

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

ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

Лабораторный практикум для студентов специальности
1-40 05 01-01 «Информационные системы и технологии
(в проектировании и производстве)»

Витебск
2023

Составители:

В. Ф. Куксевич, С. А. Клименкова, Д. В. Черненко

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом УО «ВГТУ», протокол № 8 от 28.04.2023.

Электронные приборы : лабораторный практикум / сост. В. Ф. Куксевич, С. А. Клименкова, Д. В. Черненко – Витебск : УО «ВГТУ», 2023. – 123 с.

Лабораторный практикум является руководством к лабораторным работам по дисциплине «Электронные приборы» для студентов специальности 1-40 05 01-01 «Информационные системы и технологии (в проектировании и производстве)», содержит общие требования, предъявляемые к выполнению лабораторных работ, освещает теоретические вопросы подготовки к ним, приводит примеры получения характеристик электронных приборов с помощью программы Electronics Workbench.

Издание в электронном виде расположено в репозитории библиотеки УО «ВГТУ».

УДК 621.38

© УО «ВГТУ», 2023

Содержание

Общие требования к выполнению лабораторных работ	4
Лабораторная работа 1	
<i>Исследование параметров импульсного сигнала прямоугольной формы</i>	5
Лабораторная работа 2	
<i>Исследование параметров периодических электрических сигналов</i>	9
Лабораторная работа 3	
<i>Исследование полупроводниковых диодов</i>	15
Лабораторная работа 4	
<i>Исследование однофазных схем выпрямления</i>	23
Лабораторная работа 5	
<i>Исследование трехфазных схем выпрямления</i>	32
Лабораторная работа 6	
<i>Исследование сглаживающих фильтров</i>	39
Лабораторная работа 7	
<i>Исследование однофазных схем выпрямления с умножением напряжения</i>	51
Лабораторная работа 8	
<i>Исследование биполярных транзисторов</i>	55
Лабораторная работа 9	
<i>Исследование однокаскадного усилителя низкой частоты</i>	61
Лабораторная работа 10	
<i>Исследование мультивибратора</i>	68
Лабораторная работа 11	
<i>Исследование генератора пилообразного напряжения</i>	75
Лабораторная работа 12	
<i>Исследование типовых схем на операционных усилителях</i>	81
Лабораторная работа 13	
<i>Исследование схем стабилизации напряжения</i>	92
Лабораторная работа 14	
<i>Исследование комбинационных логических схем</i>	99
Лабораторная работа 15	
<i>Исследование триггеров</i>	107
Литература	122

Общие требования к выполнению лабораторных работ

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

Перед проведением каждой 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.

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

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

Формулы приводятся сначала в общем виде, затем с подставленными числовыми значениями.

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.

Лабораторная работа 1

Исследование параметров импульсного сигнала прямоугольной формы

Цель работы: экспериментальное изучение и графический расчет основных параметров электрического импульсного сигнала прямоугольной формы.

Теоретические сведения

Электрическим импульсом называют электрический сигнал, имеющий параметры (напряжение, сила тока), отличающиеся от постоянного уровня в течение короткого промежутка времени. Понятие «короткий промежуток времени» является условным: часто под этим понимают время, соизмеримое с длительностью переходных процессов в рассматриваемом устройстве.

Так как импульсные сигналы могут иметь различную форму, то и называют их в соответствии с похожей по форме геометрической фигурой: прямоугольные, треугольные, трапециевидные и т. д. Чаще остальных в электронных приборах применяют именно прямоугольные импульсы.

К основным параметрам прямоугольных импульсов можно отнести следующие:

- амплитуда импульса U_m – величина максимального отклонения импульсного сигнала от начального уровня U_0 ;

- длительность импульса t_u – интервал времени от момента появления импульсного сигнала до его завершения. Если начало и конец импульса трудно выделить, то расчет t_u ведут по уровню $0,1U_m$ (рис. 1.1), используя в этом случае название – длительность импульса по основанию $0,1$ амплитуды.

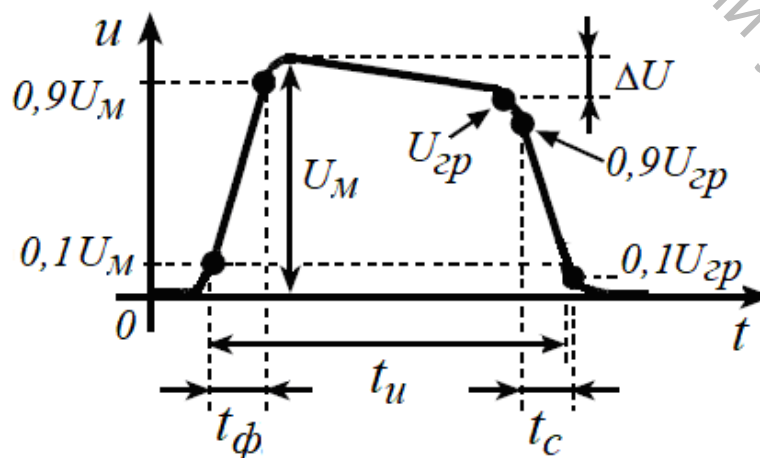


Рисунок 1.1 – График прямоугольного импульса

К дополнительным параметрам прямоугольных импульсов можно отнести:

– длительность фронта (передний фронт) t_ϕ – время от момента начала сигнала до момента достижения им максимального значения. Если временные моменты плохо различимы, то t_ϕ фиксируется от уровня $0,1U_m$ до уровня $0,9U_m$;

– длительность спада (среза) (задний фронт) t_c – временной интервал от максимального значения импульса до момента его завершения. Если спад плоской вершины отсутствует ($\Delta U = 0$), то t_c находится также как t_ϕ . Если спад плоской вершины наблюдается (т. е. $\Delta U \neq 0$), то отмечается граничная точка U_{zp} , где кончается плоская вершина и начинается спад. Данная точка не является «жесткой», так как ее положение определяется каждым наблюдателем индивидуально. В этом случае время среза определяется как убывание сигнала от $0,9U_{zp}$ до $0,1U_{zp}$;

– коэффициент спада плоской вершины импульса:

$$K_{cn} = \frac{\Delta U}{U_m} = \frac{U_m - U_{zp}}{U_m} = 1 - \frac{U_{zp}}{U_m}. \quad (1.1)$$

Если $\Delta U = 0$, то есть в отсутствие спада плоской вершины, $K_{cn} = 0$.

Порядок выполнения работы в программе Electronics Workbench

Для исследования параметров электрического сигнала прямоугольной формы собрать схему (рис. 1.2), установив следующие параметры:

– входное напряжение – *прямоугольной формы* (элемент Function generator  библиотеки компонентов Instruments);

– амплитуда сигнала $U_m = \text{№ компьютера} (В)$;

– частота сигнала $f = 500 \text{ кГц}$;

– сопротивление резистора $R = 330 \text{ Ом}$;

– индуктивность катушки $L = 1 \text{ мГн}$;

– емкость конденсатора $C = 750 \text{ нФ}$.

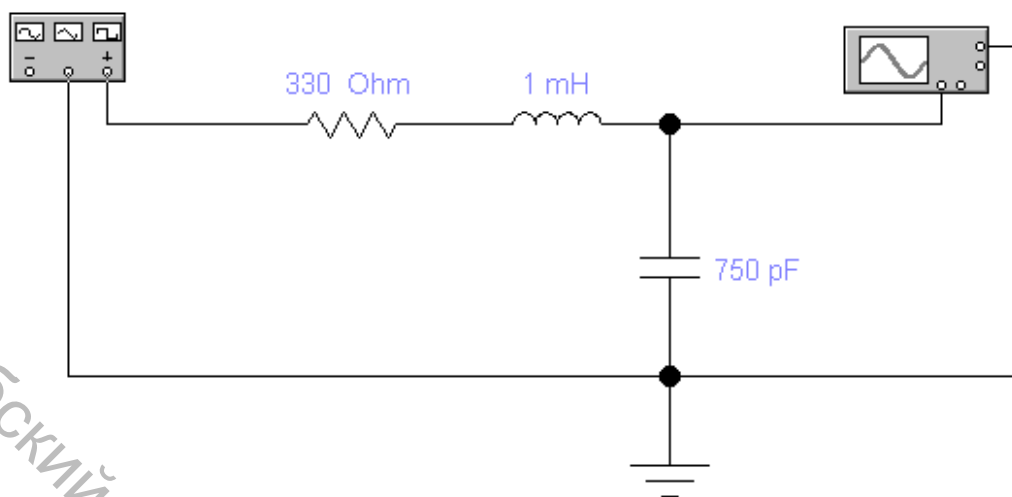


Рисунок 1.2 – Схема для исследования параметров электрического сигнала прямоугольной формы

Включив схему, получить осциллограмму напряжения на конденсаторе для момента начала формирования сигнала (рис. 1.3).

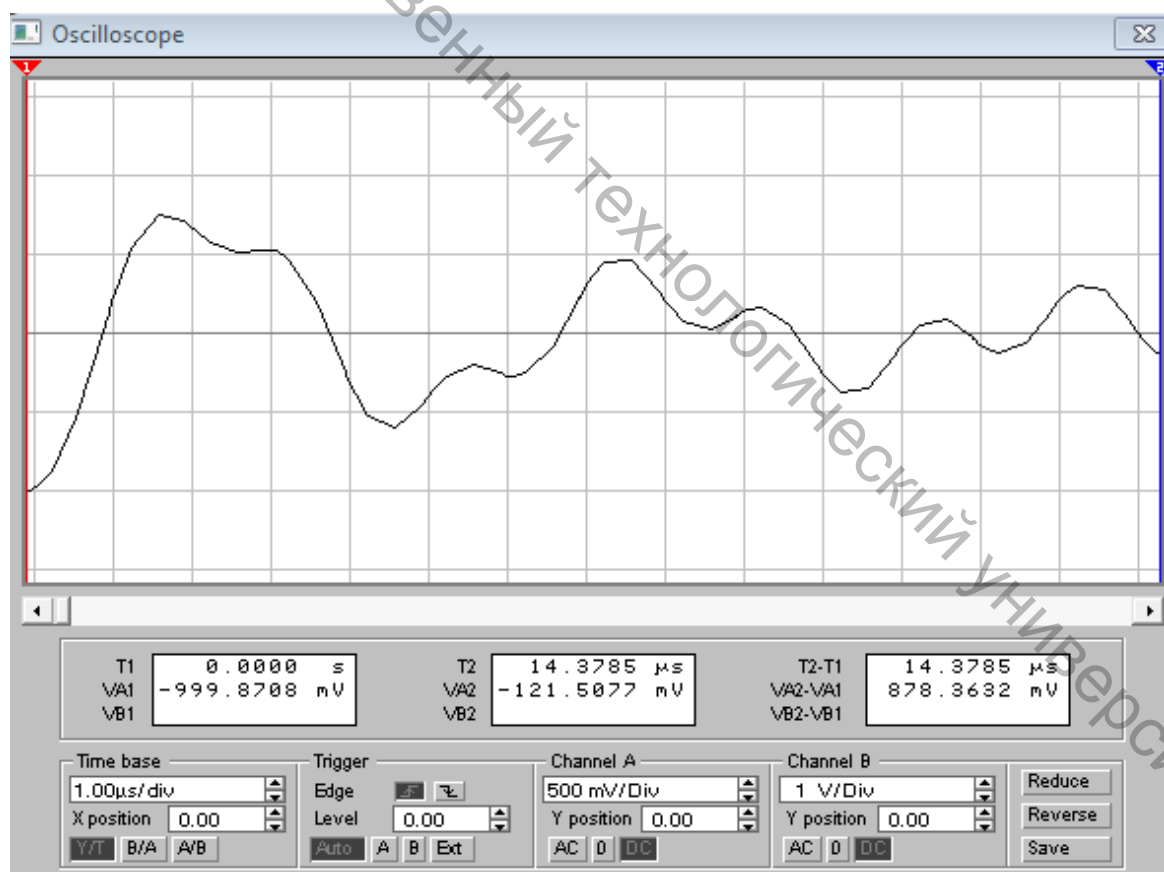


Рисунок 1.3 – Осциллограмма напряжения на конденсаторе

Зарисовать график электрического импульса прямоугольной формы, используя систему координат на рисунке 1.4. Масштаб на осях указать в

соответствии со значениями параметров в индикаторных окнах Time base и Channel A лицевой панели осциллографа.

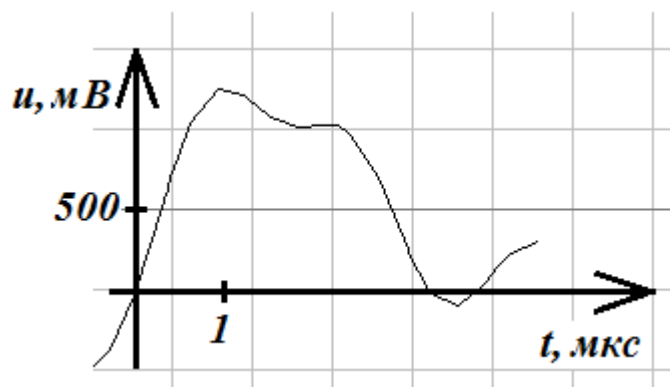


Рисунок 1.4 – График электрического импульса прямоугольной формы

Указать на изображенном графике параметры электрического импульса в соответствии с рисунком 1.1.

Определить по графику и занести в таблицу 1.1 значения t_{ϕ} , t_c , t_u , U_m , U_{zp} , ΔU . Значение K_{cn} рассчитать по (1.1).

Таблица 1.1 – Результаты эксперимента

$t_{\phi}, \text{мкс}$	$t_c, \text{мкс}$	$t_u, \text{мкс}$	$U_m, \text{В}$	$U_{zp}, \text{В}$	$\Delta U, \text{В}$	K_{cn}

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Экспериментально полученный график $u(t)$ электрического импульса прямоугольной формы с указанием на нем параметров в соответствии с рисунком 1.1 и расчетом значения K_{cn} .
3. Таблица 1.1 с результатами эксперимента.

Контрольные вопросы

1. Что такое электрический импульс?
2. Какие параметры прямоугольных импульсов относятся к основным?
3. Какие параметры прямоугольных импульсов относятся к дополнительным?

Лабораторная работа 2

Исследование параметров периодических электрических сигналов

Цель работы: экспериментальное изучение и графический расчет основных параметров периодических электрических сигналов.

Теоретические сведения

Периодическим называется сигнал, значения которого повторяются через определенные равные промежутки времени, называемые периодом повторения сигнала, или просто периодом.

Одним из простейших электрических периодических сигналов является сигнал электрического тока, изменяющегося по синусоидальному закону:

$$i = I_m \sin \omega t. \quad (2.1)$$

График тока, изменяющегося по синусоидальному закону представлен на рисунке 2.1

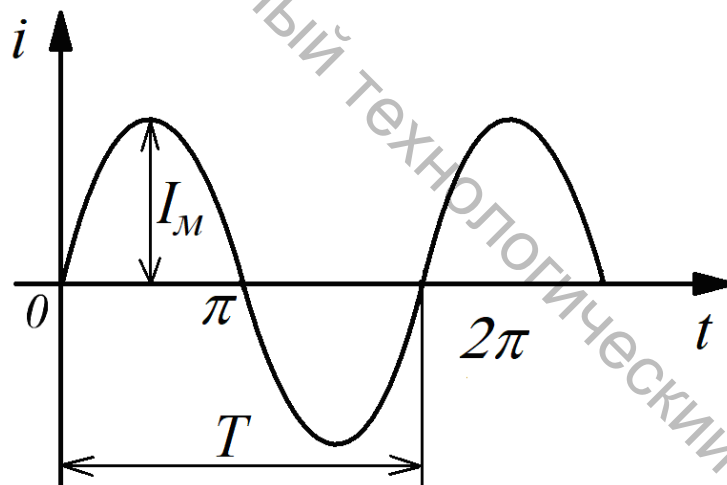


Рисунок 2.1 – График тока, изменяющегося по синусоидальному закону

Полный круг изменения переменного тока, в котором его мгновенные значения принимают все возможные, как положительные, так и отрицательные значения, называется циклом. Тогда период T – это длительность одного цикла, а частота f – число периодов за 1 секунду:

$$f = \frac{1}{T}. \quad (2.2)$$

Частота переменного тока промышленных сетей Европы – 50 Гц , США – 60 Гц .

