаемая в мА/В:

$$S_i = \Delta I_C / \Delta U_3.$$

Крутизна характеристики в общем случае нелинейна во всем диапазоне изменения тока стока и уменьшается с увеличением напряжения между стоком и истоком.

Внутреннее сопротивление полевого транзистора определяется отношением напряжения стока к соответствующему изменению тока стока (напряжение на затворе при определении сопротивления должно оставаться постоянным):

$$R_i = \left. \frac{\Delta U_{cu}}{\Delta I_c} \right|_{U_{3u} = \text{const.}}$$

Усилительные свойства транзистора по напряжению характеризуются коэффициентом усиления μ_i :

$$\mu_i = \left. \frac{\Delta U_{cu}}{\Delta U_{3u}} \right|_{I_c = \text{const.}}$$

Коэффициент усиления связан с крутизной вольтамперной характеристики и внутренним сопротивлением соотношением

$$\mu_i = S_i R_i.$$

Задание к лабораторной работе

На основании заданного преподавателем типа полевого транзистора рассчитать сопротивление ограничивающих резисторов R_1 , R_2 (рисунок 11.3) Заполнить таблицу 11.1.

Таблица 11.1 – Исходные данные

Тип транзистора	Параметры источников ЭДС		Параметры транзистора и ограничивающих резисторов					
	E_1 , В	E_2 , В	$I_{C \max}$, мА	$U_{си \max}$, В	$U_{зи \max}$, В	S , мА/В	R_1 , Ом	R_2 , Ом

Снять стоковую и стокзатворную ВАХ полевого транзистора и определить статические параметры полевого транзистора S_i , R_i , μ_i , результаты занести в таблицу 11.2.

Таблица 11.2 – Параметры полевого транзистора

Тип транзистора	Результаты вычислений		
	S_i , мА/В	R_i , кОм	μ_i
Моделирование			
Эксперимент		<td> </td>	

11.2 Порядок выполнения лабораторной работы

11.2.1 Выписать из справочника основные параметры заданных преподавателем полевых транзисторов с изолированным затвором [9]. Для построения вольтамперных стокзатворной и выходной характеристик полевых транзисторов в программе Multisim собрать схему, указанную на рисунке 11.3.

На затвор подается напряжение от источника ЭДС E_3 , который задает напряжение на затворе $U_{зи}$. Напряжение сток–исток задается источником ЭДС E_2 , ток в цепи стока измеряется амперметром I_C , напряжение – вольтметром $U_{си}$. Величина резистора R_2 рассчитывается исходя из ограничения тока стока $I_C < 0,5 I_{C \max}$ при заданных преподавателем значениях ЭДС.

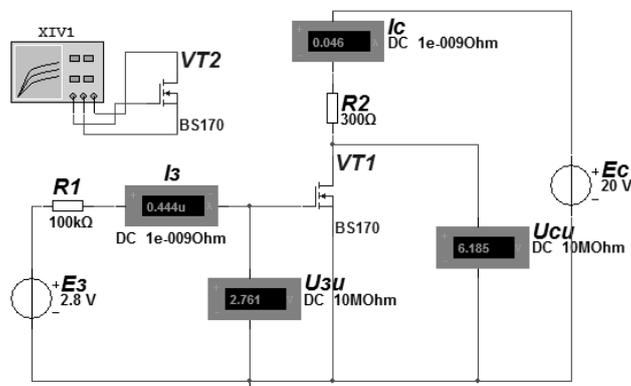


Рисунок 11.3 – Схема для снятия сток–затворной и выходных ВАХ полевого транзистора в среде Multisim

Выходную ВАХ транзистора можно получить с помощью характериографа.

11.2.2 Для экспериментального получения характеристик полевого транзистора на макетной плате из полученного набора элементов собрать схему, приведенную на рисунке 11.3.

11.2.3 Снять выходные ВАХ полевого транзистора для нескольких значений напряжения на затворе $U_{зи}$, сравнить их с полученными при моделировании.

11.2.4 Снять стоко-затворные ВАХ полевого транзистора для заданного преподавателем тока стока I_C , сравнить их с полученными при моделировании.

11.2.5 Определить статические параметры полевого транзистора S_i , R_i , μ_i и проверить соотношение между ними. Заполнить таблицу 11.2.

11.2.6 Сделать выводы по результатам работы.

11.3 Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать цель работы, схемы для снятия характеристик полевых транзисторов в среде Multisim, блок-диаграмму виртуального прибора для экспериментального исследования и диалоговое окно, характеристики и параметры полевых транзисторов по результатам моделирования и экспериментальные, выводы по работе.

Контрольные вопросы

- 1 Приведите основные параметры полевого транзистора.
- 2 Опишите порядок построения выходных и стоко-затворных характеристик транзистора по результатам моделирования и экспериментально.
- 3 Как определить крутизну стоко-затворной характеристики, внутреннее сопротивление и коэффициент усиления полевого транзистора?

12 Лабораторная работа № 12. Исследование транзисторных ключей

Цель работы: изучение основных параметров и принципов работы транзисторных ключей.

12.1 Основные теоретические сведения

Электронные ключи используются для коммутации электрических сигналов и составляют альтернативу механическим коммутаторам (реле). В маломощных цепях их выполняют на полупроводниковых диодах, более совершенными являются ключи на биполярных и полевых транзисторах.

