

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Учреждение образования
«Витебский государственный технологический университет»

**ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА АВТОМАТИКИ.
ЭЛЕМЕНТЫ СХЕМ ВТОРИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ
ПИТАНИЯ**

**Методические указания по выполнению лабораторных работ
для студентов специальности
1-53 01 01-05 «Автоматизация технологических процессов и производств
(легкая промышленность)»**

Витебск
2020

УДК 621.38

Составители:

В. Ф. Куксевич, Д. В. Черненко

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом УО «ВГТУ», протокол № 6 от 19.06.2020.

Электронные устройства автоматики. Элементы схем вторичных источников питания : методические указания по выполнению лабораторных работ / сост. Д. В. Черненко, В. Ф. Куксевич. – Витебск : УО «ВГТУ», 2020. – 56 с.

Методические указания являются руководством к лабораторным работам по дисциплине «Электронные устройства автоматики» для студентов специальности 1-53 01 01-05 «Автоматизация технологических процессов и производств (легкая промышленность)» и содержат общие требования, предъявляемые к выполнению лабораторных работ, освещают теоретические вопросы подготовки к ним, приводят примеры получения характеристик электронных устройств автоматики с помощью лабораторного стенда УИЛС-1 и программы Electronics Workbench.

УДК 621.38

© УО «ВГТУ», 2020

Содержание

Общие требования к выполнению лабораторных работ	4
Правила техники безопасности при проведении лабораторных работ с помощью стенда УИЛС-1	5
Краткое описание стенда УИЛС-1	6
Лабораторная работа 1	
<i>Исследование однофазных схем выпрямления</i>	7
Лабораторная работа 2	
<i>Исследование трехфазных схем выпрямления</i>	15
Лабораторная работа 3	
<i>Исследование сглаживающих фильтров</i>	21
Лабораторная работа 4	
<i>Исследование однофазных схем выпрямления с умножением напряжения</i>	32
Лабораторная работа 5	
<i>Исследование однофазного управляемого выпрямителя</i>	37
Лабораторная работа 6	
<i>Исследование однофазных выпрямителей специального назначения</i>	44
Лабораторная работа 7	
<i>Исследование параметрических стабилизаторов постоянного напряжения</i>	50
Литература	55

Общие требования к выполнению лабораторных работ

Студент должен предварительно изучить описание предстоящей лабораторной работы, а также теоретический материал, соответствующий данной работе.

Перед проведением каждой лабораторной работы проводится проверка теоретической подготовки студента по данной теме. После разрешения преподавателя студенты приступают к выполнению лабораторной работы.

Отчет по выполненной лабораторной работе составляется каждым студентом индивидуально.

Отчет должен содержать:

- название работы;
- цель работы (изложена в методических указаниях);
- схему исследуемой цепи;
- основные расчетные соотношения;
- таблицы измеренных и рассчитанных величин;
- графики, осциллограммы.

При оформлении отчета обязательно соблюдение ГОСТа на буквенные и графические обозначения физических величин и элементов схем.

Графики изображаются в прямоугольной системе координат с указанием масштабов по осям координат.

Если преподавателем будет предложено переделать какую-либо часть отчета, то в этом случае исправления вносятся в текст при помощи корректирующих материалов, с тем расчетом, чтобы исправленная работа представляла единое целое. Листы с большим числом исправлений следует переделать полностью.

Правила техники безопасности при проведении лабораторных работ с помощью стенда УИЛС-1

При нарушении правил техники безопасности стенды лаборатории могут оказаться источником опасности поражения электрическим током. Поражение электрическим током тела человека может привести к тяжелым поражениям нервной, дыхательной и сердечно-сосудистой систем. Опасность возрастает с увеличением напряжения, так как при больших напряжениях протекают большие токи. В связи с этим во время лабораторных работ необходимо строго соблюдать правила техники безопасности:

а) доступ к стендам и аппаратуре во время занятий производится только с разрешения преподавателя;

б) перед началом сборки электрической цепи на стенде убедиться, что все источники питания отключены, проверить исправность изоляции, состояние наконечников и штырей соединительных проводов;

в) включение стенда под напряжение выполнять только после проверки преподавателем или лаборантом правильности сборки схемы;

г) в случае возникновения неисправностей приборов или других элементов исследуемой цепи должны быть отключены все источники питания стенда;

д) при выполнении работы строго запрещается касаться руками, авторучкой, карандашом и другими предметами незаизолированных точек или участков цепи, находящихся под напряжением;

е) всем студентам до начала лабораторных занятий необходимо ознакомиться с инструкцией по технике безопасности, имеющейся в лаборатории и строго соблюдать ее положения во время лабораторных занятий.

При проведении занятий в лаборатории учебная группа делится на бригады. Каждый студент должен иметь свою рабочую тетрадь для записей результатов измерений и графических построений во время лабораторных занятий.

После того, как необходимые эксперименты проверены, стенд отключается, исследуемая цепь разбирается и далее следует обработка результатов измерений, выполнение необходимых расчетов, заполнение таблиц и окончательное оформление отчета.

Преподаватель проверяет оформленный отчет и при отсутствии замечаний разрешает студенту защищать работу. При этом каждому студенту задаются контрольные вопросы по теоретическим, экспериментальным, расчетным и графическим материалам лабораторной работы. Условием защиты работы являются удовлетворительные ответы на поставленные вопросы и правильно оформленный отчет.

Краткое описание стенда УИЛС-1

Универсальный учебно-исследовательский лабораторный стенд УИЛС-1 включает в себя пульт, набор элементов, соединительных проводов и специальный лабораторный стол. Пульт состоит из источников энергии, электронного ключа, наборного поля и регулируемых пассивных элементов.

В источники энергии входят:

– блок постоянных напряжений, содержащий источник регулируемого стабилизированного напряжения ($U = 0...25 \text{ В}$, $I = 0...1 \text{ А}$) и источник нерегулируемого напряжения ($U = 20 \text{ В}$, $I = 0...1 \text{ А}$);

– блок переменного напряжения, представляющий собой регулируемый стабилизированный источник, обеспечивающий параметры $U = 5...25 \text{ В}$ и $I = 0...1 \text{ А}$ при $f = 0,1...8,0 \text{ кГц}$;

– блок трехфазного напряжения – трехфазный источник с независимыми фазами, напряжение которых регулируется ступенчато от 0 до 40 В через 1 В при $f = 50 \text{ Гц}$. Допустимый ток – до 1 А .

При превышении током значения 1 А имеющаяся в каждом источнике защита отключает их от цепи.

Электронный ключ применяется при анализе переходных процессов и представляет собой замыкающий и размыкающий полупроводниковые ключи с внутренней либо внешней синхронизацией.

Наборное поле, расположенное в центре пульта, представляет собой панель с 67 парами гнезд, предназначенными для подключения элементов исследуемой цепи (сплошные линии на наборном поле между гнездами обозначают их электрическое соединение между собой).

Регулируемые пассивные элементы расположены справа от наборного поля и включают в себя:

– блок переменного сопротивления с возможностью получения на выходе R_4 сопротивления в диапазоне $0...999 \text{ Ом}$ при допустимой мощности рассеивания – 5 Вт ;

– блок переменной емкости, обеспечивающий на выходе C_4 изменение емкости от $0,01$ до $9,99 \text{ мкФ}$;

– блок переменной индуктивности, позволяющий получить на выходе L_4 индуктивность в диапазоне $0,1...99,9 \text{ мГн}$ при допустимом токе до $0,2 \text{ А}$.

К выходам $R_1 \dots R_3$, $C_1 \dots C_3$, $L_1 \dots L_3$ блоков подключены пассивные элементы с нерегулируемыми параметрами.

В комплекс стенда входят также элементы наборного поля (стандартные резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности), соединительные провода и переключки. Имеющиеся в стенде измерительные приборы предназначены только для контроля работы источников.

Лабораторная работа 1

Исследование однофазных схем выпрямления

Цель работы: изучение принципа действия однофазных одно- и двухполупериодных схем выпрямления, экспериментальное определение их основных параметров и характеристик.

Теоретические сведения

Выпрямительным устройством (выпрямителем) называют статический преобразователь электрической энергии переменного тока в энергию постоянного тока. Выпрямительное устройство может состоять из трех основных элементов (рис. 1.1): трансформатора 1, вентильной схемы 2 и сглаживающего фильтра 3.

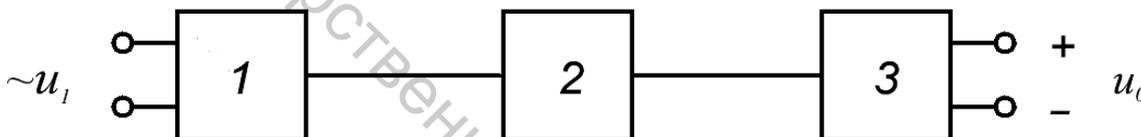


Рисунок 1.1 – Структурная схема выпрямителя

Трансформатор в выпрямительном устройстве предназначен для получения заданного напряжения, а также для устранения непосредственной электрической связи (гальванической связи) цепи выпрямленного тока с питающей сетью. Вентильная схема преобразует переменное напряжение в пульсирующее однополярное, а сглаживающий фильтр служит для получения постоянного напряжения из пульсирующего, т. е. для ослабления переменных составляющих, содержащихся в пульсирующем напряжении.

Выходными параметрами выпрямителя являются следующие величины: U_0 – среднее значение выпрямленного напряжения, I_0 – среднее значение выпрямленного тока, f_{n1} – частота основной гармоники выпрямленного напряжения, K_n – коэффициент пульсации выпрямленного напряжения.

Коэффициентом пульсации называют отношение амплитуды основной (первой) гармоники выпрямленного напряжения к его среднему значению:

$$K_n = U_{mn} / U_0.$$

Внешняя характеристика выпрямителя – зависимость выпрямленного напряжения U_0 от тока нагрузки I_0 при неизменном напряжении на входе выпрямителя. По этой характеристике можно определить выходное напряжение выпрямителя при заданной нагрузке и его внутреннее сопротивление:

$$R_0 = \Delta U_0 / \Delta I_0.$$

Вентили в схемах выпрямления характеризуют следующими параметрами: средним выпрямленным током $I_{np,cp}$, действующим значением тока I_{np} , амплитудой тока $I_{m,np}$, амплитудой обратного напряжения $U_{m,обр}$, средней мощностью P_{cp} .

При проектировании выпрямителей выбор вентиля осуществляют так, чтобы значения указанных параметров в электрической цепи не превышали предельно допустимых значений для выбранных вентилях.

При питании от однофазной сети используют следующие схемы выпрямления: однополупериодную, двухполупериодную с выводом нулевой точки трансформатора, мостовую (схема Греча).

Однополупериодная схема выпрямления (рис. 1.2) отличается простотой, небольшим числом элементов, невысокой стоимостью, возможностью работы без трансформатора непосредственно от питающей сети.

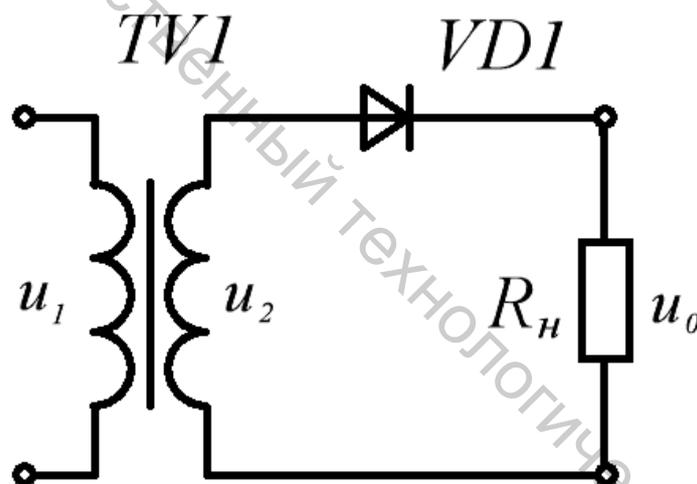


Рисунок 1.2 – Однополупериодная схема выпрямления

На рисунке 1.3 представлены временные диаграммы, характеризующие работу этой схемы на активную нагрузку при питании синусоидальным напряжением. Если принять сопротивление вторичной обмотки трансформатора и прямое сопротивление вентиля равными нулю, то во время положительной полуволны u_2 (вентиль VDI открыт) напряжение на нагрузке повторяет форму напряжения на вторичной обмотке трансформатора. Во время отрицательной полуволны u_2 (вентиль VDI закрыт) напряжение U_0 на нагрузке равно нулю, а поскольку обратное сопротивление вентиля $R_{обр} \gg R_n$, то напряжение вторичной обмотки полностью приложено к вентилю (потенциал анода вентиля становится отрицательным).

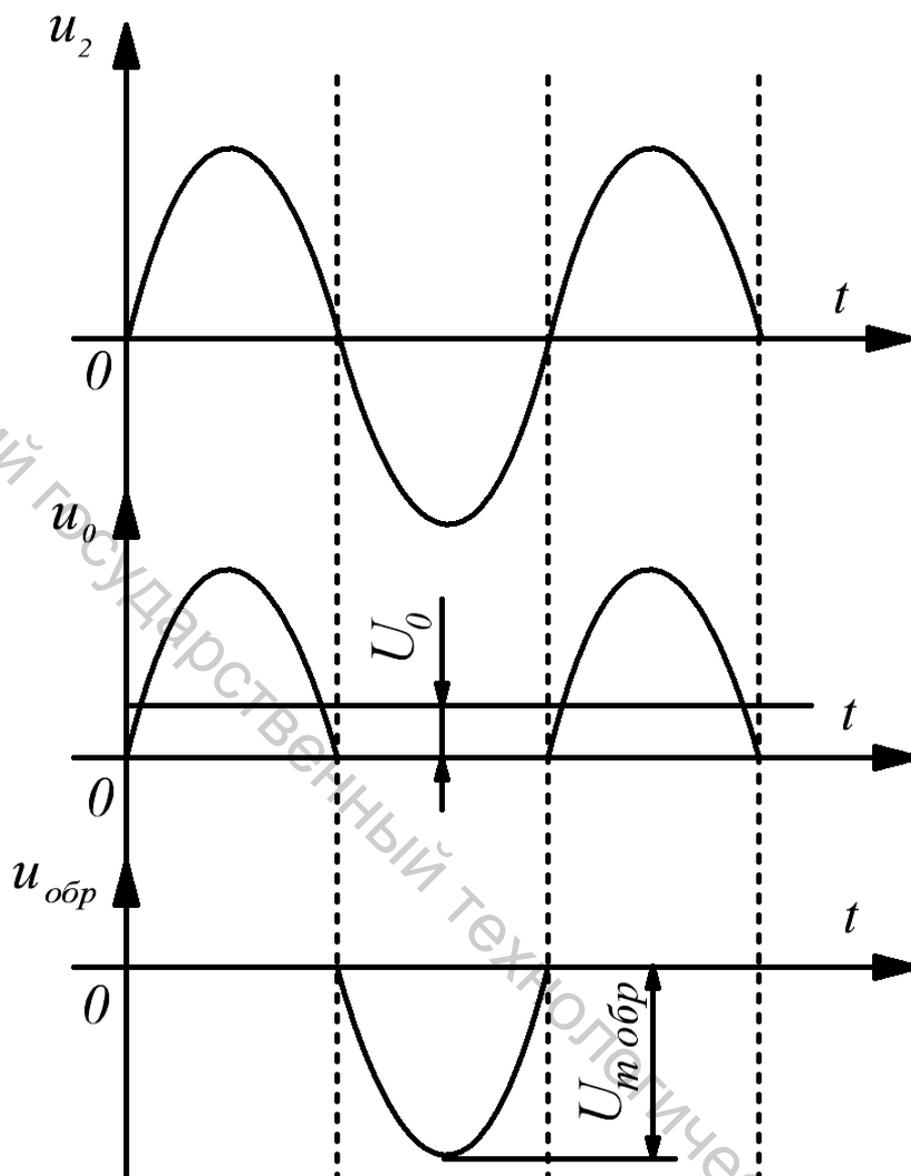


Рисунок 1.3 – Временные диаграммы

Для однополупериодной схемы выпрямления характерны следующие недостатки: низкая частота пульсации, высокое обратное напряжение на вентиле, плохое использование трансформатора (используется энергия одной полуволны напряжения вторичной обмотки), вынужденное намагничивание сердечника трансформатора (по вторичной обмотке протекает постоянная составляющая выпрямленного тока).

Двухполупериодная схема выпрямления с выводом нулевой точки трансформатора (рис. 1.4) образована двумя вентилями $VD1$ и $VD2$, трансформатором $TV1$, имеющим две одинаковые вторичные обмотки, включенные последовательно и согласно.

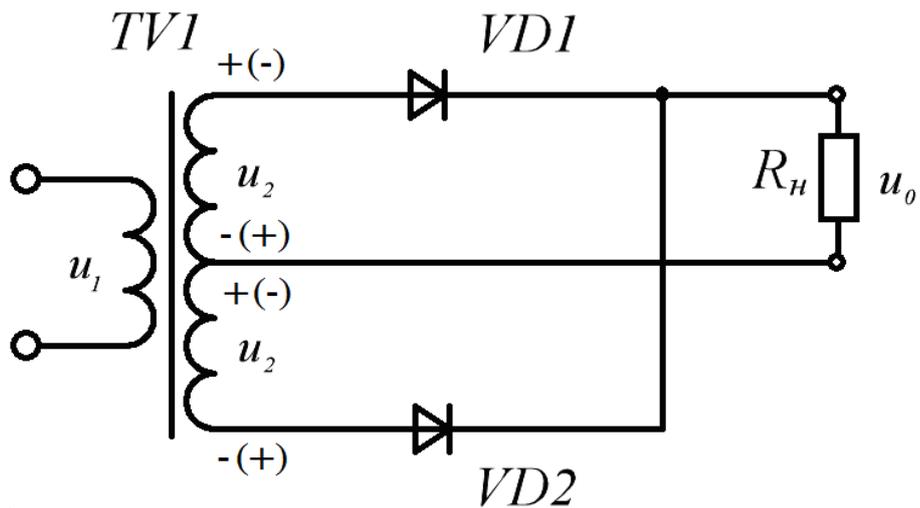


Рисунок 1.4 – Двухполупериодная схема выпрямления с выводом нулевой точки трансформатора

Во время положительной полуволны u_2 (полярность u_2 на рисунке 1.4 указана без скобок) открыт вентиль $VD1$. Во время отрицательной полуволны открыт вентиль $VD2$. Ток обоих вентилях протекает через нагрузку в одном направлении. Временные диаграммы напряжений для этой схемы выпрямления представлены на рисунке 1.5.

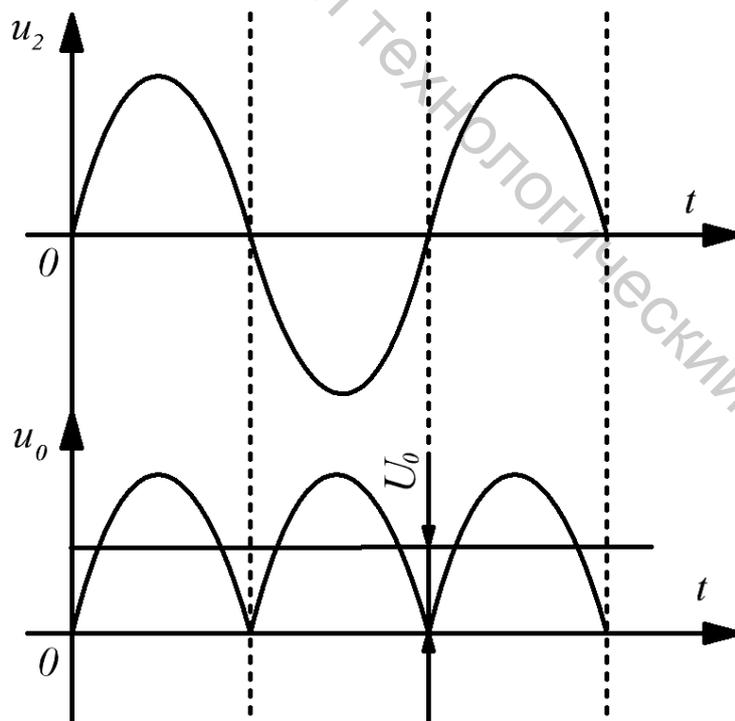


Рисунок 1.5 – Временные диаграммы

Фактически эта схема представляет собой две однополупериодные схемы выпрямления, работающие поочередно (через $T/2$) на общую нагрузку, что и

предопределяет ее достоинства и недостатки. К достоинствам схемы выпрямления с нулевой точкой можно отнести следующие: частота пульсации в два раза выше, чем в однополупериодной схеме, в два раза выше среднее значение выпрямленного напряжения, хороший КПД, отсутствие вынужденного намагничивания трансформатора. Основная область применения этой схемы – низковольтные выпрямители. Поскольку в любой момент времени в ней последовательно с нагрузкой оказывается включенным только один вентиль, то при больших выпрямленных токах и малых напряжениях это позволяет получить хороший КПД. К недостаткам схемы с нулевой точкой следует отнести плохое использование трансформатора (две вторичные обмотки, работающие в течение $T/2$ каждая), высокое обратное напряжение на вентилях, невозможность работы без трансформатора.

Мостовая схема выпрямления (рис. 1.6) содержит четыре вентиля и трансформатор с одной вторичной обмоткой.