Если начало отсчета времени принять раньше или позже момента, когда мгновенное значение синусоидальной величины равно нулю, то возникает понятие начальной фазы ψ синусоиды.

Графику синусоидального тока, изображенному на рисунке 2.2, соответствует уравнение:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i), \quad (2.3)$$

где $(\omega t + \psi_i)$ – фазовый угол (фаза синусоиды); ψ_i – начальная фаза синусоиды.

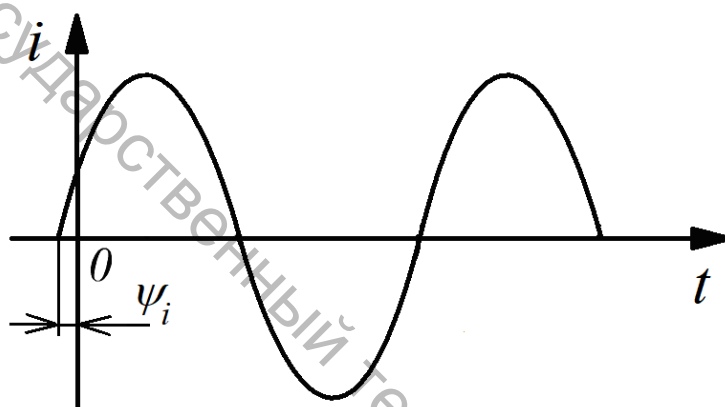


Рисунок 2.2 – График синусоидального тока

Величина ω , характеризующая скорость изменения фазового угла, называется угловой частотой:

$$\omega = 2\pi f. \quad (2.4)$$

Если рассматриваются две синусоидальные величины одной частоты, но с разными начальными фазами (ψ_1 и ψ_2), то их разность $(\psi_1 - \psi_2)$ называется углом сдвига фаз. Если это угол сдвига фаз одинаковых величин (например, i_1 и i_2), то он обозначается α ; если между разными величинами (например, i и u), то он обозначается φ .

К периодическим электрическим сигналам можно отнести и последовательность импульсов прямоугольной формы. В этом случае такой периодический сигнал характеризуется также параметрами:

– коэффициент заполнения γ , показывающий какую часть периода T составляет длительность импульса t_u :

$$\gamma = \frac{t_u}{T}, \quad (2.5)$$

– скважность, показывающая во сколько раз период T больше длительности импульса t_u :

$$Q = \frac{T}{t_u}. \quad (2.6)$$

Порядок выполнения работы в программе Electronics Workbench

1. Для исследования параметров электрического сигнала синусоидальной формы собрать схему (рис. 2.3), установив следующие параметры:

- входное напряжение – *синусоидальной формы* (элемент Function generator  библиотеки компонентов Instruments);
- амплитуда сигнала $U_m = \text{№ компьютера} (B)$;
- частота сигнала $f = \text{№ компьютера} (кГц)$;
- сопротивление резистора нагрузки $R_n = \text{№ компьютера} (кОм)$;

Параметры генератора U_m и f занести в «Экспериментальные значения» таблицы 2.1.

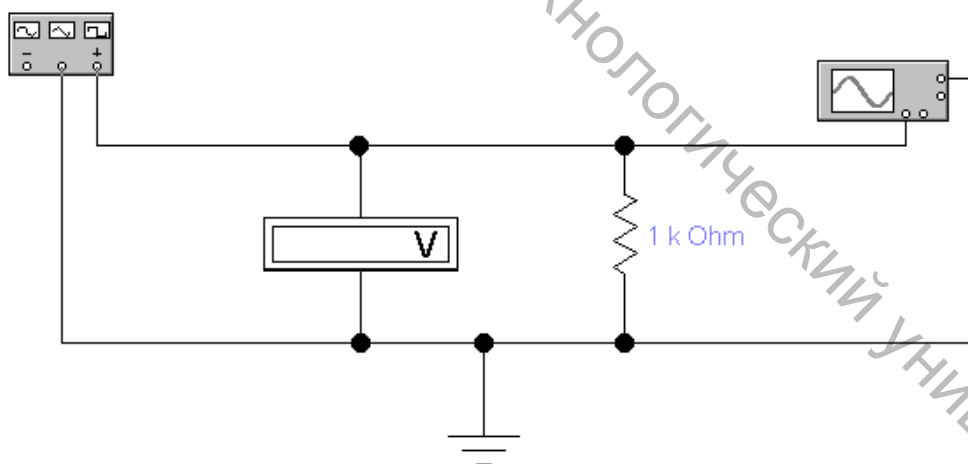


Рисунок 2.3 – Схема для исследования параметров электрического сигнала синусоидальной формы

Вольтметр схемы перевести в положение «АС» (на вкладке Value окна параметров вольтметра Voltmeter properties).

Включив схему, измерить с помощью вольтметра действующее значение U напряжения на резисторе нагрузки и занести его в «Экспериментальные значения» таблицы 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты эксперимента и расчета

	U_m, B	U, B	$f, кГц$	$T, мс$	$\psi_u, ^\circ$	$\omega, рад / с$
Экспериментальные значения				-	-	-
Расчетные значения						

Зарисовать осциллограмму напряжения на резисторе нагрузки, используя систему координат на рисунке 2.4. Масштаб на осях указать в соответствии со значениями параметров в индикаторных окнах Time base и Channel A лицевой панели осциллографа.

На зарисованной осциллограмме произвести графические построения в соответствии с рисунком 2.4.

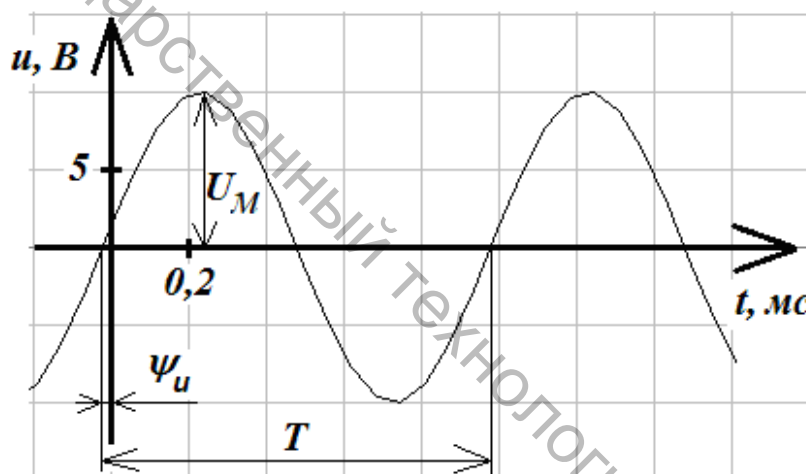


Рисунок 2.4 – Осциллограмма напряжения на резисторе нагрузки

Определить по графику и занести в «Расчетные значения» таблицы 2.1 параметры T , U_m , ψ_u .

Рассчитать по (2.2), (2.4) и занести в «Расчетные значения» таблицы 2.1 параметры f и ω . Действующее значение напряжения на резисторе нагрузки рассчитать по формуле

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad (2.7)$$

и также занести его в «Расчетные значения» таблицы 2.1.

2. Для исследования параметров последовательности электрических сигналов прямоугольной формы собрать схему (рис. 2.5), установив следующие параметры:

- входное напряжение – *прямоугольной формы* (элемент Function generator  библиотеки компонентов Instruments);
- амплитуда сигнала $U_m = \text{№ компьютера} (B)$;
- частота сигнала $f = 500 \text{ кГц}$;
- сопротивление резистора $R = 100 \text{ Ом}$;
- емкость конденсатора $C = 750 \text{ нФ}$.

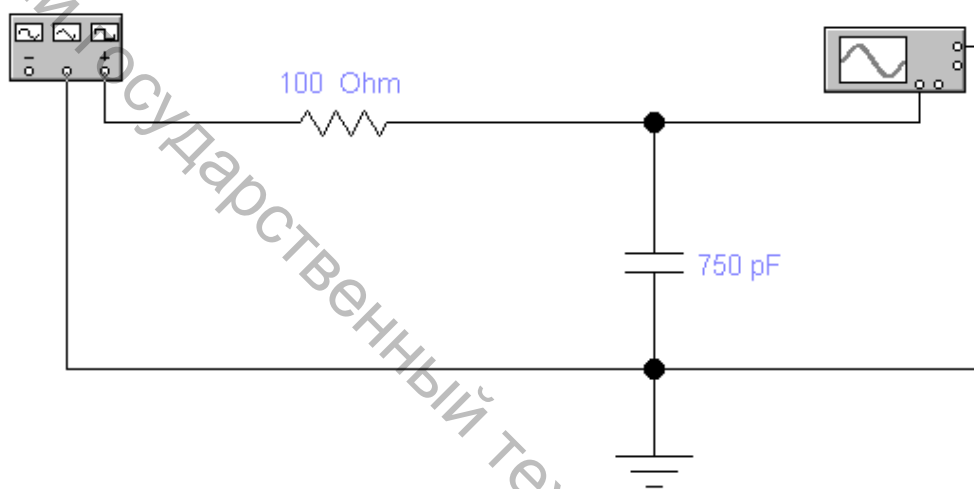


Рисунок 2.5 – Схема для исследования параметров последовательности электрических сигналов прямоугольной формы

Зарисовать осциллограмму последовательности электрических сигналов прямоугольной формы, используя систему координат на рисунке 2.6. Масштаб на осях указать в соответствии со значениями параметров в индикаторных окнах Time base и Channel A лицевой панели осциллографа.

На зарисованной осциллограмме произвести графические построения в соответствии с рисунком 2.6 (для определения периода следования электрических сигналов прямоугольной формы T) и в соответствии с рисунком 1.1 (для определения параметров U_m , $0, IU_m$, t_u импульса прямоугольной формы).

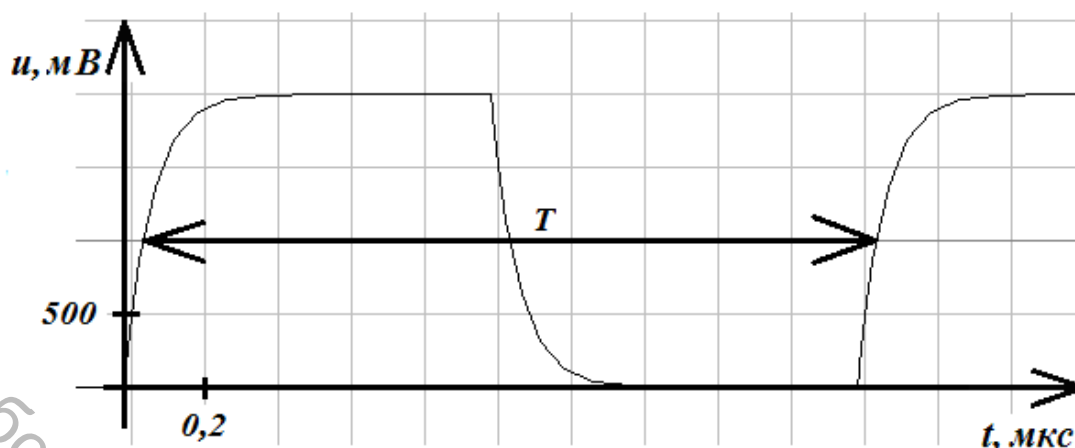


Рисунок 2.6 – Осциллограмма последовательности электрических сигналов прямоугольной формы

Определить по графику и занести в таблицу 2.2 значения T , t_u , U_m .
Рассчитать по (2.2), (2.5), (2.6) и занести в таблицу 2.2 значения f , γ и Q .

Таблица 2.2 – Результаты эксперимента

$T, \text{мкс}$	$t_u, \text{мкс}$	$U_m, \text{В}$	$f, \text{кГц}$	γ	Q

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Экспериментально полученная осциллограмма $u(t)$ напряжения на резисторе нагрузки схемы рисунка 2.3, с указанием на ней параметров в соответствии с рисунком 2.4 и расчетом значений f , ω , U .
3. Таблица 2.1 с результатами эксперимента.
4. Экспериментально полученная осциллограмма $u(t)$ последовательности электрических сигналов прямоугольной формы в схеме рисунка 2.5, с указанием на ней параметров в соответствии с рисунками 2.6 и 1.1, а также расчетом f , γ , Q .
5. Таблица 2.2 с результатами эксперимента.

Контрольные вопросы

1. Поясните основные параметры синусоидального тока.
2. Поясните основные параметры последовательности импульсов прямоугольной формы.

Лабораторная работа 3

Исследование полупроводниковых диодов

Цель работы: изучение принципа действия и основных свойств полупроводниковых диодов, исследование их параметров и вольтамперных характеристик.

Теоретические сведения

Полупроводниковым диодом называют полупроводниковый прибор с одним электрическим p - n -переходом и двумя выводами. Такие приборы применяют для выпрямления переменного тока, детектирования колебаний, преобразования СВЧ-колебаний в колебания промежуточной частоты, стабилизации напряжения в цепях постоянного тока и т. д.

По назначению полупроводниковые диоды делят на выпрямительные, импульсные, опорные (стабилитроны), туннельные, фотодиоды, светодиоды, варикапы и др.

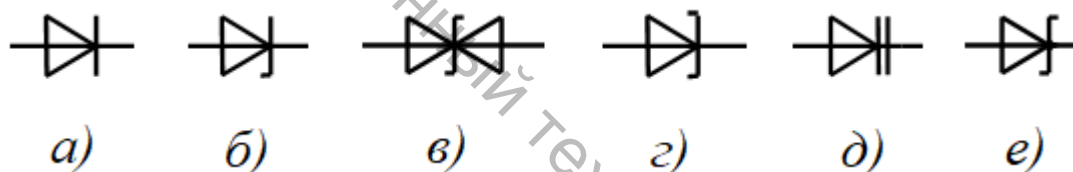


Рисунок 3.1 – Полупроводниковые диоды

На рисунке 3.1 представлены графические обозначения некоторых типов диодов: а – общее обозначение (выпрямительный и импульсный диоды); б – стабилитрон односторонний; в – стабилитрон двусторонний; г – туннельный диод; д – варикап; е – диод Шоттки.

Выпрямительные полупроводниковые диоды предназначены для пропускания тока определенного направления. Их основу составляет электронно-дырочный переход, который получают методом сплавления или диффузии двух полупроводников p - и n -типа.

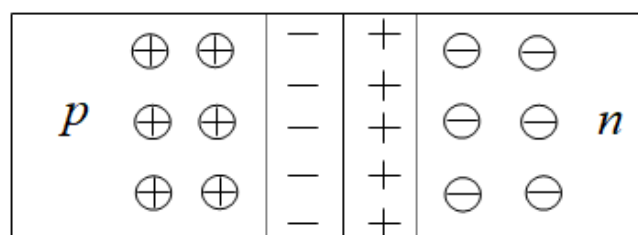


Рисунок 3.2 – Структура p - n -перехода

Рассмотрим работу p - n -перехода при отсутствии внешнего источника ЭДС (рис. 3.2). Пусть левая область прибора имеет дырочную проводимость, а правая – электронную. Так как концентрация дырок в p -слое больше, чем в n -слое, то часть дырок перейдет из p -слоя в n -слой. Одновременно будет проходить диффузионный переход электронов из n -слоя в p -слой. При уходе дырок из p -слоя в нем создается объемный отрицательный заряд, а при уходе электронов из n -слоя в нем останется нескомпенсированный объемный положительный заряд. При этом в p - n -переходе возникает потенциальный барьер – разность потенциалов, препятствующая дальнейшему диффузионному переходу носителей.

Распределение потенциала φ в p - n -переходе (рис. 3.3) зависит от расстояния удаления x от p - n перехода. За нулевой потенциал условно принимают потенциал в непосредственной близости от p - n -перехода.