В зависимости от характера коммутируемого сигнала электронные ключи разделяют на цифровые и аналоговые. **Цифровые** ключи коммутируют напряжения или токи источника питания и обеспечивают получение двух уровней сигнала на выходе. Один уровень соответствует открытому состоянию ключа, другой – закрытому. **Аналоговые** ключи обеспечивают подключение или отключение источников аналоговых информационных сигналов, имеющих произвольную форму напряжений, в том числе и цифрового сигнала.

Транзисторные ключи выполняются на биполярных или полевых транзисторах. В свою очередь ключи на полевых транзисторах делятся на МДП-ключи и ключи на полевых транзисторах с управляющим $p-n$ -переходом. Транзисторный ключ на биполярном транзисторе по своей схеме подобен транзисторному усилителю с общим эмиттером. Однако по выполняемым функциям и, соответственно, режимам работы активного элемента он существенно отличается от усилительного каскада. Транзисторный ключ имеет два основных состояния: разомкнутое, которому соответствует режим *отсечки* транзистора (транзистор заперт), и замкнутое, которое характеризуется режимом *насыщения* транзистора или режимом, близким к нему. В течение процесса переключения транзистор работает в активном режиме. Процессы в ключевом каскаде носят нелинейный характер. Насыщение ключа достигается увеличением тока базы. Однако при некотором его значении, которое называется базовым током насыщения $I_{БН}$, дальнейший рост тока базы практически не приводит к росту коллекторного тока насыщения $I_{КН}$, при этом напряжение на коллекторе (с учетом коллекторной нагрузки) составляет несколько десятков или сотен милливольт (в ИС около 0,1...0,2 В). Одной из важных характеристик ключа в режиме насыщения является коэффициент насыщения

$$S = \frac{I_{КН}}{I_{БН}},$$

на границе насыщения $S = 1$. При его увеличении повышается нагрузочная способность ключа, уменьшается влияние различных дестабилизирующих факторов на его выходные параметры, но ухудшается быстродействие. Поэтому коэффициент насыщения выбирается из компромиссных соображений, исходя из условий конкретной задачи.

Ключевой каскад на рисунке 12.1, *a* представляет собой каскад по схеме с ОЭ, на входе которого включен резистор R_B , обеспечивающий при заданном входном напряжении $U_{ВПР}$ требуемый ток насыщения базы. Для обеспечения режима отсечки транзистора в классической схеме ключевого каскада предусматривается источник компенсирующего тока, образованного резистором $R_{\delta 1}$ и источником напряжения U_B .

$$R_B = \beta \cdot R_K (U_{уп} - U_{БЭ}) / S (U_{П} - U_{КН}) = 0,17\beta \cdot R_K.$$

где $U_{БЭ}$ – напряжение «база–эмиттер» открытого транзистора (здесь и далее имеются в виду кремниевые транзисторы), $U_{БЭ} = (0,7 \dots 0,8)$ В;

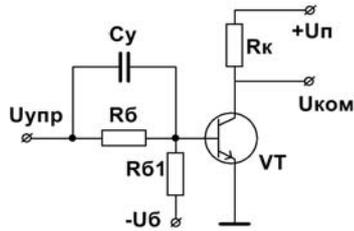
S – коэффициент насыщения, $S = 1,5 \dots 2$;

β – коэффициент усиления транзистора по току;

$U_{КН}$ – напряжение на коллекторе открытого транзистора, $U_{КН} = (0,1 \dots 0,2)$ В;

$U_{П}$ – напряжение питания.

а)



б)

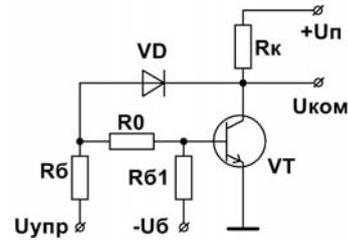


Рисунок 12.1 – Схемы включения каскадов на биполярных транзисторах с резисторной связью (а) и дополнительной обратной связью (б)

Конденсатор C_y называется ускоряющим, он предназначен для повышения быстродействия ключа. Благодаря ему увеличивается отпирающий базовый ток в момент появления сигнала логической единицы. При сигнале логического нуля ускоряется процесс запираения транзистора, поскольку в этом случае ускоряющий конденсатор будет создавать на базе запирающее напряжение отрицательной полярности.

Второй способ повышения быстродействия транзисторного ключа реализуется применением отрицательной обратной связи (рисунок 12.1, б). Здесь предотвращается насыщение состояния транзистора за счет использования в цепи отрицательной обратной связи диода VD . Пока напряжение «база–коллектор» больше падения напряжения на сопротивлении R_0 , этот диод заперт, обратная связь отсутствует. При увеличении входного сигнала (и, соответственно, входного тока) увеличивается и ток коллектора. При достаточно большом входном сигнале напряжение «база–коллектор» становится равным падению напряжения на сопротивлении резистора R_0 , диод VD отпирается и начинает действовать отрицательная обратная связь. Теперь рост базового тока мало влияет на режим работы транзистора, т. к. значительная часть входного тока протекает в этом случае непосредственно через диод, и транзистор не переходит в режим насыщения.

Ключи на полевых транзисторах с управляющим р–n-переходом применяют в различных коммутаторах аналоговых сигналов. Их существенными преимуществами перед ключами на биполярных транзисторах являются: малое остаточное напряжение на ключе в проводящем состоянии; высокое сопротивление в непроводящем состоянии и, как следствие, малый ток, протекающий через закрытый ключ; малая потребляемая мощность от источника управляющего напряжения; возможность коммутации электрических сигналов низкого уровня (единицы милливольт и менее).