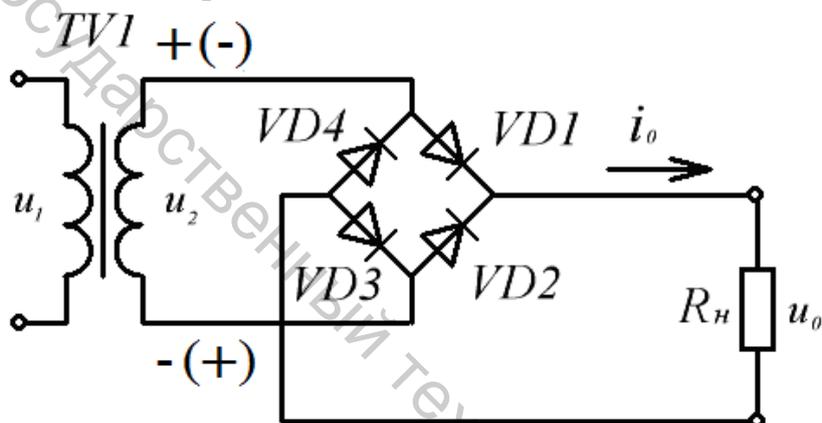


Рисунок 1.6 – Мостовая схема выпрямления

Во время положительной полуволны напряжения u_2 во вторичной обмотке трансформатора $VT1$ проводят ток вентили $VD1$, $VD3$, а во время отрицательной – вентили $VD2$, $VD4$. При этом ток в нагрузке протекает в одном направлении, указанном стрелкой, а ток во вторичной обмотке трансформатора через каждые $T/2$ изменяет свое направление на противоположное.

К закрытым вентилям прикладывается обратное напряжение, повторяющее по форме напряжение вторичной обмотки трансформатора. Максимальное значение обратного напряжения равно U_{m2} , т. е. амплитуде напряжения вторичной обмотки трансформатора. Поскольку в течение $T/2$ проводят ток два вентиля, а два – находятся в непроводящем состоянии, то к каждому из закрытых вентилях оказывается приложенным $U_{m.обр} = U_{m2} / 2$ (при равенстве их обратных сопротивлений). Временные диаграммы входного и выходного напряжений мостовой схемы выпрямления совпадают с соответствующими диаграммами выпрямителя с нулевым выводом (рис. 1.5).

Основными преимуществами мостовой схемы являются: большая частота пульсаций, чем в однополупериодной схеме; небольшое обратное напряжение;

хорошее использование трансформатора; отсутствие вынужденного намагничивания; возможность работы без трансформатора.

Недостатки мостовой схемы: большое количество вентиляей, повышенное падение напряжения на вентиляях.

Основные параметры рассмотренных схем выпрямления при работе на активную нагрузку представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Схема выпрямления	$\frac{U_2}{U_0}$	$\frac{U_{m.обр}}{U_0}$	$\frac{I_{np.ср}}{I_0}$	$\frac{I_{m.пр}}{I_0}$	$\frac{I_{np}}{I_0}$	$\frac{I_2}{I_0}$	$\frac{S_{mp}}{P_0}$	K_n	$\frac{f_n}{f_c}$
Однополупериодная	2,22	3,14	1	3,14	1,57	1,57	3,09	1,57	1
Двухполупериодная с нулевой точкой	1,11	3,14	0,5	1,57	0,785	0,785	1,48	0,67	2
Однофазная мостовая	1,11	1,57	0,5	1,57	0,785	1,11	1,23	0,67	2

Порядок выполнения работы на унифицированном стенде УИЛС-1

1. Для выполнения работы выбрать модуль "ВЫПРЯМИТЕЛЬ", схема которого представлена на рисунке 1.7, и разместить его на наборном поле.

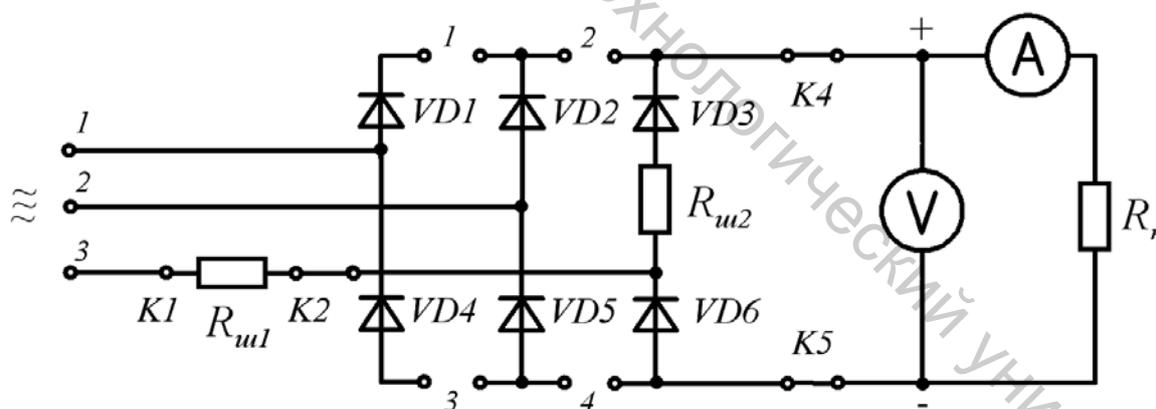


Рисунок 1.7 – Схема модуля "ВЫПРЯМИТЕЛЬ"

2. Для исследования однофазной однополупериодной схемы выпрямления к аноду диода $VD1$ и нижнему выводу нагрузки подать переменное напряжение с частотой 50 Гц от любой фазы источника трехфазного напряжения стенда. Катод диода $VD1$ подключить к точке соединения выводов амперметра и вольтметра. Подключить к выпрямителю нагрузку R_n , используя блок переменных сопротивлений стенда. Изменяя сопротивление нагрузки от 100 до 900 Ом , а также при $R_n = \infty$, измерить

напряжение U_0 и ток I_0 . Данные занести в таблицу 1.2. Подключить к нагрузке осциллограф и зарисовать осциллограммы напряжений u_2 и u_0 при $R_n = 900 \text{ Ом}$.

3. Для исследования однофазной мостовой схемы выпрямления к входным клеммам 1 и 2 схемы модуля "ВЫПРЯМИТЕЛЬ" подать переменное напряжение с частотой 50 Гц от любой фазы источника трехфазного напряжения стенда. Перемкнуть клеммы 1 и 3 схемы. Подключить к выпрямителю нагрузку R_n , используя блок переменных сопротивлений стенда и измерительные приборы. Изменяя сопротивление нагрузки от 100 до 900 Ом , а также при $R_n = \infty$, измерить напряжение U_0 и ток I_0 . Данные занести в таблицу 1.2. Подключить к нагрузке осциллограф и зарисовать осциллограмму напряжения u_0 при $R_n = 900 \text{ Ом}$.

Таблица 1.2

	$R_n, \text{ Ом}$	100	200	300	400	500	600	700	800	900	∞
Однофазная однополупериодная схема	$U_0, \text{ В}$										
	$I_0, \text{ мА}$										
Однофазная мостовая схема	$U_0, \text{ В}$										
	$I_0, \text{ мА}$										

4. Построить внешние характеристики обеих схем выпрямления $U_0(I_0)$.

Порядок выполнения работы в программе Electronics Workbench

1. Произвести моделирование схемы однополупериодного выпрямителя, приведенной на рисунке 1.8, задав следующие параметры элементов: напряжение источника питания 10 В , частота тока 50 Гц , сопротивление нагрузки $R = (\text{№ компьютера}) \text{ кОм}$. Зарисовать в масштабе осциллограммы напряжений на входе схемы и на нагрузке.

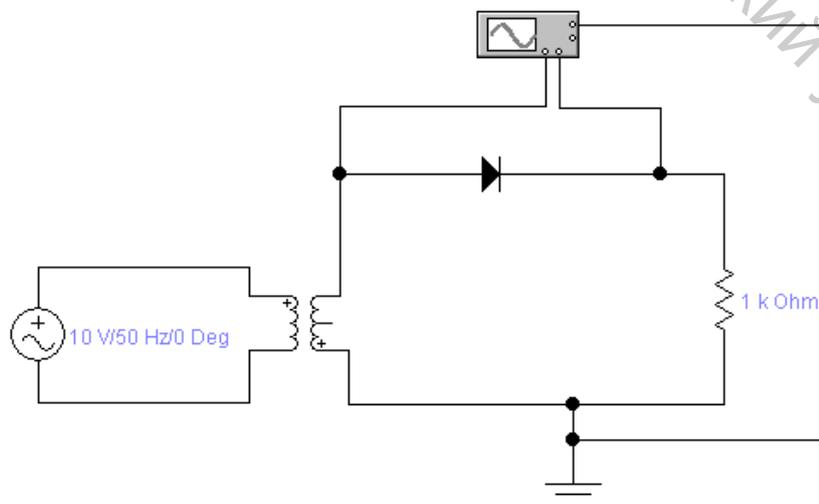


Рисунок 1.8 – Схема моделирования однополупериодного выпрямителя

2. Произвести моделирование схемы двухполупериодного выпрямителя с выводом нулевой точки трансформатора, приведенной на рисунке 1.9, задав следующие параметры элементов: напряжение источника питания 10 В , частота тока 50 Гц , сопротивление нагрузки $R = (\text{№ компьютера})\text{ кОм}$. Зарисовать в масштабе осциллограммы напряжений на входе схемы и на нагрузке.

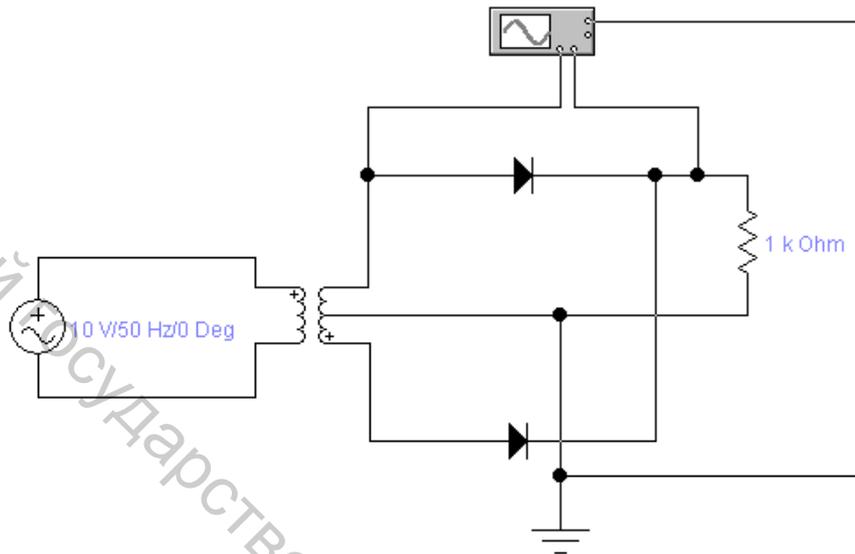


Рисунок 1.9 – Схема моделирования двухполупериодного выпрямителя с выводом нулевой точки трансформатора

3. Произвести моделирование схемы однофазного мостового выпрямителя, приведенной на рисунке 1.10, задав следующие параметры элементов: напряжение источника питания 10 В , частота тока 50 Гц , сопротивление нагрузки $R = (\text{№ компьютера})\text{ кОм}$. Зарисовать в масштабе осциллограммы напряжений на входе схемы и на нагрузке.

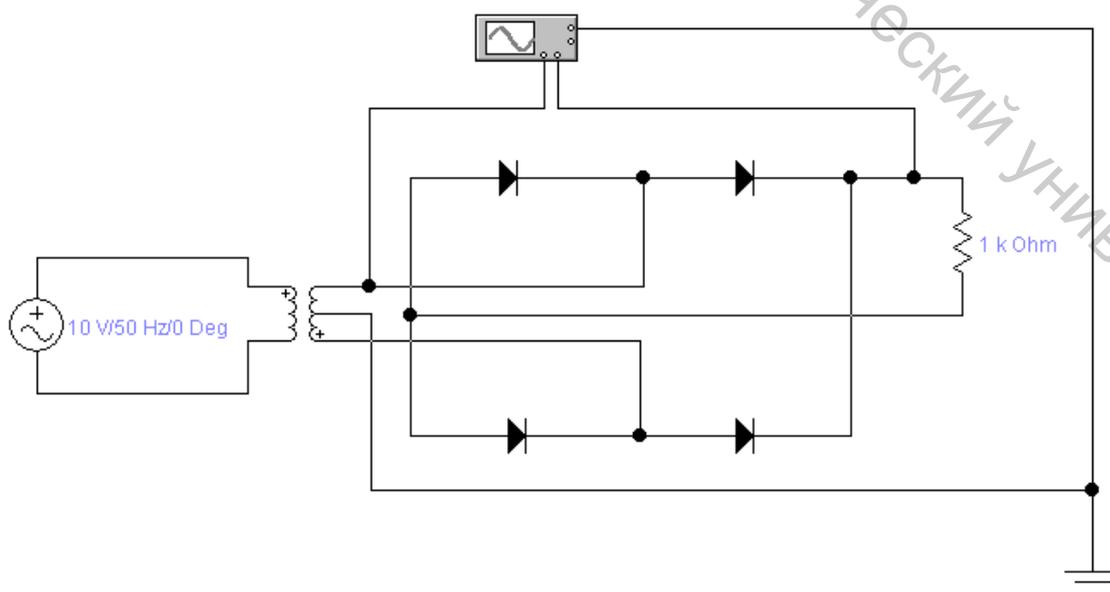


Рисунок 1.10 – Схема моделирования однофазного мостового выпрямителя

Контрольные вопросы

1. Объяснить принцип действия однополупериодной схемы выпрямления, ее достоинства и недостатки.
2. Объяснить принцип действия двухполупериодной схемы выпрямления с нулевой точкой, ее достоинства и недостатки.
3. Объяснить принцип действия мостовой схемы выпрямления, ее достоинства и недостатки.
4. Что такое внешняя характеристика выпрямителя? Чем определяется ее наклон?
5. Что такое коэффициент пульсаций и внутреннее сопротивление выпрямителя?

Лабораторная работа 2

Исследование трехфазных схем выпрямления

Цель работы: изучение принципа действия основных трехфазных схем выпрямления, экспериментальное определение их основных параметров и характеристик.

Теоретические сведения

Трехфазные выпрямители используют для получения выпрямленного напряжения при средних и больших мощностях в нагрузке. Наибольшее распространение получили две трехфазные схемы выпрямления: трехфазная схема выпрямления с нулевым выводом (схема Миткевича) и мостовая схема (схема Ларионова).

Трехфазную схему выпрямления с нулевым выводом образуют трансформатор и три вентиля (рис. 2.1). Первичные обмотки трансформатора могут быть соединены звездой или треугольником. Вторичные обмотки должны быть соединены звездой. Свободные выводы вторичных обмоток подключены к анодам вентиля, катоды которых соединены в узел. Сопротивление нагрузки подключают между точкой соединения катодов и нулевой точкой вторичных обмоток.

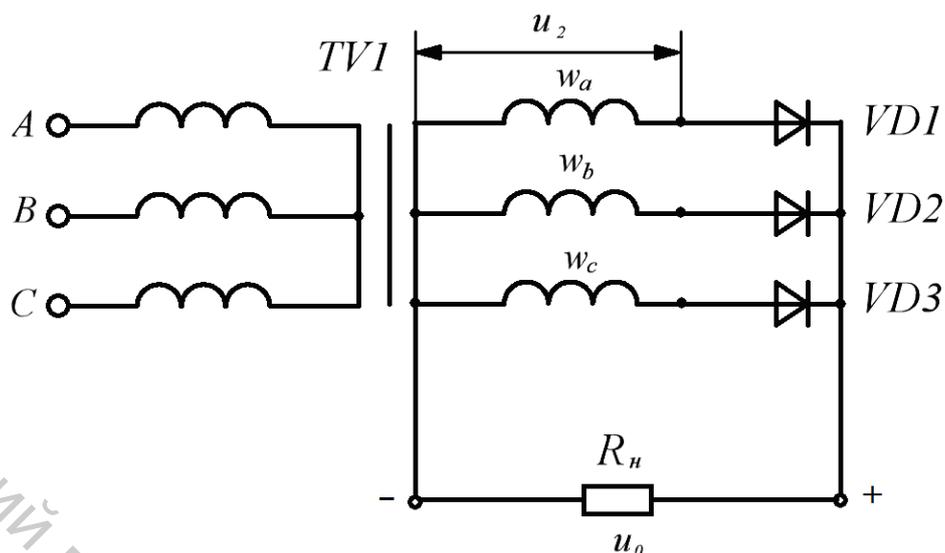


Рисунок 2.1 – Трехфазная схема выпрямления с нулевым выводом

Временные диаграммы, поясняющие работу схемы, приведены на рисунке 2.2. Рассмотрим работу этой схемы выпрямления при активной нагрузке.

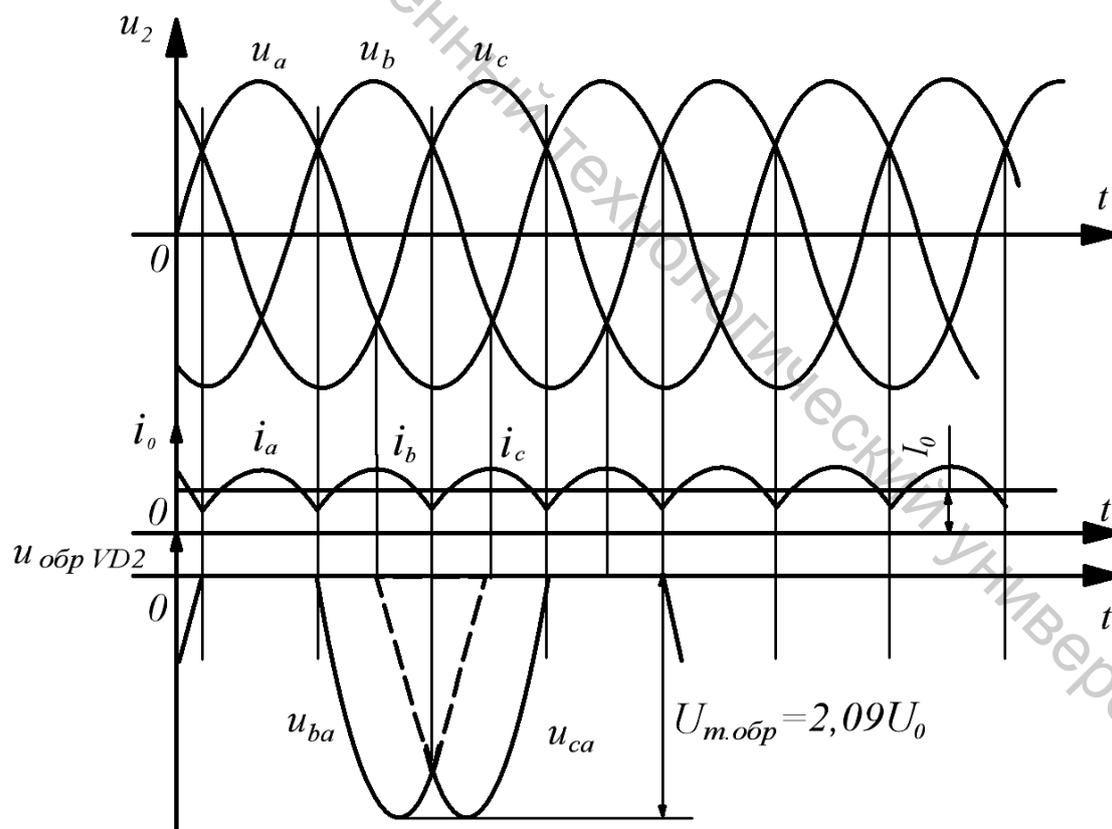


Рисунок 2.2 – Временные диаграммы

Поскольку сопротивление нагрузки выпрямителя включено между нулевым выводом обмоток и точкой соединения катодов вентилей, они будут

открываться только при положительной полярности соответствующего фазного напряжения. Кроме того, открытым может быть только тот вентиль, мгновенное значение напряжения на аноде которого в данный момент времени выше, чем у других. Из рисунка 2.2 видно, что каждый из вентиляей проводит ток в течение $T/3$.

Поскольку направление тока через нагрузку не изменяется, ток в нагрузке имеет однополярный пульсирующий характер, частота пульсаций в три раза выше частоты питающей сети. Следует отметить, что направление тока во вторичных обмотках трансформатора также остается постоянным, что вызывает вынужденное намагничивание сердечника трансформатора.

Трехфазная мостовая схема выпрямления образована трехфазным трансформатором и шестью вентилями (рис. 2.3). Вентили $VD1, VD3, VD5$ образуют так называемую катодную группу, поскольку их катоды соединены в узел, а вентили $VD2, VD4, VD6$ – анодную группу (их аноды сведены в узел). Временные диаграммы, поясняющие работу схемы при активной нагрузке, приведены на рисунке 2.4.

