

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

ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА АВТОМАТИКИ

**Методические указания к практическим занятиям
для студентов специальности 1-53 01 01-01
«Автоматизация технологических процессов и производств
(машиностроение и приборостроение)»**

Витебск
2019

УДК 621.38

Составители:

А. В. Ильющенко, В. Ф. Куксевич

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом УО «ВГТУ», протокол № 5 от 29.05.2019.

Электронные устройства автоматики : методические указания к практическим занятиям / сост. А. В. Ильющенко, В. Ф. Куксевич. – Витебск : УО «ВГТУ», 2019. – 55 с.

Методические указания являются руководством к практическим занятиям по дисциплине «Электронные устройства автоматики» для студентов специальности 1-53 01 01-01 «Автоматизация технологических процессов и производств (машиностроение и приборостроение)», содержат общие требования, предъявляемые к выполнению практических занятий, освещают теоретические вопросы подготовки к ним, приводят примеры получения характеристик электронных устройств автоматики с помощью программы Electronics Workbench.

УДК 621.38

© УО «ВГТУ», 2019

Содержание

Общие требования к выполнению практических занятий	4
Практическое занятие 1	
<i>Исследование однофазных схем выпрямления</i>	5
Практическое занятие 2	
<i>Исследование трехфазных схем выпрямления</i>	13
Практическое занятие 3	
<i>Исследование сглаживающих фильтров</i>	19
Практическое занятие 4	
<i>Исследование однофазных схем выпрямления с умножением напряжения</i>	30
Практическое занятие 5	
<i>Исследование однокаскадного усилителя низкой частоты</i>	35
Практическое занятие 6	
<i>Исследование типовых схем на операционных усилителях</i>	42
Практическое занятие 7	
<i>Исследование мультивибратора на биполярных транзисторах</i>	47
Литература	54

Общие требования к выполнению практических занятий

Студент должен предварительно изучить описание предстоящего практического занятия, теоретический материал, соответствующий данному занятию.

Перед проведением каждого занятия проводится проверка теоретической подготовки студента по данной теме. После разрешения студенты приступают к выполнению практической работы.

Отчет по выполненному практическому занятию 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.

Практическое занятие 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.

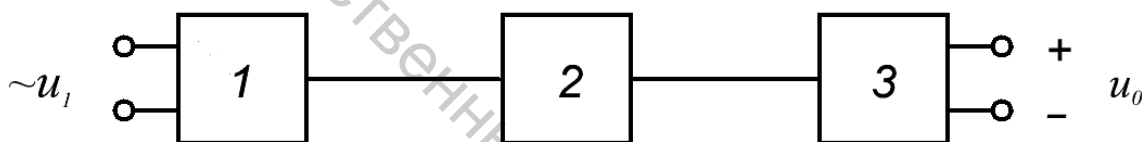


Рисунок 1.1 – Структурная схема выпрямителя

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:

$$K_n = U_{mn} / U_0. \quad (1.1)$$

Внешняя характеристика выпрямителя – зависимость выпрямленного напряжения U_0 от тока нагрузки I_0 при неизменном напряжении на входе вы-

прямителя. По этой характеристике можно определить выходное напряжение выпрямителя при заданной нагрузке и его внутреннее сопротивление:

$$R_0 = \Delta U_0 / \Delta I_0. \quad (1.2)$$

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

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.

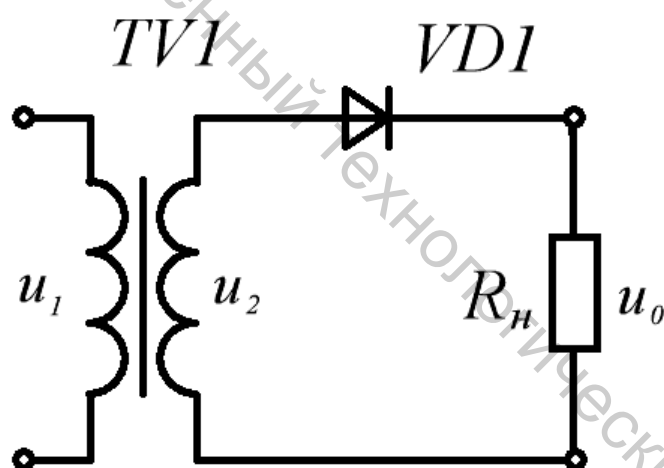


Рисунок 1.2 – Однополупериодная схема выпрямления

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).

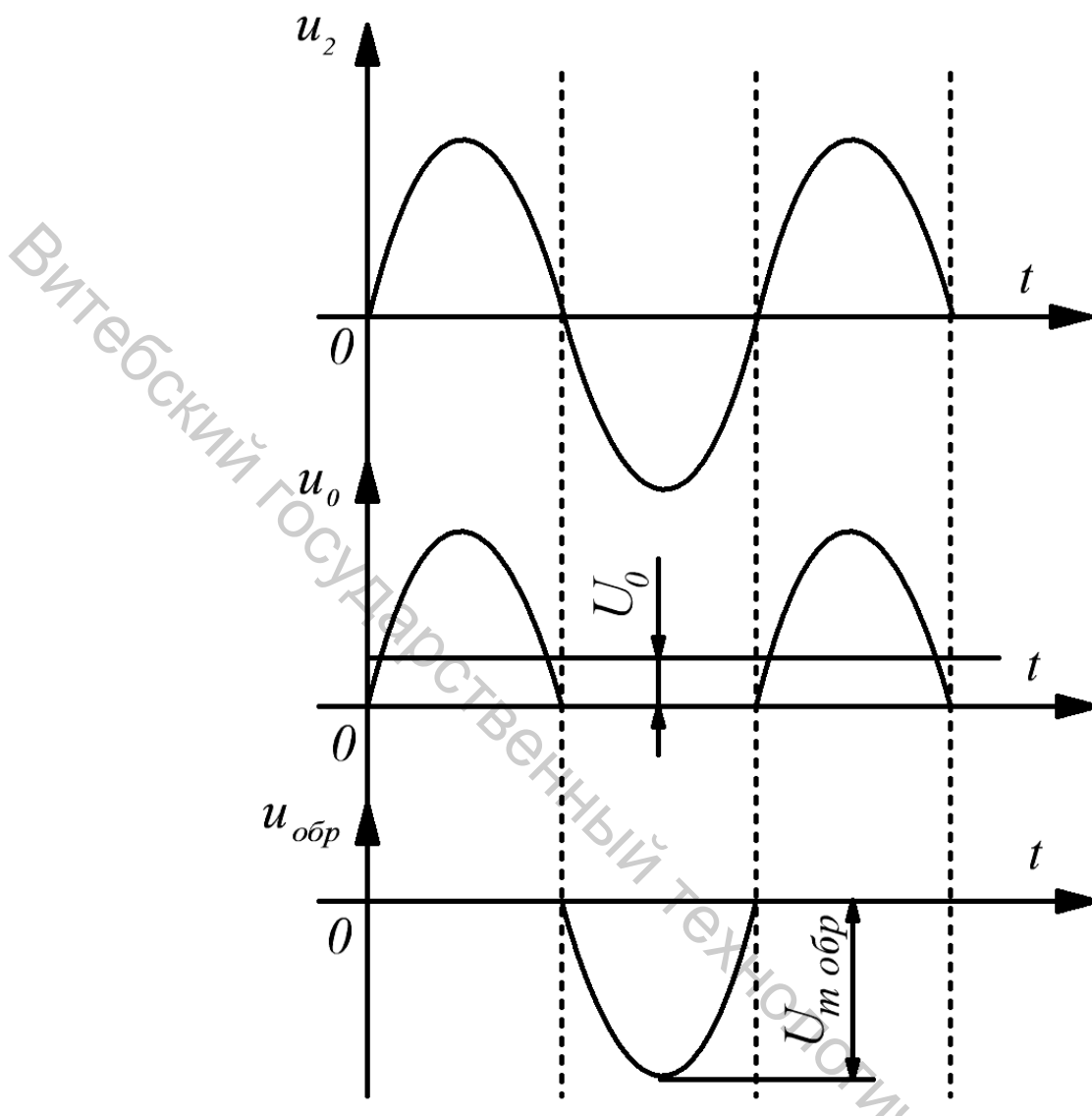


Рисунок 1.3 – Временные диаграммы

Для однополупериодной схемы выпрямления характерны следующие недостатки: низкая частота пульсации, высокое обратное напряжение на вентиле, плохое использование трансформатора (используется энергия одной полувольты 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.

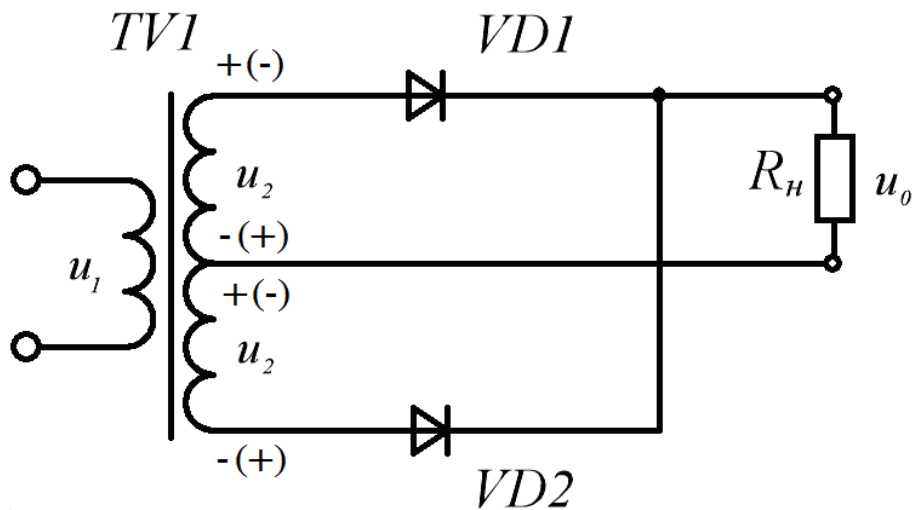


Рисунок 1.4 – Двухполупериодная схема выпрямления с выводом нулевой точки трансформатора

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.

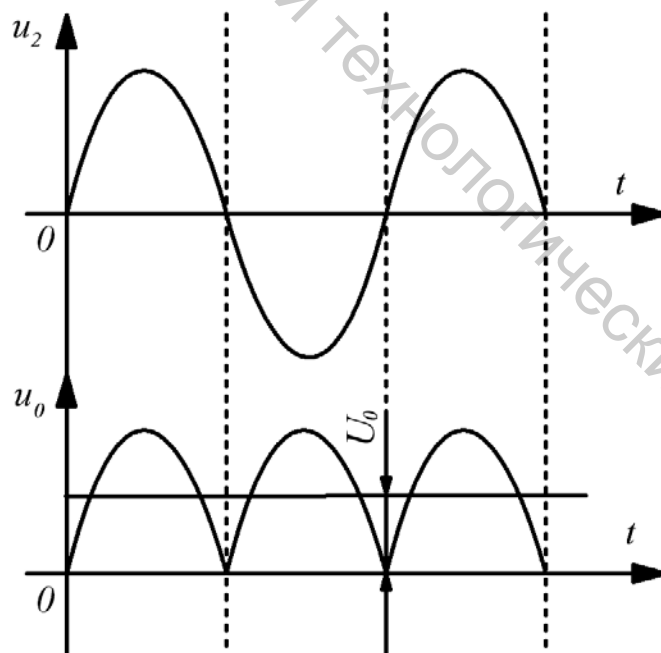


Рисунок 1.5 – Временные диаграммы

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 ра-

за 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.

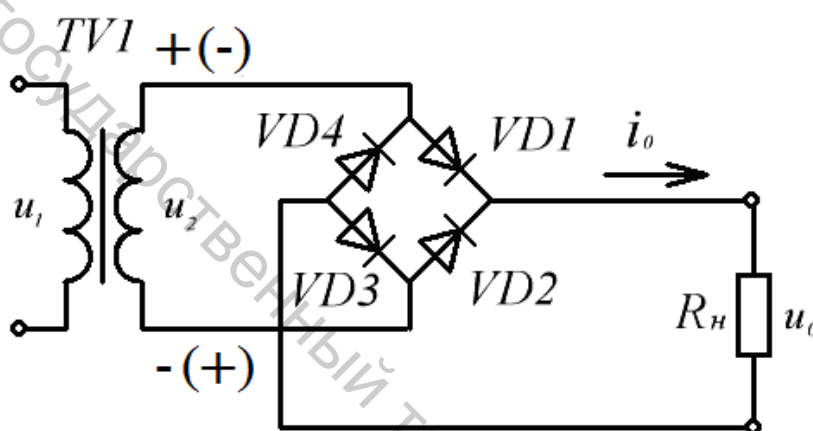


Рисунок 1.6 – Мостовая схема выпрямления

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 – Основные параметры схем выпрямления

Схема выпрямления	$\frac{U_2}{U_0}$	$\frac{U_{т.обр}}{U_0}$	$\frac{I_{нр.ср}}{I_0}$	$\frac{I_{т.нр}}{I_0}$	$\frac{I_{нр}}{I_0}$	$\frac{I_2}{I_0}$	$\frac{S_{мп}}{P_0}$	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.

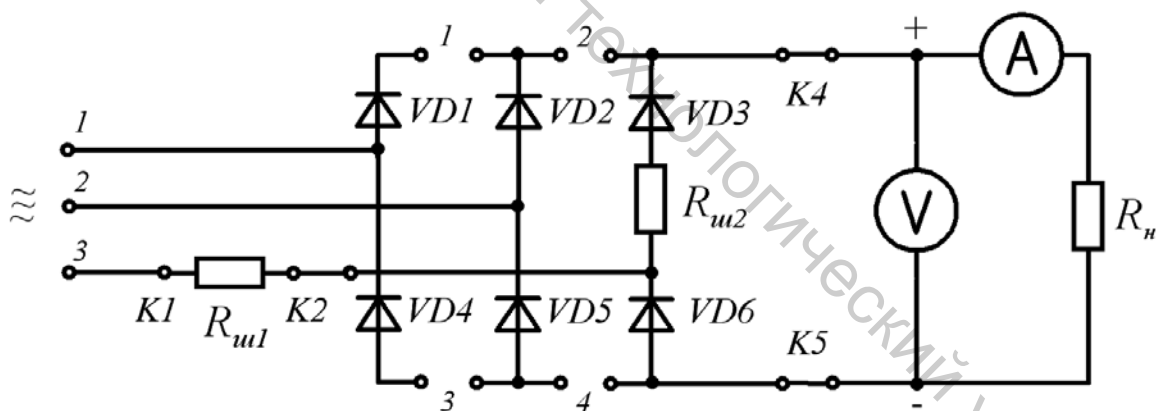


Рисунок 1.7 – Схема модуля «ВЫПРЯМИТЕЛЬ»

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. Переключить 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 – Данные для построения внешних характеристик

	$R_n, \text{ Ом}$	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.