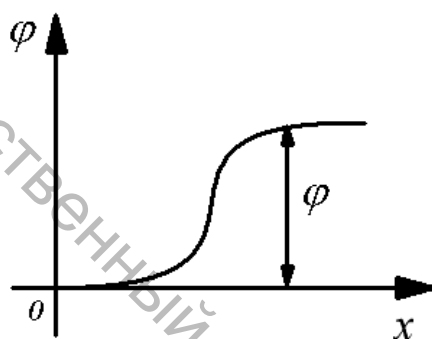


Рисунок 3.3 – График изменения потенциала в p - n -переходе

Если внешний источник ЭДС положительным выводом подключить к p -слою, а отрицательным – к n -слою, то потенциал барьера снизится, и диффузионный поток дырок из p -слоя в n -слой резко возрастет. Через p - n -переход потечет так называемый прямой ток.

Если изменить подключение источника ЭДС на обратную полярность, то потенциальный барьер увеличится. В этом режиме через p - n -переход проходят только неосновные носители заряда: дырки из n -слоя в p -слой и электроны из p -слоя в n -слой, т.е. через переход течет обратный ток. Величина обратного тока на несколько порядков меньше величины прямого тока, так как концентрация неосновных носителей гораздо меньше концентрации основных. Эта особенность p - n -перехода используется при создании полупроводниковых диодов. В качестве основного материала при этом применяется германий или кремний. Полупроводниковые приборы на основе кремния имеют обратный ток на несколько порядков ниже, чем на основе германия, что обуславливает их более широкое применение.

Основной характеристикой выпрямительного диода является его вольтамперная характеристика (ВАХ) (рис. 3.4). Вид ВАХ зависит от материала полупроводника и температуры.

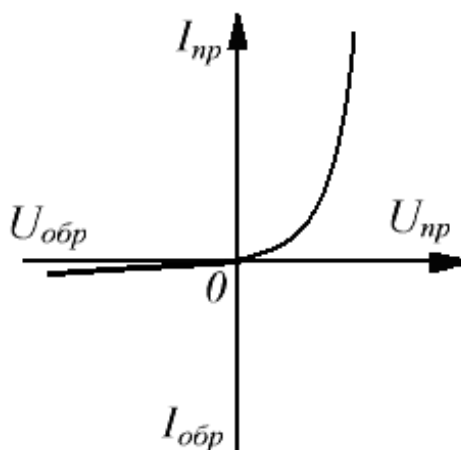


Рисунок 3.4 – ВАХ выпрямительного диода

Основными параметрами выпрямительных полупроводниковых диодов являются:

- постоянное прямое напряжение U_{np} при заданном прямом токе I_{np} ;
- максимально допустимое обратное напряжение $U_{обр.м}$, при котором диод может нормально работать длительное время;
- средний выпрямленный ток $I_{np.ср}$, который может длительно проходить через диод при допустимой температуре его нагрева;
- максимально допустимая мощность $P_{макс}$, рассеиваемая диодом.

По максимально допустимому значению среднего выпрямленного тока диоды делятся на маломощные ($I_{np.ср} \leq 0,3 A$), средней мощности ($0,3 A < I_{np.ср} \leq 10 A$) и большой мощности ($I_{np.ср} > 10 A$). Выпрямительные диоды большой мощности называют силовыми.

Для увеличения $U_{обр.м}$ диоды можно включать последовательно. Для последовательного включения подходят диоды с идентичными характеристиками. В настоящее время выпускаются так называемые диодные столбы, в которых соединены последовательно от 5 до 50 диодов, с обратным напряжением $2 \div 40 кВ$.

Для увеличения I_{np} диоды соединяют параллельно. Также часто осуществляют соединения, облегчающие применение диодов в конкретных выпрямительных устройствах (выпрямительные мосты).

Полупроводниковым стабилитроном называют полупроводниковый диод, напряжение на котором сохраняется с определенной точностью при изменении проходящего через него тока в заданном диапазоне. Он предназначен для стабилизации напряжения в цепях постоянного тока.

Рабочим участком ВАХ стабилитрона (рис. 3.5) является участок электрического пробоя. При изменении тока, протекающего через стабилитрон,

от значения от $I_{ст.мин}$ до значения $I_{ст.макс}$ напряжение на нем мало отличается от значения $U_{ст}$. На этом свойстве основано использование стабилитронов.

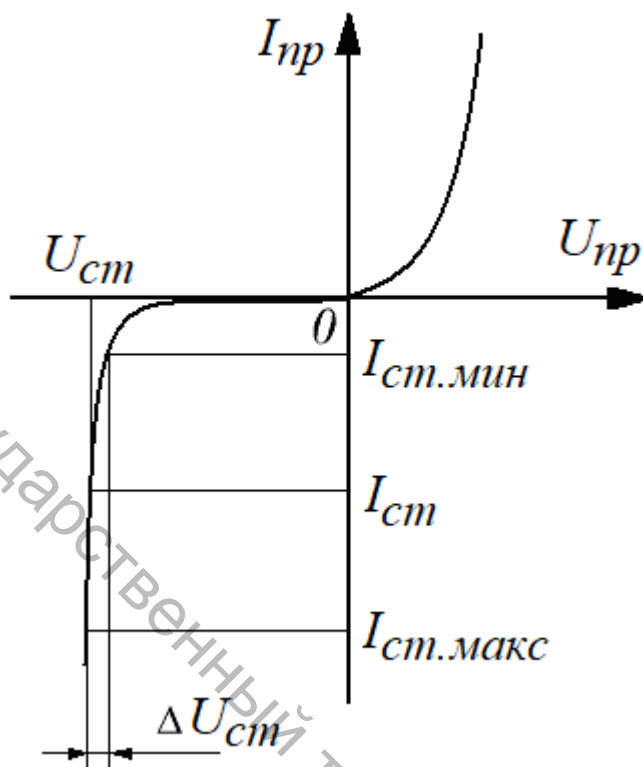


Рисунок 3.5 – ВАХ стабилитрона

Основными параметрами стабилитронов являются:

- напряжение стабилизации $U_{ст}$;
- минимальный $I_{ст.мин}$ и максимальный $I_{ст.макс}$ токи стабилизации;
- максимально допустимая рассеиваемая мощность $P_{макс}$;
- дифференциальное сопротивление на участке стабилизации $r_{\partial} = \Delta U_{ст} / \Delta I_{ст}$.

У современных стабилитронов напряжение стабилизации лежит в пределах от 1 до 1000 В при токах стабилизации от 1 мА до 2 А. Для стабилизации напряжения менее 1 В используется прямая ветвь ВАХ кремниевого диода, называемого стабистором. У стабисторов $U_{ст} \approx 0,7 В$. Путем последовательного соединения стабилитронов (или стабисторов) можно получить любое требуемое напряжение стабилизации.

Порядок выполнения работы в программе Electronics Workbench

1. Собрать схему согласно рисунку 3.6, выбрав модель диода  1N4001. В качестве нагрузки использовать резистор сопротивлением $R_H = 100 \text{ Ом}$.

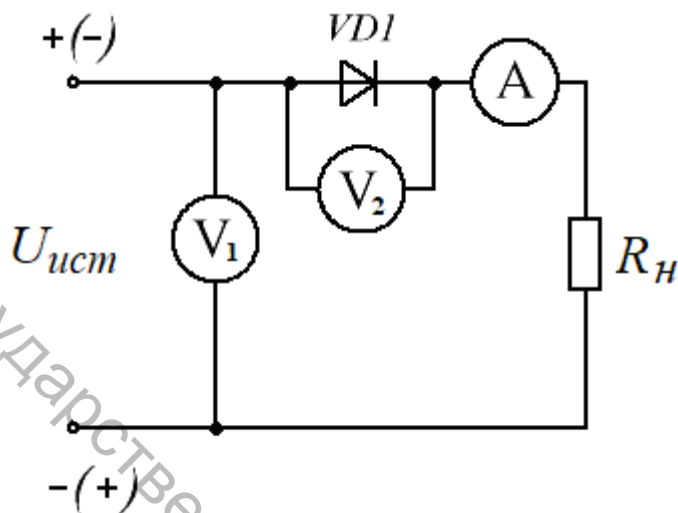


Рисунок 3.6 – Схема исследования выпрямительного диода

Для исследования диода в прямом режиме к входным клеммам цепи подключить источник постоянного напряжения (элемент  библиотеки компонентов Sources) с полярностью, указанной на рисунке 3.6 без скобок. Устанавливая значения напряжения источника $U_{ист}$ согласно данным таблицы 3.1, измерить с помощью вольтметра V_2 и амперметра A значения напряжения на диоде $U_{пр}$ и тока $I_{пр}$ в прямом режиме. Результаты измерений занести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты эксперимента

	$U_{ист}, B$	0	3	6	9	12	15
Прямой режим	$U_{пр}, B$						
	$I_{пр}, mA$						
Обратный режим	$U_{обр}, B$						
	$I_{обр}, mA$						

Для исследования диода в обратном режиме к входным клеммам цепи подключить источник постоянного напряжения (элемент  библиотеки компонентов Sources) с полярностью, указанной на рисунке 3.6 в скобках. Устанавливая значения напряжения источника $U_{ист}$ согласно данным таблицы 3.1, измерить с помощью вольтметра V_2 и амперметра A значения напряжения на диоде $U_{обр}$ и тока $I_{обр}$ в обратном режиме. Результаты измерений занести в таблицу 3.1.

По данным таблицы 3.1 построить ВАХ выпрямительного диода (по аналогии с рисунком 3.4).

2. Собрать схему согласно рисунку 3.7, выбрав модель  стабилитрона 1N4733. В качестве нагрузки использовать резистор сопротивлением $R_H = 300 \text{ Ом}$.

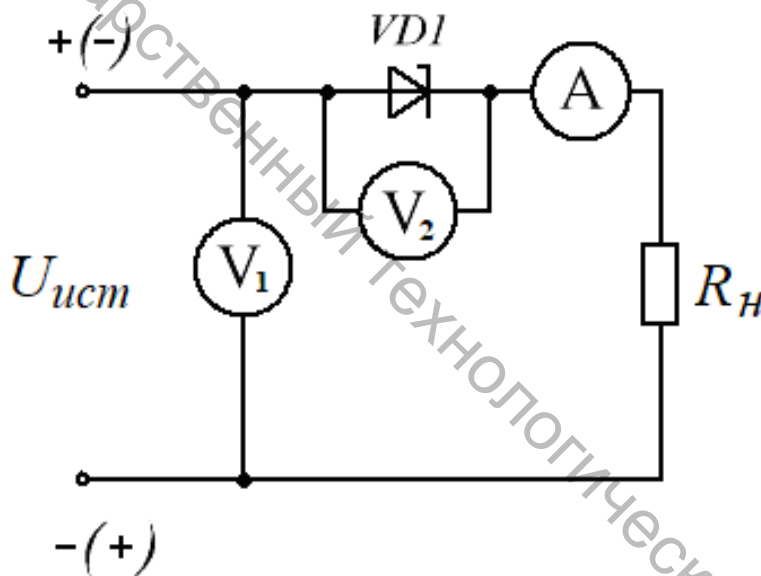


Рисунок 3.7 – Схема исследования стабилитрона

Для исследования стабилитрона в прямом режиме к входным клеммам цепи подключить источник постоянного напряжения (элемент  библиотеки компонентов Sources) с полярностью, указанной на рисунке 3.7 без скобок. Устанавливая значения напряжения источника $U_{ист}$ согласно данным таблицы 3.2, измерить с помощью вольтметра V_2 и амперметра A значения напряжения на стабилитроне $U_{пр}$ и тока $I_{пр}$ в прямом режиме. Результаты измерений занести в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты эксперимента

	$U_{ист}, В$	0	3	6	9	12	15
Прямой режим	$U_{np}, В$						
	$I_{np}, мА$						
Режим стабилизации	$U_{см}, В$						
	$I_{см}, мА$						

Для исследования стабилитрона в обратном режиме (режиме стабилизации) к входным клеммам цепи подключить источник постоянного напряжения (элемент  библиотеки компонентов Sources) с полярностью, указанной на рисунке 3.7 в скобках. Устанавливая значения напряжения источника $U_{ист}$ согласно данным таблицы 3.2, измерить с помощью вольтметра V_2 и амперметра A значения напряжения на стабилитроне $U_{см}$ и тока $I_{см}$ в режиме стабилизации. Результаты измерений занести в таблицу 3.2.

По данным таблицы 3.2 построить ВАХ стабилитрона (по аналогии с рисунком 3.5).

3. Для исследования последовательного соединения диодов собрать схему согласно рисунку 3.8, выбрав модели  диодов: $VD1$ – 1N4001, $VD2$ – BA157GP. В качестве нагрузки использовать резистор сопротивлением $R_H = 100 \text{ Ом}$.

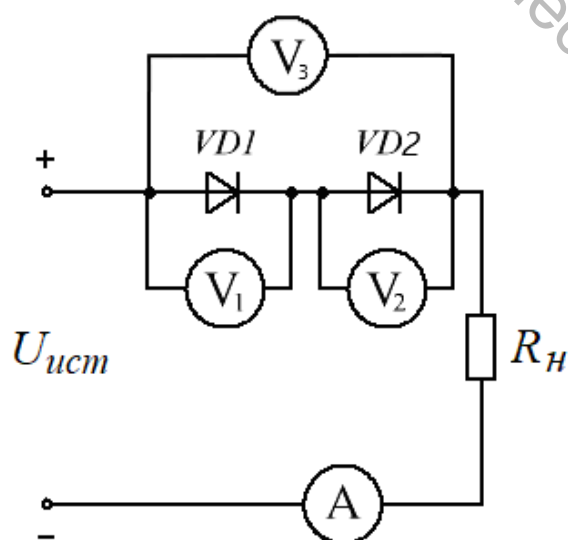


Рисунок 3.8 – Схема исследования последовательного соединения диодов

Для исследования последовательного соединения диодов в прямом режиме к входным клеммам цепи подключить источник постоянного напряжения (элемент  библиотеки компонентов Sources) с полярностью, указанной на рисунке 3.8. Устанавливая значения напряжения источника $U_{ист}$ согласно данным таблицы 3.3, измерить с помощью вольтметров V_1 , V_2 , V_3 и амперметра A значения напряжений на диодах и тока в прямом режиме. Результаты измерений занести в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты эксперимента

$U_{ист}, В$	0	5	10	15	20	25
$U_1, В$						
$U_2, В$						
$U_3, В$						
$I, мА$						

По данным таблицы 3.3 на одной координатной плоскости построить прямые ветви ВАХ диодов $I(U_1)$, $I(U_2)$ и эквивалентной ВАХ $I(U_3)$.

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Рисунок 3.6.
3. Таблица 3.1 с результатами эксперимента.
4. ВАХ выпрямительного диода по данным таблицы 3.1.
5. Рисунок 3.7.
6. Таблица 3.2 с результатами эксперимента.
7. ВАХ стабилитрона по данным таблицы 3.1.
8. Рисунок 3.8.
9. Таблица 3.3 с результатами эксперимента.
10. ВАХ диодов $I(U_1)$, $I(U_2)$ и эквивалентная ВАХ их последовательного соединения $I(U_3)$ по данным таблицы 3.3.

Контрольные вопросы

1. Поясните процессы, происходящие в $p-n$ -переходе.
2. Изобразите ВАХ выпрямительного диода и стабилитрона. Дайте объяснение построенным характеристикам.
3. Поясните основные параметры исследуемых полупроводниковых приборов.

Лабораторная работа 4

Исследование однофазных схем выпрямления

Цель работы: изучение принципа действия однофазных 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. Простейшее выпрямительное устройство состоит из трех основных элементов (рис. 4.1): трансформатора 1, вентильной схемы 2 и сглаживающего фильтра 3.

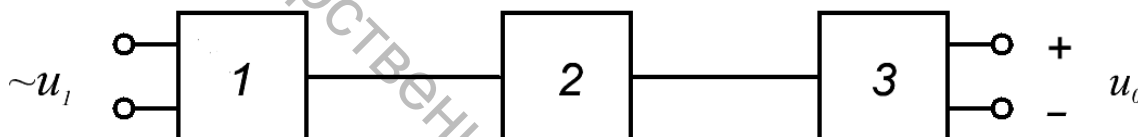


Рисунок 4.1 – Структурная схема выпрямителя

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 пульсации (основной гармоники) выпрямленного напряжения; K_n – коэффициент пульсации выпрямленного напряжения.