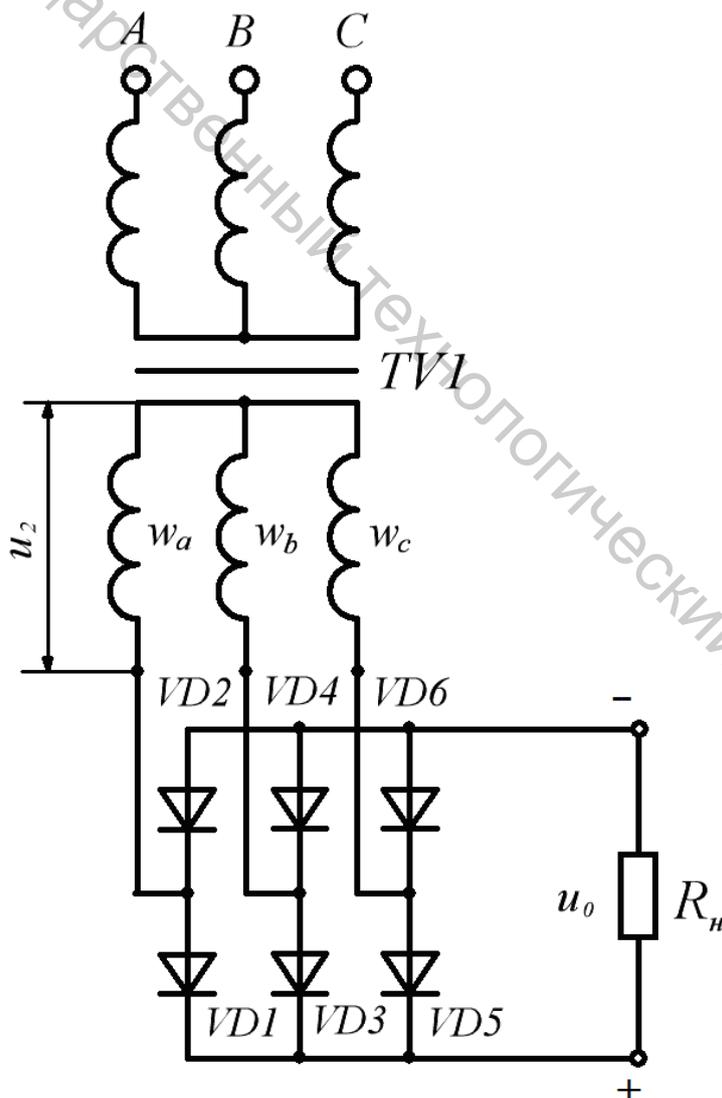


Рисунок 2.3 – Трехфазная мостовая схема выпрямления

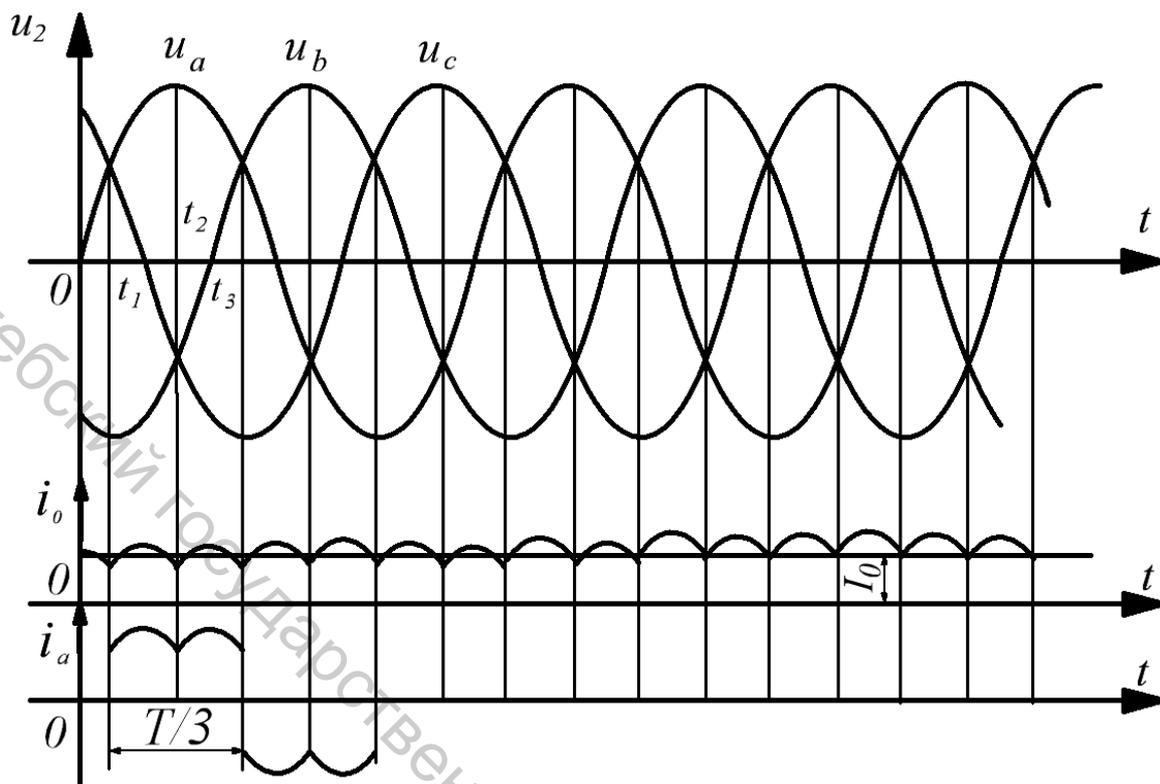


Рисунок 2.4 – Временные диаграммы

Каждый вентиль выпрямителя проводит ток в течение $T/3$. В анодной группе в данный момент будет работать тот вентиль, напряжение на катоде которого имеет наиболее отрицательное мгновенное значение. В катодной группе ток проводит вентиль, имеющий на аноде наибольшее мгновенное положительное значение напряжения. Например, в течение интервала времени t_1-t_2 ток проходит по контуру: $w_a-VD1-R_n-VD4-w_b-w_a$, в течение t_2-t_3 : $w_a-VD1-R_n-VD6-w_c-w_a$. В схеме Ларионова одновременно пропускают ток (как и в однофазной мостовой схеме) два вентиля: один из катодной, а второй из анодной группы.

Выпрямленное напряжение определяется в любой момент времени разностью напряжений фаз с наиболее положительным и наиболее отрицательным напряжениями, т. е. линейным напряжением. Поскольку каждая вторичная обмотка связана с двумя вентилями, по ней за период входного напряжения протекает ток этих вентилях дважды в противоположных направлениях. К неработающей в данный момент паре вентилях приложено обратное напряжение, равное амплитуде линейного. Из этого следует, что обратное напряжение на вентиле в схеме Ларионова в два раза меньше (при равенстве обратных сопротивлений вентилях), чем в схеме с нулевой точкой.

Основные параметры рассмотренных трехфазных схем выпрямления при работе на активную нагрузку приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Схема выпрямления	$\frac{U_2}{U_0}$	$\frac{U_{m.обр}}{U_0}$	$\frac{I_{np.ср}}{I_0}$	$\frac{I_{m.нр}}{I_0}$	$\frac{I_{нр}}{I_0}$	$\frac{I_2}{I_0}$	$\frac{S_{mp}}{P_0}$	K_n	$\frac{f_n}{f_c}$
Трехфазная с нулевой точкой	0,855	2,1	0,33	1,21	0,59	0,59	1,38	0,25	3
Трехфазная мостовая	0,43	1,05	0,33	1,05	0,58	0,82	1,05	0,057	6

Указанные в таблице 2.1 соотношения приведены для случая соединения обмоток трансформатора «звезда – звезда».

Несмотря на большее в два раза количество вентилях, схема Ларионова гораздо предпочтительнее схемы с нулевым выводом благодаря следующим достоинствам: небольшое значение максимального обратного напряжения на вентиле, хорошее использование трансформатора по мощности и отсутствие вынужденного подмагничивания, малый коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения, повышенная частота пульсаций выпрямленного напряжения, возможность работы от трансформатора с соединением вторичных обмоток как звездой, так и треугольником, а также непосредственно от трехфазной питающей сети.

Порядок выполнения работы на унифицированном стенде УИЛС-1

1. Для выполнения работы выбрать модуль "ВЫПРЯМИТЕЛЬ", схема которого представлена на рисунке 1.7, и разместить его на наборном поле.

2. Для исследования трехфазной схемы выпрямления с нулевым выводом к входным клеммам 1, 2 и 3 схемы модуля "ВЫПРЯМИТЕЛЬ" подать трехфазное напряжение с частотой 50 Гц от источника трехфазного напряжения стенда, соединив фазы источника звездой. Переключить клеммы 1 и 2 схемы. Подключить к выпрямителю нагрузку R_n , используя блок переменных сопротивлений стенда и измерительные приборы. Нижний вывод нагрузки соединить с точкой соединения концов фаз источника. Изменяя сопротивление нагрузки от 100 до 900 Ом, а также при $R_n = \infty$, измерить напряжение U_0 и ток I_0 . Данные занести в таблицу 2.2. Подключить к нагрузке осциллограф и зарисовать осциллограммы напряжений u_2 и u_0 при $R_n = 900$ Ом.

3. Для исследования трехфазной мостовой схемы выпрямления к входным клеммам 1, 2 и 3 схемы модуля "ВЫПРЯМИТЕЛЬ" подать трехфазное напряжение с частотой 50 Гц от источника трехфазного напряжения стенда, соединив фазы источника звездой. Переключить клеммы 1, 2, 3 и 4 схемы. Подключить к выпрямителю нагрузку R_n , используя блок переменных сопротивлений стенда и измерительные приборы. Изменяя сопротивление нагрузки от 100 до 900 Ом, а также при $R_n = \infty$, измерить напряжение U_0 и ток I_0 . Данные занести в таблицу 2.2. Подключить к нагрузке осциллограф и зарисовать осциллограмму напряжения u_0 при $R_n = 900$ Ом.

Таблица 2.2

	$R_n, \text{Ом}$	100	200	300	400	500	600	700	800	900	∞
Трехфазная схема с нулевым выводом	$U_0, \text{В}$										
	$I_0, \text{мА}$										
Трехфазная мостовая схема	$U_0, \text{В}$										
	$I_0, \text{мА}$										

4. Построить внешние характеристики обеих схем выпрямления $U_0(I_0)$.

Порядок выполнения работы в программе Electronics Workbench

1. Произвести моделирование схемы трехфазного выпрямителя с нулевым выводом, приведенной на рисунке 2.5, задав следующие параметры элементов: напряжение источника питания 10 В ; частота тока 50 Гц ; начальные фазы напряжений $\psi_a = 0^\circ, \psi_b = 120^\circ, \psi_c = 240^\circ$; сопротивление нагрузки $R = (\text{№ компьютера}) \text{ кОм}$. Зарисовать в масштабе осциллограммы напряжений на входе схемы и на нагрузке.

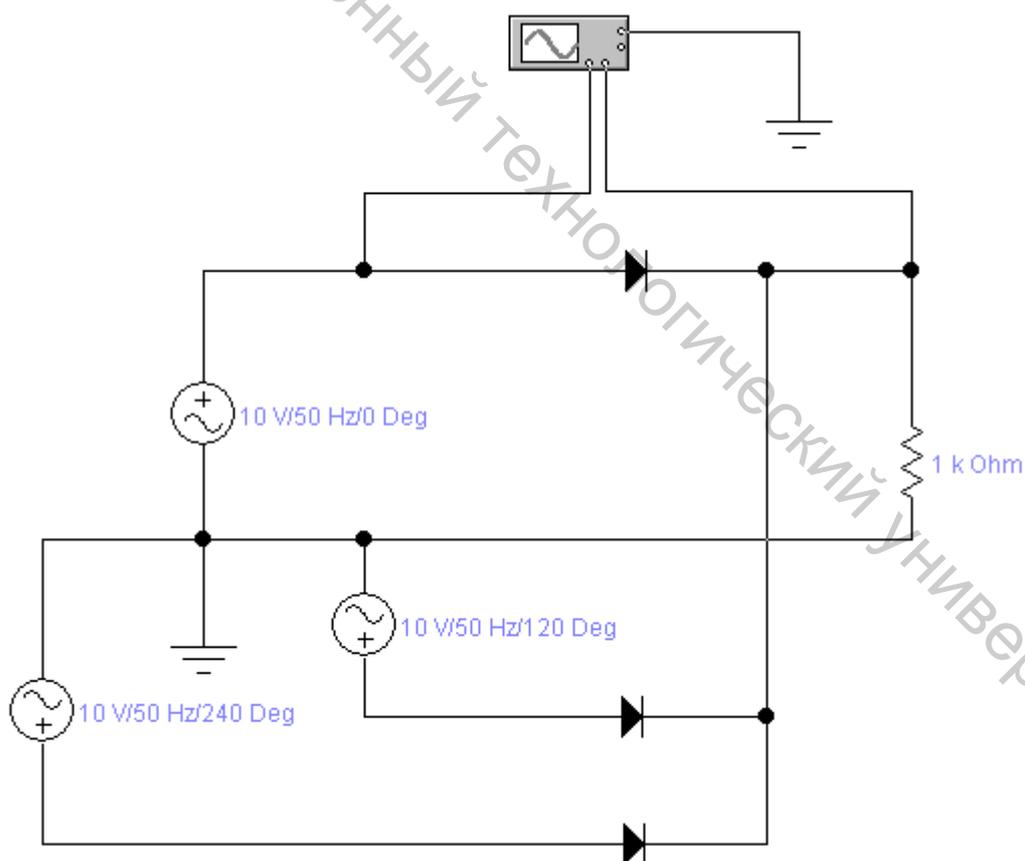


Рисунок 2.5 – Схема моделирования трехфазного выпрямителя с нулевым выводом

2. Произвести моделирование схемы трехфазного мостового выпрямителя, приведенной на рисунке 2.6, задав следующие параметры элементов: напряжение источника питания 10 В ; частота тока 50 Гц ; начальные фазы напряжений $\psi_a = 0^\circ$, $\psi_b = 120^\circ$, $\psi_c = 240^\circ$; сопротивление нагрузки $R = (\text{№ компьютера})\text{ кОм}$. Зарисовать в масштабе осциллограмму напряжения на нагрузке.

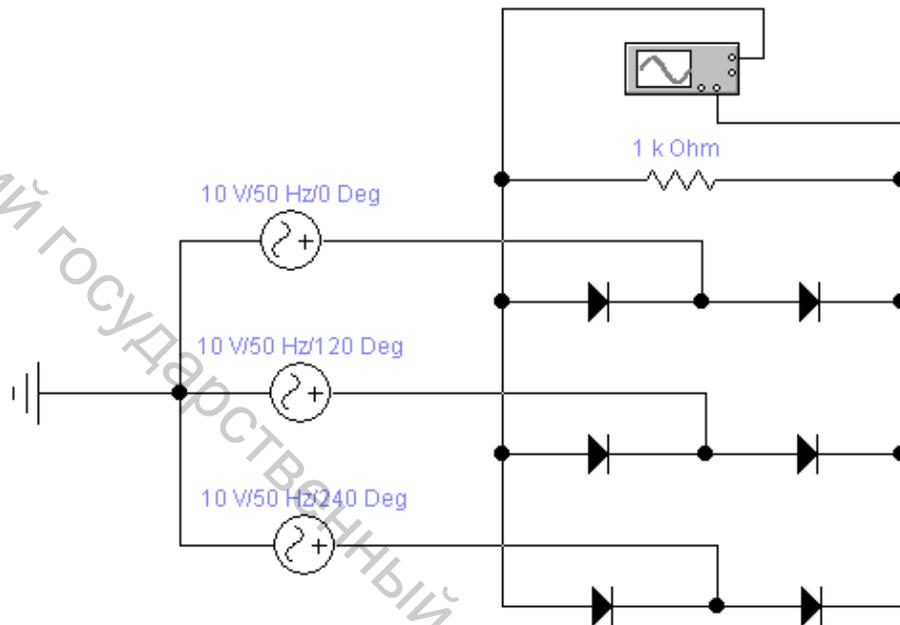


Рисунок 2.6 – Схема моделирования трехфазного мостового выпрямителя

Контрольные вопросы

1. Объяснить принцип действия трехфазной схемы выпрямления с нулевым выводом, ее достоинства и недостатки.
2. Объяснить принцип действия трехфазной мостовой схемы выпрямления, ее достоинства и недостатки.
3. Дать сравнительную оценку трехфазных схем выпрямления: с нулевым выводом и мостовой.
4. Дать сравнительную оценку однофазных и трехфазных схем выпрямления.

Лабораторная работа 3

Исследование сглаживающих фильтров

Цель работы: изучение принципа действия сглаживающих фильтров и исследование их основных характеристик.

Теоретические сведения

Выходное напряжение всех схем выпрямления имеет пульсирующий характер, т. е. наряду с постоянной составляющей содержит значительную переменную составляющую, существенно нарушающую работоспособность питаемых от выпрямителя электронных устройств. Для уменьшения переменной составляющей выпрямленного напряжения на выходе выпрямителя устанавливают сглаживающий фильтр, чаще всего представляющий собой фильтр нижних частот, частота среза которого выбирается ниже частоты первой (основной) гармоники переменной составляющей выпрямленного напряжения.

Степень пульсаций выпрямленного напряжения оценивают коэффициентом пульсаций, который равен отношению амплитуды первой гармоники напряжения пульсаций U_{m1} к среднему значению U_0 выходного напряжения $K_n = U_{m1} / U_0$. Зная кратность пульсаций выпрямленного напряжения m , коэффициент пульсаций на выходе выпрямителя по первой гармонике определяют как $K_n = 2 / (m^2 - 1)$. Качество работы сглаживающего фильтра оценивают его коэффициентом сглаживания, который равен отношению коэффициента пульсаций на входе фильтра к коэффициенту пульсаций на его выходе $K_c = K_{nвх} / K_{nвых}$. Иногда для оценки свойств сглаживающего фильтра удобнее использовать коэффициент фильтрации, представляющий собой отношение амплитуд переменных составляющих напряжений на входе и выходе фильтра $K_f = U_{твх} / U_{твых}$.

Рассмотрим принцип действия основных типов пассивных сглаживающих фильтров, наиболее широко используемых на практике.

Емкостной фильтр представляет собой конденсатор C_f , включенный параллельно нагрузке R_n выпрямителя (рис. 3.1).

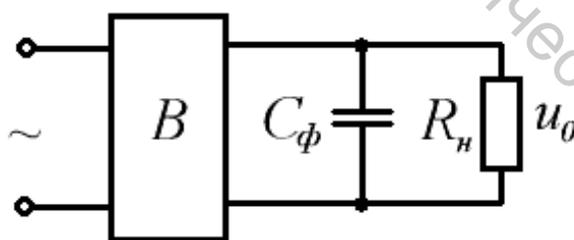


Рисунок 3.1 – Схема выпрямления с емкостным фильтром

В течение интервала времени, когда мгновенное значение напряжения $u_{вых}$ на выходе выпрямителя больше мгновенного значения напряжения u_c на конденсаторе (рис. 3.2), конденсатор накапливает энергию, поступающую от выпрямителя. При этом вентили выпрямителя открыты и по ним течет ток заряда конденсатора. Когда выпрямленное напряжение становится меньше напряжения на конденсаторе, вентили закрываются, и ток в нагрузке поддерживается за счет энергии, накопленной в конденсаторе фильтра C_f .

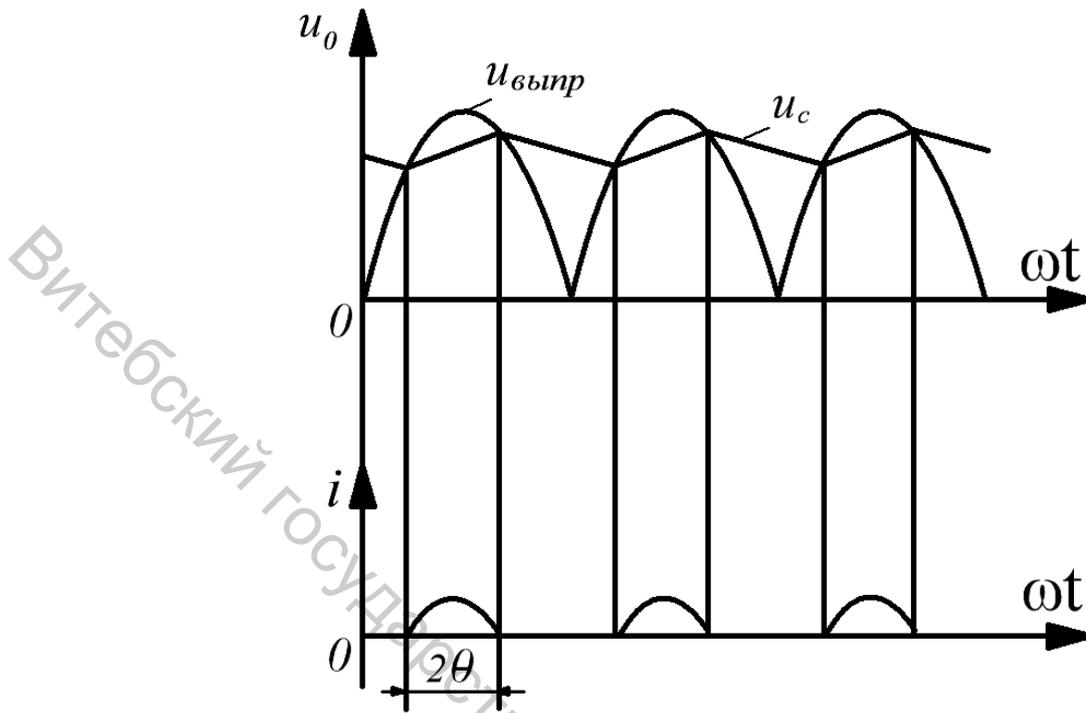


Рисунок 3.2 – Временные диаграммы

Половину интервала, в течение которого вентиль выпрямителя пропускает ток (смещен в прямом направлении), называют углом отсечки и обозначают θ (рис. 3.2).