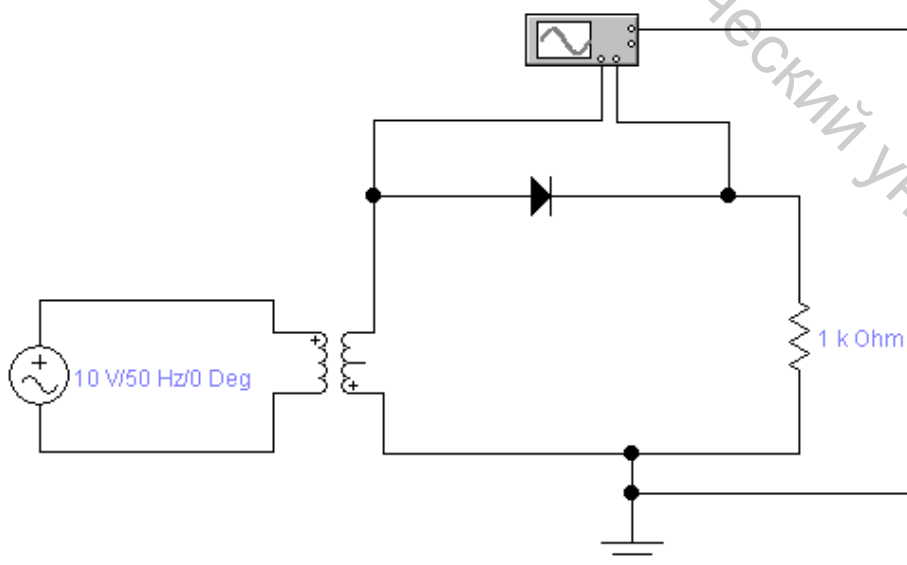


Рисунок 1.8 – Схема моделирования однополупериодного выпрямителя

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.

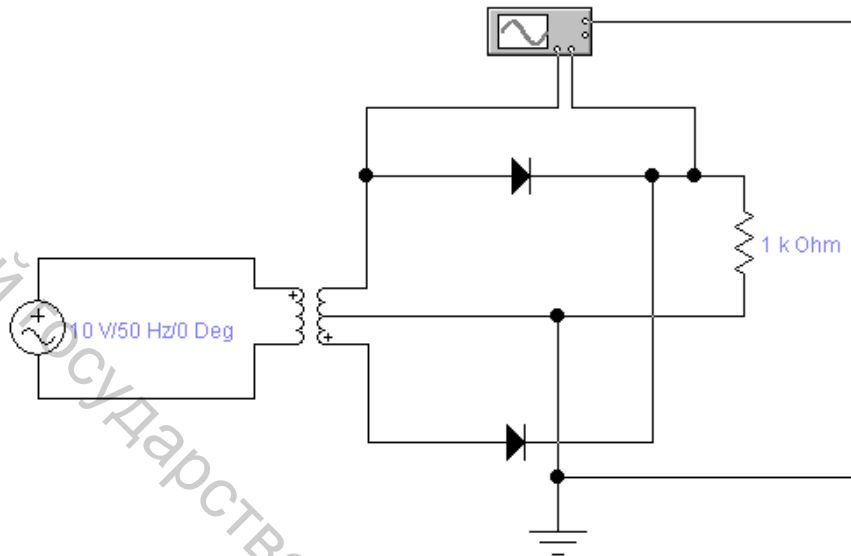


Рисунок 1.9 – Схема моделирования двухполупериодного выпрямителя с выводом нулевой точки трансформатора

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.

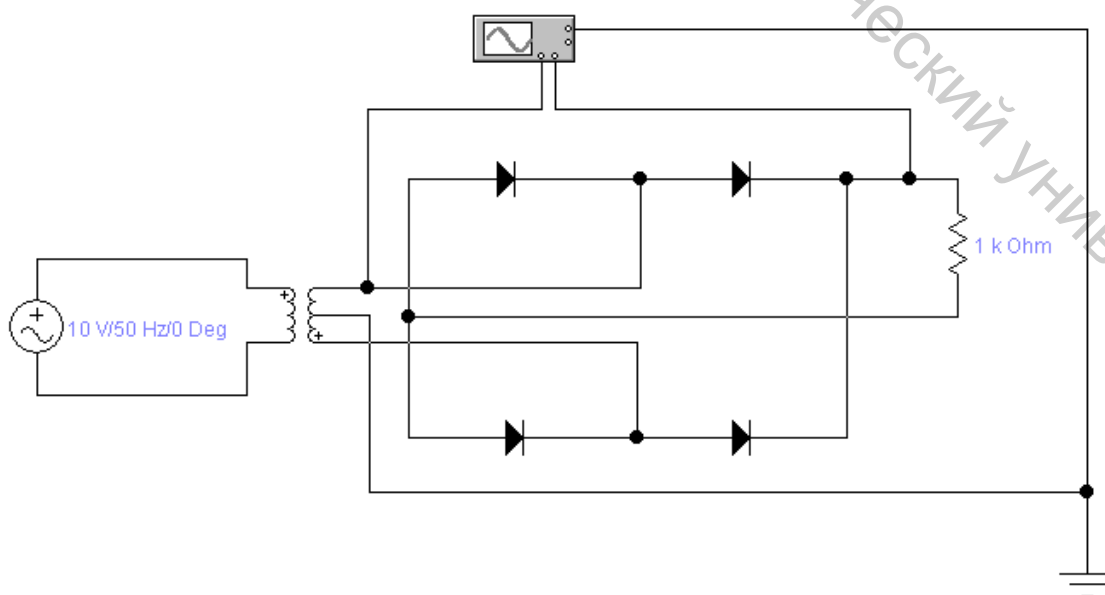


Рисунок 1.10 – Схема моделирования однофазного мостового выпрямителя

Контрольные вопросы

1. Пояснить 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?

Практическое занятие 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.

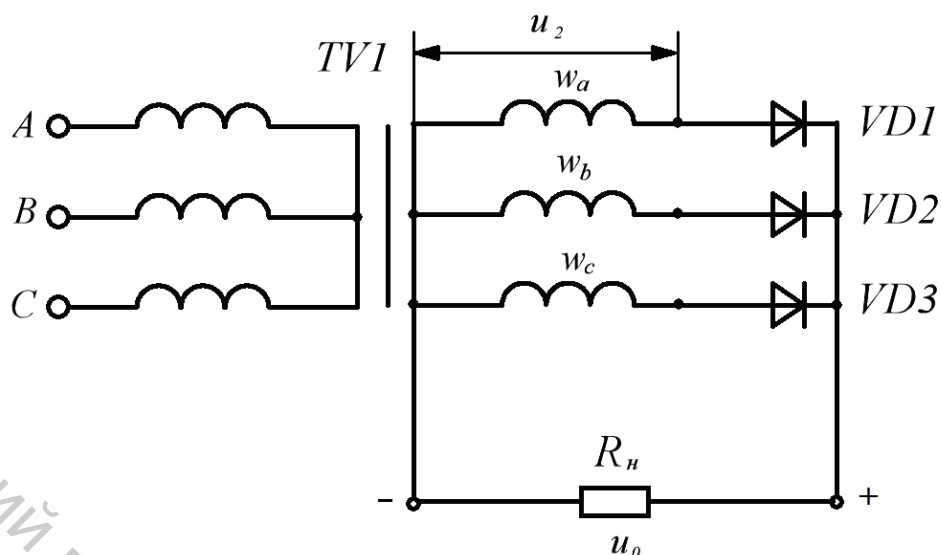


Рисунок 2.1 – Трехфазная схема выпрямления с нулевым выводом

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

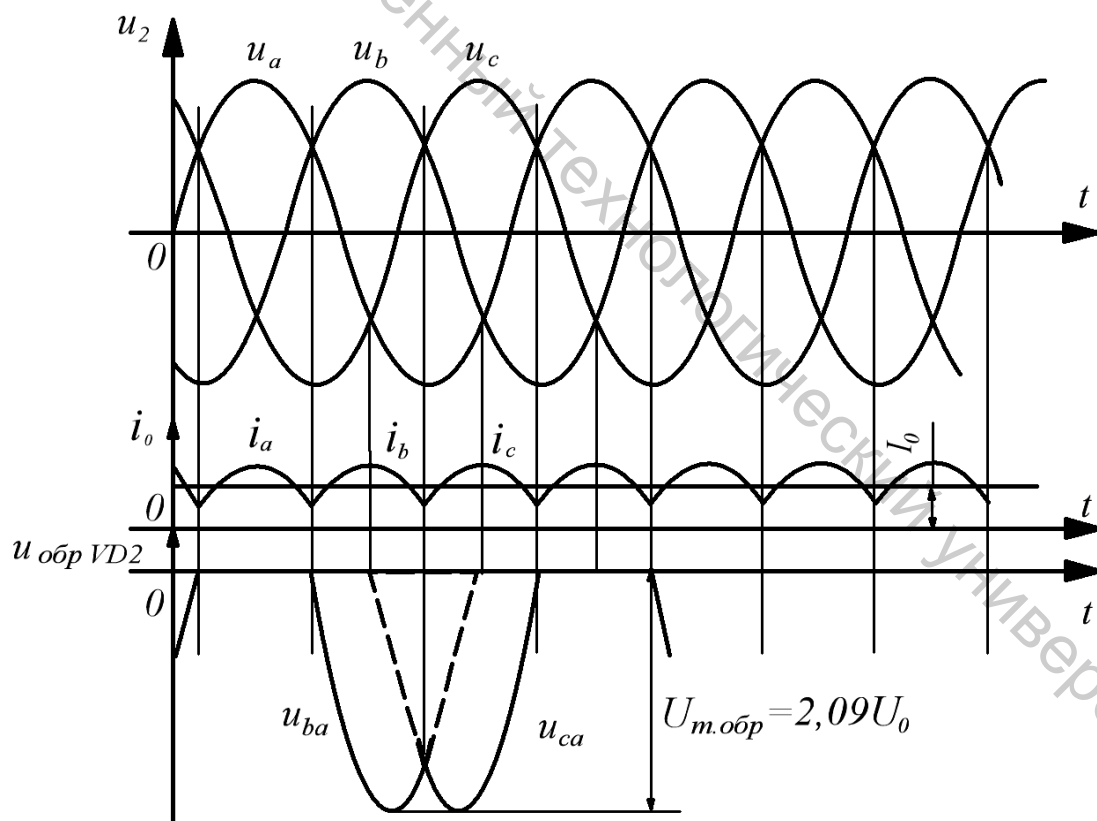


Рисунок 2.2 – Временные диаграммы

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

крываться только при положительной полярности соответствующего фазного напряжения. Кроме того, открытым может быть только тот клапан, мгновенное значение напряжения на аноде которого в данный момент времени выше, чем у других. Из рисунка 2.2 видно, что каждый из клапанов 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 клапанами (рис. 2.3). Клапаны $VD1, VD3, VD5$ образуют так называемую катодную группу, поскольку их катоды соединены в узел, а клапаны $VD2, VD4, VD6$ – анодную группу (их аноды сведены в узел). Временные диаграммы, поясняющие работу схемы при активной нагрузке, приведены на рисунке 2.4.

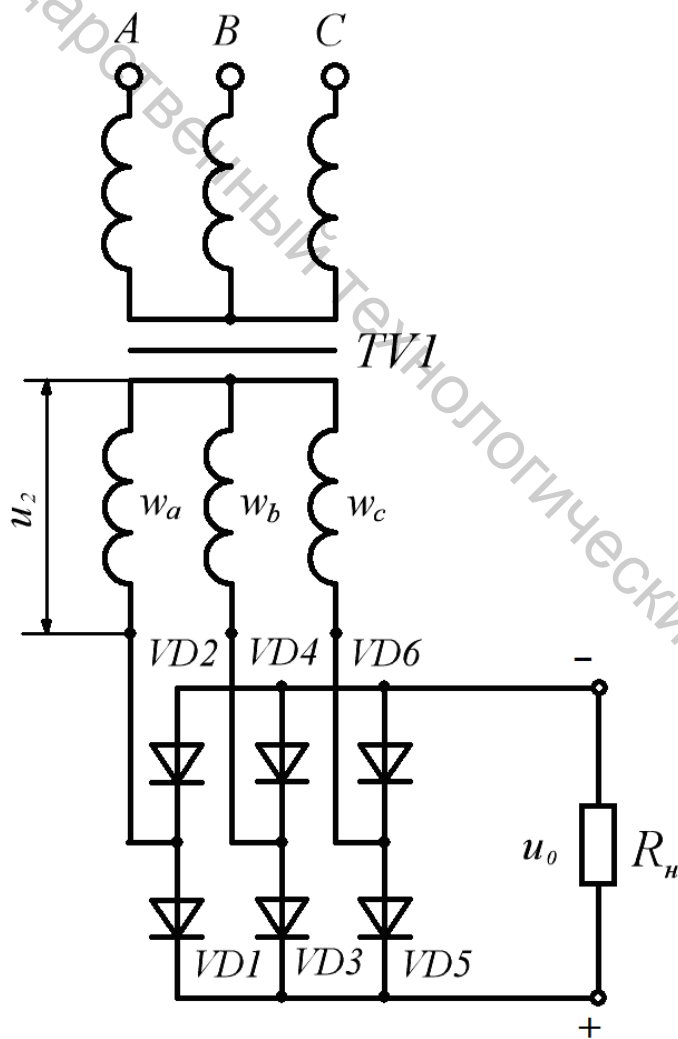


Рисунок 2.3 – Трехфазная мостовая схема выпрямления

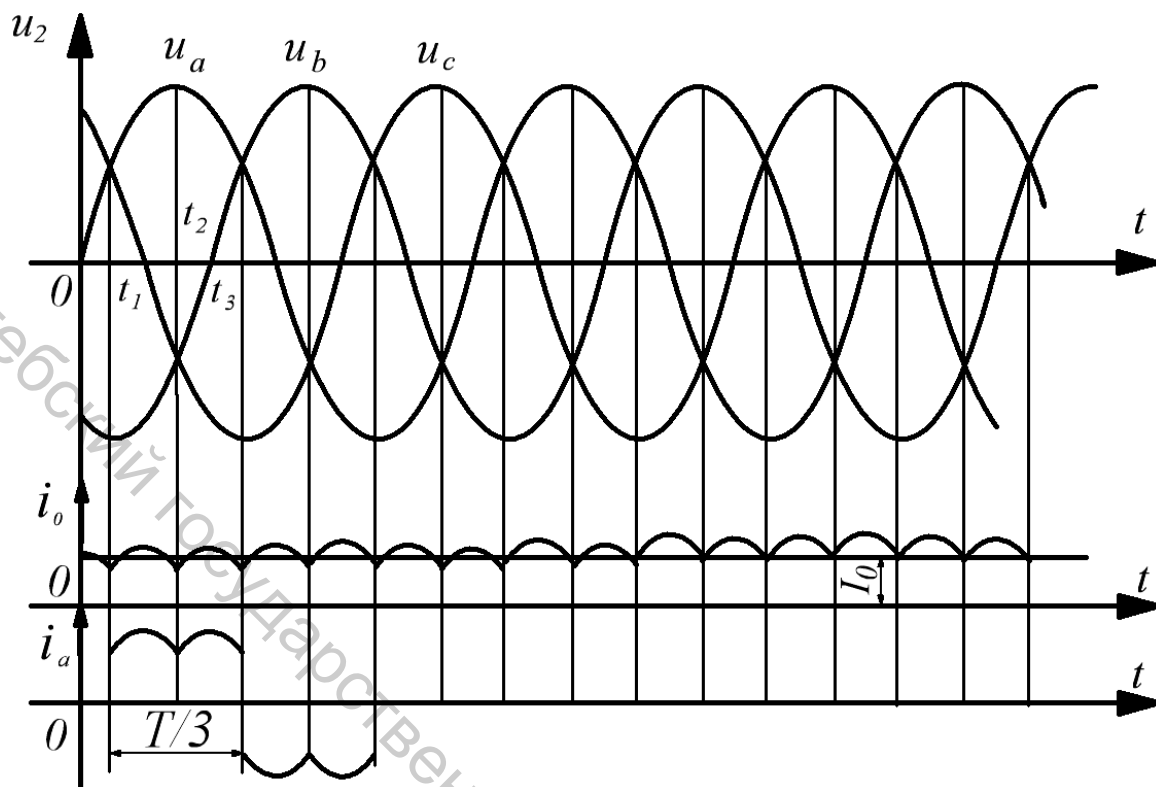


Рисунок 2.4 – Временные диаграммы

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 – Основные параметры трехфазных схем выпрямления

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	$\frac{f_n}{f_c}$
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 вентиля, 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 – Данные для построения внешних характеристик

	$R_n, \text{Ом}$	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.