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

$$K_n = \frac{U_{o.г.м.}}{U_0}. \quad (4.1)$$

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:

$$r_0 = \frac{\Delta U_0}{\Delta I_0}. \quad (4.2)$$

Вентили в схемах выпрямления характеризуют следующими параметрами: средним $I_{np.cр}$ и амплитудным $I_{np.m}$ значениями выпрямленного тока, амплитудным значением обратного напряжения $U_{обр.m}$, 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 Грца).

Однополупериодная схема выпрямления (рис. 4.2) отличается простотой, небольшим числом элементов, невысокой стоимостью, возможностью работы без трансформатора непосредственно от питающей сети.

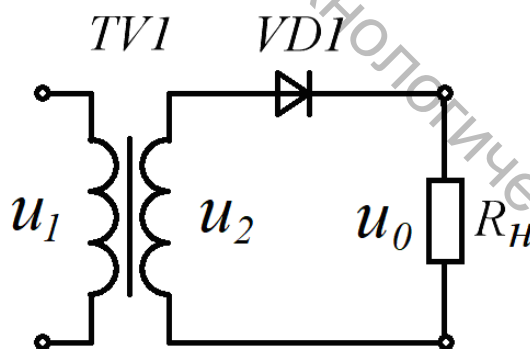


Рисунок 4.2 – Однополупериодная схема выпрямления

На рисунке 4.3 представлены временные диаграммы, характеризующие работу этой схемы на активную нагрузку при питании синусоидальным напряжением. Во время положительной полуволны u_2 вентиль $VD1$ открыт и напряжение на нагрузке повторяет форму напряжения на вторичной обмотке трансформатора $TV1$. Во время отрицательной полуволны u_2 вентиль $VD1$ закрыт и 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.

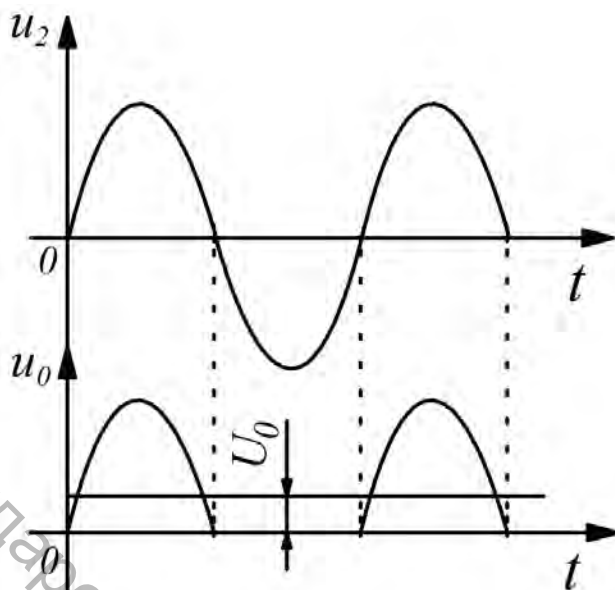


Рисунок 4.3 – Временные диаграммы

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. 4.4) образована двумя вентилями $VD1$ и $VD2$, трансформатором $TV1$, имеющим две одинаковые вторичные обмотки, включенные последовательно и согласно.

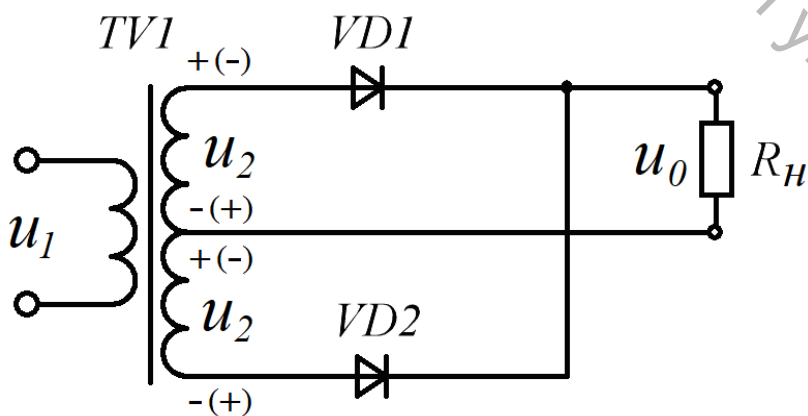


Рисунок 4.4 – Двухполупериодная схема выпрямления с выводом нулевой точки трансформатора

Во время положительной полуволны u_2 (полярность u_2 на рисунке 4.4 указана без скобок) открыт вентиль $VD1$. Во время отрицательной полуволны u_2 (полярность u_2 на рисунке 4.4 указана в скобках) открыт вентиль $VD2$. Ток обоих вентилях протекает через нагрузку в одном направлении. Временные диаграммы напряжений для этой схемы выпрямления представлены на рисунке 4.5.

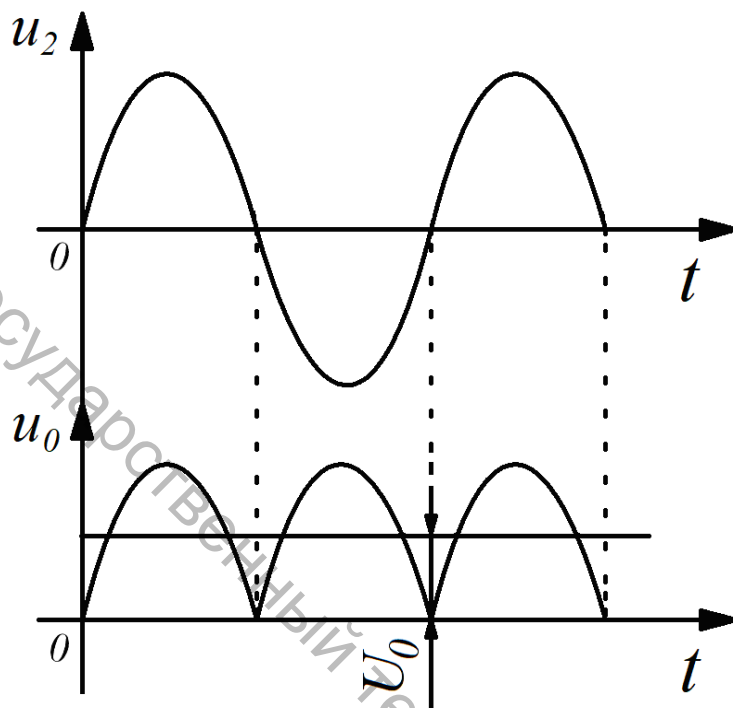


Рисунок 4.5 – Временные диаграммы

К достоинствам схемы выпрямления с нулевой точкой можно отнести следующие: частота пульсации и среднее значение выпрямленного напряжения в два раза выше, чем в однополупериодной схеме; высокий КПД; отсутствие намагничивания трансформатора. Основная область применения этой схемы – низковольтные выпрямители. 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. 4.6) содержит четыре вентиля и трансформатор с одной вторичной обмоткой.

Во время положительной полуволны u_2 открыты и проводят ток вентили $VD1$ и $VD3$, а во время отрицательной – $VD2$ и $VD4$. При этом ток в нагрузке в оба полупериода u_2 протекает в одном направлении (указанном на рисунке 4.6 стрелкой), а ток во вторичной обмотке трансформатора через каждые $T/2$ изменяет свое направление на противоположное.

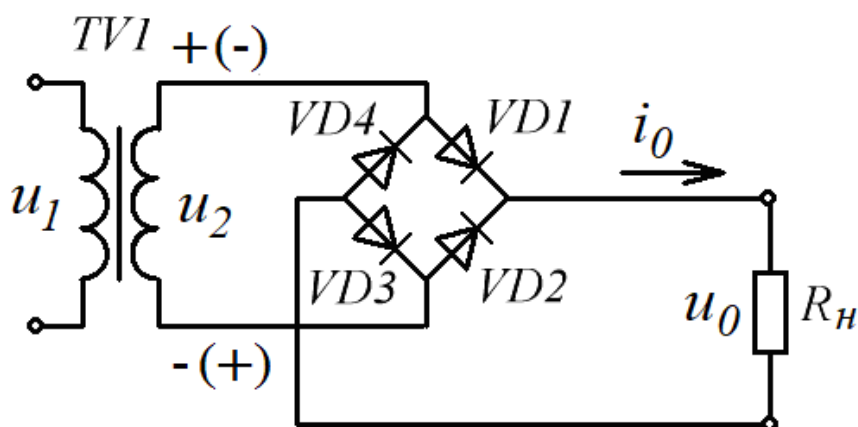


Рисунок 4.6 – Мостовая схема выпрямления

Поскольку в течение $T / 2$ проводят ток два вентиля, а два – находятся в непроводящем состоянии, то к каждому из закрытых вентилях оказывается приложенным $U_{обр.м} = U_{2м} / 2$.

Временные диаграммы входного и выходного напряжений мостовой схемы выпрямления совпадают с соответствующими диаграммами выпрямителя с нулевым выводом (рис. 4.5).

Основными преимуществами мостовой схемы являются: большая, чем в однополупериодной схеме, частота пульсаций; небольшое обратное напряжение; хорошее использование трансформатора; отсутствие вынужденного намагничивания сердечника трансформатора; возможность работы без трансформатора.

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

Основные параметры рассмотренных схем выпрямления при работе на активную нагрузку представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Основные параметры однофазных схем выпрямления

Схема выпрямления	$\frac{U_2}{U_0}$	$\frac{U_{обр.м}}{U_0}$	$\frac{I_{np.ср}}{I_0}$	$\frac{I_{np.м}}{I_0}$	$\frac{I_{np}}{I_0}$	$\frac{I_2}{I_0}$	$\frac{S_{mp}}{P_0}$	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 4.7, и разместить его на наборном поле.

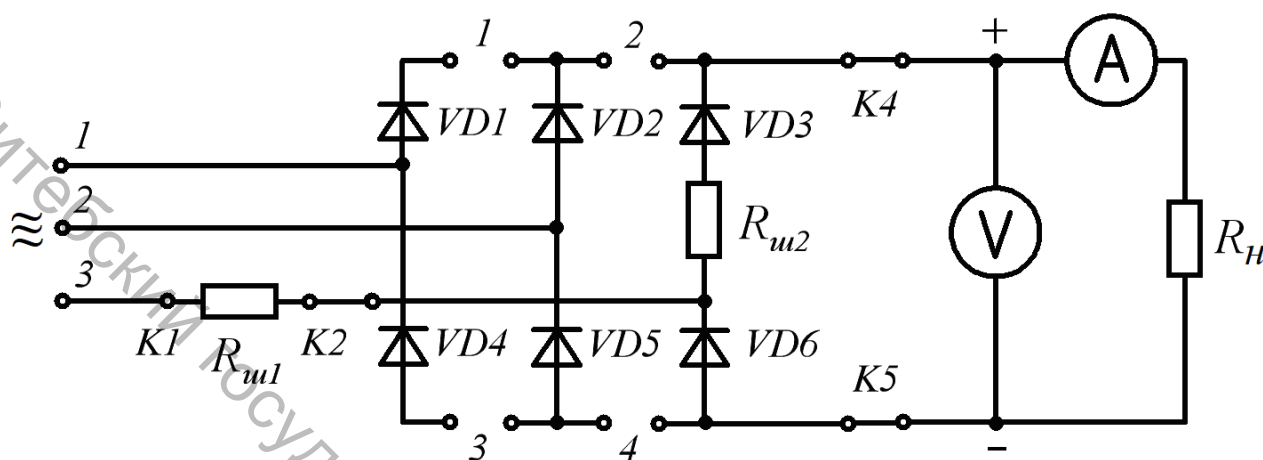


Рисунок 4.7 – Схема модуля «ВЫПРЯМИТЕЛЬ»

2. Для исследования однофазной однополупериодной схемы выпрямления к аноду диода $VD1$ и нижнему выводу резистора нагрузки R_n 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. Нагрузку R_n подключить к выпрямителю, используя блок переменного сопротивления стенда. Изменяя сопротивление нагрузки от 100 до 900 Ом , а также при $R_n = \infty$, измерить напряжение U_0 и ток I_0 . Результаты измерений занести в таблицу 4.2.

Используя осциллограф, зарисовать с его экрана в масштабе осциллограммы напряжений $u_2(t)$ на входе схемы выпрямления и $u_0(t)$ на нагрузке при $R_n = 900 \text{ Ом}$.

3. Для исследования однофазной мостовой схемы выпрямления к входным клеммам 1 и 2 схемы на рисунке 4.7 подать переменное напряжение с частотой 50 Гц от любой фазы источника трехфазного напряжения стенда. Замкнуть клеммы разъемов 1 и 3 схемы. Нагрузку R_n подключить к выпрямителю, используя блок переменного сопротивления стенда. Изменяя сопротивление нагрузки от 100 до 900 Ом , а также при $R_n = \infty$, измерить напряжение U_0 и ток I_0 . Результаты измерений занести в таблицу 4.2.

Используя осциллограф, зарисовать с его экрана в масштабе осциллограмму напряжения $u_0(t)$ на нагрузке при $R_n = 900 \text{ Ом}$.

Таблица 4.2 – Результаты эксперимента

	$R_n, \text{Ом}$	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. Для исследования однополупериодного выпрямителя собрать схему (рис. 4.8), установив сопротивление резистора нагрузки $R_n = \text{№ компьютера} \times 10 (\text{кОм})$. В меню программы Analysis выбрать Analysis Options. Во вкладке Instruments установить значение Minimum number of time points равным 300.

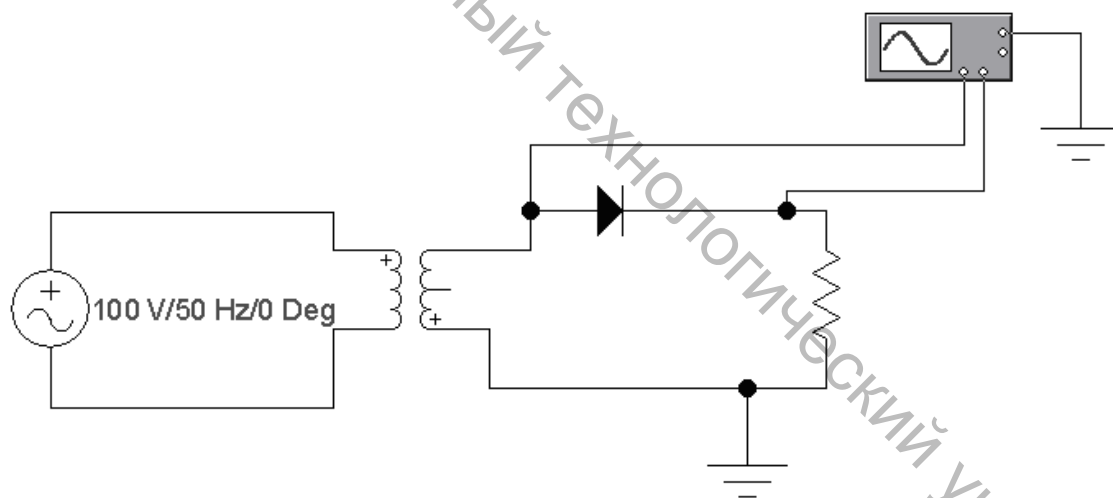


Рисунок 4.8 – Схема моделирования однополупериодного выпрямителя

Включив схему, зарисовать с экрана осциллографа в масштабе осциллограммы напряжения $u_2(t)$ на входе схемы выпрямления и $u_0(t)$ на нагрузке в соответствии с рисунком 4.9.