Базовые схемы ключей на полевых транзисторах с управляющим р–n-переходом показаны на рисунке 12.2. Коммутируемый сигнал подается на вход U_{II} и снимается с выхода $U_{ВЫХ}$ (R_H – сопротивление нагрузки). Сигнал управления подается на вход $U_{УПР}$. Для запираения ключа на затвор транзистора подается напряжение, которое должно превышать напряжение стока и истока на величину, большую напряжения отсечки на 2...3 В, но не превышающую предельно допустимых значений.

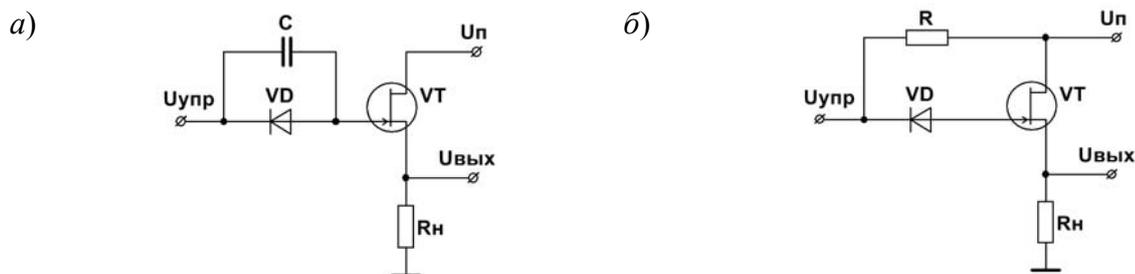


Рисунок 12.2 – Схемы ключей на полевых транзисторах с управляющим р–п-переходом с ускоряющей емкостью (а) и дополнительным резистором (б)

В закрытом состоянии сопротивление ключей достаточно велико (более 10^8 Ом). В открытом состоянии ключа напряжение на управляющем электроде близко к нулю и зависит от значения коммутируемого напряжения $U_{упр}$ и сопротивления нагрузки R_n . Это обусловлено тем, что при увеличении напряжения на истоке транзистора и неизменном потенциале затвора напряжение «затвор–исток» отлично от нуля и транзистор частично заперт, при этом сопротивление «сток–исток» увеличивается и падение напряжения в канале «сток–исток» возрастает. Для ключа, работающего в режиме прерывателя, когда напряжение $U_{упр}$ может меняться в широких пределах, это является существенным недостатком. В таких случаях необходима автоматическая стабилизация напряжения между затвором и каналом. На схемах (см. рисунок 12.2) эту роль выполняет последовательно включенный в цепь затвора диод VD , который для запирающего напряжения включен в прямом направлении. Если напряжение управления выбрать больше максимально возможного значения коммутируемого напряжения, то при подаче открывающего напряжения р–п – переход затвора открывается, а диод VD закрывается. В этом случае при изменении коммутируемого напряжения р–п-переход останется открытым и сопротивление его канала останется неизменным. Для этой же цели в схеме на рисунок 12.2, б между истоком и входом ключа дополнительно включается высокоомный резистор R . Конденсатор C (рисунок 12.2, а) предназначен для ускорения процесса перезарядки емкостей «затвор–исток» и «затвор–сток».

Задание к лабораторной работе

На основании заданного типа транзистора, параметров $U_{п}$, R_k , $U_{упр}$ произвести расчёт сопротивления входной цепи R_B . Заполнить таблицу 12.1.

Таблица 12.1 – Исходные данные

Тип транзистора	Заданные параметры				Расчитанные параметры
	β	$U_{п}$, В	$U_{упр}$, В	R_k , Ом	R_B , Ом

12.2 Порядок выполнения лабораторной работы

12.2.1 Произвести моделирование работы транзисторного ключа в программе Multisim (рисунок 12.3).

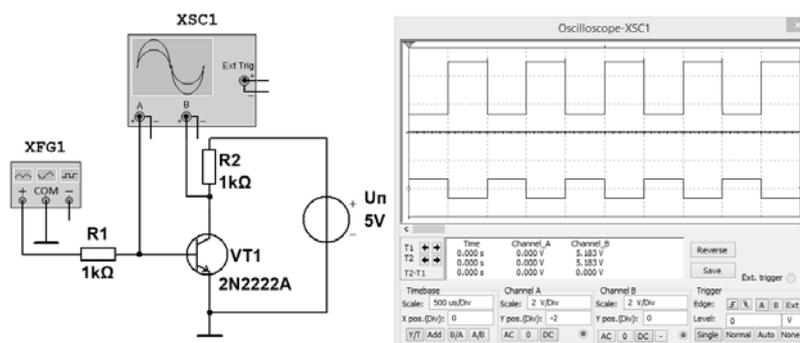


Рисунок 12.3 – Простейший ключ на биполярном транзисторе и осциллограммы сигналов на выходе ($U_{ком}$) и на базе ($U_{упр}$) транзисторного ключа

12.2.2 Исследовать зависимость падения напряжения на открытом ключе $U_{кн}$ от тока коллектора при изменении сопротивления R_K от 10 кОм до 100 Ом.

12.2.3 Изменяя сопротивление в базе транзистора, исследовать зависимость падения напряжения на открытом ключе $U_{кн}$ от тока базы.