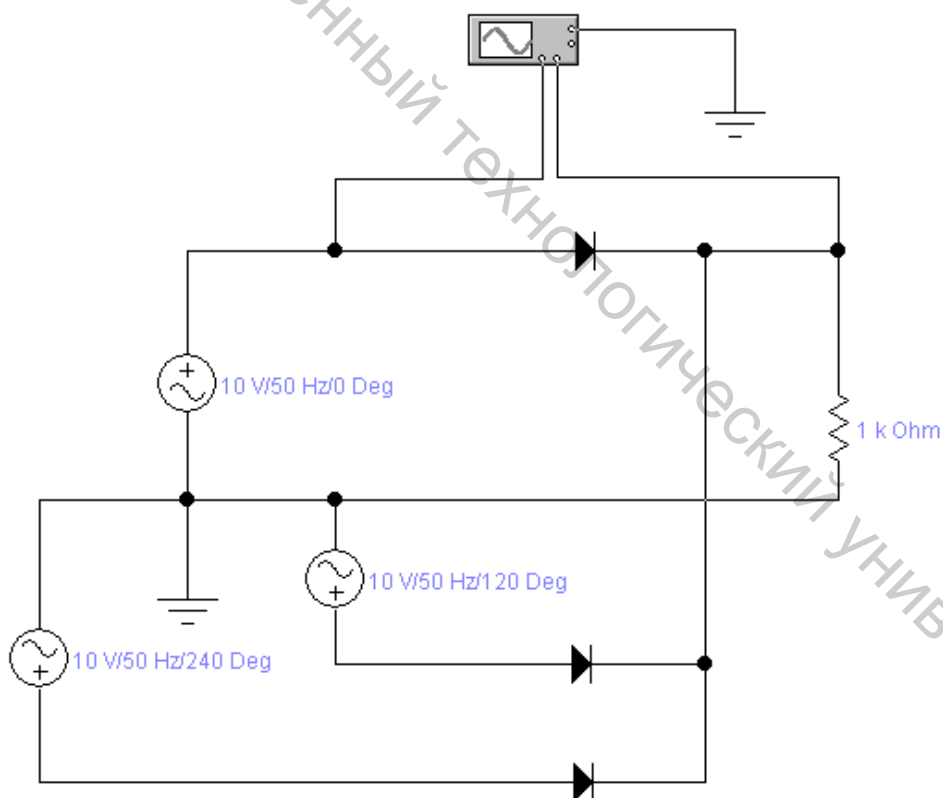


Рисунок 2.5 – Схема моделирования трехфазного выпрямителя с нулевым выводом

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.

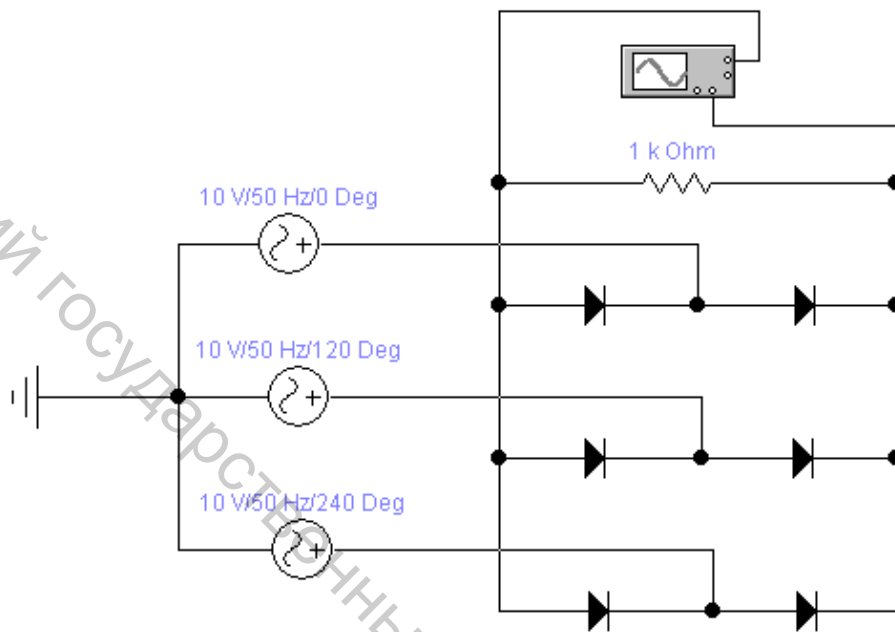


Рисунок 2.6 – Схема моделирования трехфазного мостового выпрямителя

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.
5. Дать сравнительную оценку однофазных и трехфазных схем выпрямления.

Практическое занятие 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 $K_c = K_{пвх} / K_{пвых}$. 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_ϕ , включенный параллельно нагрузке R_n выпрямителя (рис. 3.1).

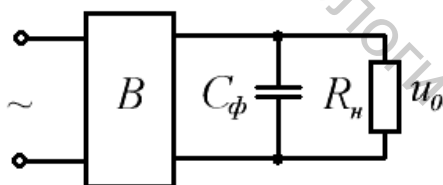


Рисунок 3.1 – Схема выпрямления с емкостным фильтром

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_ϕ .

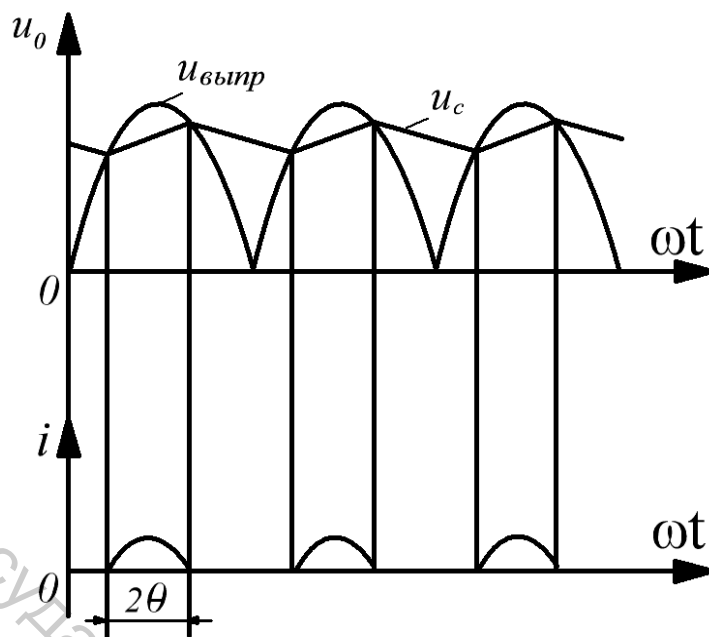


Рисунок 3.2 – Временные диаграммы

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).

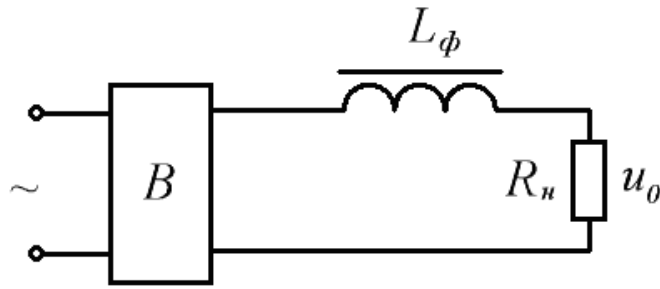


Рисунок 3.3 – Схема выпрямления с индуктивным фильтром

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).

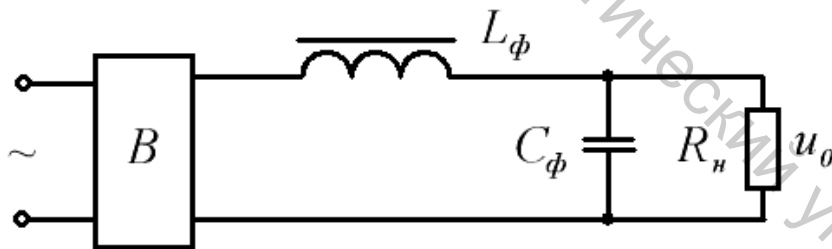


Рисунок 3.4 – Схема выпрямления с Г-образным LC-фильтром

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.

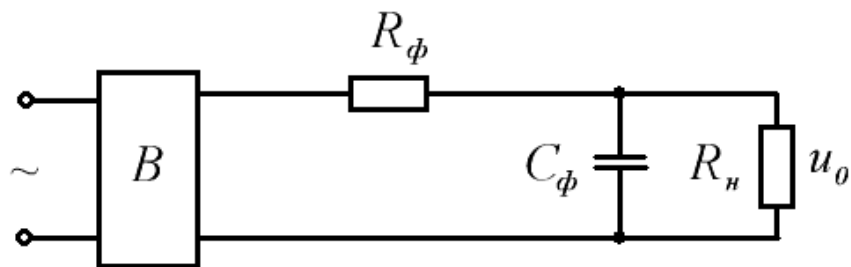


Рисунок 3.5 – Схема выпрямления с Γ -образным RC -фильтром

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:

$$\frac{I}{m\omega C_\phi} \ll R_n; \quad R_\phi \gg \frac{I}{m\omega C_\phi}; \quad R_\phi = R_n(1 - \eta) / \eta. \quad (3.1)$$

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.

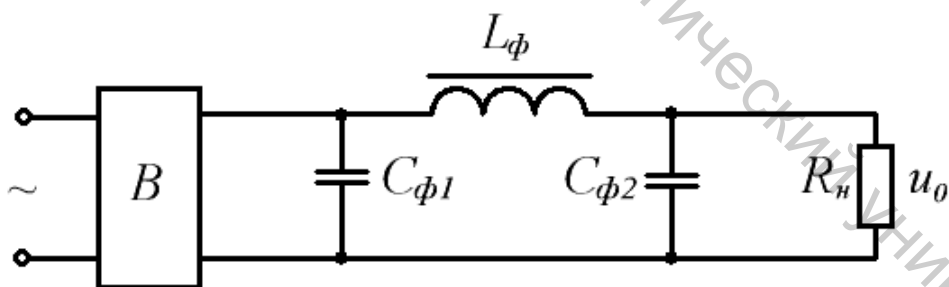


Рисунок 3.6 – Схема выпрямления с Π -образным фильтром

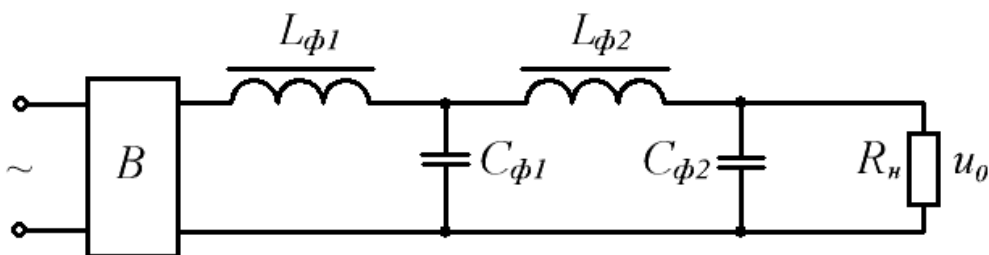


Рисунок 3.7 – Схема выпрямления с двойным Γ -образным фильтром

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 – Данные для построения внешних характеристик

	$R_n, \text{ Ом}$	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 – Коэффициенты сглаживания фильтров

№	Наименование фильтра	Коэффициенты сглаживания
1.	Емкостный фильтр	$K_{c1} = \frac{K_{nax}}{K_{nвых}} = \frac{0,67}{\frac{1}{m\omega C_\phi R_n}}$
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	$K_{c1} = K_{c1} \cdot K_{c2}$

Порядок выполнения работы в программе Electronics Workbench

1. Произвести моделирование схемы выпрямителя при отсутствии сглаживающего фильтра (рис. 3.8), задав следующие параметры элементов: напря-

жение 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.

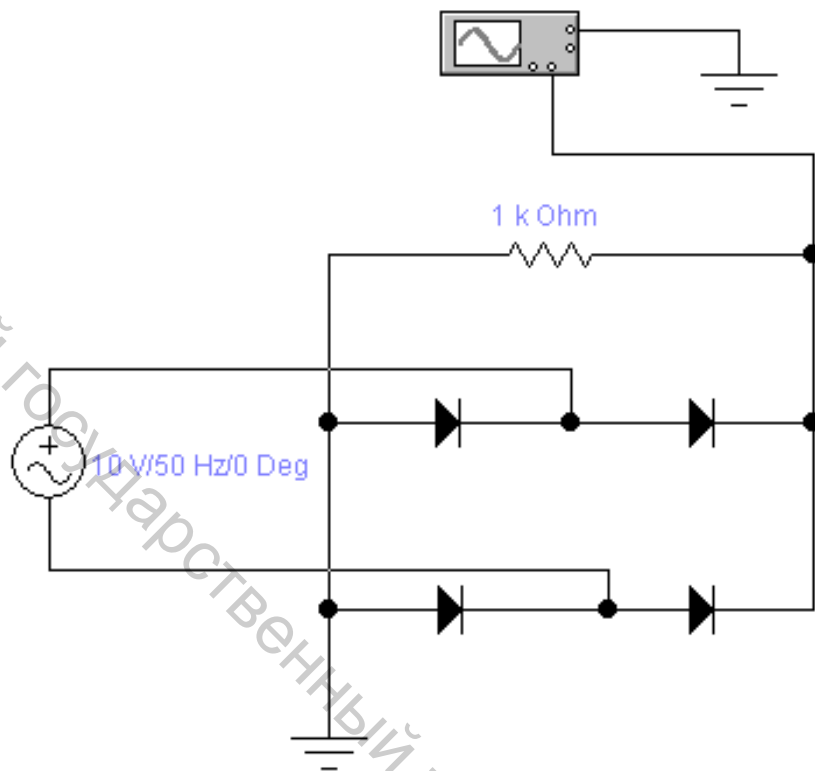


Рисунок 3.8 – Схема моделирования однофазного мостового выпрямителя без сглаживающего фильтра



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.