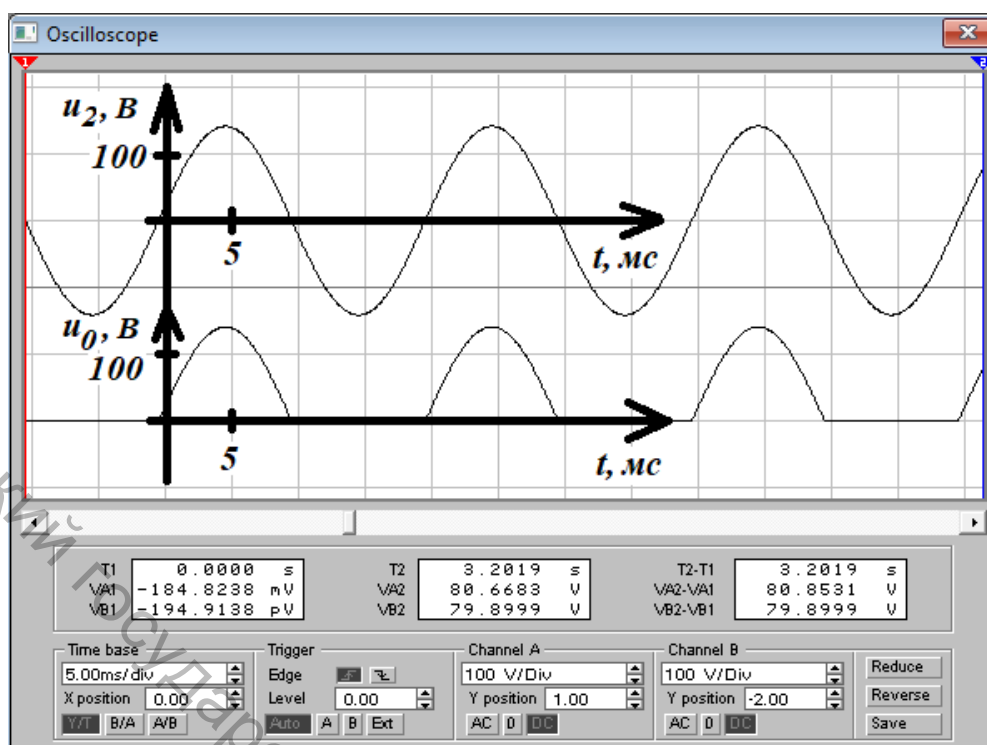


Рисунок 4.9 – Осциллограммы напряжения

2. Для исследования двухполупериодного выпрямителя с выводом нулевой точки трансформатора собрать схему (рис. 4.10), установив сопротивление резистора нагрузки $R_H \neq \text{№ компьютера} \times 10 (\text{кОм})$.

Включив схему, зарисовать с экрана осциллографа в масштабе осциллограммы напряжения $u_2(t)$ на входе схемы выпрямления и $u_0(t)$ на нагрузке.

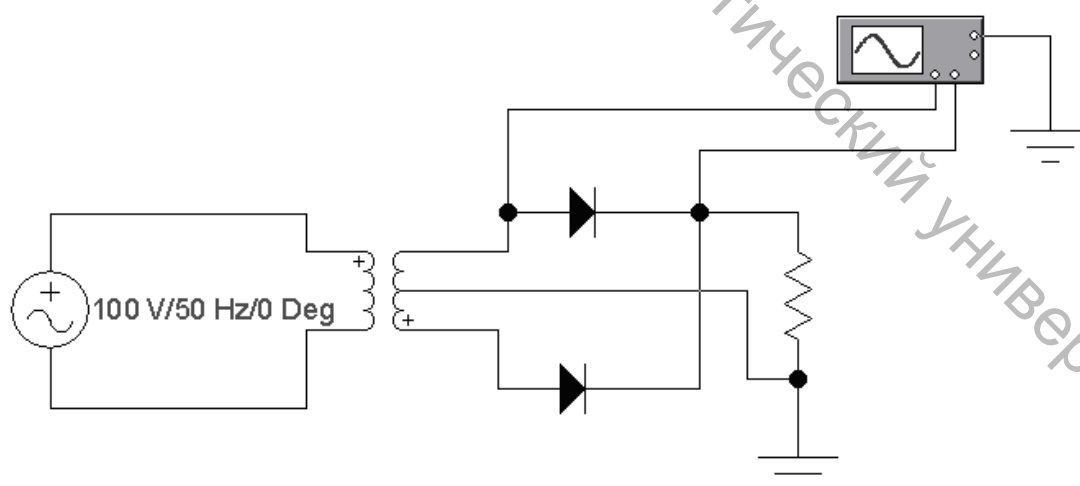


Рисунок 4.10 – Схема моделирования двухполупериодного выпрямителя с выводом нулевой точки трансформатора

3. Для исследования однофазного мостового выпрямителя собрать схему (рис. 4.11), установив сопротивление резистора нагрузки $R_n = \text{№ компьютера} \times 10 (\text{кОм})$.

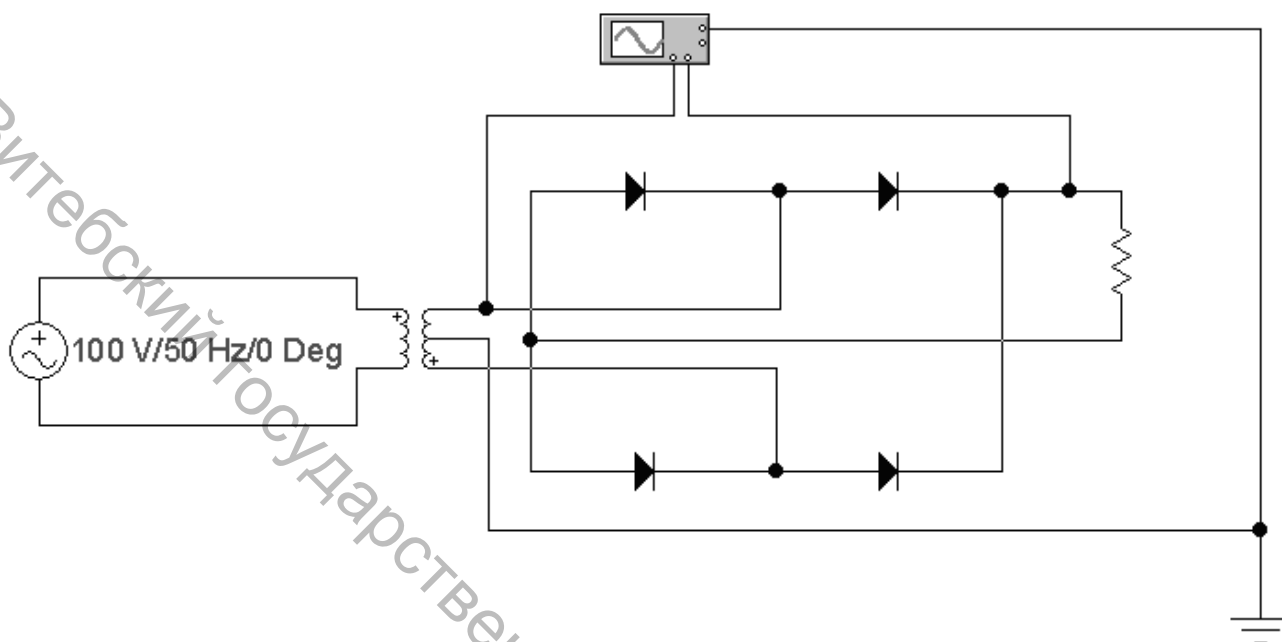


Рисунок 4.11 – Схема моделирования однофазного мостового выпрямителя

Включив схему, зарисовать с экрана осциллографа в масштабе осциллограммы напряжения $u_2(t)$ на входе схемы выпрямления и $u_0(t)$ на нагрузке.

Содержание отчета

(при выполнении работы на унифицированном стенде УИЛС-1)

1. Название и цель работы.
2. Рисунки 4.2 и 4.6.
3. Таблица 4.2 с результатами экспериментов.
4. Экспериментально полученные осциллограммы напряжений $u_2(t)$ и $u_0(t)$ в схеме рисунка 4.2 и напряжения $u_0(t)$ в схеме рисунка 4.6
5. Внешние характеристики $U_0(I_0)$ схем выпрямления по данным таблицы 4.2.

Содержание отчета

(при выполнении работы в программе Electronics Workbench)

1. Название и цель работы.
2. Рисунки 4.2, 4.4 и 4.6.

3. Экспериментально полученные осциллограммы напряжений $u_2(t)$ и $u_0(t)$ в моделях схем рисунков 4.8, 4.10 и 4.11.

Контрольные вопросы

1. Объясните принцип действия однополупериодной схемы выпрямления, ее достоинства и недостатки.
2. Объясните принцип действия двухполупериодной схемы выпрямления с выводом нулевой точки трансформатора, ее достоинства и недостатки.
3. Объясните принцип действия мостовой схемы выпрямления, ее достоинства и недостатки.
4. Что такое внешняя характеристика выпрямителя?
5. Как определить коэффициент пульсаций и внутреннее сопротивление выпрямителя?

Лабораторная работа 5

Исследование трехфазных схем выпрямления

Цель работы: изучение принципа действия 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 трансформатора (схема Миткевича) и мостовая схема (схема Ларионова).

Трехфазную схему выпрямления с нулевым выводом трансформатора образуют трехфазный трансформатор и три вентиля (рис. 5.1). Первичные обмотки трансформатора (обмотки высшего напряжения) могут быть соединены звездой или треугольником, вторичные обмотки (обмотки низшего напряжения) 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.

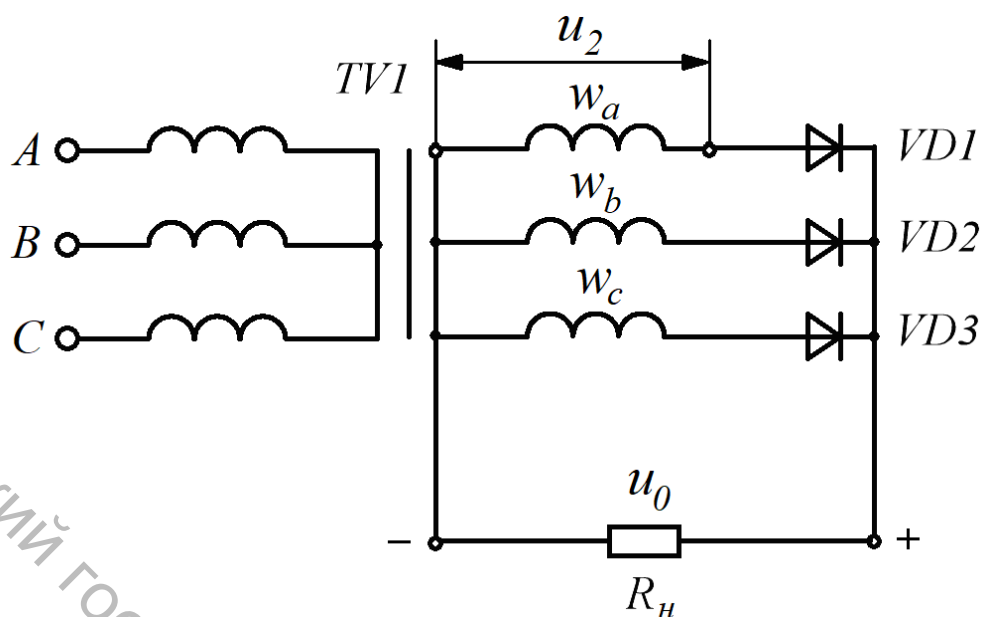


Рисунок 5.1 – Трехфазная схема выпрямления с нулевым выводом трансформатора

Временные диаграммы, поясняющие работу схемы, приведены на рисунке 5.2. Рассмотрим работу этой схемы выпрямления при активной нагрузке.

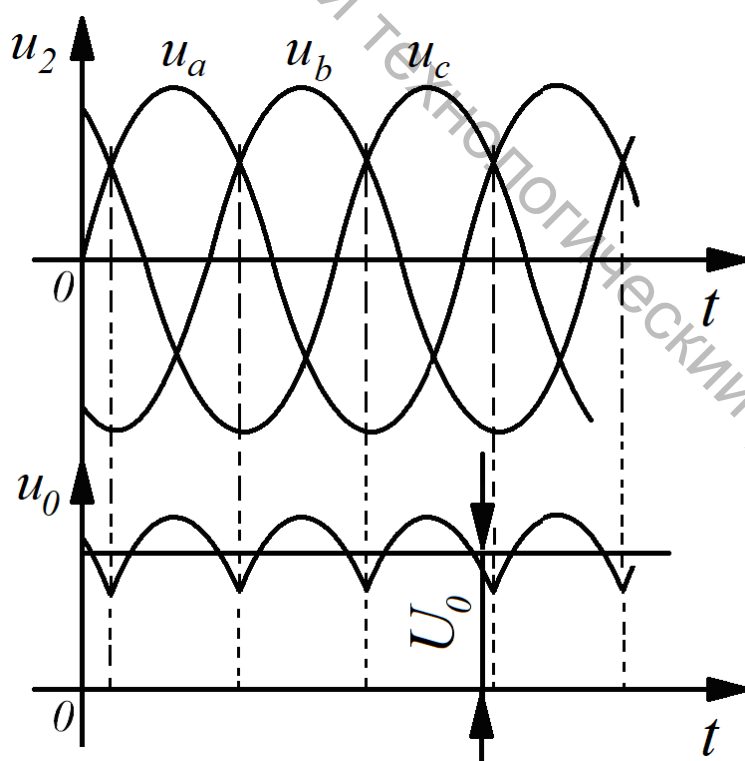


Рисунок 5.2 – Временные диаграммы

В любой момент времени в схеме открыт только один клапан, имеющий на аноде наибольшее мгновенное положительное значение напряжения. Из рисунка 5.2 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 его 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. 5.3). Клапаны $VD1$, $VD3$, $VD5$ образуют так называемую катодную группу, поскольку их катоды соединены в узел, а клапаны $VD2$, $VD4$, $VD6$ – анодную группу (их аноды соединены в узел).

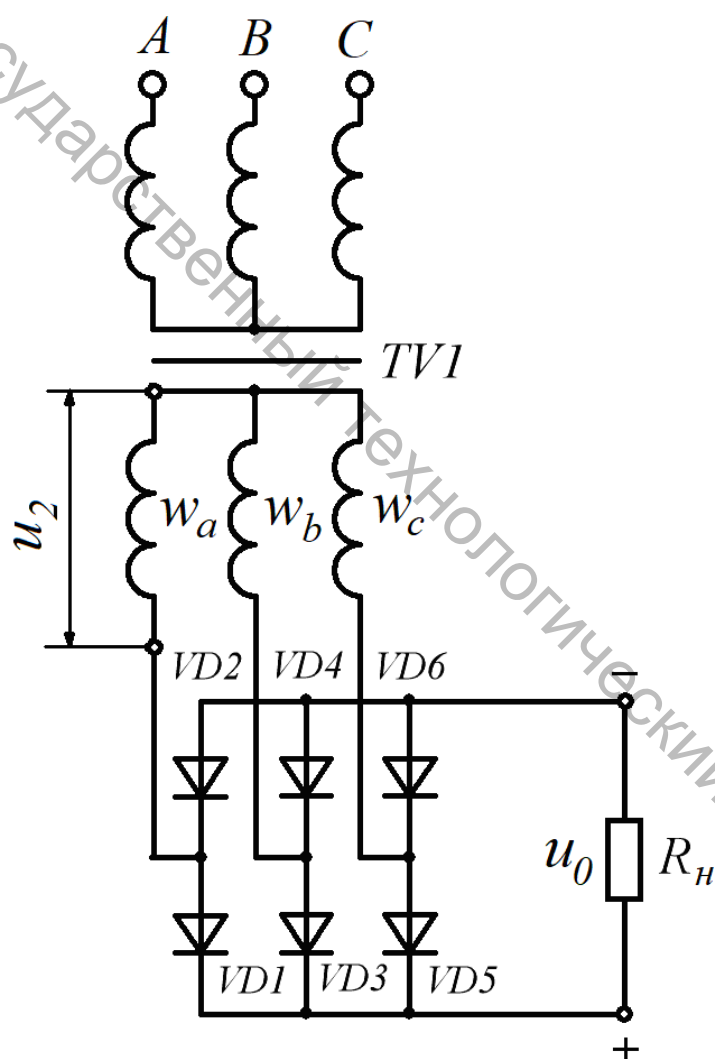


Рисунок 5.3 – Трехфазная мостовая схема выпрямления

Временные диаграммы, поясняющие работу схемы при активной нагрузке, приведены на рисунке 5.4.