12.2.4 По осциллограмме выходного сигнала определить время переключения $t_{п1}$ транзистора из открытого состояния в закрытое.

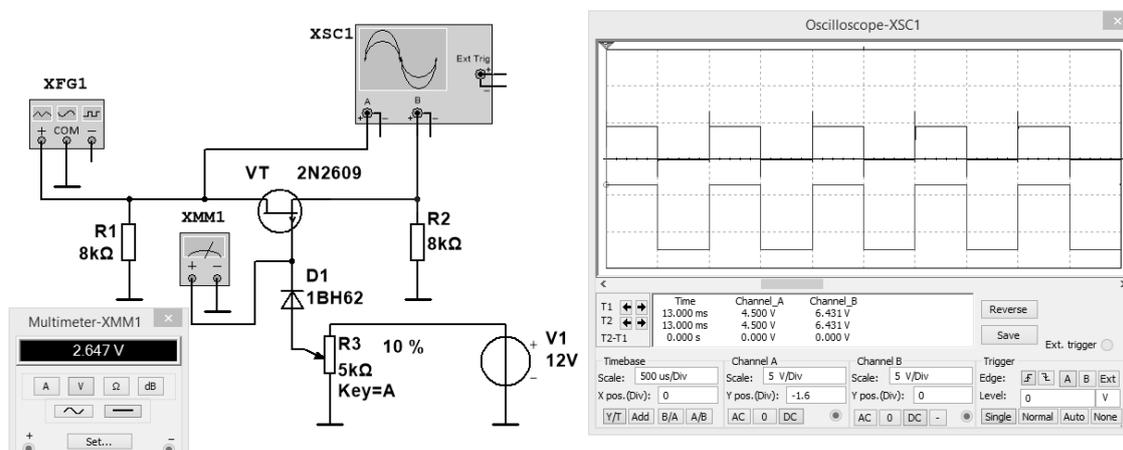


Рисунок 12.4 – Ключ на полевом транзисторе и осциллограммы входного и выходного сигналов ключа

12.2.5 Включить в схему ускоряющий конденсатор согласно рисунку 12.1 и определить, как изменится время переключения $t_{п1}$.

12.2.6 Снять осциллограмму работы ключа при подаче на базу транзистора синусоидального сигнала. Сделать вывод о работе ключа.

12.2.7 Произвести моделирование работы транзисторного ключа на полевом транзисторе в программе Multisim согласно рисунку 12.4.

12.2.8 По схеме (см. рисунок 12.4) исследовать зависимость выходного сигнала от управляющего напряжения (при изменении напряжения $U_{упр}$).

12.2.9 Исследовать зависимость падения напряжения на ключе коммутируемого сигнала и его асимметрии от напряжения отсечки полевого транзистора и амплитуды коммутируемого сигнала.

12.2.10 По результатам моделирования заполнить таблицу 12.2.

Таблица 12.2 – Результаты исследования

Результаты измерений				
	$U_{упр}$, мВ	$U_{ком}$, мВ	C_u , мкФ	$t_{пл}$, с
Моделирование				
Эксперимент				

12.2.11 Для экспериментального исследования ключа на макетной плате из полученного набора элементов собрать схему, предложенную преподавателем. На вход схемы подавать прямоугольное напряжение положительной полярности от генератора $U_{ГГ1}$.

12.2.12 Сделать выводы по результатам работы.

12.3 Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать цель работы, задание к работе, схемы для моделирования работы ключей в среде Multisim, блок-диаграмму виртуального прибора для экспериментального снятия характеристик и диалоговое окно, осциллограммы входных и выходных напряжений, основные параметры ключа в виде таблицы, выводы по работе.

Контрольные вопросы

- 1 Назовите область применения цифровых ключей.
- 2 Назовите основные параметры электронных ключей.
- 3 Какие режимы работы биполярного транзистора соответствуют замкнутому и состоянию транзисторного ключа?
- 4 От чего зависит быстродействие транзисторного ключа?

13 Лабораторная работа № 13. Исследование усилителя на биполярном транзисторе

Цель работы: изучение методики расчёта, принципа функционирования и характеристик усилителя на биполярном транзисторе.

13.1 Основные теоретические сведения

Одним из наиболее распространённых усилителей на биполярных транзисторах является усилитель с *общим эмиттером* (ОЭ). В этом усилителе эмиттер является общим электродом для входной и выходной цепей

(рисунок 13.1). Входное напряжение $u_{ВХ}$ от источника сигнала E_C с внутренним сопротивлением R_C подаётся на усиляемый каскад на биполярном транзисторе VT через конденсатор связи C_{P1} , предотвращающий прохождение постоянной составляющей тока от источника сигнала.