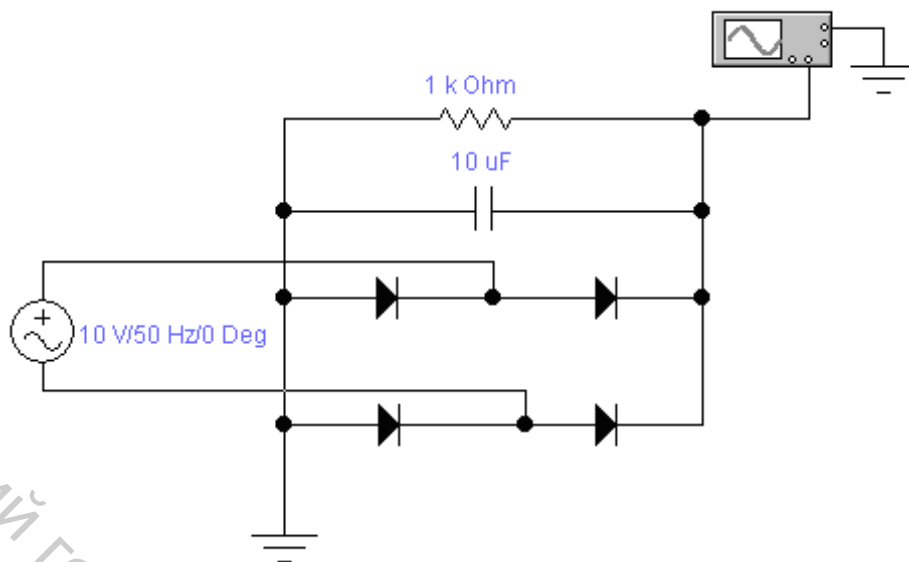


Рисунок 3.10 – Схема моделирования однофазного мостового выпрямителя с емкостным фильтром

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.

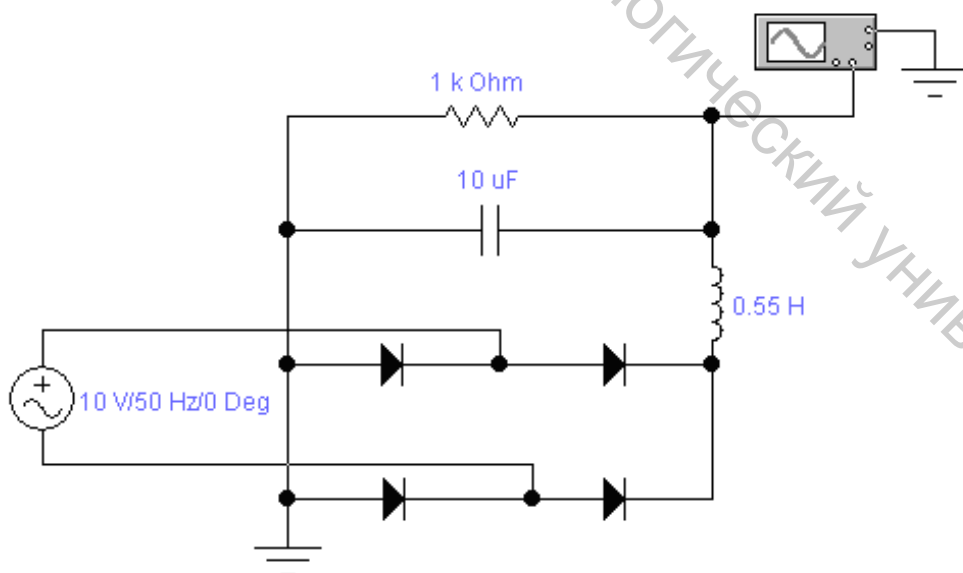


Рисунок 3.11 – Схема моделирования однофазного мостового выпрямителя с Γ -образным LC -фильтром

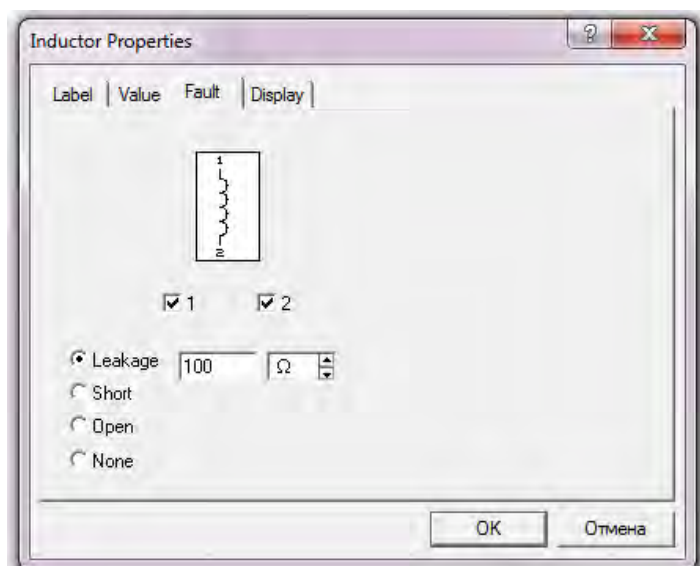


Рисунок 3.12 – Настройка параметров катушки индуктивности

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.

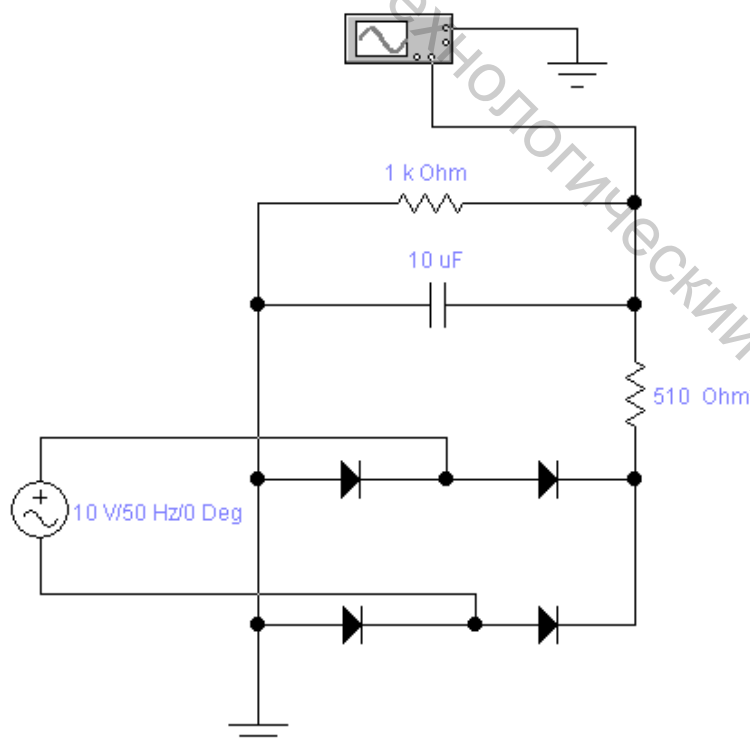


Рисунок 3.13 – Схема моделирования однофазного мостового выпрямителя с Γ -образным RC -фильтром

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.

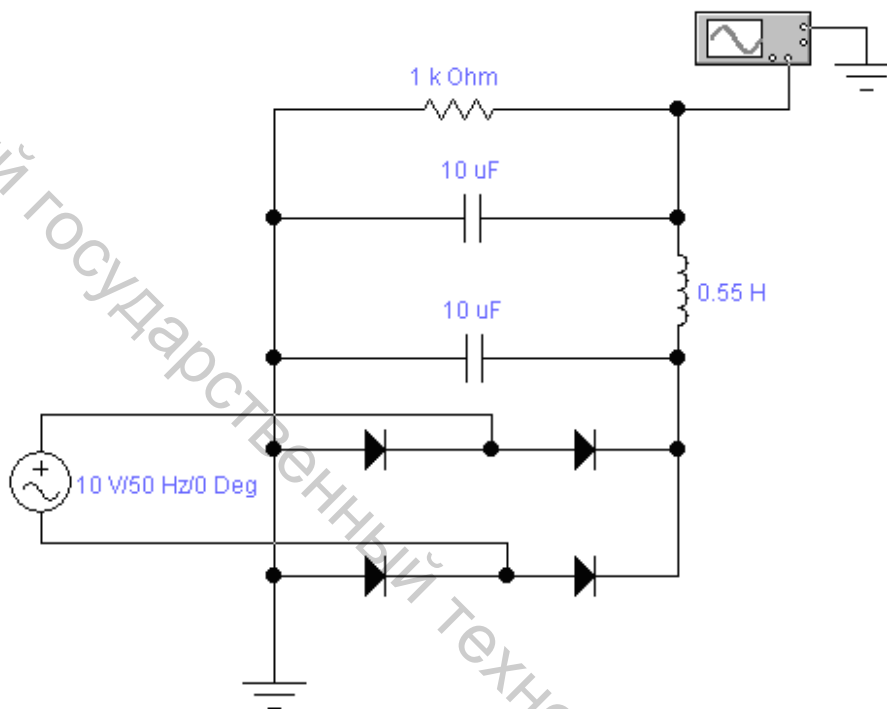


Рисунок 3.14 – Схема моделирования однофазного мостового выпрямителя с Π -образным фильтром

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?

Практическое занятие 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

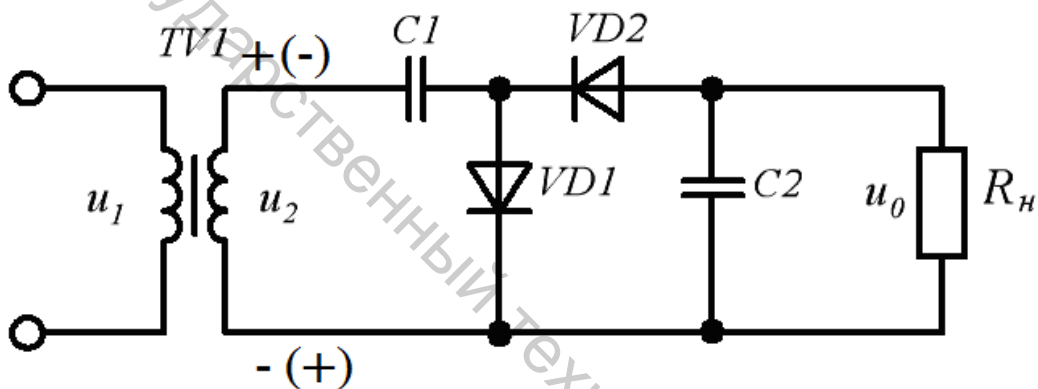


Рисунок 4.1 – Однополупериодная несимметричная схема удвоения напряжения

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

$$U_{C2} = U_{C1} + U_{2m} = 2U_{2m}. \quad (4.1)$$

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

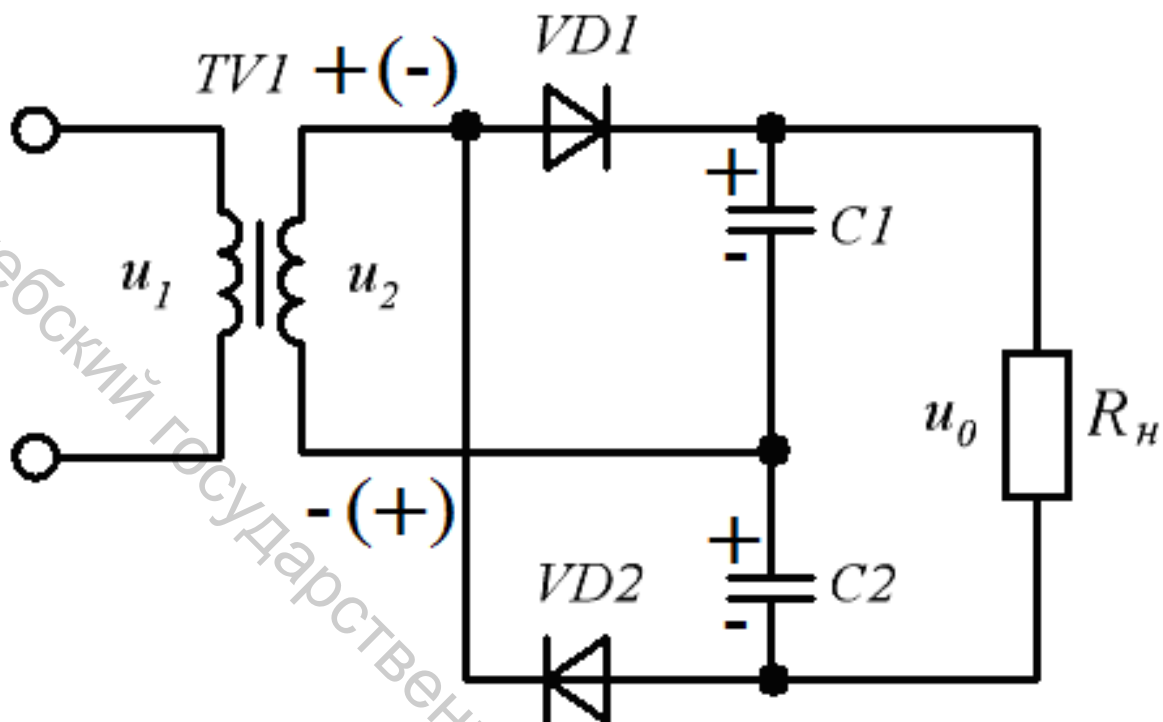


Рисунок 4.2 – Двухполупериодная симметричная схема удвоения напряжения

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

$$U_0 = U_{C1} + U_{C2} = 2U_{2m}. \quad (4.2)$$

В данной схеме исключается подмагничивание сердечника трансформатора.

На основе данных схем строятся схемы многократного умножения напряжения.