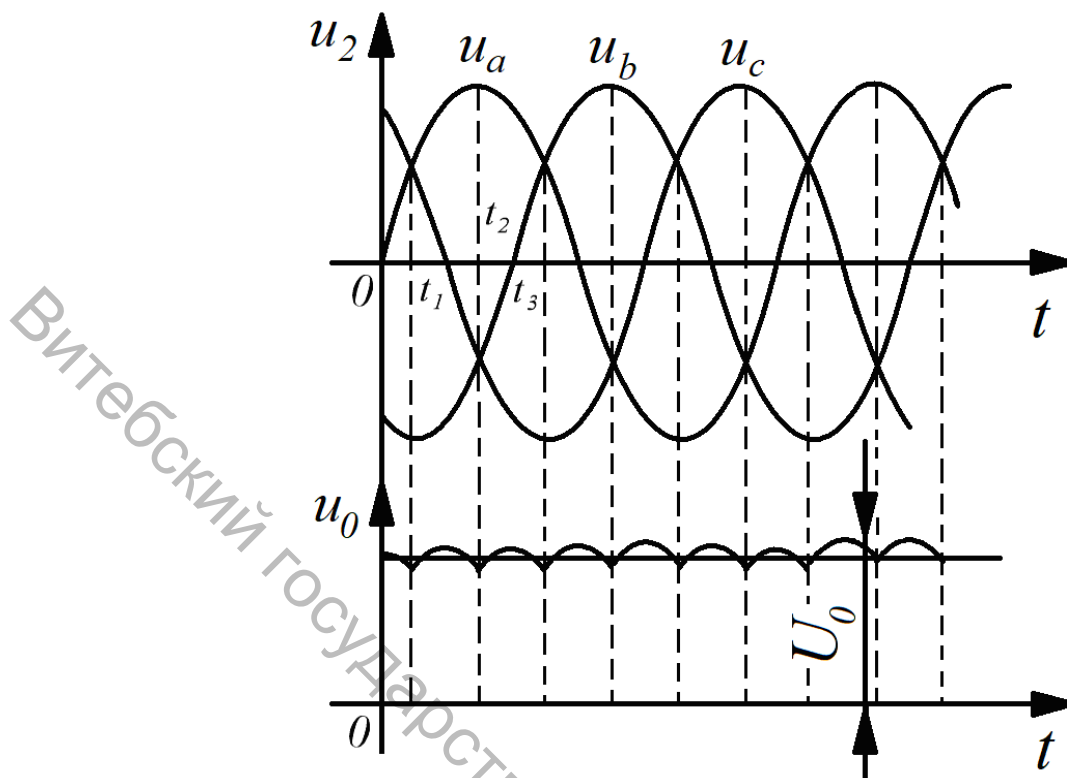


Рисунок 5.4 – Временные диаграммы

В схеме Ларионова одновременно пропускают ток (как и в однофазной мостовой схеме) два вентиля: один из катодной, другой из анодной группы. В анодной группе открыт 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 интервале времени $t_1 - t_2$ открыты вентили $VD1$ и $VD4$, в интервале $t_2 - t_3$ открыты $VD1$ и $VD6$. Каждый вентиль выпрямителя проводит ток в течение $T/3$, а пара открытых вентилях – в течение $T/6$.

Несмотря на большее в два раза количество вентилях, схема Ларионова предпочтительнее схемы с нулевым выводом трансформатора 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.

Основные параметры рассмотренных трехфазных схем выпрямления при работе на активную нагрузку приведены в таблице 5.1. Указанные в таблице 5.1 соотношения действительны для случая соединения обмоток трансформатора «звезда – звезда».

Таблица 5.1 – Основные параметры трехфазных схем выпрямления

Схема выпрямления	$\frac{U_2}{U_0}$	$\frac{U_{м.обр}}{U_0}$	$\frac{I_{пр.ср}}{I_0}$	$\frac{I_{пр.м}}{I_0}$	$\frac{I_{пр}}{I_0}$	$\frac{I_2}{I_0}$	$\frac{S_{пр}}{P_0}$	K_n	$\frac{f_n}{f_c}$
Трехфазная с нулевым выводом трансформатора	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

Порядок выполнения работы на унифицированном стенде УИЛС-1

1. Для выполнения работы выбрать модуль «ВЫПРЯМИТЕЛЬ», схема которого представлена на рисунке 4.7, и разместить его на наборном поле.

2. Для исследования трехфазной схемы выпрямления с нулевым выводом трансформатора к входным клеммам 1, 2 и 3 схемы на рисунке 4.7 подать трехфазное напряжение с частотой 50 Гц от источника трехфазного напряжения стенда, соединив фазы источника звездой. Замкнуть клеммы разъемов 1 и 2 схемы. Подключить к выпрямителю нагрузку R_n , используя блок переменного сопротивления 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 . Результаты измерений занести в таблицу 5.2.

Используя осциллограф, зарисовать с его экрана в масштабе осциллограммы напряжений $u_2(t)$ на входе схемы выпрямления и $u_0(t)$ на нагрузке при $R_n = 900 \text{ Ом}$. На рисунке $u_2(t)$ дополнительно изобразить две синусоиды для получения графика трехфазного напряжения, аналогичного изображенному на рисунке 5.2.

3. Для исследования трехфазной мостовой схемы выпрямления к входным клеммам 1, 2 и 3 схемы на рисунке 4.7 подать трехфазное напряжение с частотой 50 Гц от источника трехфазного напряжения стенда, соединив фазы источника звездой. Замкнуть клеммы разъемов 1, 2, 3 и 4 схемы. Подключить к выпрямителю нагрузку R_n , используя блок переменного сопротивления 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 . Результаты измерений занести в таблицу 5.2.

Используя осциллограф, зарисовать с его экрана в масштабе осциллограмму напряжения $u_0(t)$ при $R_n = 900 \text{ Ом}$.

Таблица 5.2 – Результаты эксперимента

	$R_n, \text{Ом}$	100	200	300	400	500	600	700	800	900	∞
Трехфазная схема с нулевым выводом трансформатора	$U_0, \text{В}$										
	$I_0, \text{мА}$										
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. Для исследования трехфазного выпрямителя с нулевым выводом трансформатора собрать схему (рис. 5.5), установив сопротивление резистора нагрузки $R_n = \text{№ компьютера (кОм)}$. В меню программы Analysis выбрать Analysis Options. Во вкладке Instruments установить значение Minimum number of time points равным 300.

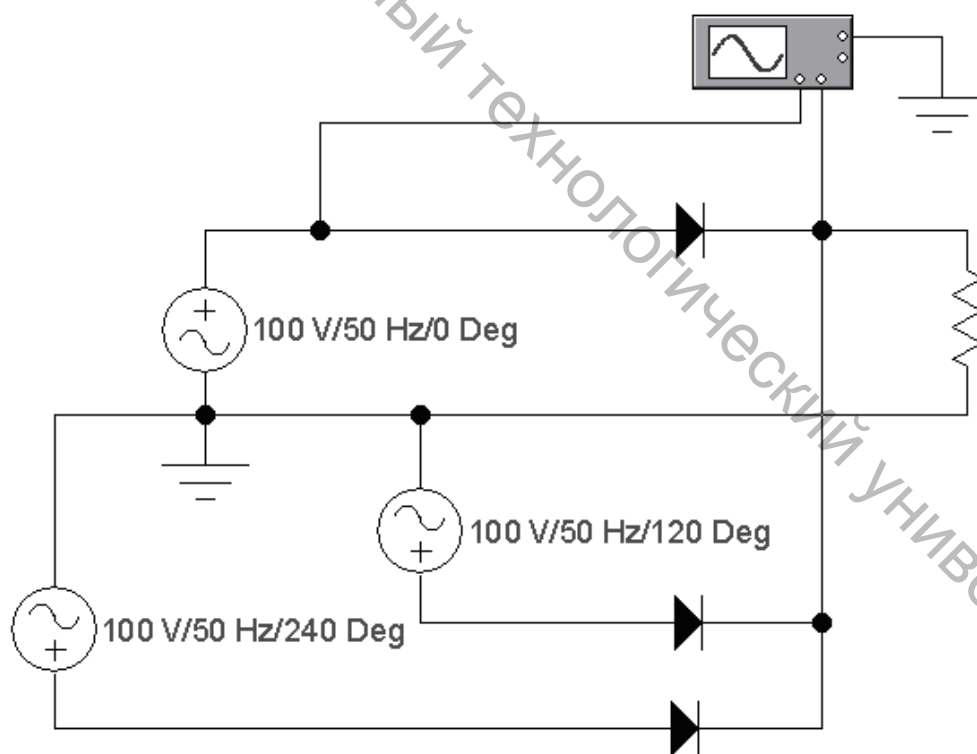


Рисунок 5.5 – Схема моделирования трехфазного выпрямителя с нулевым выводом трансформатора

Включив схему, зарисовать с экрана осциллографа в масштабе осциллограммы напряжения $u_2(t)$ на входе схемы выпрямления и $u_0(t)$ на нагрузке. На рисунке $u_2(t)$ дополнительно изобразить две синусоиды для получения графика трехфазного напряжения, аналогичного изображенному на рисунке 5.2.

2. Для исследования трехфазного мостового выпрямителя собрать схему (рис. 5.6), установив сопротивление резистора нагрузки $R_H = N_{\text{№ компьютера}} (\text{кОм})$.

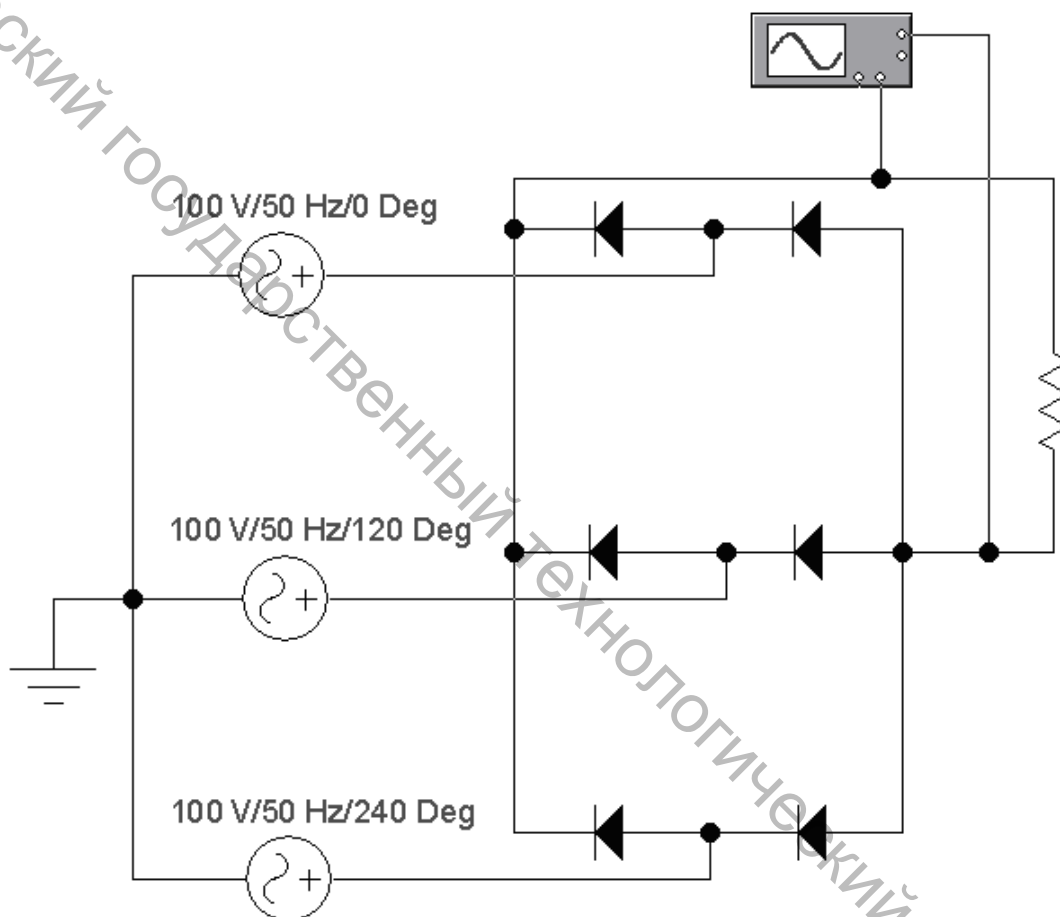


Рисунок 5.6 – Схема моделирования трехфазного мостового выпрямителя

Включив схему, зарисовать в масштабе осциллограммы напряжения. Осциллограмму $u_2(t)$ изобразить аналогичной осциллограмме из п. 1. Осциллограмму $u_0(t)$ зарисовать с экрана осциллографа.

Содержание отчета

(при выполнении работы на унифицированном стенде УИЛС-1)

1. Название и цель работы.
2. Рисунки 5.1 и 5.3.

3. Таблица 5.2 с результатами экспериментов.
4. Экспериментально полученные осциллограммы напряжений $u_2(t)$ и $u_0(t)$ в схеме рисунка 5.1 и напряжения $u_0(t)$ в схеме рисунка 5.3
5. Внешние характеристики $U_0(I_0)$ схем выпрямления по данным таблицы 5.2.

Содержание отчета (при выполнении работы в программе Electronics Workbench)

1. Название и цель работы.
2. Рисунки 5.1 и 5.3.
3. Экспериментально полученные осциллограммы напряжений $u_2(t)$ и $u_0(t)$ в моделях схем рисунков 5.5 и 5.6.

Контрольные вопросы

1. Объясните принцип действия трехфазной схемы выпрямления с нулевым выводом трансформатора, ее достоинства и недостатки.
2. Объясните 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 6

Исследование сглаживающих фильтров

Цель работы: изучение принципа действия сглаживающих фильтров, экспериментальное определение их основных параметров и 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 K_n , который равен отношению амплитуды первой гармоники напряжения пульсаций к среднему значению выходного напряжения (4.1). Зная кратность пульсаций выпрямленного напряжения m , коэффициент пульсаций на выходе выпрямителя по первой гармонике определяют:

$$K_n = \frac{2}{m^2 - 1}. \quad (6.1)$$

Качество работы сглаживающего фильтра оценивают его коэффициентом сглаживания, который равен отношению коэффициента пульсаций на входе фильтра к коэффициенту пульсаций на его выходе:

$$K_c = \frac{K_{n.вх}}{K_{n.вых}}. \quad (6.2)$$

Иногда для оценки свойств сглаживающего фильтра удобнее использовать коэффициент фильтрации, представляющий собой отношение амплитуд переменных составляющих напряжений на входе и выходе фильтра:

$$K_\phi = \frac{U_{вх.м}}{U_{вых.м}}. \quad (6.3)$$

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. 6.1).

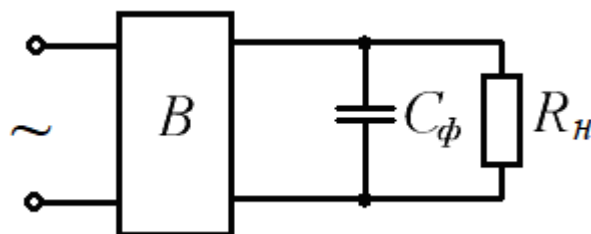


Рисунок 6.1 – Выпрямитель с емкостным фильтром

В течение интервала времени, когда мгновенное значение напряжения $u_{\text{выпр}}$ на выходе выпрямителя больше мгновенного значения напряжения u_C на конденсаторе (рис. 6.2), конденсатор накапливает энергию, поступающую от выпрямителя. При этом вентили выпрямителя открыты и по ним течет ток заряда конденсатора. Когда $u_{\text{выпр}}$ становится меньше u_C , вентили закрываются, и ток в нагрузке поддерживается за счет энергии, накопленной в конденсаторе фильтра.