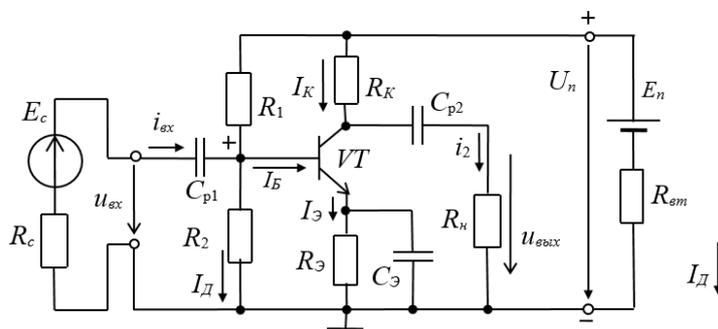


Рисунок 13.1 – Усилитель с общим эмиттером

В усилителе, кроме источника переменного сигнала, действует источник напряжения с ЭДС $E_{П}$ (обычно напряжение $U_{П} = 10...30$ В) с внутренним сопротивлением $R_{ВТ}$. Сопротивление резистора R_K выбирают исходя из требований усиления входных сигналов и ограничения тока коллектора I_K транзистора VT . Обычно сопротивление R_K составляет $0,2...5$ кОм для транзисторов малой мощности и порядка 100 Ом для транзисторов средней мощности. Резисторы R_1 и R_2 делителя напряжения питания $U_{П}$ предназначены для установки тока базы I_B транзистора (по постоянному току) соответственно рабочей точки (точки покоя) на линии нагрузки.

С помощью резистора $R_Э$ создаётся обратная отрицательная связь усилителя по постоянному току, обеспечивающая температурную стабилизацию его режима усиления. Так, при увеличении температуры возрастают постоянные составляющие токов коллектора I_K и эмиттера $I_Э$ и падение напряжения $R_Э I_Э$. В результате напряжение $U_{БЭ}$ уменьшается, вызывая уменьшение тока базы I_B , и, следовательно, I_K , стабилизируя его.

Конденсатор $C_Э$ большой ёмкости (десятки микрофарад) шунтирует сопротивление резистора $R_Э$ по переменному току, что исключает ослабление усиливаемого сигнала по переменному току цепью обратной связи.

В режиме работы усилителя по *постоянному току* для получения наименьших нелинейных искажений усиливаемого сигнала рабочую точку a (рисунок 13.2) выбирают посередине рабочего участка bc линии нагрузки по постоянному току, описываемой уравнением

$$I_{Kn} = (U_n - U_{Kn}) / R_K, \quad U_{Kn} = U_{КЭ} + R_Э I_{Эn}.$$

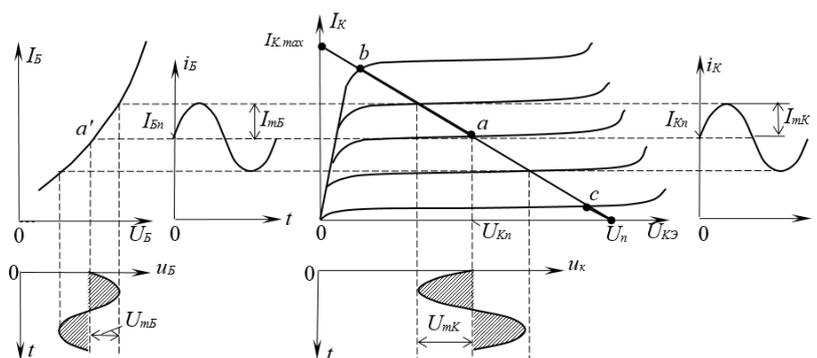


Рисунок 13.2 – К расчёту усилителя

Задание к лабораторной работе

На основании заданного типа транзистора, параметров усилителя произвести расчёт элементов схемы (см. рисунок 13.1) и осуществить их выбор.

Таблица 13.1 – Исходные данные

Тип транзистора	Заданные параметры				
	$U_{П}$, В	$I_{КП}$, мА	f_{H} , Гц	R_{H} , Ом	$h_{21Э}$

Продолжение таблицы 13.1

Рассчитанные параметры								
$I_{Бп}$, А	$I_{Д}$, А	$R_{К}$, Ом	R_1 , Ом	R_2 , Ом	$R_{Э}$, Ом	$C_{Э}$, мкФ	C_{P1} , мкФ	C_{P2} , мкФ
принято								

13.2 Порядок выполнения лабораторной работы

13.2.1 Для подтверждения правильности расчётов произвести моделирование работы усилителя в программе Multisim, согласно рисунку 13.3. Напряжения и токи в схемах отображаются с помощью виртуальных вольтметров, амперметров и осциллографа XSC1. Входной сигнал формируется функциональным генератором Agilent-XFG1.

Для отображения параметров усилителя по постоянному току (в режиме покоя) в свойствах измерительных приборов установить «DC».

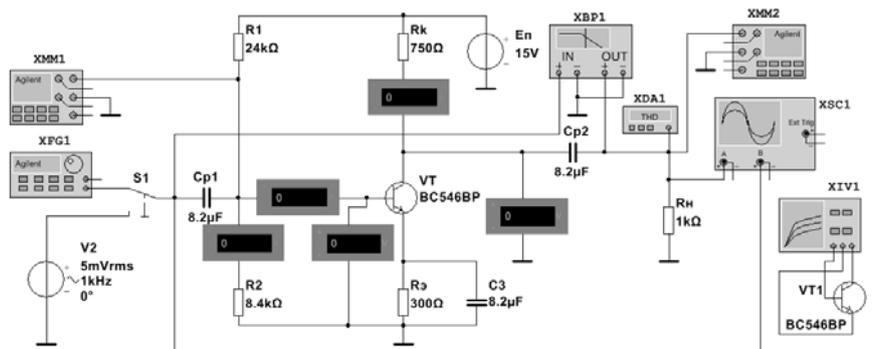


Рисунок 13.3 – Схема усилительного каскада в среде Multisim

13.2.2 С помощью характериографа XIV1 снять входные и выходные характеристики биполярного транзистора. Построить линию нагрузки. Определить положение рабочей точки. Определить максимальную величину входного сигнала для работы усилительного каскада в линейном режиме (без искажения формы передаваемого сигнала). Рассчитать входное сопротивление усилительного каскада $R_{ВХ}$, коэффициенты усиления K_I , K_U , K_P .