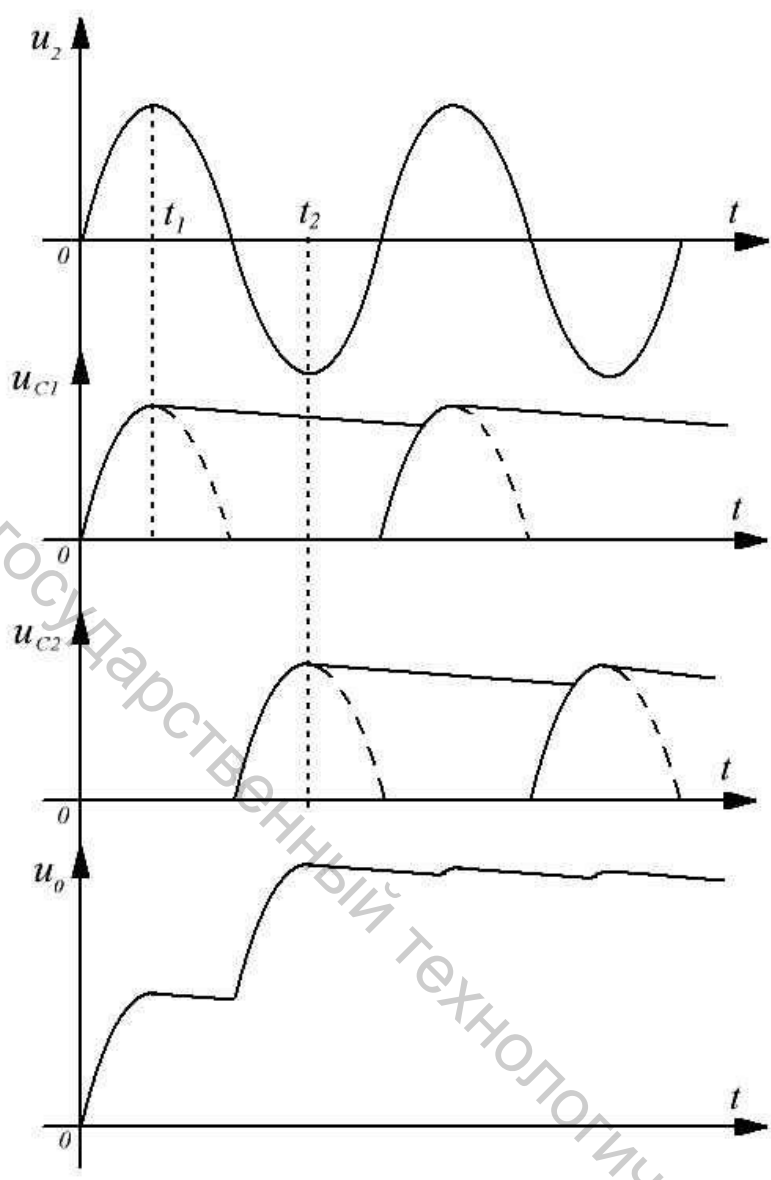


Рисунок 4.3 – Временные диаграммы

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

$$U_{C2} = 2U_{2m}. \tag{4.3}$$

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

$$U_{C3} = U_{2m} + U_{C2} = U_{2m} + 2U_{2m} = 3U_{2m}. \tag{4.4}$$

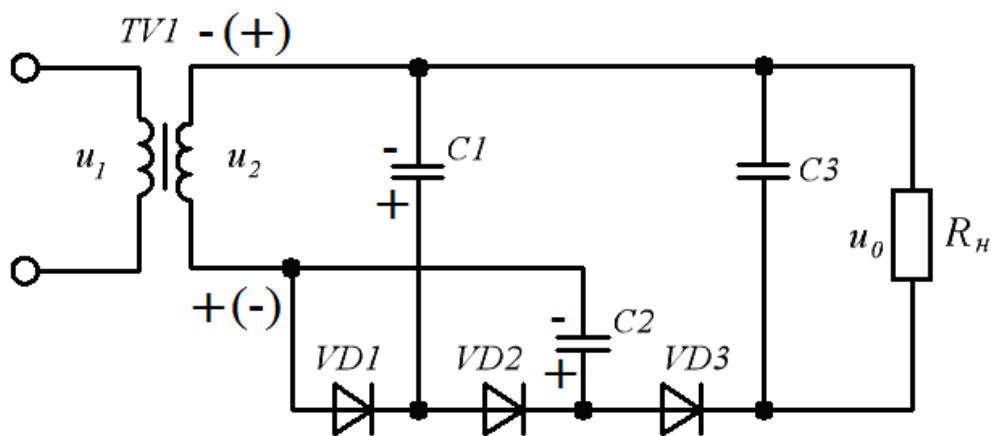


Рисунок 4.4 – Однополупериодная схема умножения напряжения (схема первого рода)

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

В данной схеме $U_{обр} = 2U_{2m}$ (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 $C1$.

$$U_{C2} = U_{2m} + U_{C1} = 2U_{2m} \quad (4.5)$$

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

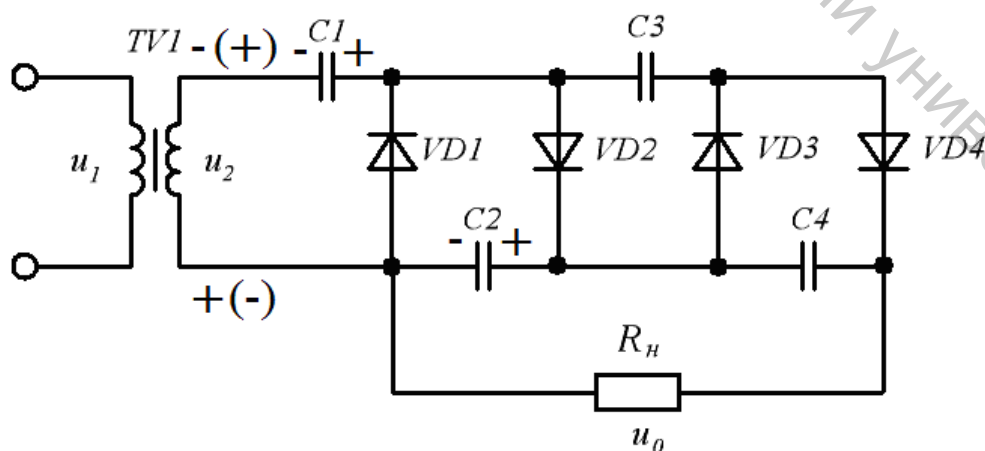


Рисунок 4.5 – Однополупериодная схема с умножением напряжения (схема второго рода)

Так как $C1$ включен в противофазе, то

$$U_{C3} = U_{2m} + U_{C2} - U_{C1} = U_{2m} + 2U_{2m} - U_{2m} = 2U_{2m}. \quad (4.6)$$

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

$$U_{C4} = U_{2m} + U_{C1} + U_{C3} - U_{C2} = U_{2m} + U_{2m} + 2U_{2m} - 2U_{2m} = 2U_{2m}. \quad (4.7)$$

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).

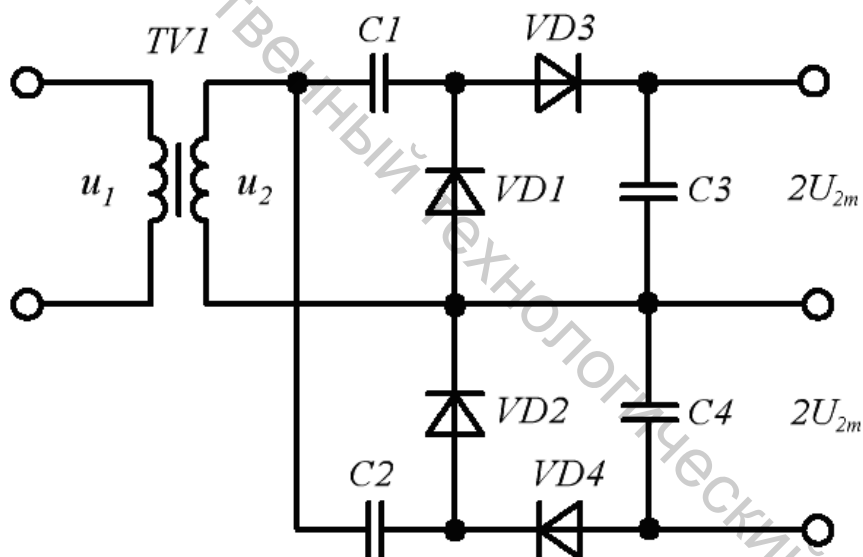



Рисунок 4.6 – Комбинированная схема умножения напряжения

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 – Данные схем выпрямления с умножением напряжения

Схема \ С, мкФ	5	50	500
Рис. 4.1			
Рис. 4.2			
Рис. 4.4			
Рис. 4.5			
Рис. 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.

Практическое занятие 5

Исследование однокаскадного усилителя низкой частоты

Цель работы: изучение назначения элементов и исследование характеристик усилителей низкой частоты (УНЧ), выполненных на биполярных транзисторах. Ознакомление с особенностями применения УНЧ в технике.

Теоретические сведения

Электронным усилителем называется устройство, преобразующее электрические сигналы небольшой мощности на входе в электрические сигналы большей мощности на выходе. Увеличение сигнала в усилителе происходит за счет преобразования энергии источника питания, осуществляемого с помощью активных управляемых элементов (УЭ), как правило, биполярных и полевых транзисторов.

Основными параметрами усилителей являются:

1. Коэффициент усиления по напряжению:

$$K_U = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}. \quad (5.1)$$

2. Коэффициент усиления по току:

$$K_I = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}}. \quad (5.2)$$

2. Коэффициент усиления по мощности:

$$K_P = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}. \quad (5.3)$$

Основными характеристиками усилителей являются:

1. Амплитудная характеристика (АХ) – зависимость амплитуды выходного сигнала от амплитуды сигнала на входе $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$ (рис. 5.1).

2. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) – зависимость коэффициента усиления усилителя от частоты подаваемого на его вход сигнала $K(f)$ (рис. 5.2). С помощью АЧХ определяется полоса пропускания усилителя Δf , в пределах которой величина коэффициента усиления отвечает заданным требованиям.

$$\Delta f = f_{\text{в}} - f_{\text{н}}, \quad (5.4)$$

где $f_{\text{в}}$ и $f_{\text{н}}$ – соответственно верхняя и нижняя граничные частоты.

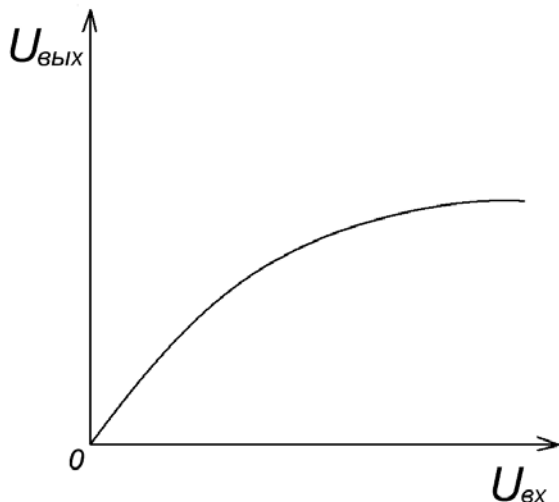


Рисунок 5.1 – Амплитудная характеристика

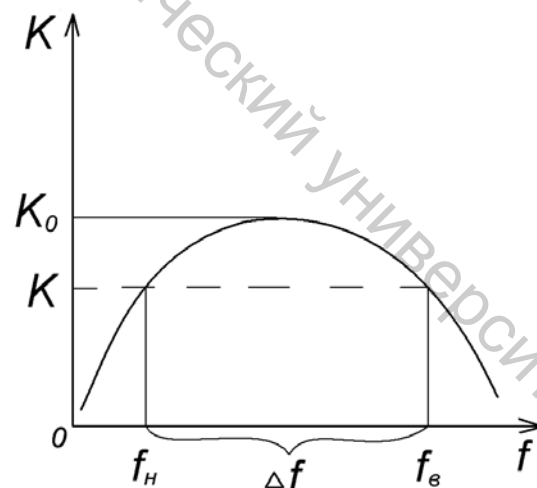


Рисунок 5.2 – Амплитудно-частотная характеристика

3. Фазочастотная характеристика (ФЧХ) – зависимость фазового сдвига между выходным и входным сигналами от частоты при гармоническом входном сигнале.

В зависимости от того, какой из выводов биполярного транзистора при включении делают общим для входной и выходной цепей, различают схемы с общей базой (ОБ), общим коллектором (ОК) и общим эмиттером (ОЭ). При этом в схеме с ОБ усиливается только напряжение, в схеме с ОК – только ток, в схеме с ОЭ – и ток, и напряжение (мощность).

Наибольшее распространение в схемах усилительных каскадов получила схема с ОЭ и термостабилизацией режима покоя (рис. 5.3).

Основными элементами схемы являются:

– источник питания E_k , осуществляющий подачу энергии в выходную цепь для усиления сигнала;

– транзистор VT – управляемый входным сигналом элемент, изменяющий свое сопротивление;

– резистор R_k , выполняющий две функции: задающий ток покоя коллектора I_{k0} и создающий динамический режим работы транзистора.

Остальные элементы схемы являются вспомогательными. Конденсаторы C_b и C_k являются разделительными. C_b используется для развязки входной цепи усилителя по постоянному току от источника входного сигнала. C_k пропускает в цепь нагрузки только переменную составляющую выходного сигнала и задерживает постоянную составляющую.

Резисторы R_1 и R_2 являются делителем напряжения и задают начальный режим работы базы: ток покоя базы I_{b0} и напряжение покоя между базой и эмиттером $U_{бэ0}$.

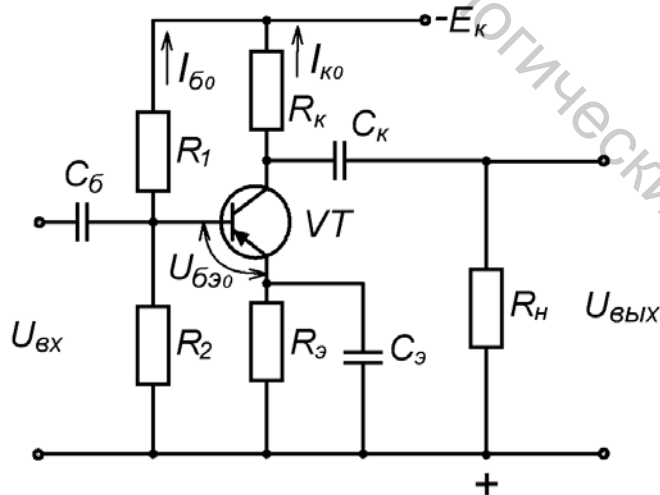


Рисунок 5.3 – Усилительный каскад на биполярном транзисторе с общим эмиттером

Рассмотрим принцип действия данного каскада.

При отсутствии входного сигнала во входной и в выходной цепях протекают создаваемые дополнительным источником питания E_k токи покоя

усилителя $I_{\text{бн}}$ и $I_{\text{кп}}$. Они поддерживают транзистор в активном (проводящем) состоянии.

При подаче на вход переменного напряжения:

– в случае отрицательной полуволны, отрицательное напряжение на базе увеличивается, увеличивается и ток базы $i_{\text{б}}$; транзистор начинает работать в пропускном режиме и ток $i_{\text{к}}$ возрастает; выходное напряжение в это время (согласно II закону Кирхгофа) становится менее отрицательным

$$U_{\text{к}} = -E_{\text{к}} + i_{\text{к}}R_{\text{к}}; \quad (5.5)$$

– в случае положительной полуволны, напряжение на базе становится менее отрицательным, ток базы $i_{\text{б}}$ уменьшается, транзистор прикрывается, уменьшается ток $i_{\text{к}}$; выходное напряжение в это время, определяемое тем же II законом Кирхгофа, становится более отрицательным.

В результате форма усиливаемого сигнала сохраняется неизменной, а амплитуда увеличивается, так как $|E_{\text{к}}| \gg |u_{\text{ax}}|$.

Работа данного каскада зависит от температурного режима. При изменении температуры изменяются прежде всего $I_{\text{к0}}$, а значит и коэффициент усиления тока транзистором β . Это приводит к нарушению режима работы усилительного каскада, в результате транзистор может перейти к работе на нелинейных участках характеристик, нарушится форма выходного сигнала.

Для термостабилизации точки покоя в цепь эмиттера включен резистор $R_{\text{э}}$, создающий отрицательную обратную связь (ООС) по току. При изменении температуры транзистора изменяется напряжение между базой и эмиттером за счет изменения напряжения на $R_{\text{э}}$. Изменение $U_{\text{бэ}}$ приводит к изменению тока $I_{\text{б}}$, а значит и тока коллектора $I_{\text{к}}$. Таким образом $I_{\text{к0}}$ будет поддерживаться на заданном уровне.

Емкость $C_{\text{э}}$ шунтирует $R_{\text{э}}$ по переменному току, исключая тем самым проявление ООС в каскаде по переменным составляющим. Отсутствие $C_{\text{э}}$ привело бы к уменьшению коэффициентов усиления каскада.

В схеме с ОЭ фаза выходного сигнала противоположна фазе входного, поэтому такие усилители называются инвертирующими.

Порядок выполнения работы на унифицированном стенде УИЛС-1

1. Для выполнения работы выбрать модуль «РС-УСИЛИТЕЛИ НЧ», схема которого представлена на рисунке 5.4, и разместить его на наборном поле. Собрать схему, соответствующую рисунку 5.3. Для этого переключить клеммы 1 и 4. Подключить к клеммам К4 и К6 нагрузку, используя блок переменных сопротивлений.