Выпрямленное напряжение представляет собой сумму постоянной составляющей и ряда гармонических составляющих с частотами, кратными частоте питающей сети. Наибольшую амплитуду имеет первая основная гармоническая составляющая. Поскольку для постоянного тока конденсатор представляет бесконечно большое сопротивление, постоянная составляющая тока выпрямителя замыкается через нагрузку, а переменная составляющая – через конденсатор фильтра. С целью ослабления переменной составляющей тока в нагрузке емкость конденсатора фильтра выбирают так, чтобы его сопротивление первой гармонике тока было много меньше сопротивления нагрузки $1/(m\omega C_\phi) \ll R_n$. Из этого выражения следует, что эффективность емкостного фильтра тем выше, чем больше сопротивление нагрузки, т. е. чем меньше ток нагрузки.

Поскольку сглаживающее действие емкостного фильтра основано на накоплении энергии $W_c = C_\phi U^2 / 2$, величина которой пропорциональна квадрату напряжения на конденсаторе, то наиболее целесообразно использовать емкостный фильтр при повышенных напряжениях.

Индуктивный фильтр представляет собой дроссель L_ϕ , включенный последовательно с сопротивлением нагрузки R_n (рис. 3.3).

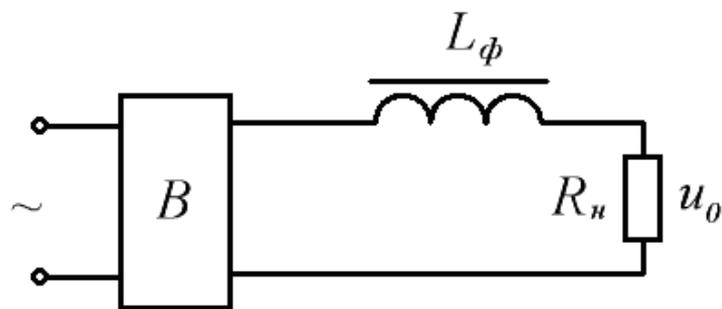


Рисунок 3.3 – Схема выпрямления с индуктивным фильтром

Сглаживающее действие индуктивного фильтра обусловлено возникновением в нем ЭДС самоиндукции, препятствующей изменению мгновенного значения выпрямленного тока. Если пренебречь активным сопротивлением дросселя, то постоянная составляющая выпрямленного тока им не ослабляется и подается в нагрузку без изменения, тогда как переменная составляющая будет в значительной степени ослаблена. Для эффективного сглаживания пульсаций необходимо индуктивность дросселя выбрать из условия $m\omega L_\phi \gg R_n$. Величина энергии, запасаемой дросселем фильтра, равна $W_L = L_\phi I^2 / 2$. Очевидно наиболее эффективное использование индуктивного фильтра при больших токах нагрузки. При правильном выборе индуктивный фильтр позволяет обеспечить непрерывность тока в цепи нагрузки. Выходное напряжение выпрямителя с индуктивным фильтром изменяется меньше с изменением тока нагрузки, чем в случае использования емкостного фильтра.

Г-образные фильтры. Г-образный LC-фильтр получают включением параллельно нагрузке конденсатора емкостью C_ϕ , а последовательно – дросселя индуктивностью L_ϕ (рис. 3.4).

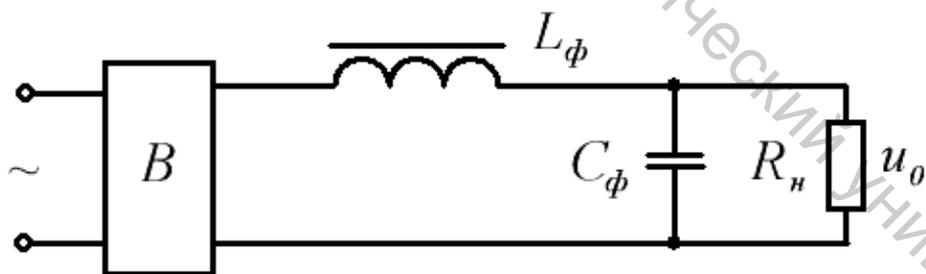


Рисунок 3.4 – Схема выпрямления с Г-образным LC-фильтром

В данном фильтре сочетаются положительные качества емкостного и индуктивного фильтров. Параметры L_ϕ и C_ϕ образующих его элементов выбирают из условия $m\omega L_\phi \gg R_n \gg 1/(m\omega C_\phi)$.

В выпрямителях малой мощности, а также в выпрямителях с высоким входным напряжением и малым током нагрузки вместо дросселя часто ставят резистор сопротивления R_ϕ (рис. 3.5), получая сглаживающий Г-образный RC-фильтр.

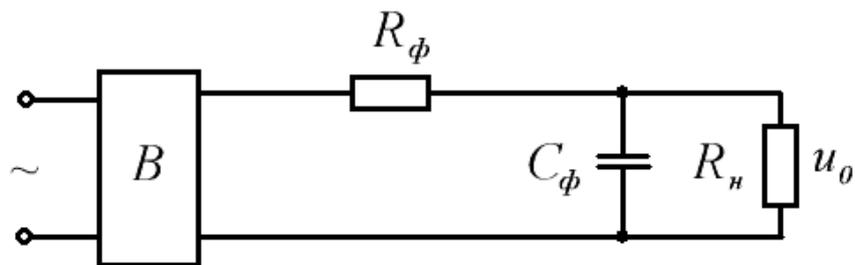


Рисунок 3.5 – Схема выпрямления с Γ -образным RC -фильтром

В этом фильтре на сопротивлении R_ϕ , кроме переменной составляющей, выделяется часть постоянной составляющей выпрямленного напряжения, что снижает КПД фильтра и требует повышения выходного напряжения выпрямителя. Достоинством RC -фильтров являются малые размеры и стоимость. Для получения хорошего коэффициента сглаживания и приемлемого КПД элементы RC -фильтра выбирают из следующих условий:

$$\frac{1}{m\omega C_\phi} \ll R_n; \quad R_\phi \gg \frac{1}{m\omega C_\phi}; \quad R_\phi = R_n(1 - \eta) / \eta.$$

Оптимальным считается КПД порядка 0,8.

Многозвенные фильтры. При необходимости получения высоких значений коэффициента сглаживания применяют более сложные схемы фильтров: Π -образные (рис. 3.6) и двойные Γ -образные (рис. 3.7). При расчете таких фильтров принимают их коэффициенты сглаживания равными произведению коэффициентов сглаживания образующих их простых фильтров. Например, коэффициент сглаживания Π -образного фильтра принимают равным произведению коэффициентов сглаживания емкостного и Γ -образного фильтров.

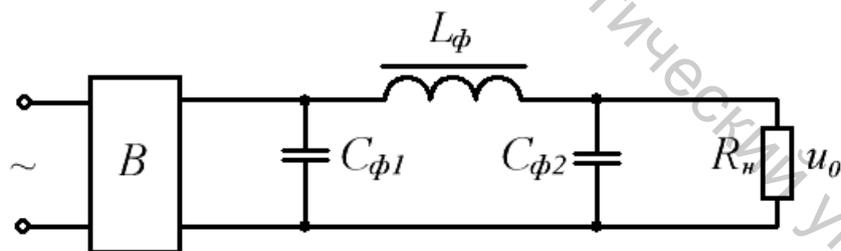


Рисунок 3.6 – Схема выпрямления с Π -образным фильтром

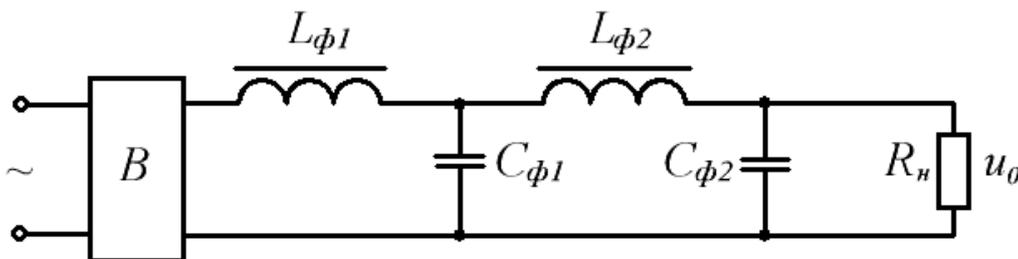


Рисунок 3.7 – Схема выпрямления с двойным Γ -образным фильтром

Порядок выполнения работы на унифицированном стенде УИЛС-1

1. Для выполнения работы выбрать модуль "ВЫПРЯМИТЕЛЬ", схема которого представлена на рисунке 1.7, и разместить его на наборном поле.

2. Для исследования схемы выпрямления с емкостным фильтром собрать схему на рисунке 3.1, временно отключив конденсатор фильтра C_{ϕ} . В качестве выпрямителя «В» использовать однофазную мостовую схему выпрямления (сборка схемы описана в п. 3 порядка выполнения работы на унифицированном стенде УИЛС – 1 практического занятия № 1). Подключить к выпрямителю нагрузку R_n , используя блок переменных сопротивлений стенда. К входным клеммам 1 и 2 схемы модуля "ВЫПРЯМИТЕЛЬ" подать переменное напряжение с частотой 50 Гц от любой фазы источника трехфазного напряжения стенда. Подключить к нагрузке осциллограф и зарисовать осциллограмму напряжения u_0 при отсутствии сглаживающего фильтра для $R_n = 900 \text{ Ом}$.

При отключенном источнике питания подключить к выпрямителю конденсатор фильтра C_{ϕ} емкостью 10 мкФ , используя блоки емкостей стенда.

Включив питание схемы, зарисовать осциллограмму напряжения u_0 при $R_n = 900 \text{ Ом}$. Изменяя сопротивление нагрузки от 100 до 900 Ом , а также при $R_n = \infty$, измерить напряжение U_0 и ток I_0 . Данные занести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

	$R_n, \text{ Ом}$	100	200	300	400	500	600	700	800	900	∞
Схема выпрямления с емкостным фильтром	$U_0, \text{ В}$										
	$I_0, \text{ мА}$										
Схема выпрямления с Г-образным LC-фильтром	$U_0, \text{ В}$										
	$I_0, \text{ мА}$										
Схема выпрямления с Г-образным RC-фильтром	$U_0, \text{ В}$										
	$I_0, \text{ мА}$										
Схема выпрямления с П-образным фильтром	$U_0, \text{ В}$										
	$I_0, \text{ мА}$										

3. Для исследования схемы выпрямления с Г-образным LC-фильтром собрать схему на рисунке 3.4. Дроссель фильтра L_{ϕ} индуктивностью $0,55 \text{ Гн}$ подключить к выпрямителю, используя блоки индуктивностей стенда.

Конденсатор фильтра C_ϕ емкостью 10 мкФ подключить к выпрямителю, используя блоки емкостей стенда. Включив питание схемы, зарисовать осциллограмму напряжения u_0 при $R_n = 900 \text{ Ом}$. Изменяя сопротивление нагрузки от 100 до 900 Ом , а также при $R_n = \infty$, измерить напряжение U_0 и ток I_0 . Данные занести в таблицу 3.1.

4. Для исследования схемы выпрямления с Γ -образным RC -фильтром собрать схему на рисунке 3.5. Резистор фильтра R_ϕ сопротивлением 510 Ом подключить к выпрямителю, используя элементы наборного поля стенда. Конденсатор фильтра C_ϕ емкостью 10 мкФ подключить к выпрямителю, используя блоки емкостей стенда. Включив питание схемы, зарисовать осциллограмму напряжения u_0 при $R_n = 900 \text{ Ом}$. Изменяя сопротивление нагрузки от 100 до 900 Ом , а также при $R_n = \infty$, измерить напряжение U_0 и ток I_0 . Данные занести в таблицу 3.1.

5. Для исследования схемы выпрямления с Π -образным фильтром собрать схему на рисунке 3.6. Дроссель фильтра L_ϕ индуктивностью $0,55 \text{ Гн}$ подключить к выпрямителю, используя блоки индуктивностей стенда. Конденсаторы фильтра $C_{\phi 1}$ и $C_{\phi 2}$ емкостью 10 мкФ подключить к выпрямителю, используя блоки емкостей стенда. Включив питание схемы, зарисовать осциллограмму напряжения u_0 при $R_n = 900 \text{ Ом}$. Изменяя сопротивление нагрузки от 100 до 900 Ом , а также при $R_n = \infty$, измерить напряжение U_0 и ток I_0 . Данные занести в таблицу 3.1.

6. Построить внешние характеристики схем выпрямления с исследованными фильтрами $U_0(I_0)$.

7. Определить коэффициенты сглаживания исследованных фильтров по формулам таблицы 3.2. Для всех расчетов принять соотношения: $m = 2$, $\omega = 2\pi f$, $f = 50 \text{ Гц}$.

Таблица 3.2

№	Наименование фильтра	Коэффициенты сглаживания
1.	Емкостный фильтр	$K_{c1} = \frac{K_{n\text{ex}}}{K_{n\text{вых}}} = \frac{0,67}{m\omega C_\phi R_n}$
2.	Γ -образный LC -фильтр	$K_{c2} = m^2 \omega^2 L_\phi C_\phi - 1$
3.	Γ -образный RC -фильтр	$K_{c3} = m\omega \frac{R_\phi R_n}{R_\phi + R_n} C_\phi$
4.	Π -образный фильтр	$K_{c4} = K_{c1} \cdot K_{c2}$

Порядок выполнения работы в программе Electronics Workbench

1. Произвести моделирование схемы выпрямителя при отсутствии сглаживающего фильтра (рис. 3.8), задав следующие параметры элементов: напряжение источника питания 10 В , частота тока 50 Гц , сопротивление нагрузки 1 кОм . Зарисовать в масштабе осциллограмму напряжения на нагрузке, установив настройки осциллографа в соответствии с рисунком 3.9.

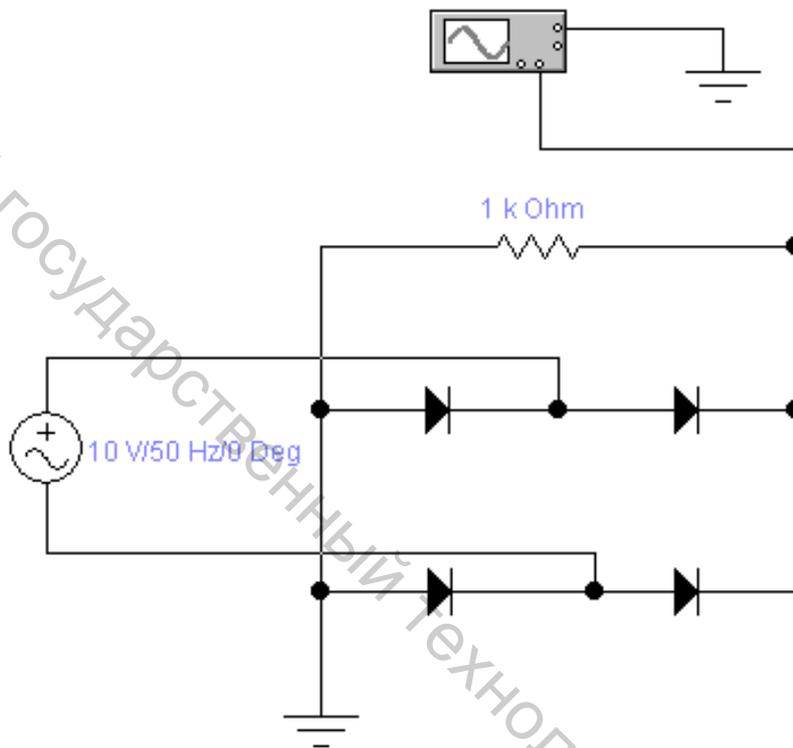


Рисунок 3.8 – Схема моделирования однофазного мостового выпрямителя без сглаживающего фильтра

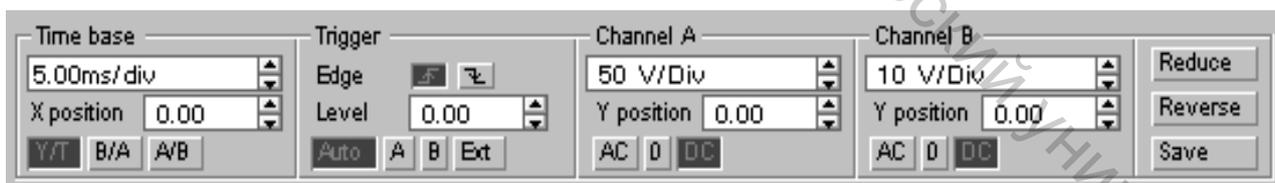


Рисунок 3.9 – Настройки осциллографа

2. Произвести моделирование схемы однофазного мостового выпрямителя с емкостным фильтром, приведенной на рисунке 3.10, задав следующие параметры элементов: напряжение источника питания 10 В , частота тока 50 Гц , емкость конденсатора 10 мкФ , сопротивление нагрузки 1 кОм . Зарисовать в масштабе осциллограмму напряжения на нагрузке, не меняя настройки осциллографа.

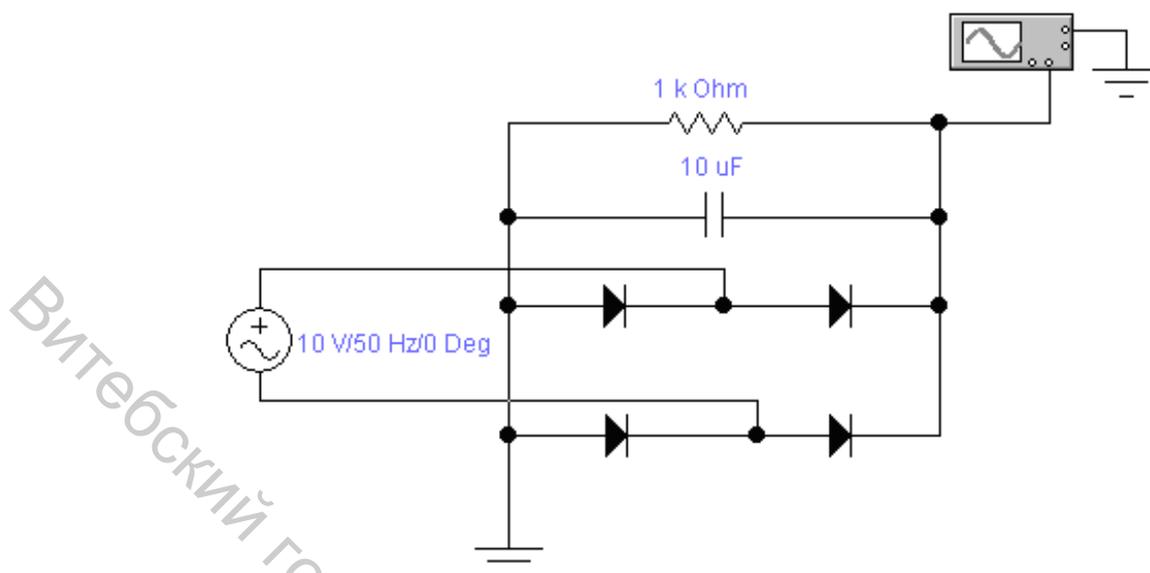


Рисунок 3.10 – Схема моделирования однофазного мостового выпрямителя с емкостным фильтром

3. Произвести моделирование схемы однофазного мостового выпрямителя с Γ -образным LC -фильтром, приведенной на рисунке 3.11, задав следующие параметры элементов: напряжение источника питания 10 В , частота тока 50 Гц , емкость конденсатора 10 мкФ , индуктивность катушки $0,55\text{ Гн}$, сопротивление нагрузки 1 кОм . Настройку параметров катушки индуктивности произвести в соответствии с рисунком 3.12. Зарисовать в масштабе осциллограмму напряжения на нагрузке, не меняя настройки осциллографа.