13.2.3 Подать на вход усилительного каскада переменный синусоидальный сигнал с амплитудой, не превышающей $U_{мБ}$. Снять осциллограмму выходного сигнала. Измерить параметры усилителя в режиме переменного сигнала (свойство прибора «АС»). Заполнить таблицу 13.2 (моделирование).

Таблица 13.2 – Результаты исследования

Заданные параметры			Результаты измерений							Результаты вычислений			
	R_H , В	$C_Э$, мкФ	$U_{ВХ}$, мВ	$I_{ВХ}$, мА	U_H , В	I_H , мА	K_G , %	f_H , кГц	f_B , кГц	$R_{ВХ}$, Ом	K_I	K_U	K_P
Моделирование													
Эксперимент													

13.2.4 Увеличить амплитуду входного сигнала до получения искажений сигнала на выходе. Наблюдать увеличение коэффициента нелинейных искажений с помощью прибора XDA1.

13.2.5 Исследовать влияние R_H , $C_Э$ на амплитуду выходного сигнала.

13.2.6 С помощью плоттера Боде снять амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) усилительного каскада. Определить нижнюю и верхнюю частоты f_H , f_B , при которых происходит снижение коэффициента усиления в $\sqrt{2}$ раз. Исследовать влияние ёмкости разделительного конденсатора C_{P2} на АЧХ. Результаты занести в таблицу 13.2 (моделирование).

13.2.7 Для экспериментального исследования усилительного каскада на макетной плате из полученного набора элементов собрать схему, приведенную на рисунке 13.4. На вход схемы подавать синусоидальное напряжение от генератора $U_{ГС1}$.

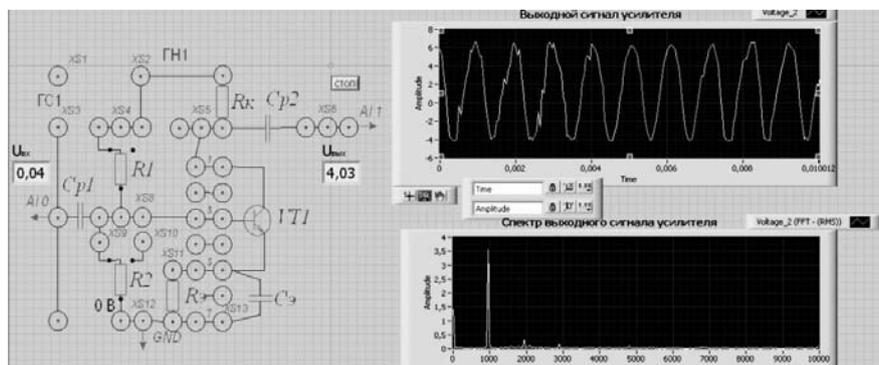


Рисунок 13.4 – Виртуальный прибор для экспериментального исследования усилительного каскада в среде LabVIEW

13.2.8 Определить основные параметры усилительного каскада. Результаты занести в таблицу 13.2 (эксперимент). Сравнить результаты моделирования, экспериментальные результаты с расчётными данными.

13.2.9 Сделать выводы по результатам работы.

13.3 Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать цель работы, задание к работе, схемы для моделирования работы усилительного каскада в среде Multisim, блок-диаграмму виртуального прибора для экспериментального снятия характеристик и диалоговое окно, осциллограммы входных и выходных напряжений, входные и выходные характеристики биполярного транзистора, АЧХ усилителя, основные параметры усилителя в виде таблицы, выводы по работе.

Контрольные вопросы

1 Объясните принцип построения нагрузочной линии для биполярного транзистора.

2 Отметьте величину сдвига фаз между входным и выходным напряжениями на осциллограммах, полученных в Multisim.

3 Какой физический смысл имеет коэффициент нелинейных искажений?

14 Лабораторная работа № 14. Исследование работы однофазных неуправляемых выпрямителей

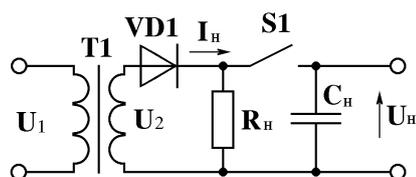
Цель работы: изучение принципа функционирования, методик расчёта, характеристик и параметров неуправляемых выпрямителей.

14.1 Основные теоретические сведения

Выпрямителем называется устройство преобразования переменного напряжения в постоянное. Выпрямительное устройство, помимо выпрямителя, в который входят один или несколько включенных по определенной схеме вентилях (диодов, тиристоров), содержит в себе силовой трансформатор, сглаживающий фильтр и стабилизатор. В зависимости от условий работы и требований отдельные узлы выпрямительного устройства могут отсутствовать.

Простейшей схемой нерегулируемого выпрямителя является однотактная однофазная (рисунок 14.1, а). Графики входного и выходного напряжений, а также тока через вентиль (диод $VD1$) при резистивной (сплошная линия) и резистивно-емкостной (пунктир) нагрузке показаны на рисунке 14.1, б [8].