2. Подать напряжение питания 20 В с блока постоянных напряжений в соответствии с обозначением полярности на модуле.

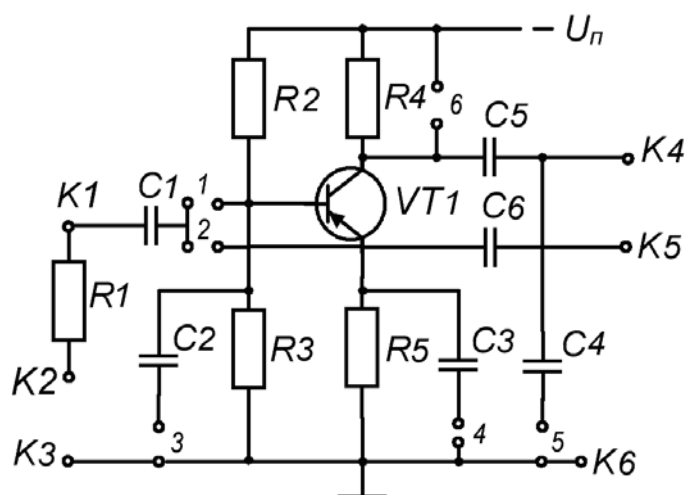


Рисунок 5.4 – Схема модуля «RC-УСИЛИТЕЛИ НЧ»

3. От генератора гармонического напряжения к клеммам *K1* и *K3* подать входной сигнал частотой 1 кГц . Изменяя напряжение входного сигнала в соответствии с данными таблицы 5.1, вольтметром измерить напряжение сигнала на выходе усилителя. Данные измерений занести в таблицу 5.1.

Таблица 5.1 – Данные для построения амплитудной характеристики

$U_{вх}, \text{ В}$	0,01	0,03	0,05	0,07	0,1	0,5	1,0	3,0
$U_{вых}, \text{ В}$								

По полученным данным построить амплитудную характеристику усилителя $U_{вых}(U_{вх})$.

4. Для получения АЧХ усилителя установить напряжение на входе схемы равным $0,03 \text{ В}$ (в процессе проведения опыта это значение необходимо поддерживать постоянным). Изменяя в соответствии с данными таблицы 5.2 частоту входного сигнала, измерить выходное напряжение усилителя. Данные измерений занести в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 – Данные для построения АЧХ

f	20 Гц	50 Гц	100 Гц	500 Гц	1 кГц	5 кГц	10 кГц	50 кГц	100 кГц	150 кГц	200 кГц
$U_{вых}, \text{ В}$											
K_U											
$l_g f$											

Рассчитать значения K_U и lgf . Данные расчета занести в таблицу 5.2. Построить АЧХ усилителя в форме зависимости $K_U(lgf)$.

Порядок выполнения работы в программе Electronics Workbench

1. Произвести моделирование схемы усилительного каскада на биполярном транзисторе с общим эмиттером (рис. 5.5). Вольтметр схемы (на вкладке «Value» окна параметров вольтметра «Voltmeter properties») перевести в положение «АС». Изменяя напряжение входного сигнала в соответствии с данными таблицы 5.1, измерить напряжение сигнала на выходе усилителя. Данные измерений (показания вольтметра, зафиксированные в момент включения схемы) занести в таблицу 5.1.

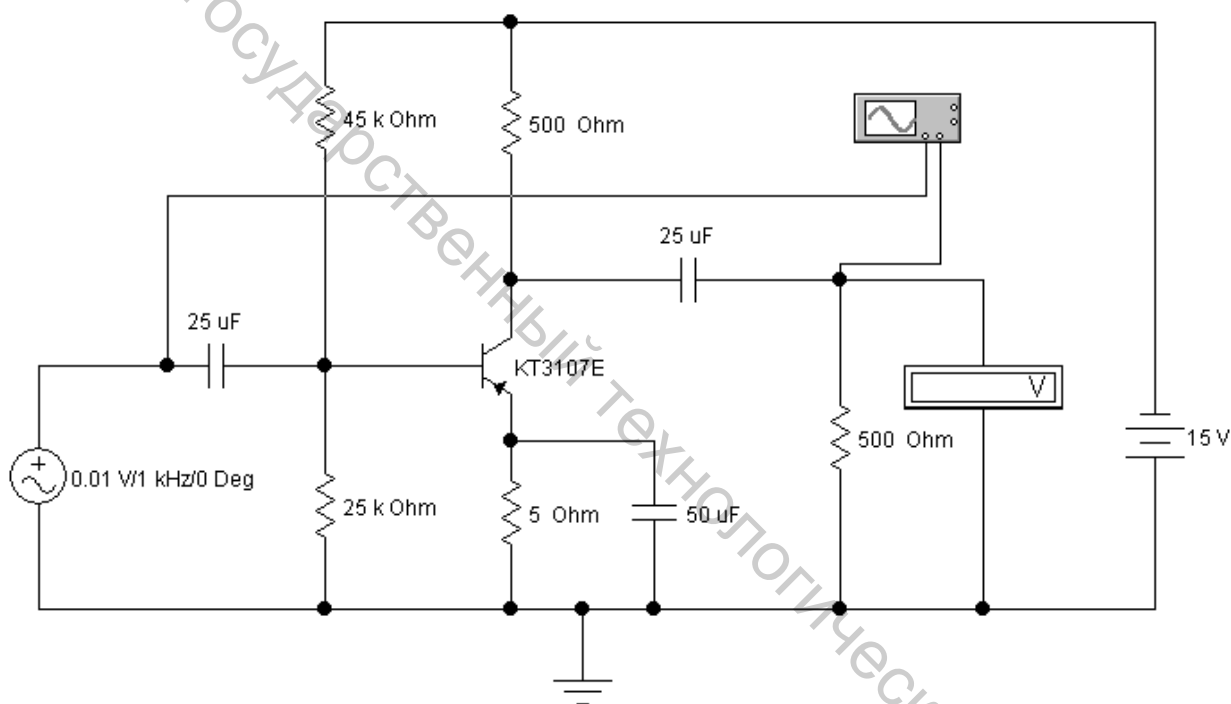


Рисунок 5.5 – Схема моделирования усилительного каскада на биполярном транзисторе с общим эмиттером

По полученным данным построить амплитудную характеристику усилителя $U_{вых}(U_{вх})$.

2. Для получения АЧХ усилителя установить напряжение на входе схемы равным $0,03 В$. Изменяя в соответствии с данными таблицы 5.2 частоту входного сигнала, измерить выходное напряжение усилителя. Данные измерений (показания вольтметра, зафиксированные в момент включения схемы) занести в таблицу 5.2.

Рассчитать значения K_U и lgf . Данные расчета занести в таблицу 5.2. Построить АЧХ усилителя в форме зависимости $K_U(lgf)$.

3. Для получения осциллограмм напряжений схемы при отсутствии нелинейных искажений сигнала установить напряжение на входе схемы $0,01\text{ В}$ и частоту сигнала 1 кГц . Настройку осциллографа произвести в соответствии с рисунком 5.6.



Рисунок 5.6 – Настройки осциллографа

Зарисовать в масштабе осциллограммы напряжений на входе схемы и на нагрузке в соответствии с рисунком 5.7.

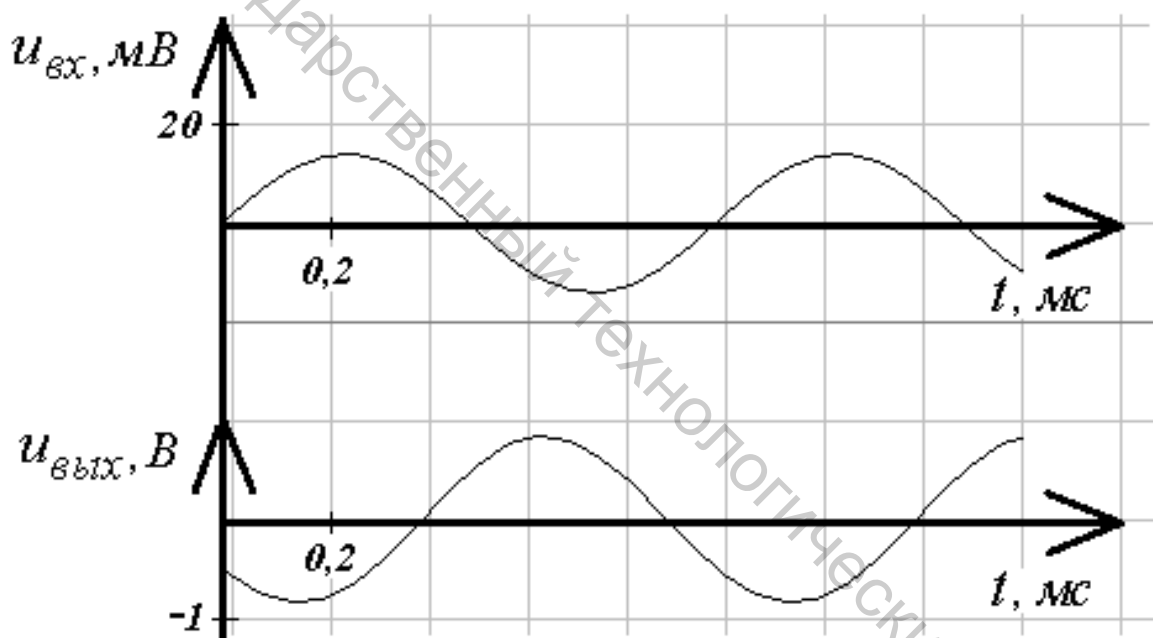


Рисунок 5.7 – Осциллограммы напряжений при отсутствии нелинейных искажений сигнала

4. Для получения осциллограмм напряжений схемы при наличии нелинейных искажений сигнала установить напряжение на входе схемы $0,5\text{ В}$ и частоту сигнала 1 кГц . Зарисовать в масштабе осциллограммы напряжений на входе схемы и на нагрузке в соответствии с рисунком 5.8.

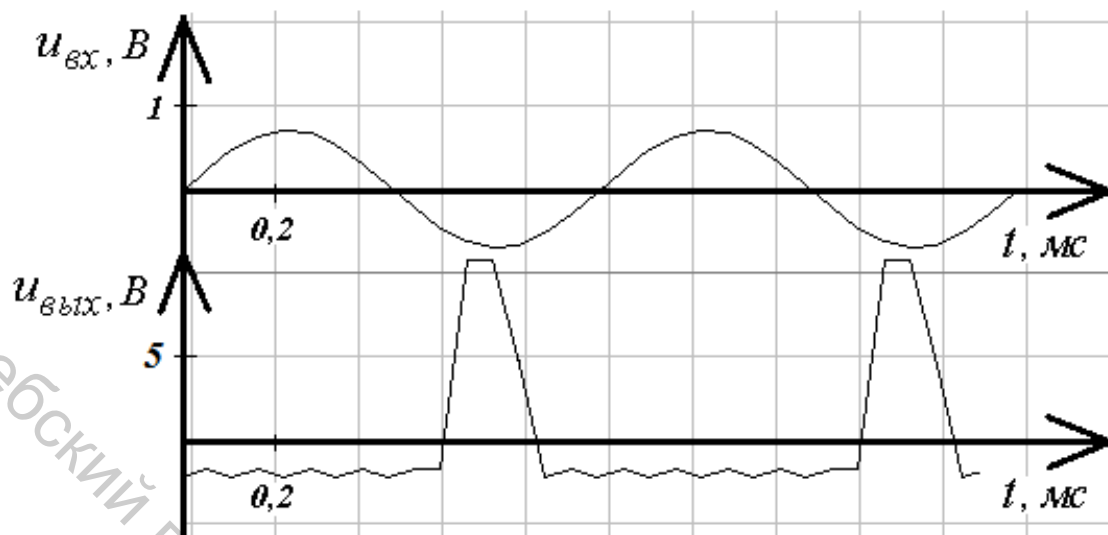


Рисунок 5.8 – Осциллограммы напряжений при наличии нелинейных искажений сигнала

Контрольные вопросы

1. Пояснить назначение элементов схемы УНЧ.
2. Пояснить принцип работы УНЧ.
3. С какой целью в схему усилителя включена цепь R_2C_2 ?
4. Что такое АХ и АЧХ усилителя?
5. Что такое полоса пропускания усилителя?
6. В чем отличие схем усилителя на биполярном транзисторе с ОБ, ОК и ОЭ?

Практическое занятие 6

Исследование типовых схем на операционных усилителях

Цель работы: изучение принципа работы схем на операционных усилителях, ознакомление с порядком расчета их основных параметров.

Теоретические сведения

Операционные усилители (ОУ) – это усилители с большими коэффициентами усиления дифференциального сигнала и подавления синфазного. Они основаны на базе дифференциальных усилителей (ДУ). Называются операционными, так как первоначально использовались для операций над аналоговыми сигналами (сложение, вычитание, интегрирование и др.). Сейчас применяются

также в усилительной технике, в качестве генераторов синусоидальных и импульсных сигналов, стабилизаторов напряжения, активных фильтров и т.д.

Достоинства ОУ – большие коэффициенты усиления, широкая полоса пропускания, широкий динамический диапазон, большое входное и малое выходное сопротивление, низкий уровень линейных и нелинейных искажений, стабильность параметров при изменении условий окружающей среды.

ОУ имеют два входа (инвертирующий и неинвертирующий) и один общий выход. Условное обозначение ОУ представлено на рисунке 6.1.

При подаче сигнала на инвертирующий (отрицательный) вход получают на выходе инвертированный (противоположный по фазе) сигнал. Этот вход используется для введения в ОУ отрицательной обратной связи (ООС).

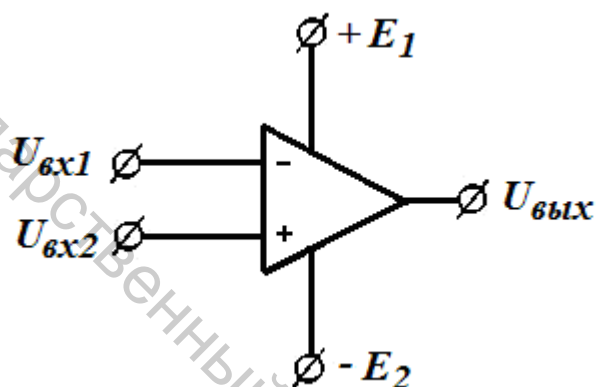


Рисунок 6.1 – Условное обозначение ОУ

При проектировании схем на ОУ предполагают их основные параметры: $R_{вх} \rightarrow \infty$, $R_{вых} \rightarrow 0$, $K_{иос} \rightarrow \infty$.

Изменяя характеристики ООС, получают следующие типовые схемы с ОУ:

Инвертирующий усилитель. Предназначен для усиления сигнала $U_{вх}$, поступающего на инвертирующий вход ОУ (рис. 6.2). Выходной сигнал имеет фазу, противоположную фазе входного.