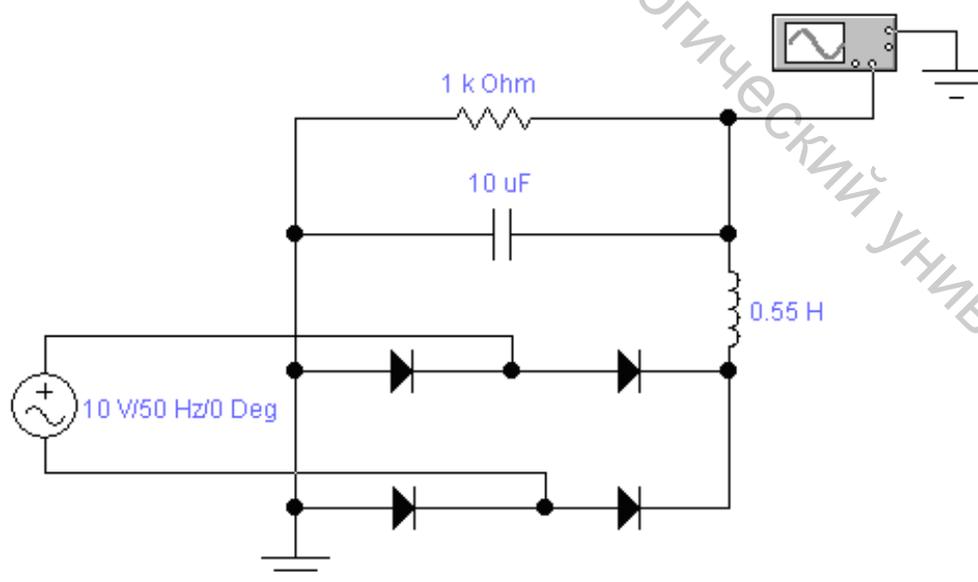


Рисунок 3.11 – Схема моделирования однофазного мостового выпрямителя с Γ -образным LC -фильтром

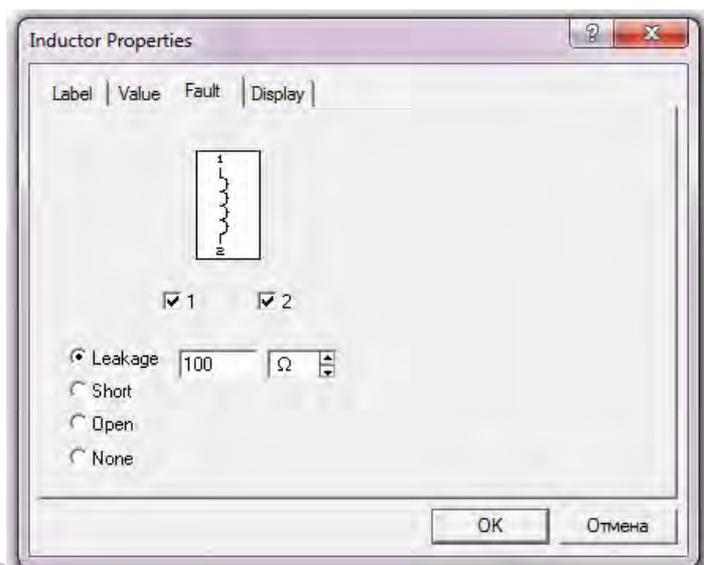


Рисунок 3.12 – Настройка параметров катушки индуктивности

4. Произвести моделирование схемы однофазного мостового выпрямителя с Γ -образным RC -фильтром, приведенной на рисунке 3.13, задав следующие параметры элементов: напряжение источника питания 10 В , частота тока 50 Гц , емкость конденсатора 10 мкФ , сопротивление резистора фильтра 510 Ом , сопротивление нагрузки 1 кОм . Зарисовать в масштабе осциллограмму напряжения на нагрузке, не меняя настройки осциллографа.

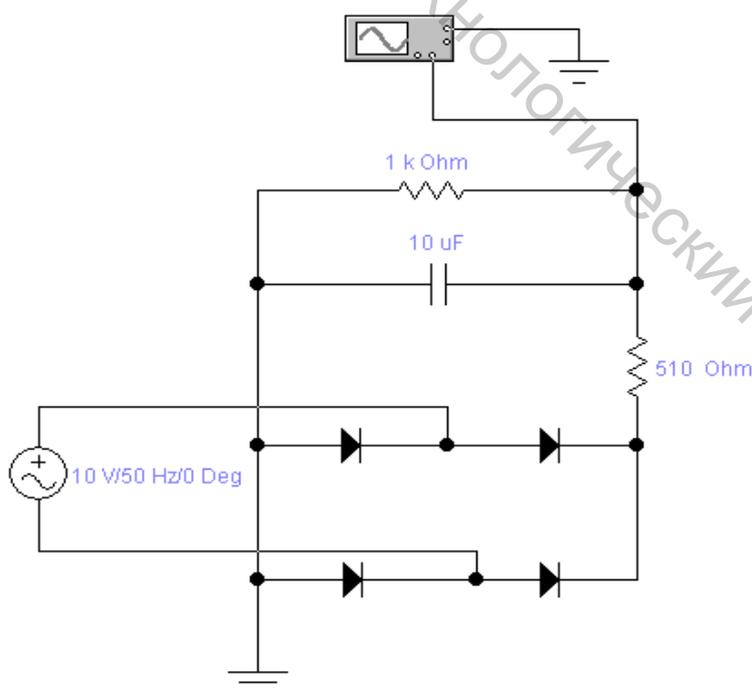


Рисунок 3.13 – Схема моделирования однофазного мостового выпрямителя с Γ -образным RC -фильтром

5. Произвести моделирование схемы однофазного мостового выпрямителя с Π -образным фильтром, приведенной на рисунке 3.14, задав следующие параметры элементов: напряжение источника питания 10 В , частота тока 50 Гц , емкости конденсаторов 10 мкФ , индуктивность катушки $0,55\text{ Гн}$, сопротивление нагрузки 1 кОм . Настройку параметров катушки индуктивности произвести в соответствии с рисунком 3.12. Зарисовать в масштабе осциллограмму напряжения на нагрузке, не меняя настройки осциллографа.

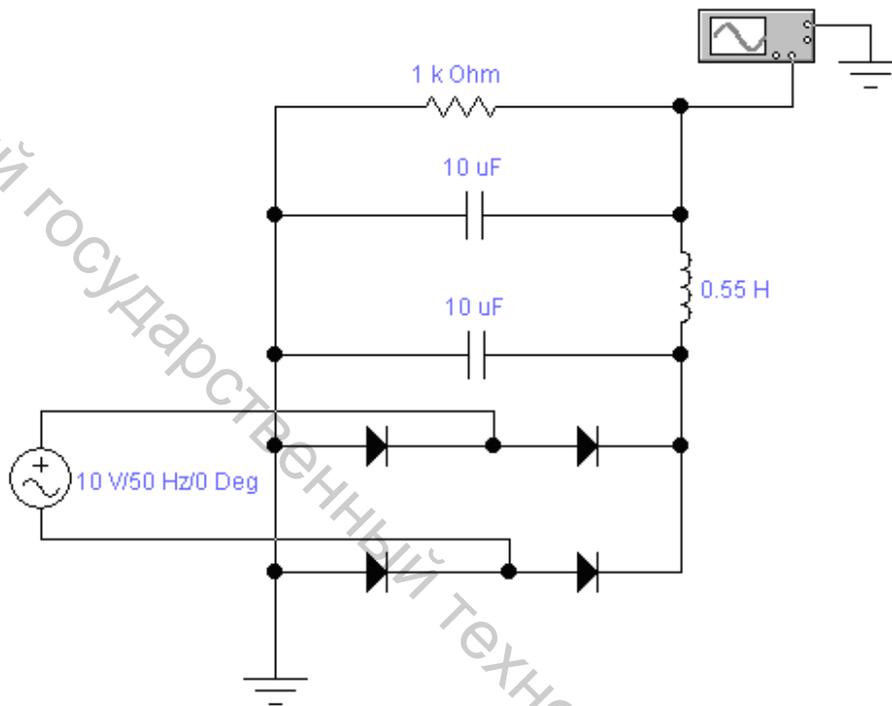


Рисунок 3.14 – Схема моделирования однофазного мостового выпрямителя с Π -образным фильтром

6. Определить коэффициенты сглаживания исследованных фильтров по формулам таблицы 3.2. Для всех расчетов принять соотношения: $m = 2$, $\omega = 2\pi f$, $f = 50\text{ Гц}$.

Контрольные вопросы

1. Объяснить принцип работы различных сглаживающих фильтров.
2. Как выбирается конденсатор в емкостном фильтре?
3. Как выбирается дроссель в индуктивном фильтре?
4. Каковы особенности емкостного и индуктивного фильтров? Назовите область их применения.
5. Как выбирать R_ϕ и C_ϕ в Γ -образном RC -фильтре?
6. Что такое угол отсечки и чем он определяется?
7. Каковы основные параметры фильтров?

Лабораторная работа 4

Исследование однофазных схем выпрямления с умножением напряжения

Цель работы: изучение принципа действия однофазных схем выпрямления с умножением напряжения и определение их основных параметров.

Теоретические сведения

Схемы выпрямителей с умножением напряжения позволяют без использования трансформатора получать на выходе умноженное в несколько раз входное напряжение.

Однополупериодная несимметричная схема удвоения напряжения

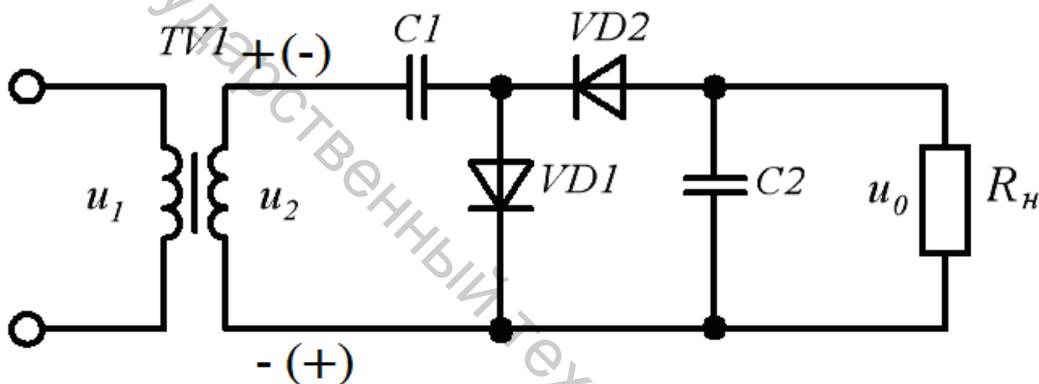


Рисунок 4.1 – Однополупериодная несимметричная схема удвоения напряжения

В течение первого полупериода (полярность u_2 на рисунке 4.1 без скобок) $VD1$ открыт, $VD2$ заперт, $C1$ заряжается через $VD1$, до амплитудного значения U_{2m} . Во второй полупериод $VD1$ закрывается, открывается $VD2$. Начинает заряжаться $C2$, находясь под суммарным напряжением источника и конденсатора $C1$. Таким образом

$$U_{C2} = U_{C1} + U_{2m} = 2U_{2m}.$$

В следующий полупериод $VD2$ закрывается, $C1$ заряжается до U_{2m} , а $C2$ разряжается на нагрузку. При этом $U_n = 2U_{2m}$.

Недостатки схемы аналогичны недостаткам однополупериодного выпрямителя.

Схема используется для повышения коэффициента передачи сигналов в электрических схемах, в качестве измерительного выпрямителя.

Двухполупериодная симметричная схема удвоения напряжения

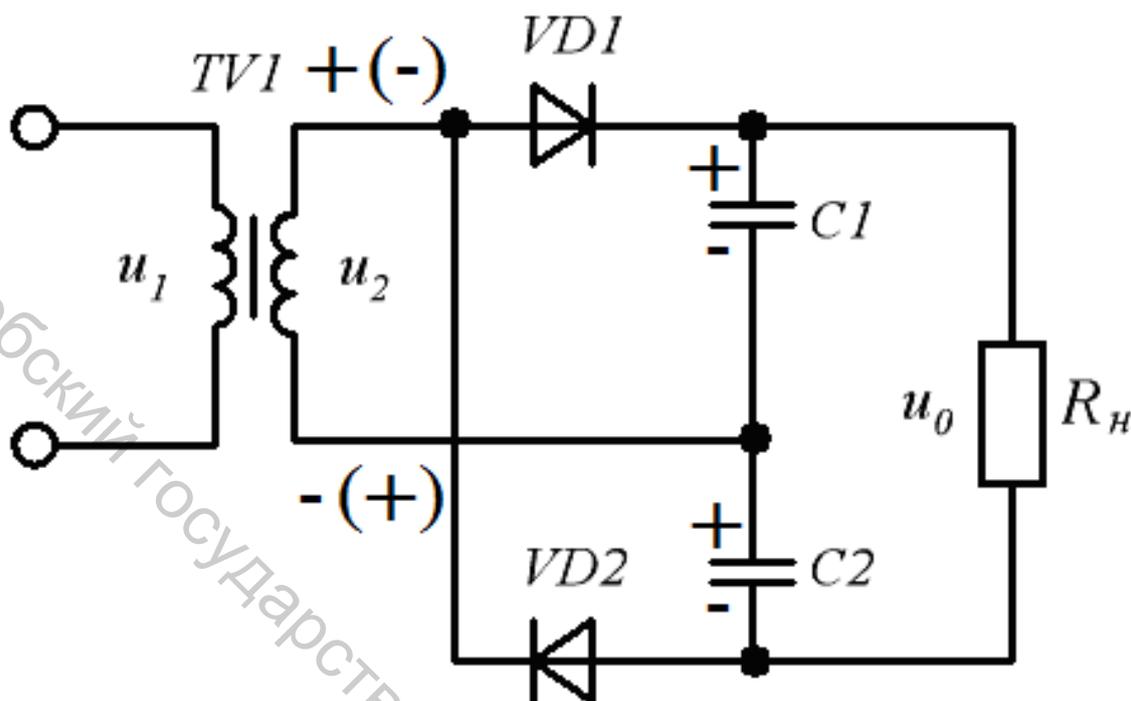


Рисунок 4.2 – Двухполупериодная симметричная схема удвоения напряжения

В течение первого полупериода (полярность u_2 на рисунке 4.2 без скобок) $VD1$ открыт, $VD2$ заперт. $C1$ заряжается до U_{2m} . В момент t_1 , когда $u_2 < u_{C1}$ (рис. 4.3), $VD1$ закрывается, а $C1$ стремится разрядиться через R_n .

В начале второго полупериода $VD2$ открыт, $VD1$ закрыт и $C2$ заряжается до U_{2m} . В момент t_2 , когда $u_2 < u_{C2}$, $VD2$ закрывается и $C2$ стремится разрядиться через R_n .

Так как постоянные времени разряда конденсаторов $C1$ и $C2$ выбирают большими, то u_{C1} и u_{C2} при разряде изменяются незначительно. Таким образом

$$U_0 = U_{C1} + U_{C2} = 2U_{2m}.$$

В данной схеме исключается подмагничивание сердечника трансформатора.

На основе данных схем строятся схемы многократного умножения напряжения.

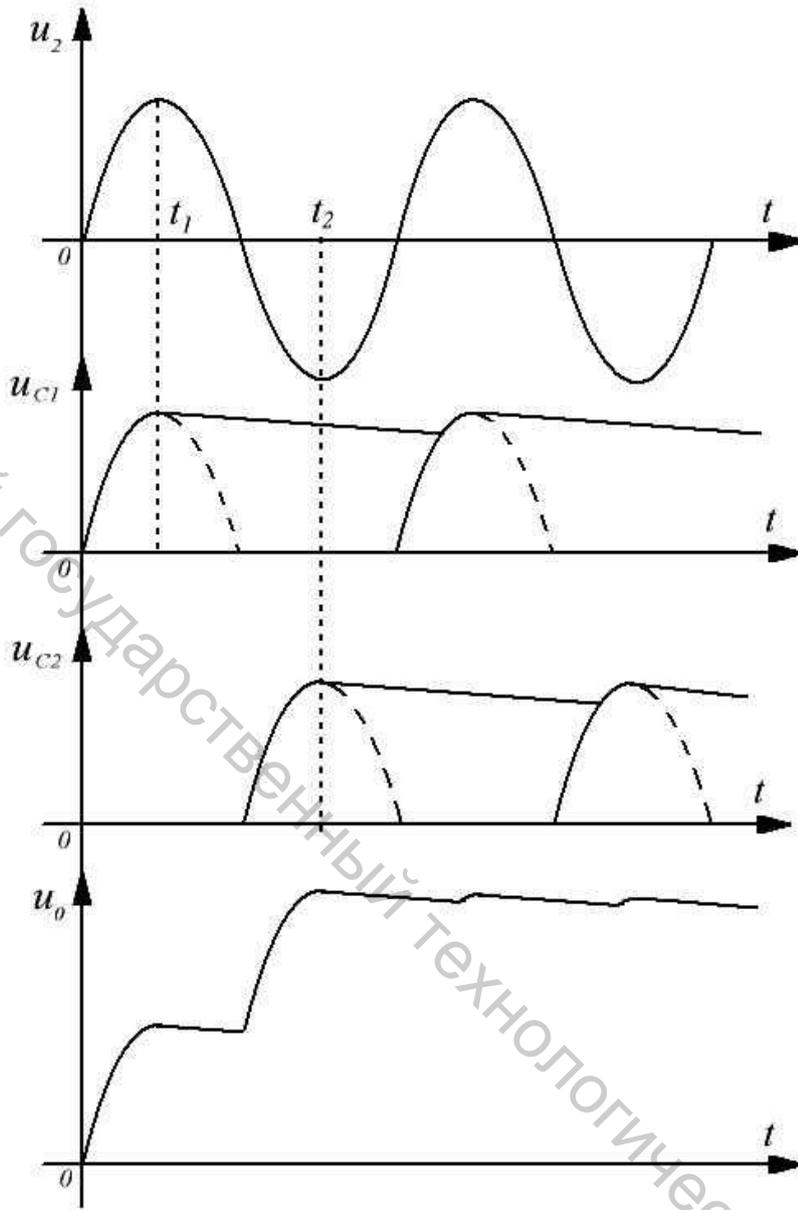


Рисунок 4.3 – Временные диаграммы

Однополупериодная схема умножения напряжения (схема первого рода)

В течение первого полупериода (полярность u_2 на рисунке 4.4 без скобок) $VD1$ открыт и $C1$ заряжается до U_{2m} . Во второй полупериод к $C2$ приложена сумма напряжений источника и конденсатора $C1$. При этом

$$U_{C2} = 2U_{2m}.$$

В следующий полупериод $VD2$ закрывается, а к $C3$ приложено суммарное напряжение источника и конденсатора $C2$.

$$U_{C3} = U_{2m} + U_{C2} = U_{2m} + 2U_{2m} = 3U_{2m}.$$

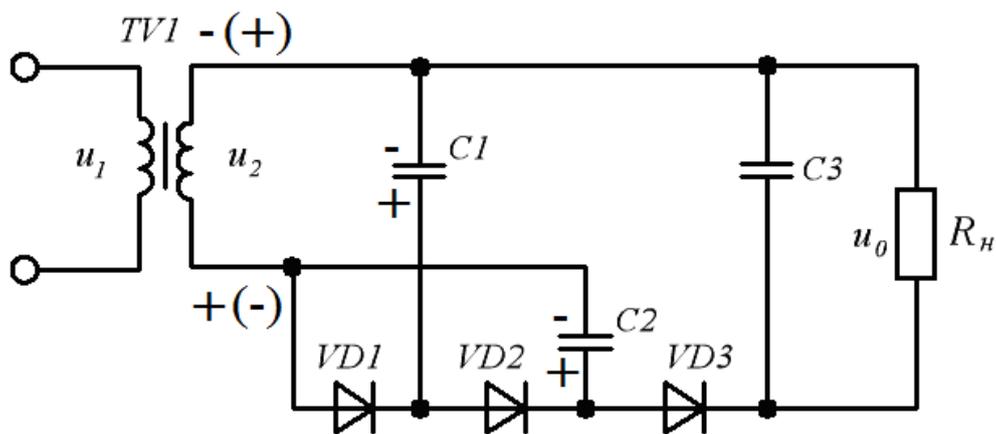


Рисунок 4.4 – Однополупериодная схема умножения напряжения (схема первого рода)

Чтобы получить на выходе напряжение nU_{2m} , необходимо подключить n контуров по аналогии с двумя первыми.

В данной схеме $U_{обp}=2U_{2m}$ (кроме первого диода), что позволяет использовать при любых напряжениях маломощные диоды, но конденсаторы (особенно выходные) должны быть рассчитаны на высокие напряжения.

Однополупериодная схема с умножением напряжения (схема второго рода)

В течение первого полупериода (полярность u_2 на рисунке 4.5 без скобок) $VD1$ открыт и $C1$ заряжается до U_{2m} . Во второй полупериод открывается $VD2$ и к конденсатору $C2$ приложено суммарное напряжение источника и конденсатора $C1$.

$$U_{C2} = U_{2m} + U_{C1} = 2U_{2m}$$

В следующем полупериоде $C3$ заряжается по цепи: $+U_2, C2, VD3, C3, C1, -U_2$.

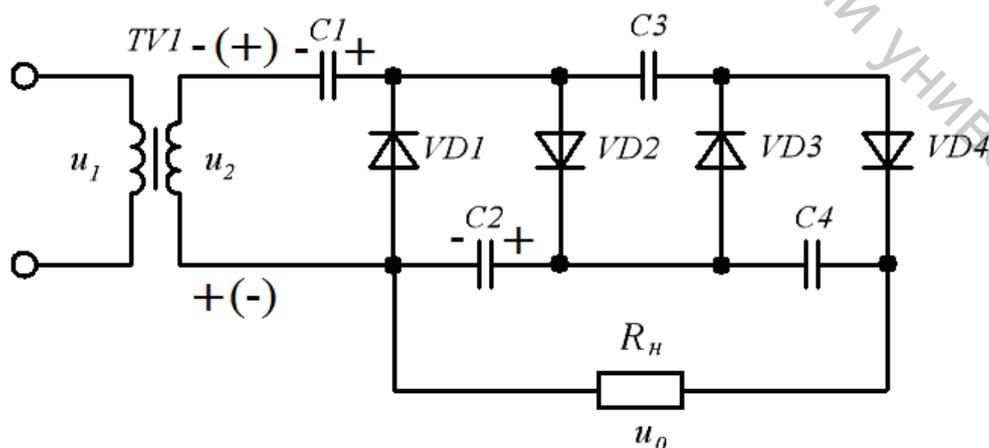


Рисунок 4.5 – Однополупериодная схема с умножением напряжения (схема второго рода)

Так как $C1$ включен в противофазе, то

$$U_{C3} = U_{2m} + U_{C2} - U_{C1} = U_{2m} + 2U_{2m} - U_{2m} = 2U_{2m}.$$

В следующий полупериод происходит зарядка $C4$ по цепи $(+)U_2, C1, C3, VD4, C4, C2, (-)U_2$. Тогда

$$U_{C4} = U_{2m} + U_{C1} + U_{C3} - U_{C2} = U_{2m} + U_{2m} + 2U_{2m} - 2U_{2m} = 2U_{2m}.$$

Таким образом, на каждом последующем конденсаторе будет создаваться напряжение $2U_{2m}$.