а)



б)

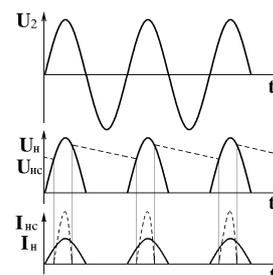


Рисунок 14.1 – Схема и временные диаграммы однофазного однополупериодного выпрямителя

Ток в цепи нагрузки, включенной последовательно с вентиляем, протекает только в моменты, когда к нему приложено прямое напряжение (полупериод). В течение следующего полупериода вентиль закрыт. Поэтому ток через нагрузку протекает только в одном направлении и имеет пульсирующий характер. Для сглаживания пульсаций применяют фильтры, чаще всего с емкостной реакцией.

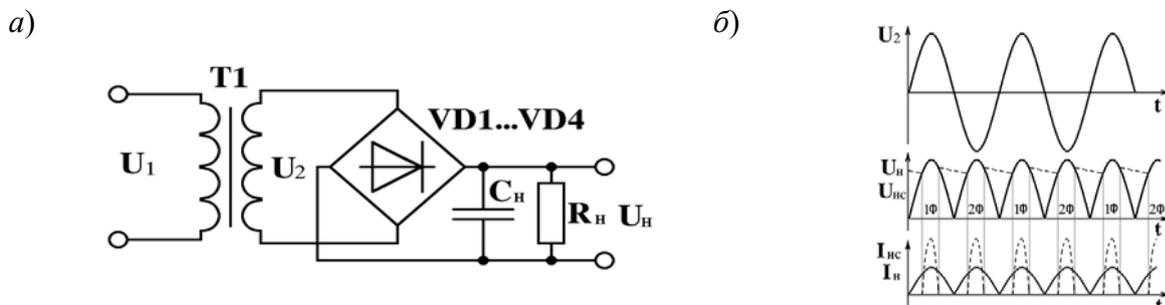


Рисунок 14.2 – Схема и временные диаграммы двухполупериодного мостового выпрямителя

Более эффективное использование трансформатора и вентиляей достигается в двухполупериодной мостовой схеме (рисунок 14.2, а). Вентили в ней работают поочередно попарно. Сердечник трансформатора здесь не подмагничивается, а временные диаграммы напряжений и токов приведены на рисунке 14.2, б [8].

Сравнительные показатели схем выпрямления приведены в таблице 14.1.

Таблица 14.1 – Сравнительные показатели схем выпрямления

Тип схемы	m	U_2/U_H	I_2/I_H	$k_{ПЛ}$	$S_{ТР}/P_H$	I_D/I_H	$U_{ОБР\ max}/U_H$
Однополупериодная	1	2,22	1,57	1,57	3,1	1	3,14
Мостовая однофазная	2	1,11	1,11	0,667	1,23	0,5	1,57

Здесь m – число пульс выпрямленного напряжения за период;

U_2, I_2 – действующее значение напряжения и тока вторичной обмотки;

U_H, I_H – средневыврямленное значение напряжения и тока в нагрузке;

$S_{ТР}$ – полная мощность трансформатора;

I_D – расчётный прямой ток диода;

$U_{ОБР\ max}$ – расчётное максимально допустимое обратное напряжение диода;

P_H – требуемая мощность нагрузки,

$$P_H = U_H \cdot I_H;$$

Коэффициент пульсаций по первой гармонике с амплитудой U_{m1}

$$k_{ПЛ} = U_{m1} / U_H;$$

Коэффициент сглаживания пульсаций $k_{СГ}$

$$k_{СГ} = k_{ПЛ} / k_H.$$

Для емкостного фильтра:

- при однополупериодной схеме выпрямления $C \geq 2/(K_{n\text{ex}}\omega R_H)$;
- при двухполупериодной схеме выпрямления $C \geq 1/(K_{n\text{ex}}\omega R_H)$.

Задание к лабораторной работе

Рассчитать параметры выпрямителей: однофазного однополупериодного, двухполупериодного мостового (см. рисунки 14.1 и 14.2), обеспечив заданные преподавателем параметры нагрузки. Заполнить таблицу 14.2.

Таблица 14.2 – Исходные данные и результаты расчёта схемы выпрямителей

Схема выпрямления	Заданные параметры				
	U_1 , В	f , Гц	U_H , В	R_H , Ом	k_H
Однополупериодная					
Двухполупериодная мостовая					

Продолжение таблицы 14.2

Схема выпрямления	Рассчитанные параметры							
	U_2 , В	k_{TP}	I_2 , А	S_{TP} , ВА	I_D , А	$U_{OBR\text{ max}}$, В	$C\Phi$, мкФ	k_{CF}
Однополупериодная								
Двухполупериодная мостовая								

По результатам моделирования и эксперимента заполнить таблицу 14.3.

Таблица 14.3 – Параметры схем выпрямления

Схема выпрямления	Результаты измерений						Результаты вычислений
		U_1 , В	U_2 , В	I_2 , мА	U_H , В	I_H , мА	k_H
Однофазная однополупериодная	Моделирование						
	Эксперимент						
Двухполупериодная мостовая	Моделирование						
	Эксперимент						

14.2 Порядок выполнения лабораторной работы

14.2.1 Для подтверждения правильности расчётов произвести моделирование работы выпрямителей в программе Multisim, построив их модели согласно рисункам 14.3-14.4 [2,7]. Напряжения и токи в схемах отображаются с помощью виртуальных вольтметров, амперметров и осциллографа XSC1.