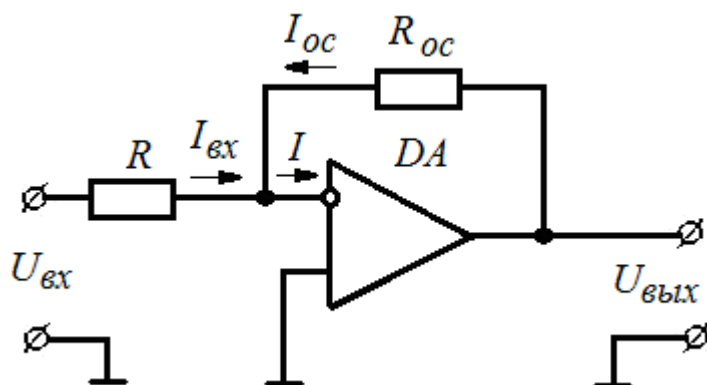


Рисунок 6.2 – Инвертирующий усилитель

Коэффициент усиления такой схемы:

$$K_U = -\frac{R_{oc}}{R}. \quad (6.1)$$

Знак «-» означает, что $U_{вых}$ сдвинуто по фазе относительно $U_{вх}$ на 180° . При $R_{oc} = R$ схема является инвертором сигнала.

Неинвертирующий усилитель. Предназначен для усиления сигнала $U_{вх}$, поступающего на неинвертирующий вход (рис. 6.3).

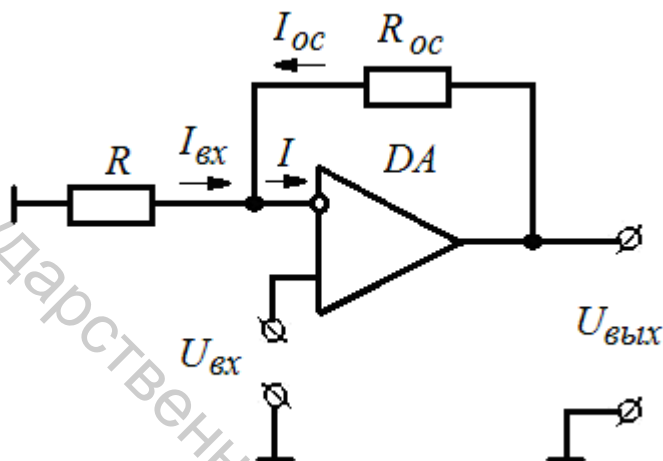


Рисунок 6.3 – Неинвертирующий усилитель

Согласно второму закону Кирхгофа, составив уравнения для схемы замещения такого ОУ и решив систему уравнений одним из методов расчета сложных цепей, получают:

$$K_U = 1 + \frac{R_{oc}}{R}. \quad (6.2)$$

При $R_{oc} = 0$ или $R \rightarrow \infty$ получают повторитель напряжения.

Интегратор. Предназначен для получения на выходе ОУ сигнала, пропорционального по времени интегралу входного сигнала (рис. 6.4)

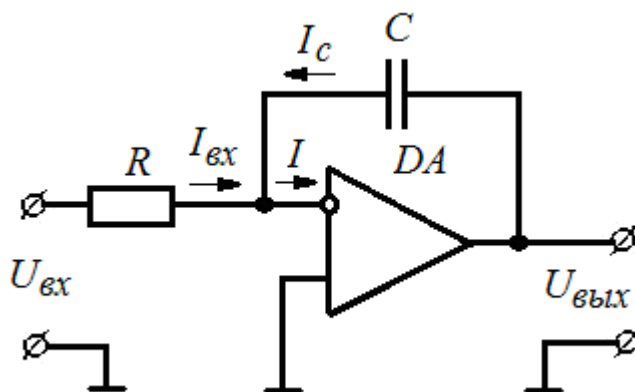


Рисунок 6.4 – Интегратор

Так как это схема инвертирующего усилителя с заменой R_{oc} на C , то:

$$U_{вых} = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_{вх} dt. \quad (6.3)$$

Дифференциатор. Предназначен для получения на выходе ОУ сигнала, пропорционального по времени дифференциалу входного сигнала (рис. 6.5)

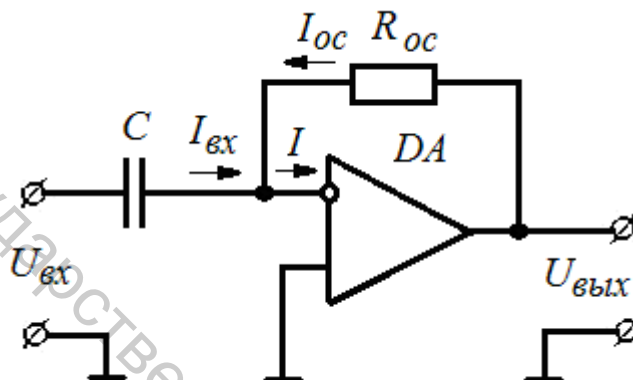


Рисунок 6.5 – Дифференциатор


Так как это схема инвертирующего усилителя с заменой R на C , то:

$$U_{вых} = -R_{oc} C \frac{du_{вх}}{dt}. \quad (6.4)$$

Порядок выполнения работы в программе Electronics Workbench

1. Произвести моделирование схемы инвертирующего усилителя (рис. 6.2), задав следующие параметры:

– входное напряжение – синусоидальной формы (элемент AC Voltage

Source  панели Sources), $U_{вх} = N_2 \text{ компьютера} \times 0,01 \text{ (В)}$;

– частота сигнала $f = N_2 \text{ компьютера (кГц)}$;

– сопротивление нагрузки на выходе схемы $R_n = N_2 \text{ компьютера (кОм)}$.


– сопротивление резистора $R = 0,5 \text{ кОм}$.

– сопротивление резистора $R_{oc} = N_2 \text{ компьютера (кОм)}$.

Зарисовать осциллограммы входного $u_{вх}(t)$ и выходного $u_{вых}(t)$ сигналов с указанием масштабов.

Рассчитать коэффициент усиления схемы K_U по формуле (6.1).


2. Произвести моделирование схемы неинвертирующего усилителя (рис. 6.3), задав следующие параметры:

- входное напряжение – синусоидальной формы (элемент AC Voltage Source  панели Sources), $U_{вх} = \text{№ компьютера} \times 0,01 \text{ (В)}$;
- частота сигнала $f = \text{№ компьютера (кГц)}$;
- сопротивление нагрузки на выходе схемы $R_n = \text{№ компьютера (кОм)}$;
- сопротивление резистора $R = 1 \text{ кОм}$;
- сопротивление резистора $R_{oc} = \text{№ компьютера (кОм)}$.

Зарисовать осциллограммы входного $u_{вх}(t)$ и выходного $u_{вых}(t)$ сигналов с указанием масштабов.


Рассчитать коэффициент усиления схемы K_U по формуле (6.2).

3. Произвести моделирование схемы интегратора (рис. 6.4), задав следующие параметры:

- входное напряжение – прямоугольной формы (элемент Function generator  панели Instruments), $U_{вх} = 1 \text{ (В)}$;
- частота сигнала $f = 1 \text{ (кГц)}$;
- сопротивление нагрузки на выходе схемы $R_n = \text{№ компьютера (кОм)}$;
- сопротивление резистора $R = 1100 \text{ Ом}$;
- емкость конденсатора $C = 0,011 \text{ мкФ}$.

Зарисовать осциллограммы входного $u_{вх}(t)$ и выходного $u_{вых}(t)$ сигналов с указанием масштабов.

4. Произвести моделирование схемы дифференциатора (рис. 6.5), задав следующие параметры:

- входное напряжение – пилообразной формы (элемент Function generator  панели Instruments), $U_{вх} = 1 \text{ (В)}$;
- частота сигнала $f = 1 \text{ (кГц)}$;
- сопротивление нагрузки на выходе схемы $R_n = \text{№ компьютера (кОм)}$;
- сопротивление резистора $R_{oc} = 500 \text{ Ом}$;
- емкость конденсатора $C = 10 \text{ мкФ}$.

Зарисовать осциллограммы входного $u_{вх}(t)$ и выходного $u_{вых}(t)$ сигналов с указанием масштабов.

Контрольные вопросы

1. Каковы назначение, область применения и достоинства ОУ?
2. Пояснить условное обозначение и основные параметры ОУ.
3. Пояснить назначение, параметры и диаграммы напряжений инвертирующего усилителя на ОУ.
4. Пояснить назначение, параметры и диаграммы напряжений неинвертирующего усилителя на ОУ.
5. Пояснить назначение, параметры и диаграммы напряжений интегратора на ОУ.

6. Пояснить назначение, параметры и диаграммы напряжений дифференциатора на ОУ.

Практическое занятие 7

Исследование мультивибратора на биполярных транзисторах

Цель работы: исследование работы мультивибратора на биполярных транзисторах (БТ) с коллекторно-базовыми связями; определение зависимости параметров мультивибратора от параметров компонентов схемы.

Теоретическая часть

Мультивибратор – автоколебательное устройство, генерирующее последовательность прямоугольных импульсов, амплитуда U_m , частота f и коэффициент заполнения Q которых задаются параметрами входящих в схему элементов. Мультивибраторы широко применяются в автоматических устройствах, вычислительной технике в качестве задающих генераторов тактовых импульсов.

Рассмотрим устройство и принцип действия мультивибратора по типовой схеме (рис. 7.1).

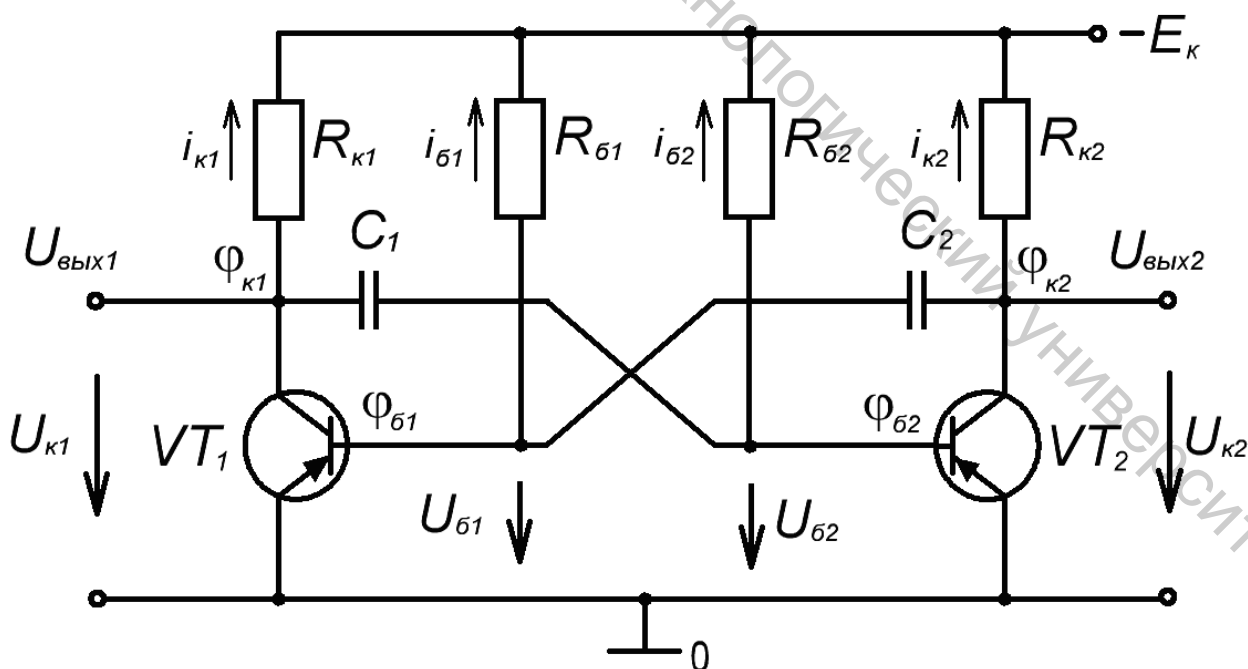


Рисунок 7.1 – Мультивибратор на биполярных транзисторах

Схема симметрична по структуре, параметры симметричных элементов одинаковы: $R_{\kappa 1} = R_{\kappa 2}$, $R_{\delta 1} = R_{\delta 2}$, $C_1 = C_2$, транзисторы VT_1 и VT_2 одного типа. База одного транзистора соединена с коллектором другого через конденсаторы C_1 и C_2 , чем обеспечивается положительная обратная связь (ПОС). Резисторы $R_{\delta 1}$ и $R_{\delta 2}$ осуществляют подачу напряжения смещения на базы соответственно транзисторов VT_1 и VT_2 и входят в состав времязадающих RC -цепей.

Так как схема симметрична, то при подаче напряжения питания от источника E_k токи коллекторов $i_{\kappa 1}$ и $i_{\kappa 2}$ должны быть одинаковыми. Но так как в реальных цепях невозможно обеспечить абсолютную симметрию схемы, то рассмотрение работы мультивибратора начнем с момента времени, когда при включении цепи ток коллектора $i_{\kappa 1}$ транзистора VT_1 скачком возрос в сравнении с $i_{\kappa 2}$. При этом увеличится падение напряжения на резисторе $R_{\kappa 1}$, а потенциал коллектора $\varphi_{\kappa 1}$ станет менее отрицательным. Напряжение на коллекторе $U_{\kappa 1}$ получит положительное приращение (рис. 7.2), которое полностью приложится к напряжению на базе $U_{\delta 2}$ транзистора VT_2 , так как напряжение на конденсаторе U_{c1} скачком измениться не может. Потенциал базы $\varphi_{\delta 2}$ транзистора VT_2 станет менее отрицательным, транзистор VT_2 приоткроется, и ток его коллектора $i_{\kappa 2}$ уменьшится. Вследствие этого произойдет уменьшение падения напряжения на резисторе $R_{\kappa 2}$ и потенциал коллектора $\varphi_{\kappa 2}$ станет более отрицательным.

Отрицательный скачок напряжения $U_{\kappa 2}$ передастся на базу транзистора VT_1 и, суммируясь с отрицательным потенциалом $\varphi_{\delta 1}$, еще более откроет транзистор VT_1 . Ток коллектора $i_{\kappa 1}$ снова возрастет. Это вызовет новый положительный скачок напряжения $U_{\kappa 1}$, который будет выше предыдущего за счет усилительных свойств транзистора, и, таким образом, лавинообразный процесс изменения токов и напряжений коллектора за счет ПОС будет повторяться. Он закончится, когда транзистор VT_1 полностью откроется и будет находиться в насыщенном состоянии, а транзистор VT_2 полностью закроется и будет находиться в режиме отсечки. С этого момента действие ПОС прекращается и лавинообразный процесс заканчивается.

По окончании лавинообразного процесса напряжение на базе транзистора VT_1 будет близким к нулю (рис. 7.2), т. к. падением напряжения на сопротивлении перехода «база – эмиттер» можно пренебречь; напряжение на коллекторе $U_{\kappa 1}$ также будет примерно равно нулю. Напряжение $U_{\delta 2}$ на базе транзистора VT_2 окажется больше нуля, напряжение на коллекторе $U_{\kappa 2}$ будет примерно равно $-E_k$, т. к. ток $i_{\kappa 2}$ почти равен нулю. Состояние схемы по окончании лавинообразного процесса называется квазиустойчивым равновесием, т. к. в этом состоянии мультивибратор не может находиться длительное время.

Открытое состояние транзистора VT_1 поддерживается отрицательным смещением на базе, подаваемым от источника питания $-E_k$ через резистор $R_{\delta 1}$; транзистор VT_2 закрыт положительным потенциалом на конденсаторе C_1 .