Необходимое значение напряжения получают, подключаясь к общей точке (любой из клемм вторичной обмотки трансформатора) и точке в схеме (снизу или сверху), в зависимости от требуемой величины выходного напряжения. Из-за несимметричности схемы происходит подмагничивание сердечника трансформатора. Для устранения данного явления используют комбинацию схем (рис. 4.6).

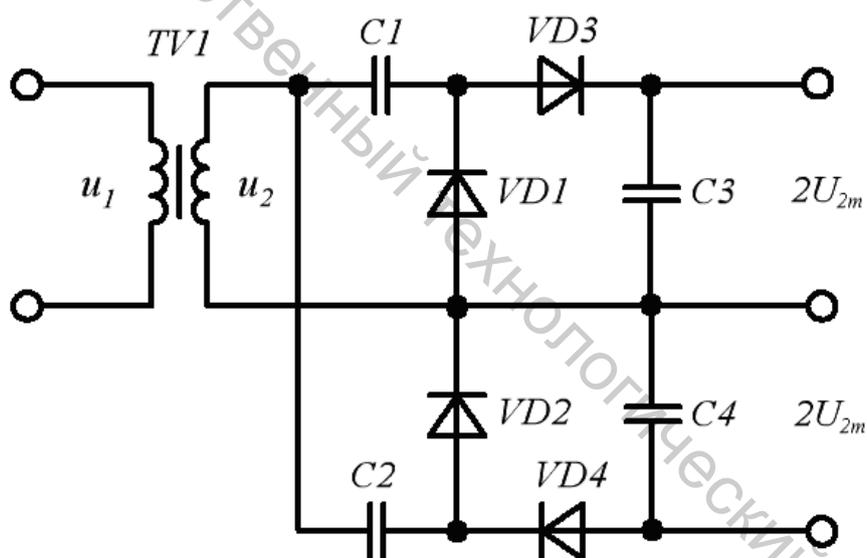


Рисунок 4.6 – Комбинированная схема умножения напряжения

Порядок выполнения работы в программе Electronics Workbench

1. Для указанных преподавателем значений сигнала на вторичной обмотке трансформатора (возможна замена трансформатора источником переменного синусоидального напряжения (элемент «AC Voltage Source»  панели «Sources») и сопротивления нагрузки произвести моделирование схем рисунков 4.1, 4.2, 4.4, 4.5, 4.6. Для различных значений емкости конденсаторов (в соответствии с данными таблицы 4.1) с помощью вольтметра (элемент

«Voltmeter»  панели «Indicators») измерить значения напряжения на нагрузке. Данные занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1

Схема \ С, мкФ	5	50	500
Рисунок 4.1			
Рисунок 4.2			
Рисунок 4.4			
Рисунок 4.5			
Рисунок 4.6			

2. Проанализировать полученные результаты.

Контрольные вопросы

1. Пояснить принцип действия схем выпрямителей с умножением напряжения.

2. Дать сравнительную оценку указанных преподавателем схем выпрямителей с умножением напряжения.

3. Изобразить схемы замещения выпрямителей с умножением напряжения, указанные преподавателем.

Лабораторная работа 5

Исследование однофазного управляемого выпрямителя

Цель работы: изучение принципа работы управляемого выпрямителя и его системы управления, определение основных параметров и характеристик управляемого выпрямителя.

Теоретические сведения

Управляемым называют выпрямитель, который кроме преобразования электрической энергии переменного тока в энергию постоянного тока осуществляет регулирование величины выпрямленного напряжения. Управляемый выпрямитель можно получить из обычного выпрямителя заменой в нем неуправляемых вентилях (диодов) управляемыми вентилями – тринисторами. Регулирование осуществляется задержкой отпирания тринистора в пределах полупериода входного переменного напряжения. Запирание тринистора происходит автоматически при снижении мгновенного значения входного напряжения до величины, при которой ток, протекающий

через тринистор, становится меньше его тока удержания. Угол задержки отпирания тринистора отсчитывается от момента естественного отпирания вентиля, т. е. от момента, в который к вентилю начинает прикладываться положительное напряжение. Этот угол обозначают α и называют углом управления.

Схема силовой части управляемого выпрямителя и временные диаграммы, поясняющие его работу, представлены на рисунке 5.1.

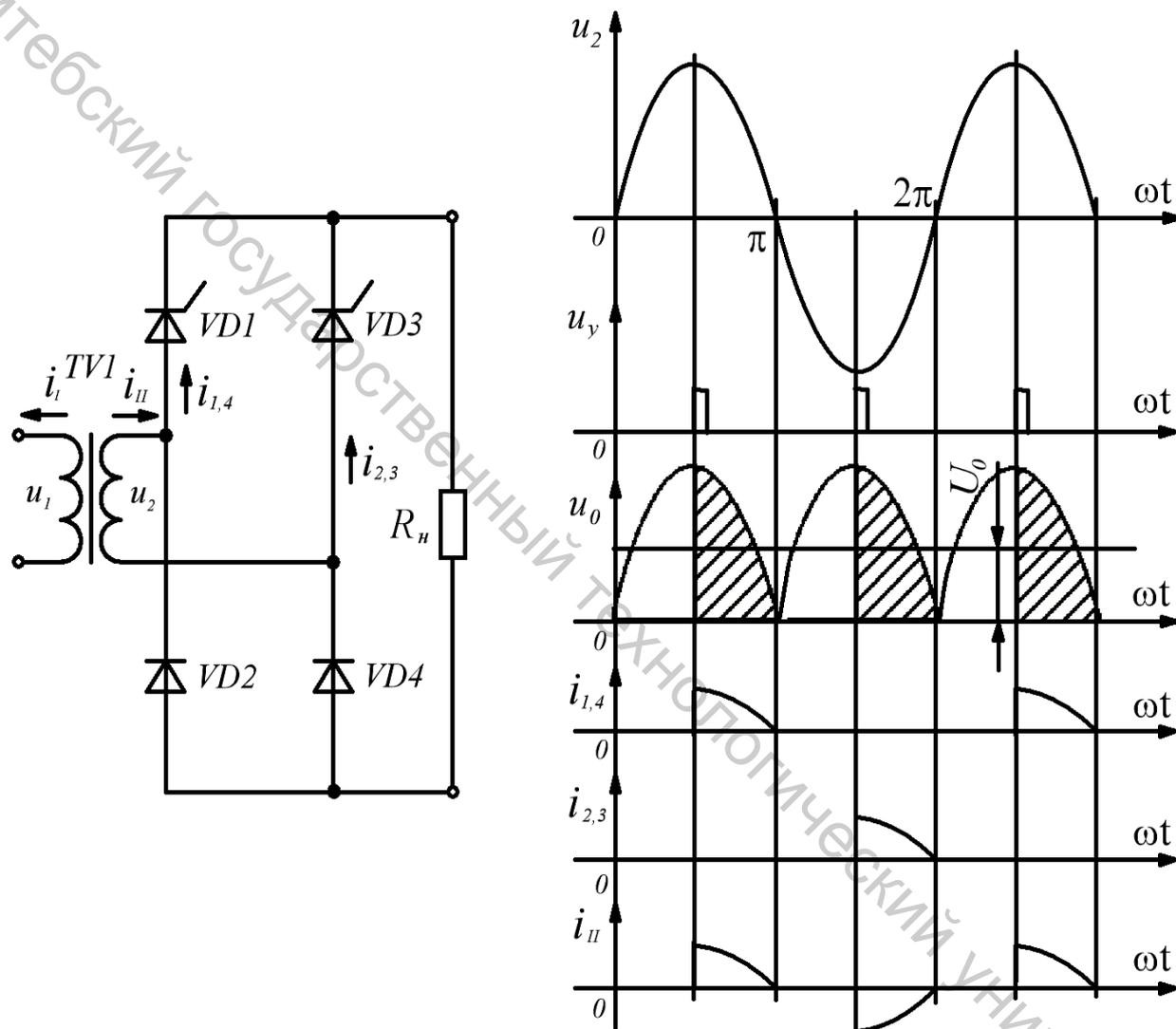


Рисунок 5.1 – Схема силовой части управляемого выпрямителя и временные диаграммы

Поскольку в мостовой схеме выпрямления в течение каждого полупериода переменного напряжения работают два вентиля, то при построении управляемого выпрямителя нет необходимости в использовании четырех тринисторов. Следует отметить, что при работе на нагрузку индуктивного характера эта схема не является оптимальной, поскольку требует включения параллельно нагрузке обратного диода. В противном случае ток,

протекающий через открытый тринистор, будет поддерживаться на уровне, большем тока удержания, за счет энергии, накопленной в индуктивности нагрузки. А это, в свою очередь, сделает невозможным своевременное запираение открытого тринистора, т. е. нарушит работу выпрямителя.

Рассмотрим работу управляемого выпрямителя на активную нагрузку. На вход выпрямителя с вторичной обмотки трансформатора поступает переменное напряжение U_2 . Система управления вырабатывает импульсы напряжения U_y , которые подводятся к управляющим электродам тринисторов и временное положение которых можно изменять в пределах полупериода напряжения U_2 . На временных диаграммах (рис. 5.1) угол управления принят равным 90° . До прихода импульсов управления тринисторы закрыты и напряжение на нагрузке равно нулю. В момент прихода импульса управления открывается соответствующий тринистор, и с этого момента к нагрузке прикладывается напряжение U_2 (падением напряжения на открытом тринисторе пренебрегают). Изменяя угол управления α , можно регулировать среднее значение выпрямленного напряжения, которое определяется из выражения

$$U_{cp.\alpha} = U_0 = U_{cp.0} \frac{1 + \cos \alpha}{2},$$

где $U_{cp.0} = 2U_{m2}/\pi$ – среднее значение выпрямленного напряжения при угле управления $\alpha=0$, т. е. выпрямленное напряжение неуправляемого выпрямителя. Очевидно, при изменении угла управления от 0 до 180° среднее значение выпрямленного напряжения плавно уменьшается от $U_{cp.0}$ до 0 . Возможность плавной регулировки выпрямленного напряжения и является основным достоинством управляемого выпрямителя. В качестве его недостатков можно указать следующие:

- усложнение схемы, поскольку необходима система управления;
- увеличение коэффициента пульсации выпрямленного напряжения и расширение его спектра. Рост амплитуд и количества высших гармонических составляющих происходит за счет искажения формы выпрямленного напряжения и его резких перепадов в момент отпирания тринисторов;
- появление сдвига по фазе между током и напряжением в первичной обмотке трансформатора. Из временных диаграмм (рис. 5.1) видно, что u_2 и i_{II} смещены по фазе на угол α . На этот же угол будут отличаться по фазе u_I и i_I . Таким образом, даже при чисто активной нагрузке управляемый выпрямитель потребляет из сети реактивную мощность, что снижает его коэффициент использования электроэнергии (коэффициент мощности) и способствует увеличению потерь в линии передачи электроэнергии.

При работе управляемого выпрямителя на нагрузку емкостного характера и управлении тристорами короткими импульсами из-за появления угла отсечки θ при малых углах управления α могут быть пропуски включения триисторов.

Основной задачей, решаемой системой управления выпрямителем, следует считать генерацию коротких положительных импульсов напряжения, отпирающих триисторы в заданные моменты времени. Один из вариантов решения этой задачи показан на рисунке 5.2, где приведена принципиальная электрическая схема управляемого выпрямителя, реализованная в лабораторном стенде.

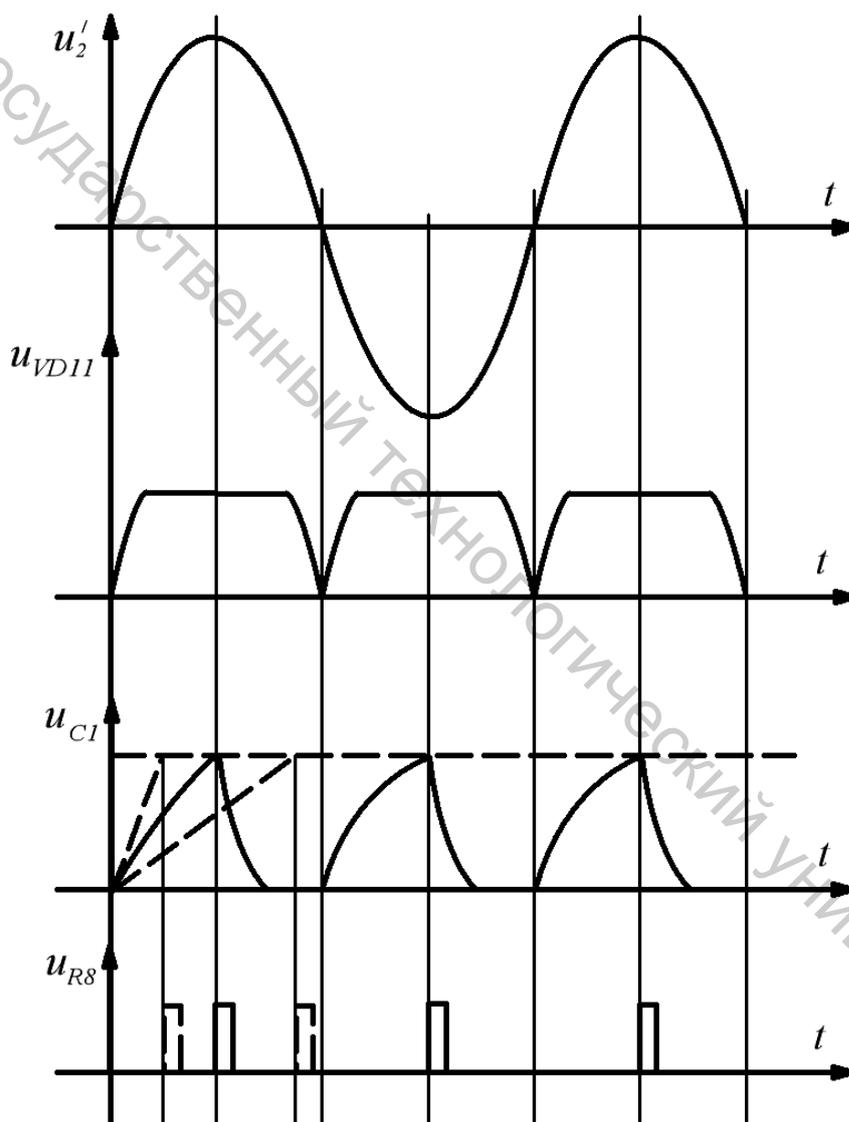


Рисунок 5.3 – Временные диаграммы

На рисунке 5.3 приведены временные диаграммы, поясняющие ее работу. Обозначения элементов на рисунке 5.3 соответствуют обозначениям на лабораторном стенде.

Рассмотрим работу системы управления. Для питания системы управления используется пульсирующее напряжение с выхода мостовой схемы $VD7...VD10$. Это напряжение ограничивается по амплитуде параметрическим стабилизатором $R9, VD11$ и подводится к формирователю управляющих импульсов напряжения, выполненном на транзисторах $VT1$ и $VT2$. Основным узлом формирователя является каскад на однопереходном транзисторе $VT1$. Напряжение к эмиттеру $VT1$ подводится с конденсатора $C1$. В момент начала импульса напряжения U_{VD11} начинает заряжаться конденсатор $C1$ через $R1$. Напряжение на $C1$ экспоненциально возрастает. По достижении U_{C1} уровня включения $VT1$ ток через него резко увеличивается, и на резисторе $R8$ формируется короткий импульс. Конденсатор $C1$ разряжается через эмиттерный переход $VT1$, и с приходом очередного импульса напряжения U_{VD11} процесс повторяется. Сформированный на $R8$ импульс напряжения усиливается каскадом на транзисторе $VT2$ и со вторичных обмоток w_2 и w_2' импульсного трансформатора $TV2$ через токоограничивающие резисторы $R6$ и $R7$ подводится к управляющим электродам триисторов $VD13$ и $VD14$. Изменяя постоянную времени цепи $R1, C1$, регулируют скорость нарастания напряжения на $C1$, т. е. момент появления управляющего импульса U_{R8} .

Поскольку начало заряда конденсатора $C1$ привязано к началу каждого полупериода сетевого переменного напряжения, моменты включения триисторов $VD13$ и $VD14$ оказываются жестко синхронизированы с определенными мгновенными значениями выпрямляемого напряжения U_2 .

Резисторы $R_{ш3}$ и $R_{ш4}$ служат для исследования токов в соответствующих цепях.

Порядок выполнения работы на унифицированном стенде УИЛС-1

1. Для выполнения работы выбрать модуль "ВЫПРЯМИТЕЛЬ" и разместить его на наборном поле. Схема однофазного управляемого выпрямителя представлена на рисунке 5.2 и на лицевой панели стенда. Подключить к выходным клеммам $K14$ и $K15$ управляемого выпрямителя нагрузку R_n , используя блок переменных сопротивлений стенда.

2. Подать напряжение питания на выпрямитель $\pm 15 В$ в соответствии с обозначениями на модуле.

3. Установить сопротивление нагрузки $R_n = 900 \text{ Ом}$. Подключить к нагрузке осциллограф. Изменяя с помощью резистора $R1$ величину угла регулирования равномерно от 0° до 180° (определяется по осциллографу), измерить напряжение U_0 для 5 различных значений α . Результаты измерений занести в таблицу 5.1.

4. Снять осциллограммы напряжения на нагрузке для первого, третьего и пятого значений α из таблицы 5.1.

Таблица 5.1

$\alpha, ^\circ$					
U_0, B					

5. Изменяя сопротивление нагрузки от 100 до 900 Ом, а также при $R_H = \infty$, измерить напряжение U_0 и ток I_0 для первого, третьего и пятого значений α из таблицы 5.1. Результаты измерений занести в таблицу 5.2.

Таблица 5.2

	$R_n, \text{Ом}$	100	200	300	400	500	600	700	800	900	∞
$\alpha =$	U_0, B										
	$I_0, \text{мА}$										
$\alpha =$	U_0, B										
	$I_0, \text{мА}$										
$\alpha =$	U_0, B										
	$I_0, \text{мА}$										

6. По данным таблицы 5.1 построить регулировочную характеристику $U_0 = f(\alpha)$.

7. По данным таблицы 5.2 построить внешние характеристики $U_0 = f(I_0)$ для всех указанных в таблице значений α .

Контрольные вопросы

1. Объяснить назначение и общие принципы работы управляемого выпрямителя.

2. Объяснить принцип построения и работу системы управления по принципиальной схеме.

3. Каково назначение всех элементов принципиальной схемы управляемого выпрямителя и его схемы управления?

4. Объяснить особенности работы управляемого выпрямителя на нагрузку активного, активно-индуктивного и активно-емкостного характера.

5. Что такое внешняя и регулировочная характеристики управляемого выпрямителя?

Лабораторная работа 6

Исследование однофазных выпрямителей специального назначения

Цель работы: экспериментальное исследование основных параметров и характеристик однофазных схем выпрямления, обеспечивающих возможность получения выходного напряжения разной величины и полярности.

Теоретические сведения

Выпрямительным устройством (выпрямителем) называют статический преобразователь электрической энергии переменного тока в энергию постоянного тока.

Для получения на выходе не одного, а сразу двух выпрямленных напряжений может быть использована одна из схем выпрямителей, показанных на рисунках 6.1 или 6.2.

В первом случае (рис. 6.1) на выходе получают два напряжения одной полярности, отличающихся по величине в 2 раза.

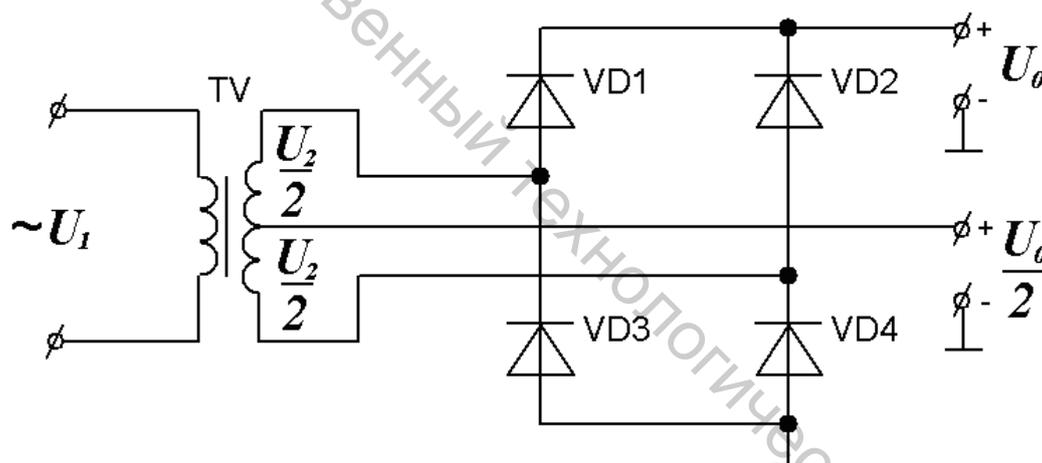


Рисунок 6.1 – Однофазный мостовой выпрямитель с выходными напряжениями разной величины

Верхняя половина схемы внешне представляет собой обычный мостовой выпрямитель. Однако средний вывод вторичной обмотки трансформатора не заземлен, а напряжение на нем равно половине напряжения, снимаемого с выхода мостового выпрямителя. Это напряжение формируется в результате работы второго выпрямителя, образованного двумя нижними по схеме диодами мостовой схемы, и полуобмотками трансформатора TV . При изменении тока нагрузки соотношение выходных напряжений остается неизменным и равным 1:2.