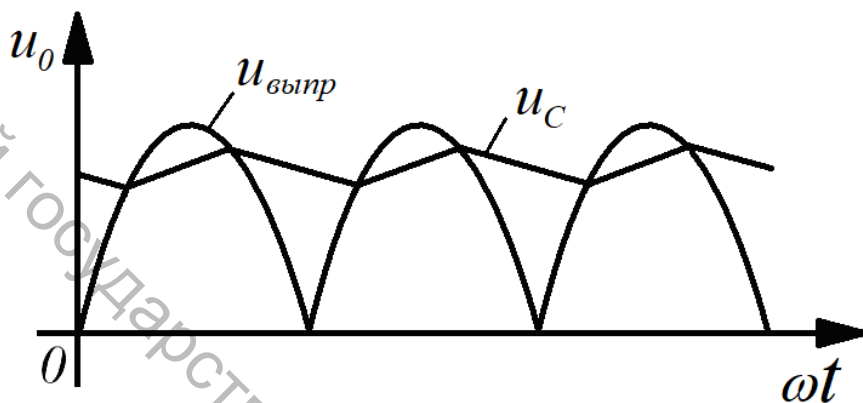


Рисунок 6.2 – Временные диаграммы

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 проходит через нагрузку, а переменная составляющая – через конденсатор фильтра. С целью ослабления переменной составляющей тока в нагрузке емкость C_ϕ конденсатора фильтра выбирают из условия, чтобы его сопротивление первой гармонике тока было много меньше сопротивления нагрузки:

$$\frac{1}{m\omega C_\phi} \ll R_n. \quad (6.4)$$

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, 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 выпрямителя (рис. 6.3).

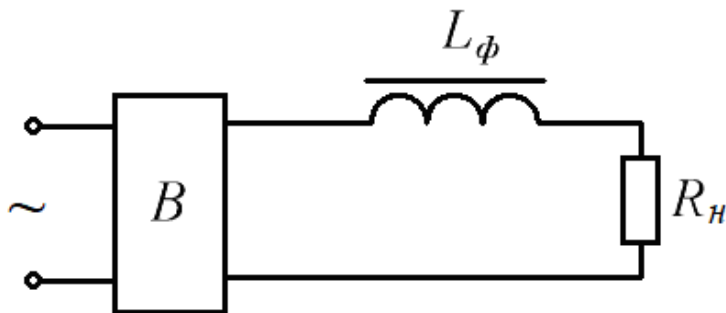


Рисунок 6.3 – Выпрямитель с индуктивным фильтром

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:

$$m\omega L_\phi \gg R_n. \quad (6.5)$$

Величина энергии, запасаемой дросселем фильтра, пропорциональна квадрату проходящего через него тока, поэтому целесообразно использовать индуктивный фильтр при больших токах нагрузки.

Г-образные фильтры. Г-образный LC-фильтр получают включением параллельно нагрузке конденсатора емкостью C_ϕ , а последовательно – дросселя индуктивностью L_ϕ (рис. 6.4).

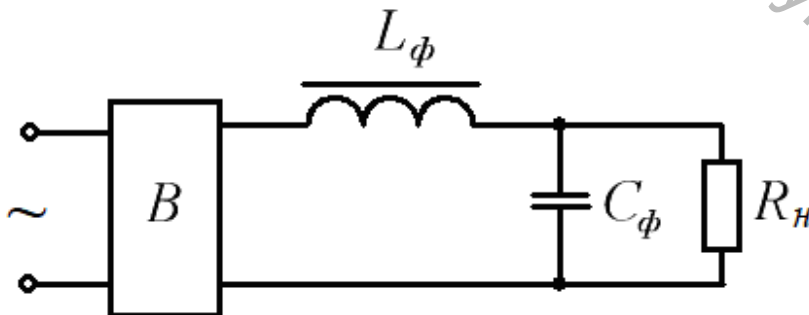


Рисунок 6.4 – Выпрямитель с Г-образным LC-фильтром

В данном фильтре сочетаются положительные качества емкостного и индуктивного фильтров. Параметры L_ϕ и C_ϕ образующих его элементов выбирают из условия:

$$m\omega L_\phi \gg R_n \gg \frac{1}{m\omega C_\phi}. \quad (6.6)$$

В выпрямителях малой мощности, а также в выпрямителях с высоким входным напряжением и малым током нагрузки дроссель L_ϕ часто заменяют резистором R_ϕ (рис. 6.5), получая сглаживающий Γ -образный RC -фильтр.

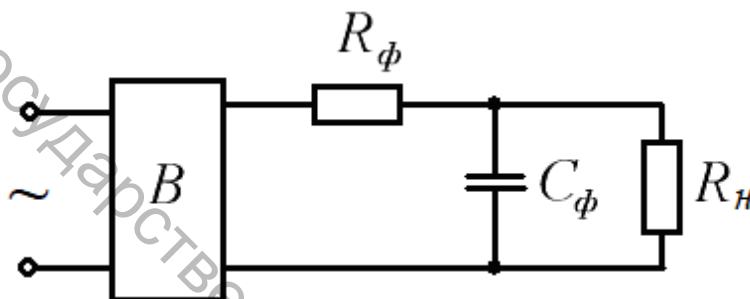


Рисунок 6.5 – Выпрямитель с Γ -образным RC -фильтром

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 η элементы RC -фильтра выбирают из следующих условий:

$$\frac{1}{m\omega C_\phi} \ll R_n, \quad R_\phi \gg \frac{1}{m\omega C_\phi}, \quad R_\phi = \frac{R_n(1-\eta)}{\eta}. \quad (6.7)$$

Оптимальным считается КПД порядка 0,8.

Многозвенные фильтры. При необходимости получения высоких значений коэффициентов сглаживания применяют более сложные схемы фильтров: Π -образные (рис. 6.6) и двойные Γ -образные (рис. 6.7). 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 фильтра и Γ -образного LC -фильтра.

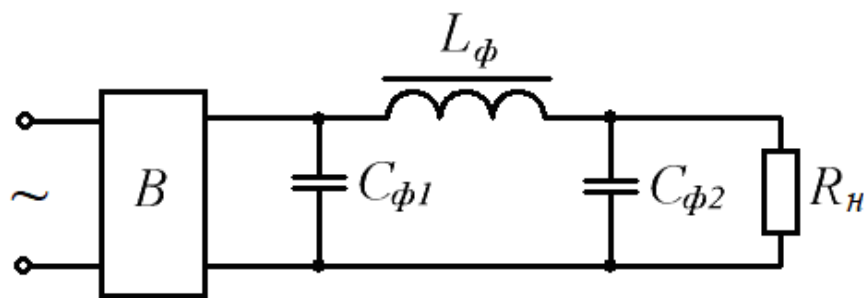


Рисунок 6.6 – Выпрямитель с Π -образным фильтром

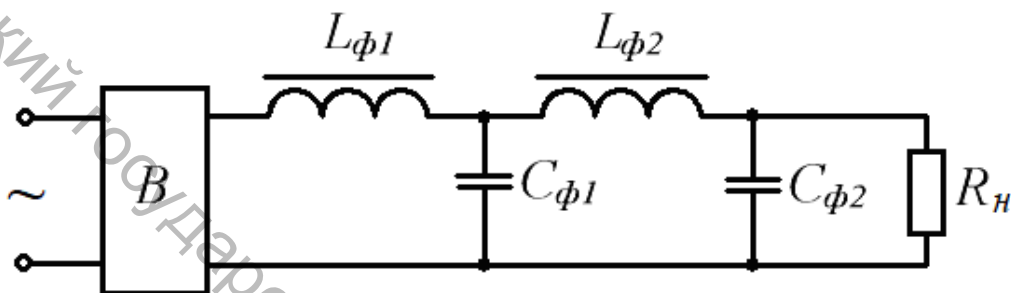


Рисунок 6.7 – Выпрямитель с двойным Γ -образным фильтром

Порядок выполнения работы на унифицированном стенде УИЛС-1

1. Для выполнения работы выбрать модуль «ВЫПРЯМИТЕЛЬ», схема которого представлена на рисунке 4.7, и разместить его на наборном поле.

2. Для исследования выпрямителя с емкостным фильтром собрать схему на рисунке 6.1, временно отключив конденсатор фильтра C_ϕ . В качестве выпрямителя «B» использовать однофазную мостовую схему выпрямления (сборка схемы описана в п. 3 порядка выполнения работы на унифицированном стенде УИЛС-1 лабораторной работы 4). Подключить к выпрямителю нагрузку $R_н$, используя блок переменного сопротивления стенда. К входным клеммам 1 и 2 схемы на рисунке 4.7 подать переменное напряжение с частотой 50 Гц от любой фазы источника трехфазного напряжения стенда. Подключить к нагрузке осциллограф и зарисовать осциллограмму напряжения $u_0(t)$ при отсутствии сглаживающего фильтра для $R_н = 900 \text{ Ом}$.

При отключенном источнике питания подключить к выпрямителю конденсатор фильтра C_ϕ емкостью 10 мкФ , используя блоки емкостей стенда. Включив питание схемы, зарисовать осциллограмму напряжения $u_0(t)$ при $R_н = 900 \text{ Ом}$. Изменяя сопротивление нагрузки от 100 до 900 Ом , а также при $R_н = \infty$, измерить напряжение U_0 и ток I_0 . Результаты измерений занести в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Результаты эксперимента

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

3. Для исследования выпрямителя с Γ -образным LC-фильтром собрать схему на рисунке 6.4. 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 $u_0(t)$ 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 . Результаты измерений занести в таблицу 6.1.

4. Для исследования выпрямителя с Γ -образным RC-фильтром собрать схему на рисунке 6.5. 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 $u_0(t)$ 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 . Результаты измерений занести в таблицу 6.1.

5. Для исследования выпрямителя с Π -образным фильтром собрать схему на рисунке 6.6. 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 $u_0(t)$ 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 . Результаты измерений занести в таблицу 6.1.

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

7. Определить коэффициенты сглаживания исследованных фильтров по формулам таблицы 6.2. Для всех расчетов принять соотношения: $m = 2$, $\omega = 2\pi f$, $f = 50 \text{ Гц}$.

Таблица 6.2 – Коэффициенты сглаживания фильтров

№	Наименование фильтра	Коэффициенты сглаживания
1.	Емкостный фильтр	$K_{c1} = \frac{K_{n.вх}}{K_{n.вых}} = \frac{0,67}{\frac{I}{m\omega C_\phi R_n}}$
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. 6.8), задав следующие параметры элементов: напряжение источника питания 10 В , частота тока 50 Гц , сопротивление нагрузки 1 кОм .

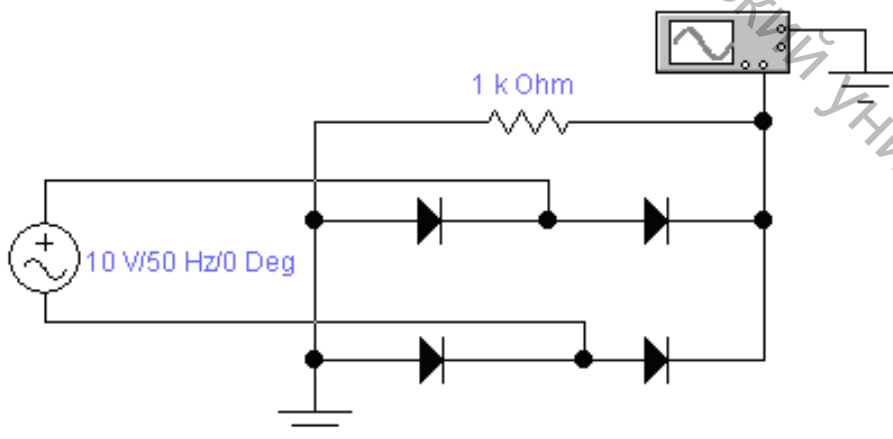


Рисунок 6.8 – Схема моделирования однофазного мостового выпрямителя без сглаживающего фильтра

Зарисовать в масштабе осциллограмму $u_0(t)$ напряжения на нагрузке, установив настройки осциллографа в соответствии с рисунком 6.9.



Рисунок 6.9 – Настройки осциллографа

2. Произвести моделирование схемы однофазного мостового выпрямителя с емкостным фильтром, приведенной на рисунке 6.10, 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 $u_0(t)$ напряжения на нагрузке, не меняя настройки осциллографа.

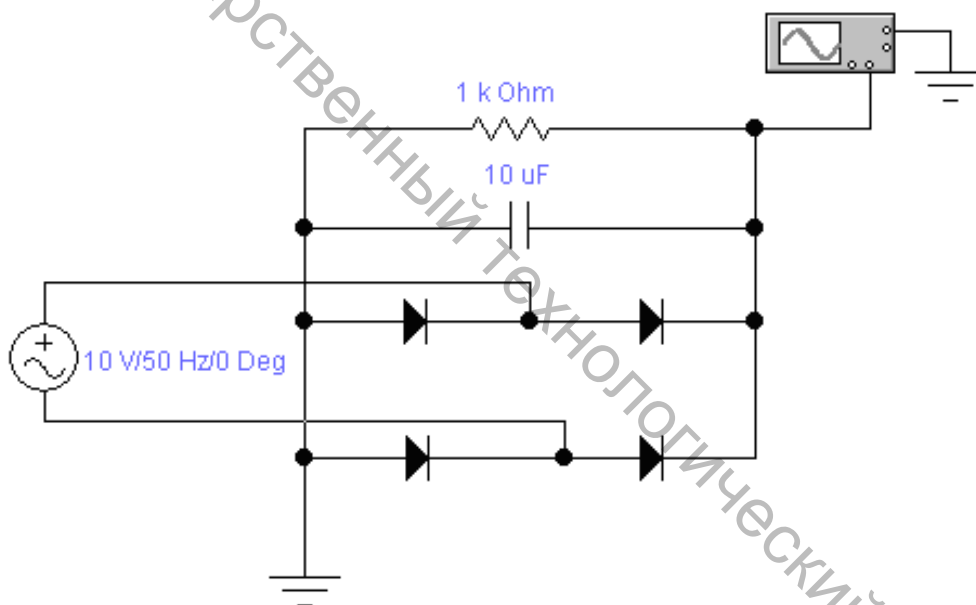


Рисунок 6.10 – Схема моделирования однофазного мостового выпрямителя с емкостным фильтром

3. Произвести моделирование схемы однофазного мостового выпрямителя с Γ -образным LC -фильтром, приведенной на рисунке 6.11, 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 6.12. Зарисовать в масштабе осциллограмму $u_0(t)$ напряжения на нагрузке, не меняя настройки осциллографа.