14.2.2 Снять осциллограммы напряжений на вторичной обмотке трансформатора U_2 и на выходе выпрямителя U_H при работе на активную и емкостную нагрузки. Подключение сглаживающего фильтра осуществляется замыканием ключа (клавиша «А»).

14.2.3 Измерить значение тока нагрузки I_H , действующего значения тока вторичной обмотки трансформатора I_2 . Определить коэффициент пульсаций

нагрузки с фильтром k_H . Для определения амплитуды первой гармоники выпрямленного напряжения U_{m1} воспользоваться анализатором спектра XSA1.

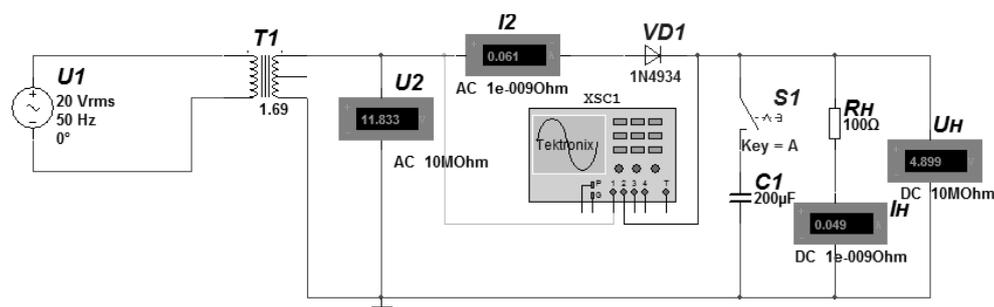


Рисунок 14.3 – Схема однофазного однополупериодного выпрямителя в среде Multisim

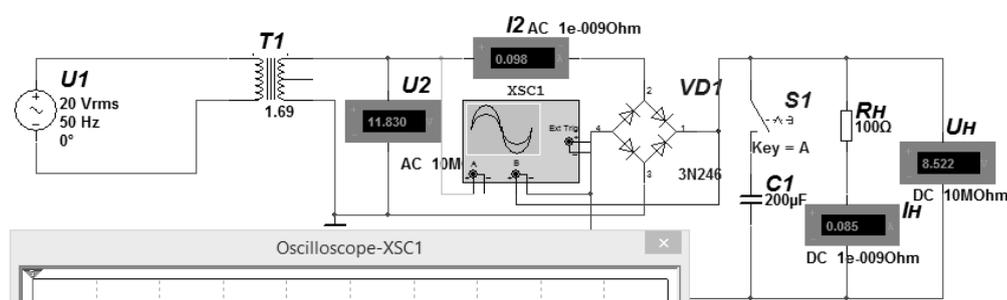


Рисунок 14.4 – Схема однофазного двухполупериодного мостового выпрямителя в среде Multisim

14.2.4 Для экспериментального исследования однофазного однополупериодного выпрямителя на макетной плате из полученного набора элементов собрать схему, приведенную на рисунке 14.3. Синусоидальное напряжение U_2 подается от генератора сигналов Г6-46.

14.2.5 Для экспериментального исследования двухполупериодного выпрямителя на макетной плате из полученного набора элементов собрать схему, приведенную на рисунке 14.5, аналогично п. 14.2.4.

14.2.6 Определить основные параметры выпрямителей. Результаты занести в таблицу 14.3 (эксперимент). Сравнить результаты моделирования, экспериментальные результаты с расчётными данными.

14.2.7 Сделать выводы по результатам работы.

14.3 Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать цель работы, задание к работе, схемы для моделирования работы выпрямителей в среде Multisim, блок-диаграмму виртуального прибора для экспериментального снятия характеристик и диалоговое окно, осциллограммы напряжений на вторичной обмотке трансформатора и нагрузке, основные параметры выпрямителей в виде таблицы, выводы по работе.

Контрольные вопросы

- 1 Опишите принцип работы схем однофазных неуправляемых выпрямителей.
- 2 Опишите порядок расчёта схем однофазных неуправляемых выпрямителей.
- 3 Приведите диаграммы входного и выходного напряжений для однофазных неуправляемых выпрямителей.

Список литературы

- 1 **Касаткин, А. С.** Курс электротехники: учебник / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – 8-е изд., стер. – Москва: Высшая школа, 2005. – 541 с.
- 2 **Иванов, И. И.** Электротехника: учебник / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. С. Равдоник. – 2-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург: Лань, 2003. – 496 с.
- 3 **Алехин, В. А.** Электроника: теория и практика. Моделирование в среде TINA-8: учебное пособие / В. А. Алехин. – Москва: Горячая линия-Телеком, 2017. – 308 с. : ил.
- 4 **Иванов, В. Н.** Электроника и микропроцессорная техника: учебник / В. Н. Иванов. – Москва: Академия, 2016. – 288 с.
- 5 **Марченко, А. Л.** Основы электроники: учебное пособие для вузов / А. Л. Марченко. – Москва: ДМК Пресс, 2008. – 296 с.
- 6 **Лачин, В. И.** Электроника: учебное пособие / В. И. Лачин, Н. С. Савелов. – 7-е изд., перераб. и доп. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2009. – 703 с.
- 7 **Бладыко, Ю. В.** Электроника. Практикум: учебное пособие / Ю. В. Бладыко. – Минск: Минфин, 2016. – 190 с. : ил.