Конденсатор C_1 при этом начинает перезаряжаться по цепи: θ , открытый транзистор VT_1 , конденсатор C_1 , резистор $R_{\delta 2}$, $-E_k$. Ток перезарядки и

напряжение на конденсаторе изменяются по экспоненциальному закону (рис. 7.2) с постоянной времени

$$\tau_{n1} = R_{\delta 2} C_1.$$

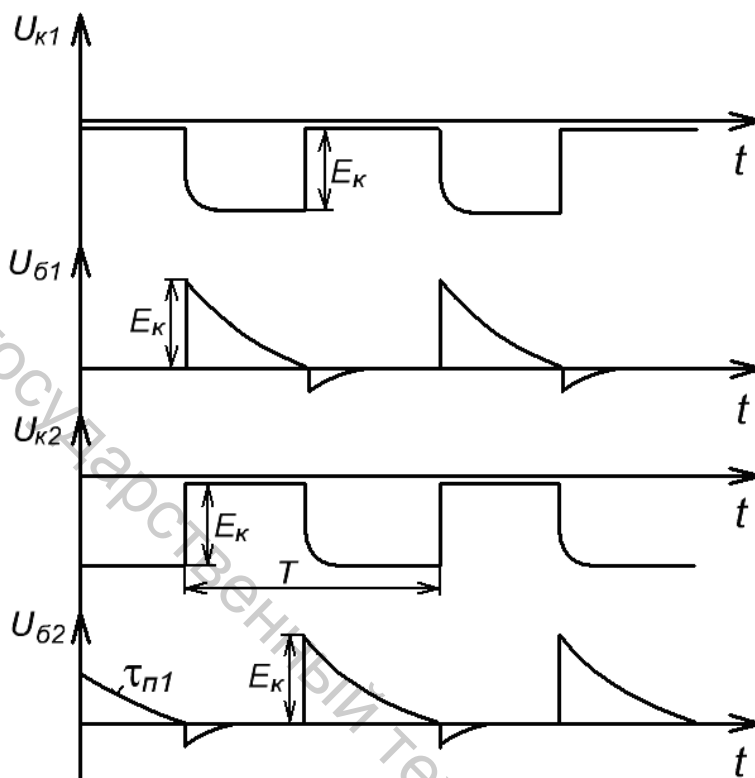


Рисунок 7.2 – Временные диаграммы напряжений мультивибратора

В момент времени, когда напряжение $U_{c1} = U_{\delta 2}$ на конденсаторе C_1 упадет до нуля, транзистор VT_2 откроется, появится ток i_{k2} и в схеме произойдет аналогичный предыдущему лавинообразный процесс, в результате которого транзистор VT_1 полностью закроется, а VT_2 полностью откроется.

Процесс перезарядки конденсаторов происходит медленно по сравнению с лавинообразным процессом. В это время формируются вершины прямоугольных импульсов.

Порядок выполнения работы на унифицированном стенде УИЛС-1

Мультивибратор построен на биполярных транзисторах МП42Б $p-n-p$ типа $VT1$ и $VT2$ (рис. 7.3). ПОС в схеме реализуется с помощью коллекторно-базовых связей через конденсаторы $C1$, $C2$ и $C4$. Длительности двух квазистойчивых состояний мультивибратора определяются времязадающими цепочками $R3$, $C1$ и $R5$, $C4$. Перемычки 2 и 3 позволяют получить по 4 значения

постоянной времени и длительности одного из квазиустойчивых состояний (когда транзистор $VT1$ насыщен, а $VT2$ заперт).

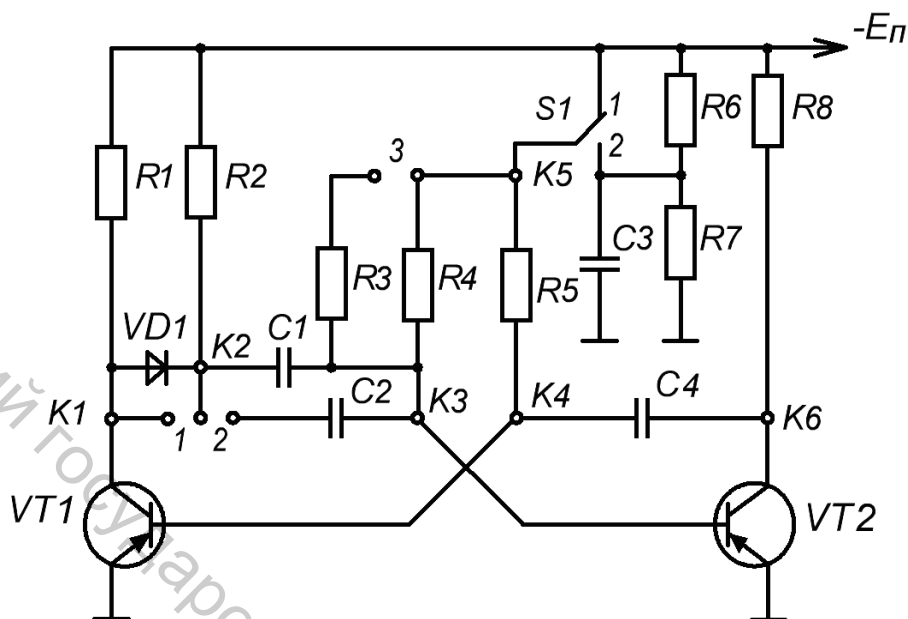


Рисунок 7.3 – Схема модуля «МУЛЬТИВИБРАТОРЫ»

Переключатель $S1$ обеспечивает коммутацию отпирающего смещения, подаваемого через резисторы $R3 \parallel R4$ и $R5$ на базы транзисторов $VT2$ и $VT1$. Перемычка 1 закорачивает отсекающий диод $VD1$ цепи формирования фронта выходного импульса. Выходные импульсы мультивибратора снимаются с коллекторов соответствующих транзисторов (гнезда $K1$ и $K6$), базовые – с гнезд $K3$ и $K4$.

Для исследования мультивибратора выполнить следующее.

1. Установить на наборном поле стенда модуль «МУЛЬТИВИБРАТОРЫ».

2. Подать напряжение питания $12В$ с блока постоянных напряжений в соответствии с обозначением полярности на модуле.

3. Подготовить к работе осциллограф, используя внешнюю синхронизацию осциллографа подачей сигнала с гнезда $K1$ модуля.

4. Подключая вход осциллографа поочередно к гнездам $K1$, $K6$, $K4$, $K3$, зарисовать осциллограммы напряжений. Устанавливая при помощи перемычек 2 , 3 , переключателя $S1$ различные варианты времязадающей цепи, зарисовать осциллограммы напряжений для точки $K1$ модуля.

5. Исследовать влияние диода $VD1$ на форму выходного импульса, зарисовав осциллограмму напряжения для точки $K1$ модуля при замкнутом коротко диоде $VD1$.

6. По временным диаграммам выходных импульсов (гнезда $K1$ и $K6$) определить, обозначив в соответствии с рисунком 7.4, длительности полупери-

одов: T_1 – нахождения транзистора в режиме насыщения, T_2 – в режиме отсечки.

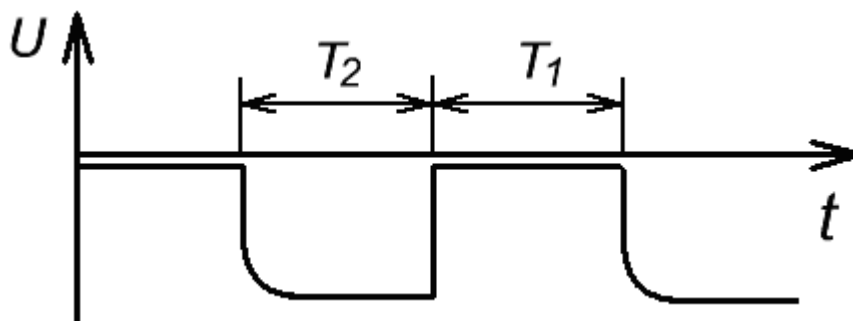


Рисунок 7.4 – Длительности полупериодов

Рассчитать коэффициент заполнения:

$$Q = \frac{T_1}{T_1 + T_2} \quad (7.1)$$

и частоту:

$$f = \frac{1}{T_1 + T_2} \quad (7.2)$$

Полученные значения T_1 , T_2 , Q и f записать в отчет в соответствии с порядком чередования осциллограмм.

Порядок выполнения работы в программе Electronics Workbench

1. Произвести моделирование схемы мультивибратора на биполярных транзисторах (рис. 7.5).

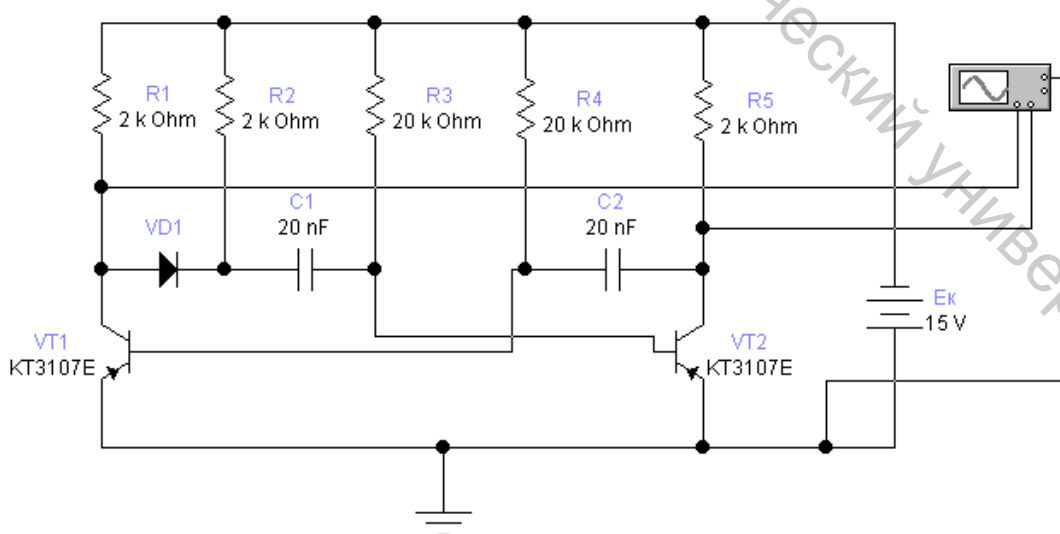


Рисунок 7.5 – Схема моделирования мультивибратора на биполярных транзисторах

2. Подключив входы осциллографа к коллекторам обоих транзисторов, зарисовать в масштабе осциллограммы напряжений на коллекторах $u_{к1}$ и $u_{к2}$ в соответствии с рисунком 7.6.

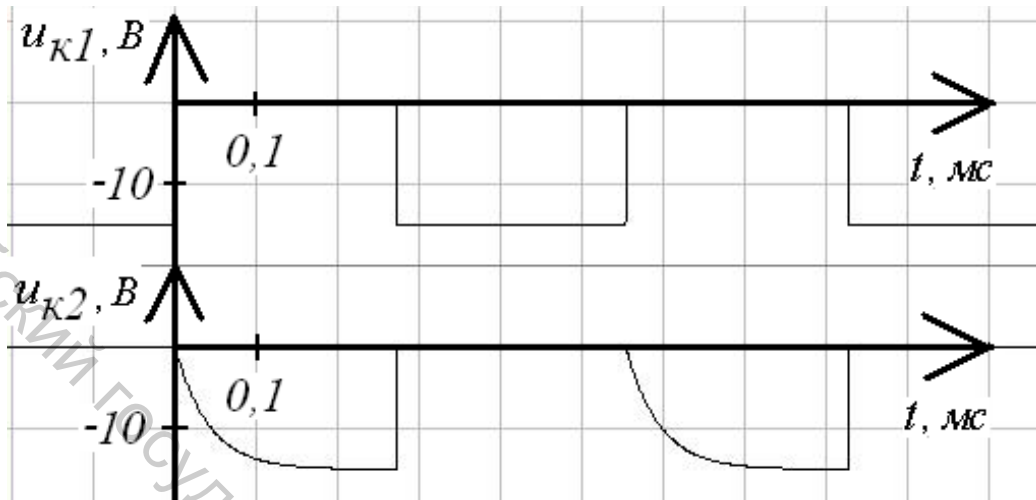


Рисунок 7.6 – Осциллограммы напряжений на коллекторах транзисторов

3. Подключив входы осциллографа к базам обоих транзисторов, зарисовать в масштабе осциллограммы напряжений на базах $u_{б1}$ и $u_{б2}$ в соответствии с рисунком 7.7.

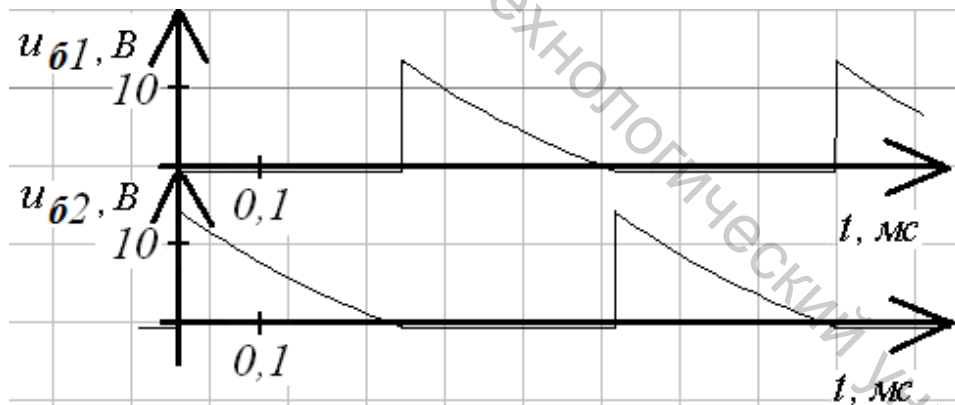


Рисунок 7.7 – Осциллограммы напряжений на базах транзисторов

4. Подключив один из входов осциллографа к коллектору транзистора $VT1$, зарисовать в масштабе:

- осциллограмму напряжения $u_{к1}$ ($R_{б2}/2$), уменьшив в два раза сопротивление резистора $R3$;
- осциллограмму напряжения $u_{к1}$ ($2C1$), увеличив в два раза емкость конденсатора $C1$.
- осциллограмму напряжения $u_{к1}$ (без $VD1$), замкнув накоротко диод $VD1$.

5. По временным диаграммам импульсов на коллекторах транзисторов определить, обозначив в соответствии с рисунком 7.4, длительности полупериодов: T_1 – нахождения транзистора в режиме насыщения, T_2 – в режиме отсечки.

Рассчитать коэффициент заполнения и частоту по формулам (7.1) и (7.2).

Полученные значения T_1 , T_2 , Q и f записать в отчет в соответствии с порядком чередования осциллограмм.

Контрольные вопросы

1. Объяснить принцип действия мультивибратора и назначение всех элементов схемы.

2. Пояснить методику расчёта длительности, коэффициента заполнения и частоты генерации импульсов мультивибратора.

3. Объяснить принцип коррекции формы импульсов мультивибратора с помощью отсекающих диодов.

4. Какие существуют способы регулировки частоты генерации импульсов мультивибратора?

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

Методические указания к практическим занятиям

Составители:

Ильющенко Александр Васильевич
Куксевич Виталий Федорович

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

Подписано к печати 17.06.2019. Формат 60x90¹/₁₆. Усл. печ. листов 3,4.
Уч.-изд. листов 4,2. Тираж 30 экз. Заказ № 194.

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.