Во втором случае (рис. 6.2) на выходе выпрямителя получаются два одинаковых напряжения, но имеющие разные полярности.

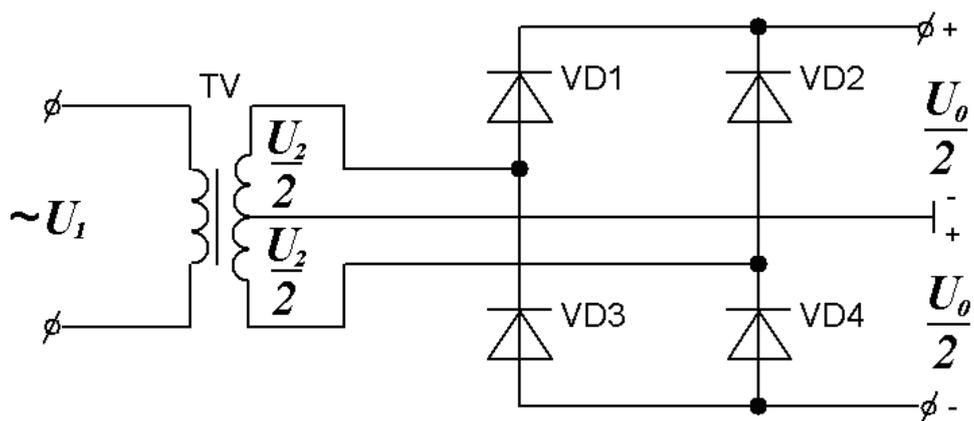


Рисунок 6.2 – Однофазный мостовой выпрямитель с разнополярными выходными напряжениями одинаковой величины

Для получения в нагрузке выпрямительных схем высоких напряжений или больших токов выполняют подключение таких схем последовательно или параллельно друг с другом. Так при последовательном соединении однофазных мостовых схем выпрямления (рис. 6.3) в нагрузке получают увеличенное в 2 раза в сравнении с U_2 напряжение U_0 .

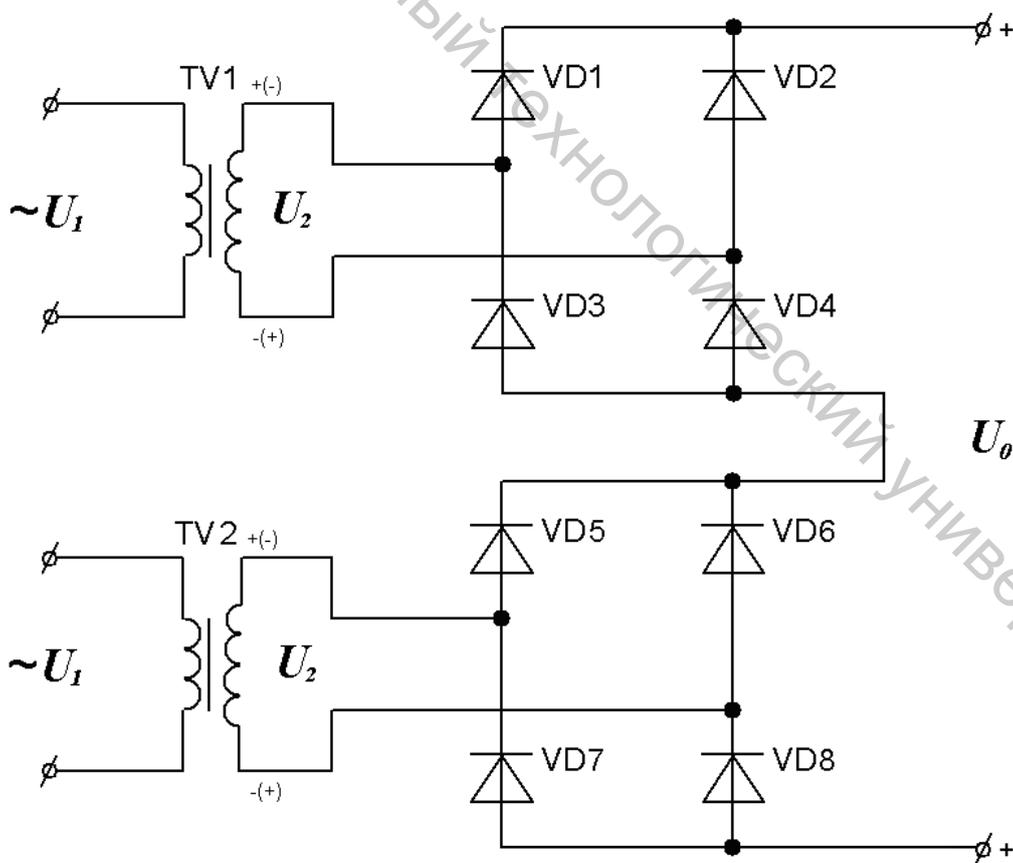


Рисунок 6.3 – Однофазный мостовой выпрямитель последовательного типа

Порядок выполнения работы в программе Electronics Workbench

1. Произвести моделирование схемы однофазного мостового выпрямителя с выходными напряжениями разной величины (рис. 6.4).

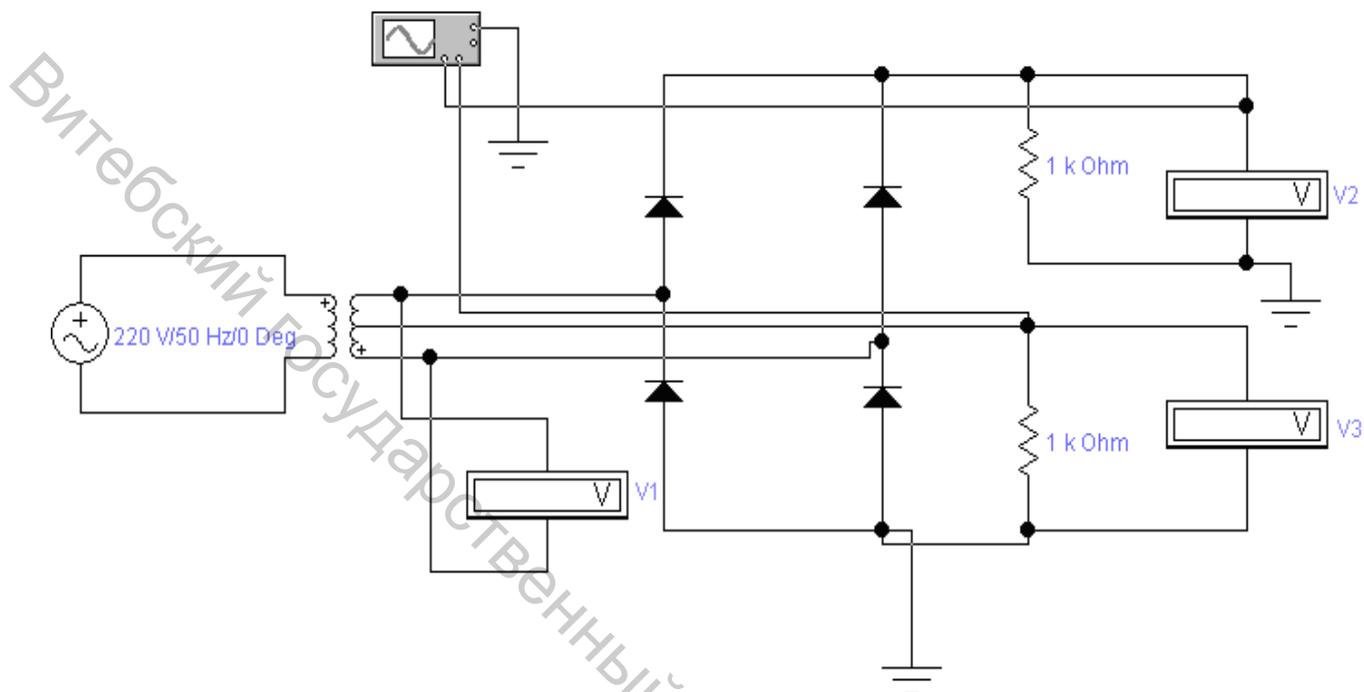


Рисунок 6.4 – Схема для исследования однофазного мостового выпрямителя с выходными напряжениями разной величины

Выбрать из имеющейся библиотеки устройств тип трансформатора, указанный преподавателем: powrvolt PP3-20, powrvolt PP3-24 или powrvolt PP3-28.

Включить схему. Снять показания вольтметров и занести в таблицу 6.1.

Таблица 6.1

U_{V1}, B (U_2)	U_{V2}, B (U_0)	U_{V3}, B ($U_0/2$)

Зарисовать осциллограммы напряжений U_0 и $U_0/2$ с указанными на рисунке 6.5 масштабами.

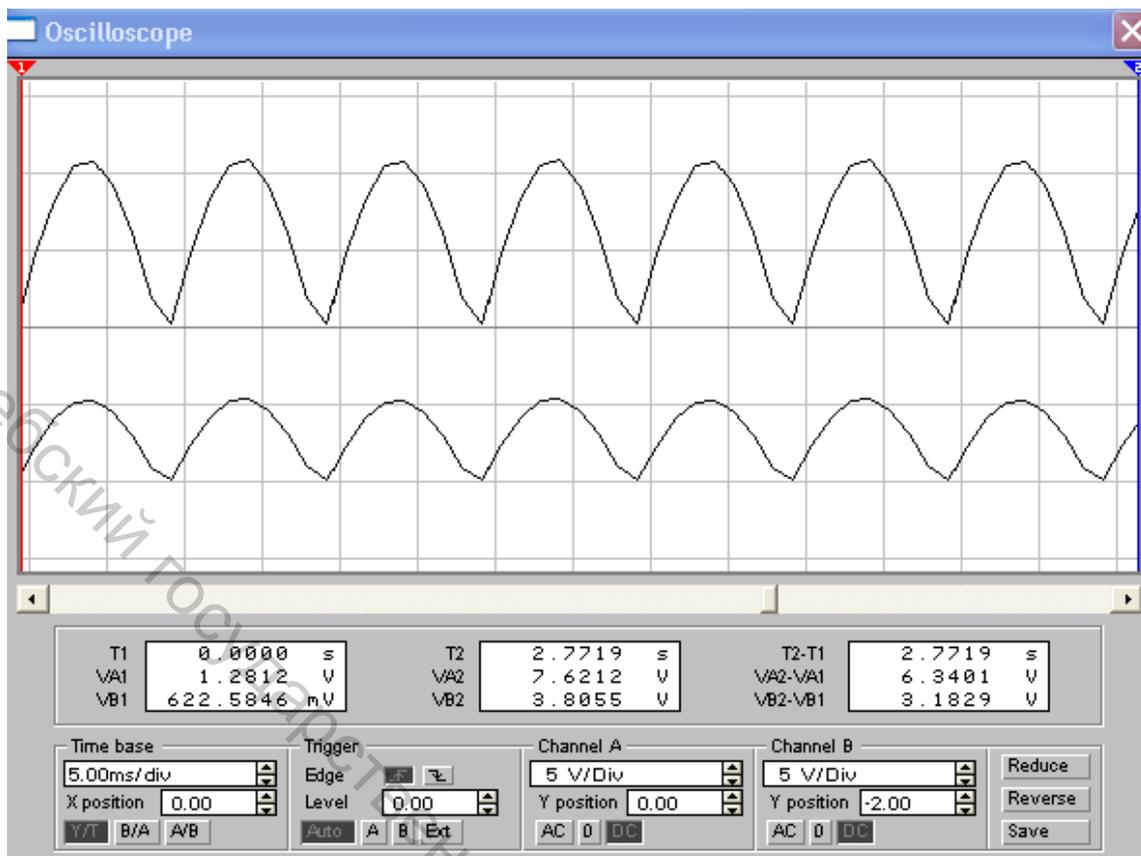


Рисунок 6.5 – Осциллограммы напряжений U_0 и $U_0/2$

2. Произвести моделирование схемы однофазного мостового выпрямителя с разнополярными выходными напряжениями одинаковой величины (рис. 6.6).

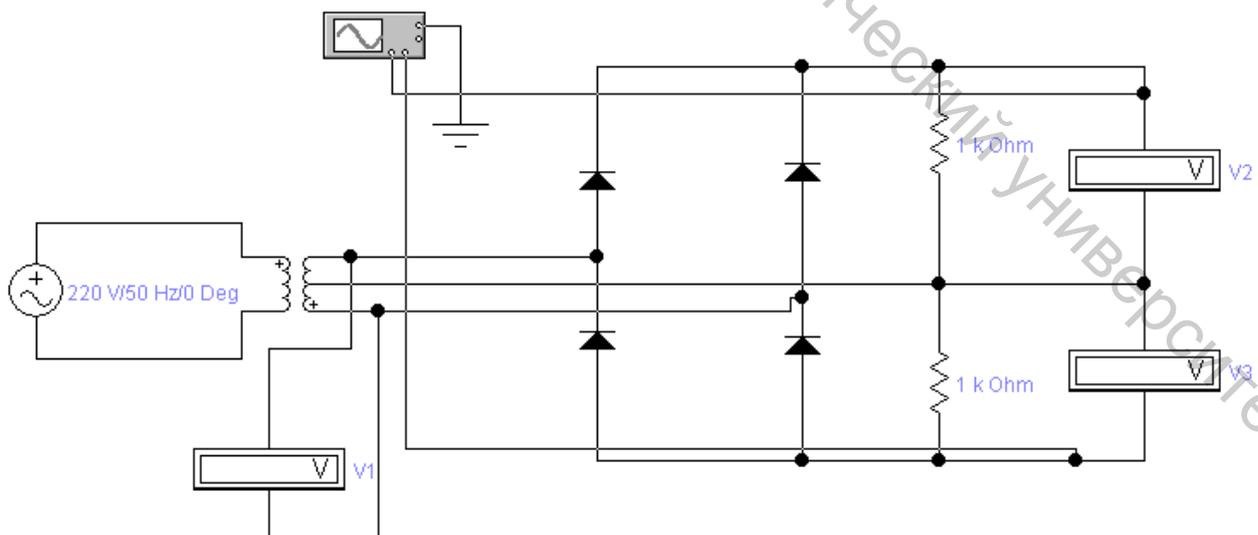


Рисунок 6.6 – Схема для исследования однофазного мостового выпрямителя с разнополярными выходными напряжениями одинаковой величины

Установить выбранный ранее тип трансформатора.
Включить схему. Снять показания вольтметров и занести в таблицу 6.2.

Таблица 6.2

U_{V1}, B (U_2)	U_{V2}, B ($U_0/2$) ₁	U_{V3}, B ($U_0/2$) ₂

Зарисовать осциллограммы напряжений ($U_0/2$)₁ и ($U_0/2$)₂ с указанными на рисунке 6.7 масштабами.

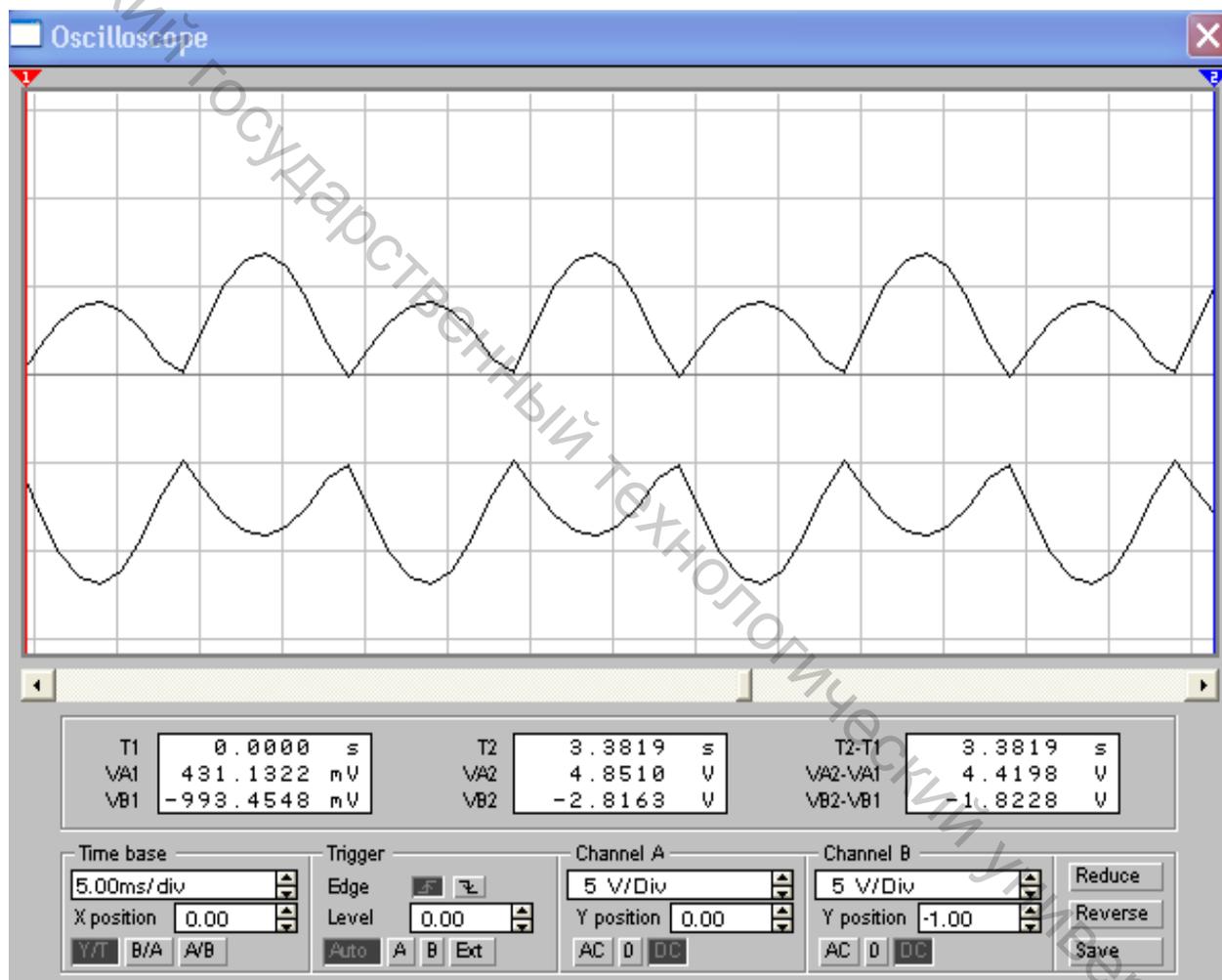


Рисунок 6.7 – Осциллограммы напряжений ($U_0/2$)₁ и ($U_0/2$)₂

3. Произвести моделирование схемы однофазного мостового выпрямителя последовательного типа (рис. 6.8).

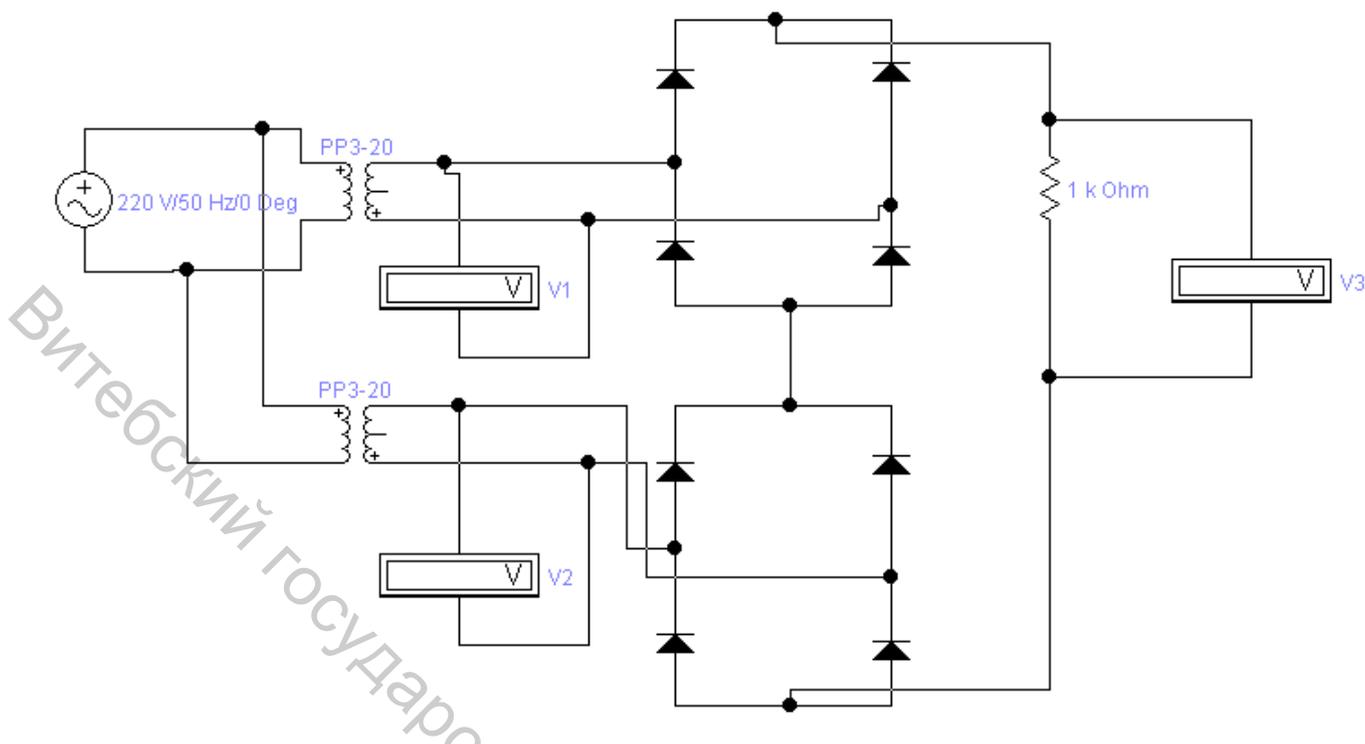


Рисунок 6.8 – Схема для исследования однофазного мостового выпрямителя последовательного типа

Установить выбранный ранее тип трансформатора.

Включить схему. Снять показания вольтметров и занести в таблицу 6.3.

Таблица 6.3

U_{V1}, B (U_2)	U_{V2}, B (U_2)	U_{V3}, B U_0

Контрольные вопросы

1. Объяснить назначение, устройство и принцип действия однофазного мостового выпрямителя с выходными напряжениями разной величины.
2. Объяснить назначение, устройство и принцип действия однофазного мостового выпрямителя с разнополярными выходными напряжениями одинаковой величины.
3. Объяснить назначение, устройство и принцип действия однофазного мостового выпрямителя с разнополярными выходными напряжениями последовательного типа.

Лабораторная работа 7

Исследование параметрических стабилизаторов постоянного напряжения

Цель работы: исследование работы параметрических стабилизаторов постоянного напряжения, экспериментальное определение их основных параметров и характеристик.

Теоретические сведения

Стабилизатором называется устройство, предназначенное для автоматического поддержания напряжения на нагрузке при изменении напряжения питающей сети, тока нагрузки, температуры окружающей среды и т. д.

Параметрические стабилизаторы – стабилизаторы, свойства которых определяются параметрами нелинейных элементов. Таким элементом является стабилитрон, у которого напряжение в пределах участка обратной ветви от $I_{стmin}$ до $I_{стmax}$ не зависит от тока, протекающего через этот элемент. Схема простейшего параметрического стабилизатора представлена на рисунке 7.1.

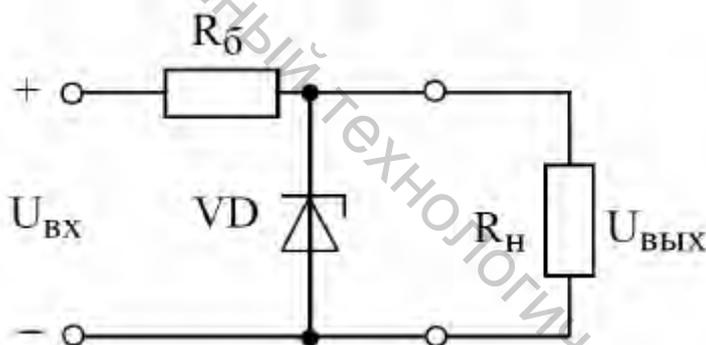


Рисунок 7.1 – Схема простейшего параметрического стабилизатора

Балластный резистор $R_б$ ограничивает величину тока стабилитрона. С ростом $R_б$, увеличивается коэффициент стабилизации $K_{ст}$, но уменьшается КПД. Значение сопротивления $R_б$ выбирается из условия:

$$R_б = \frac{U_{вх} - U_n}{I_n + I_{стном}},$$

где $I_{стном} = \frac{I_{стmax} - I_{стmin}}{2}$ – номинальный ток стабилитрона; $I_{стmax}$ и $I_{стmin}$ – максимальный и минимальный токи стабилитрона в режиме стабилизации.

Выходное сопротивление параметрического стабилизатора определяется дифференциальным сопротивлением стабилитрона:

$$R_{\text{вых}} = R_{\text{д}} = \frac{\Delta U_{\text{см}}}{\Delta I_{\text{см}}} = \frac{U_{\text{смmax}} - U_{\text{смmin}}}{I_{\text{смmax}} - I_{\text{смmin}}}.$$

Коэффициент стабилизации параметрического стабилизатора:

$$K_{\text{см}} = \frac{\Delta I_{\text{см}} \cdot R_{\text{б}}}{U_{\text{вх}}} \cdot \frac{U_{\text{н}}}{\Delta I_{\text{см}} \cdot R_{\text{д}}} = \frac{U_{\text{н}}}{U_{\text{вх}}} \cdot \frac{R_{\text{б}}}{R_{\text{д}}}.$$

Обычно $K_{\text{см}}$ не превышает $20 \div 50$. Для увеличения $K_{\text{см}}$ применяют последовательное включение нескольких стабилизаторов.

Основные недостатки параметрических стабилизаторов: невозможность регулировки выходного напряжения, малое значение коэффициента стабилизации, особенно при больших токах нагрузки ($I_{\text{н}} > I_{\text{смном}}$). Однако, за счёт простоты и надёжности, такие стабилизаторы широко распространены и используются, например, в качестве источников опорного напряжения – маломощных источников, нагрузка которых невелика и постоянна.

В схемах питания нагрузок большой мощности используют параметрические стабилизаторы напряжения с повышенной нагрузочной способностью (рис. 7.2).

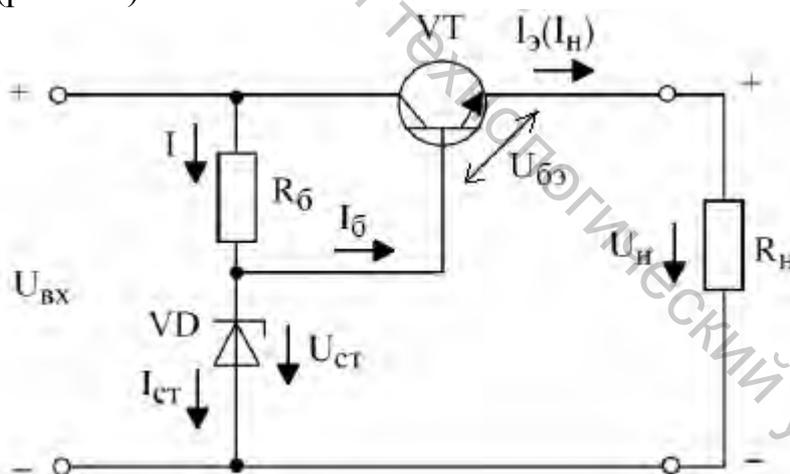


Рисунок 7.2 – Схема параметрического стабилизатора напряжения с повышенной нагрузочной способностью

Данный стабилизатор можно рассматривать и как простейший компенсационный стабилизатор, так как в нем реализуется отрицательная обратная связь по напряжению.

В качестве регулирующего элемента в схеме выступает транзистор, для управления которым необходимы малые напряжения (около $0,2 \div 0,6$ В), что позволяет обойтись без измерительного элемента и преобразующего устройства. Работа стабилизатора заключается в том, что при нормальном

режиме (отсутствие дестабилизирующих факторов) на стабилитроне создается опорное напряжение U_{cm} , которое распределяется между переходом база-эмиттер транзистора и нагрузкой $U_{cm} = U_{бэ} + U_n$, то есть устанавливается некоторое значение $U_{бэ} = U_{cm} - U_n$, определяющее степень открытия транзистора VT (сопротивление перехода коллектор-эмиттер $R_{кэ}$).

Порядок выполнения работы в программе Electronics Workbench

1. Произвести моделирование схемы параметрического стабилизатора (рис. 7.3). Источник переменного напряжения $G1$ используется в схеме для имитации пульсаций выпрямленного напряжения на выходе выпрямителя (источник $G2$).

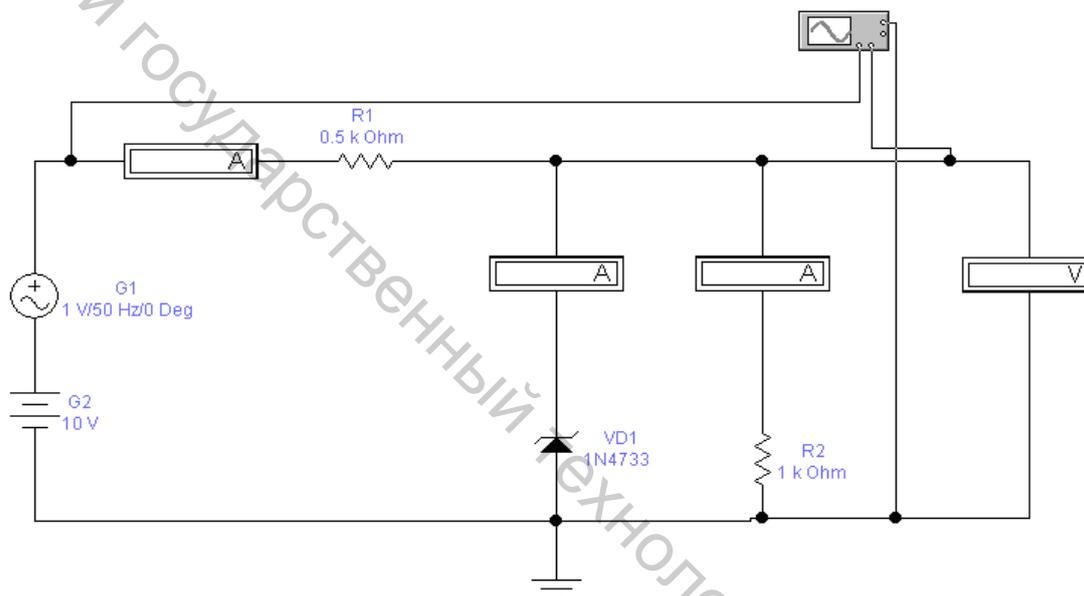


Рисунок 7.3 – Схема моделирования параметрического стабилизатора

2. Изменяя значение входного напряжения стабилизатора (источника $G2$ в схеме) в соответствии с данными таблицы 7.1, измерить выходное напряжение стабилизатора, а также ток стабилитрона, ток нагрузки и суммарный ток стабилизатора. Полученные данные занести в таблицу 7.1. Построить график зависимости $U_n(U_{ex})$.

Таблица 7.1

U_{ex}, B	U_n, B	I_{cm}, mA	I_n, mA	I_{ex}, mA
10				
12				
14				
16				
18				
20				

3. Установить значение входного напряжения стабилизатора (источника $G2$ в схеме) равным 14 В . Изменяя значения сопротивления нагрузки стабилизатора R_n ($R2$ на рисунке 7.3) в соответствии с данными таблицы 7.2, измерить выходное напряжение и суммарный ток стабилизатора, а также ток стабилитрона и ток нагрузки стабилизатора. Полученные данные занести в таблицу 7.2. Построить график зависимости $U_n(I_n)$.

Таблица 7.2

$R_n, \text{ Ом}$	$U_n, \text{ В}$	$I_{с\tau}, \text{ мА}$	$I_n, \text{ мА}$	$I_{ex}, \text{ мА}$
400				
600				
800				
1000				
1200				
1400				

4. Для получения осциллограмм напряжений схемы (рис. 7.4) установить параметры элементов в соответствии с рисунком 7.3.

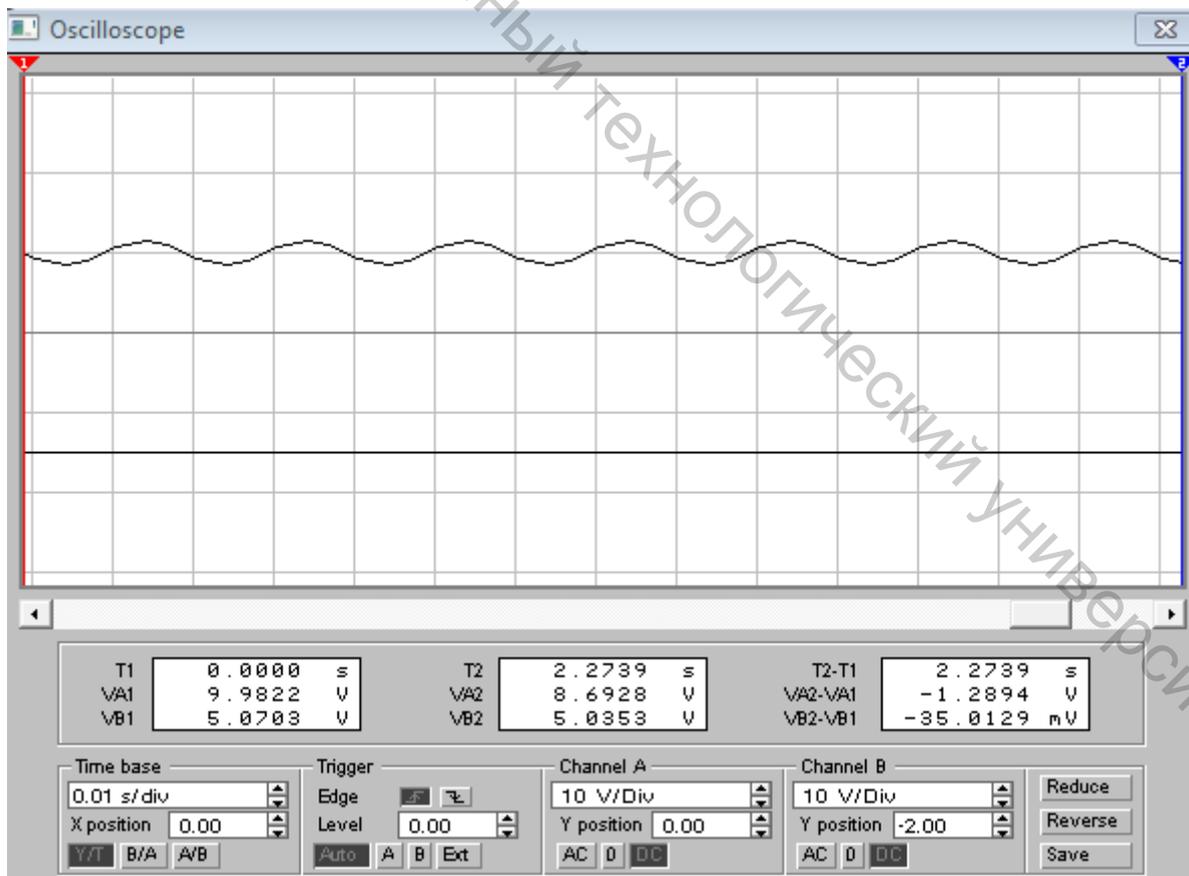


Рисунок 7.4 – Осциллограммы напряжений параметрического стабилизатора

Зарисовать в масштабе осциллограммы напряжений на входе схемы и на нагрузке в соответствии с рисунком 7.5.

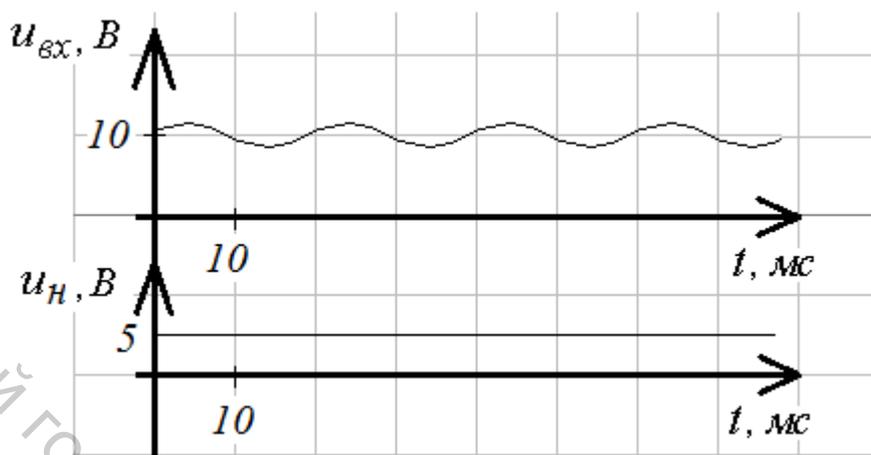


Рисунок 7.5 – Осциллограммы напряжений на входе и на нагрузке параметрического стабилизатора

5. Произвести моделирование схемы параметрического стабилизатора напряжения с повышенной нагрузочной способностью (рис. 7.6).

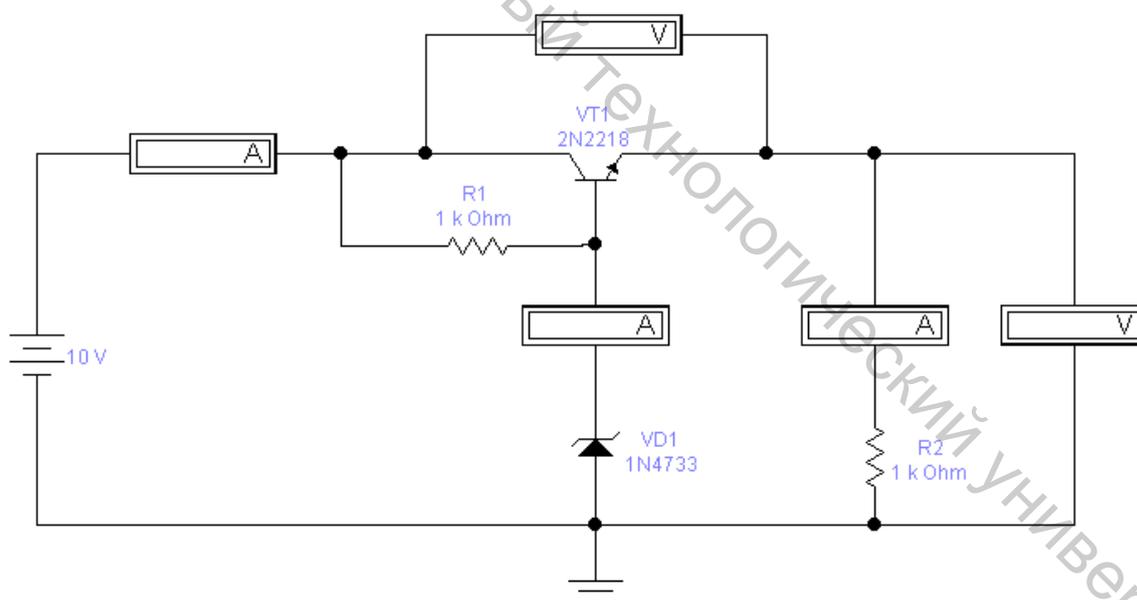


Рисунок 7.6 – Схема моделирования параметрического стабилизатора напряжения с повышенной нагрузочной способностью

6. Изменяя значение входного напряжения стабилизатора в соответствии с данными таблицы 7.3, измерить выходное напряжение стабилизатора, а также напряжение между коллектором и эмиттером регулирующего транзистора, ток стабилизатора, ток нагрузки и суммарный ток стабилизатора. Полученные данные занести в таблицу 7.3. Построить график зависимости $U_n(U_{вх})$.

Таблица 7.3

$U_{вх}, В$	$U_{VT1}, В$	$U_{нв}, В$	$I_{см}, мА$	$I_{нв}, мА$	$I_{вх}, мА$
10					
12					
14					
16					
18					
20					

Контрольные вопросы

1. Пояснить назначение элементов схемы и основные параметры простейшего параметрического стабилизатора.
2. Пояснить назначение элементов схемы и принцип действия параметрического стабилизатора напряжения с повышенной нагрузочной способностью.
3. Пояснить достоинства и недостатки, область применения параметрических стабилизаторов.

Литература

1. Электротехника с основами электроники / А. А. Федорченко, Ю. Г. Синдеев. – Москва : Дашков и К, 2007. – 416 с.
2. Электротехника и электроника / Б. И. Петленко [и др.]. – Москва : Академия, 2007. – 320 с.
3. Электротехника, электроника и импульсная техника / А. Г. Морозов. – Москва : Высшая школа, 1987.
4. Основы промышленной электроники / под ред. В. Г. Герасимова. – Москва : Высшая школа, 1986.
5. Промышленная электроника / Ю. С. Забродин. – Москва : Высшая школа, 1982.

Учебное издание

**ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА АВТОМАТИКИ.
ЭЛЕМЕНТЫ СХЕМ ВТОРИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ**

Методические указания по выполнению лабораторных работ

Составители:

Куксевич Виталий Фёдорович
Черненко Дмитрий Владимирович

Редактор *Т.А. Осипова*
Корректор *Т.А. Осипова*
Компьютерная верстка *В.Ф. Куксевич*

Подписано к печати 25.06.2020. Формат 60x90¹/₁₆. Усл. печ. листов 3,5.
Уч.-изд. листов 4,4. Тираж 40 экз. Заказ № 182.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»
210038, г. Витебск, Московский пр., 72.

Отпечатано на ризографе учреждения образования

«Витебский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.