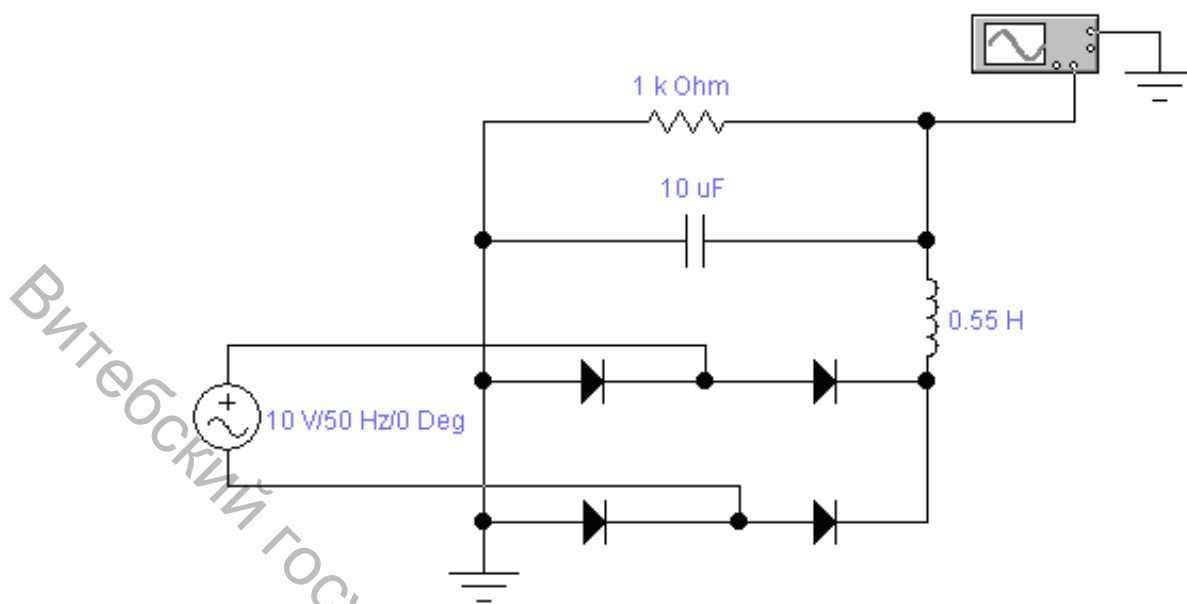


Рисунок 6.11 – Схема моделирования однофазного мостового выпрямителя с Γ -образным LC -фильтром

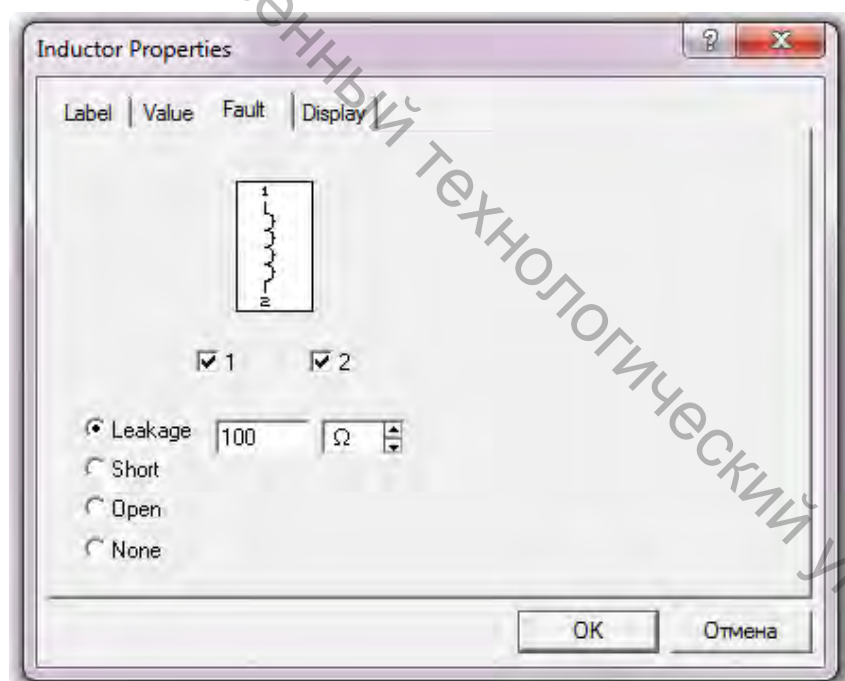


Рисунок 6.12 – Настройка параметров катушки индуктивности

4. Произвести моделирование схемы однофазного мостового выпрямителя с Γ -образным RC -фильтром, приведенной на рисунке 6.13, 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 $u_0(t)$ напряжения на нагрузке, не меняя настройки осциллографа.

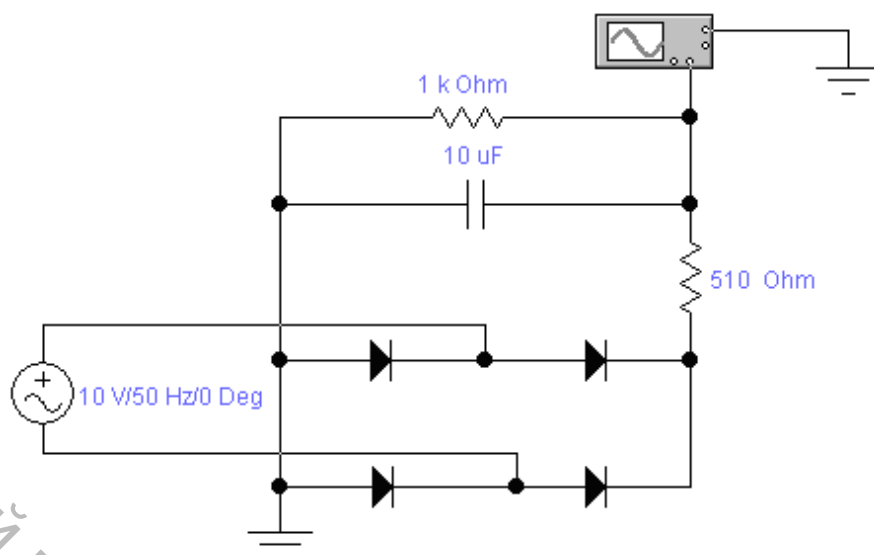


Рисунок 6.13 – Схема моделирования однофазного мостового выпрямителя с L -образным RC -фильтром

5. Произвести моделирование схемы однофазного мостового выпрямителя с Π -образным фильтром, приведенной на рисунке 6.14, 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 6.12. Зарисовать в масштабе осциллограмму напряжения $u_0(t)$ на нагрузке, не меняя настройки осциллографа.

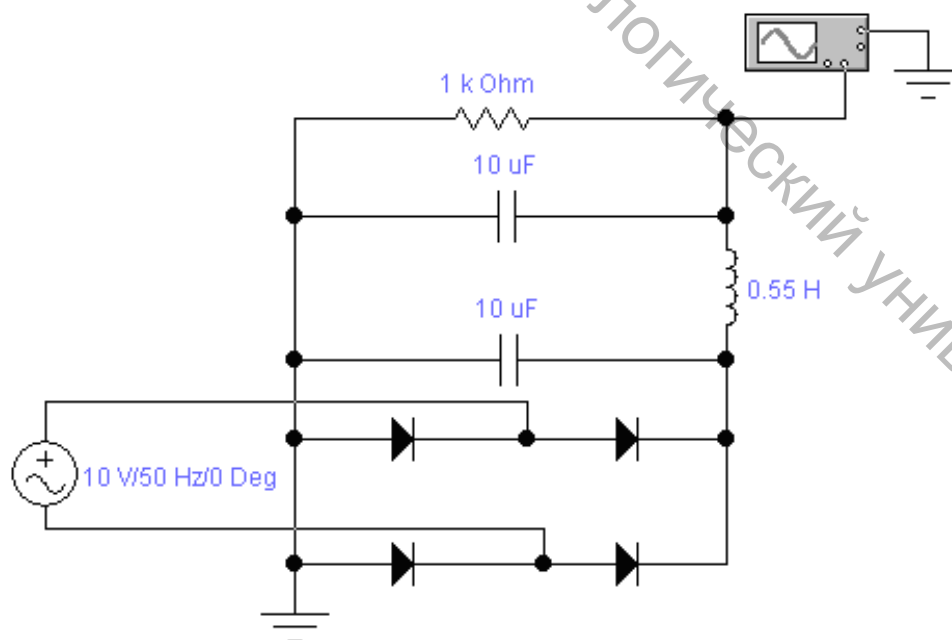


Рисунок 6.14 – Схема моделирования однофазного мостового выпрямителя с Π -образным фильтром

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

Содержание отчета (при выполнении работы на унифицированном стенде УИЛС-1)

1. Название и цель работы.
2. Рисунки 6.1, 6.4, 6.5 и 6.6.
3. Таблица 6.1 с результатами экспериментов.
4. Экспериментально полученные осциллограммы: напряжения $u_0(t)$ при отсутствии конденсатора в схеме рисунка 6.1 и напряжений $u_0(t)$ в схемах рисунков 6.1, 6.4, 6.5 и 6.6.
5. Внешние характеристики $U_0(I_0)$ выпрямителей с исследованными фильтрами по данным таблицы 6.1.
6. Расчет коэффициентов сглаживания исследованных фильтров по формулам таблицы 6.2.

Содержание отчета (при выполнении работы в программе Electronics Workbench)

1. Название и цель работы.
2. Рисунки 6.1, 6.4, 6.5 и 6.6.
3. Экспериментально полученные осциллограммы напряжений $u_0(t)$ в моделях схем рисунков 6.8, 6.10, 6.11, 6.13 и 6.14.
4. Расчет коэффициентов сглаживания исследованных фильтров по формулам таблицы 6.2.

Контрольные вопросы

1. Объясните принцип действия исследованных в лабораторной работе сглаживающих фильтров.
2. Каковы основные параметры сглаживающих фильтров?
3. Как выбирается конденсатор в емкостном фильтре?
4. Как выбирается дроссель в индуктивном фильтре?

Лабораторная работа 7

Исследование однофазных схем выпрямления с умножением напряжения

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

Теоретические сведения

Выпрямителем с умножением напряжения называют статический преобразователь электрической энергии переменного тока в энергию постоянного тока с возможностью получать на выходе умноженное в несколько раз значение входного напряжения.

Однополупериодная несимметричная схема выпрямления с удвоением напряжения изображена на рисунке 7.1.

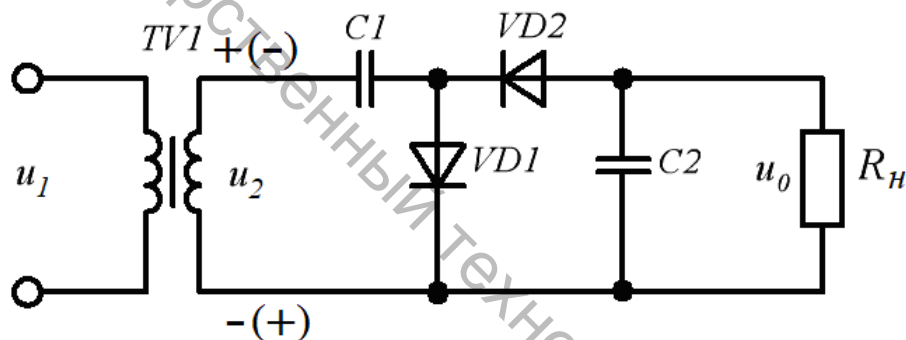


Рисунок 7.1 – Однополупериодная несимметричная схема выпрямления с удвоением напряжения

В течение первого полупериода (полярность u_2 на рисунке 7.1 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 $U_0 = U_{C2} = 2U_{2m}$.

Недостатки схемы аналогичны недостаткам однополупериодного выпрямителя.

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

Двухполупериодная симметричная схема выпрямления с удвоением напряжения изображена на рисунке 7.2.

В начале первого полупериода (полярность u_2 на рисунке 7.2 без скобок), пока $u_2 < u_{C1}$, $VD1$ открыт, $VD2$ закрыт, $C1$ заряжается до $U_{2м}$.

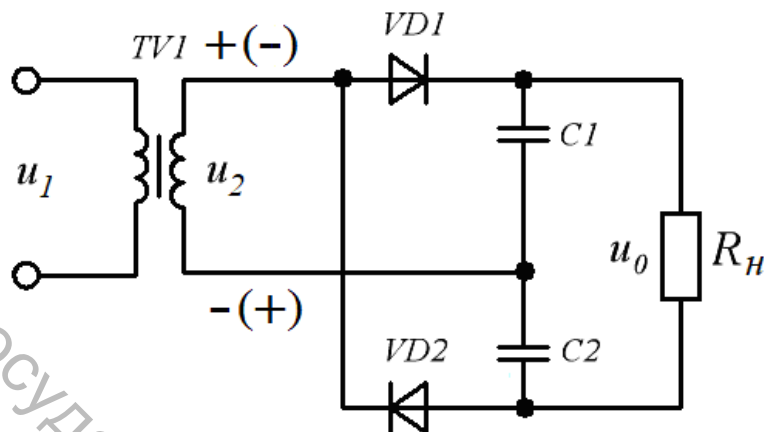


Рисунок 7.2 – Двухполупериодная симметричная схема выпрямления с удвоением напряжения

В начале второго полупериода, пока $u_2 < u_{C2}$, $VD2$ открыт, $VD1$ закрыт и $C2$ заряжается до $U_{2м}$. Таким образом

$$U_0 = U_{C1} + U_{C2} = 2U_{2м}.$$

В данной схеме исключается подмагничивание сердечника трансформатора.

Однополупериодная схема выпрямления с умножением напряжения (схема первого рода) изображена на рисунке 7.3.

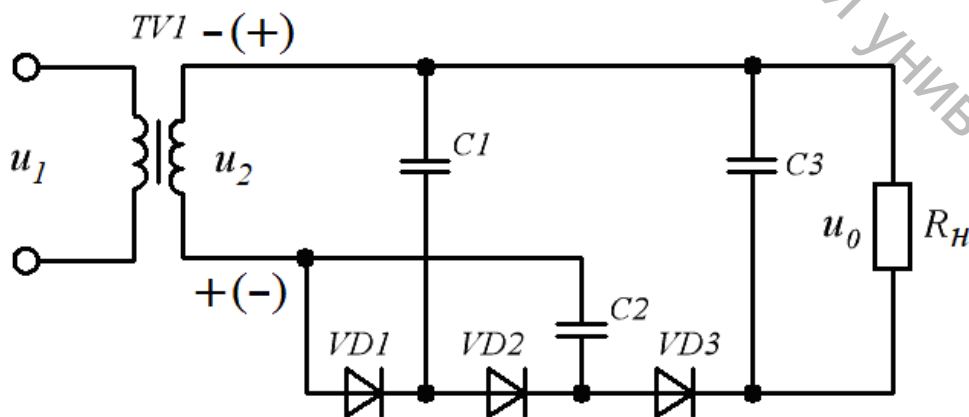


Рисунок 7.3 – Однополупериодная схема выпрямления с умножением напряжения (схема первого рода)

В течение первого полупериода (полярность u_2 на рисунке 7.3 без скобок) $VD1$ открыт и $C1$ заряжается до $U_{2м}$.

Во второй полупериод к $C2$ приложена сумма напряжений источника и конденсатора $C1$. Таким образом,

$$U_{C2} = 2U_{2м}.$$

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

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

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

Однополупериодная схема выпрямления с умножением напряжения (схема второго рода) изображена на рисунке 7.4.

В течение первого полупериода (полярность u_2 на рисунке 7.4 без скобок) $VD1$ открыт и $C1$ заряжается до $U_{2м}$. Во второй полупериод открывается $VD2$ и к конденсатору $C2$ приложено суммарное напряжение источника и конденсатора $C1$:

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

В следующем полупериоде $C3$ заряжается по цепи: $+u_2$, $C2$, $VD3$, $C3$, $C1$, $-u_2$.

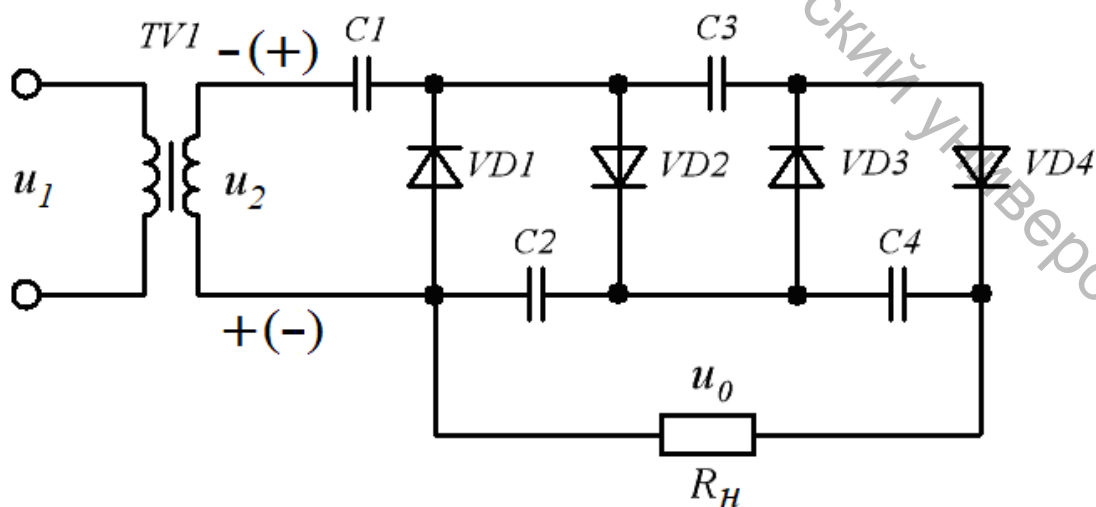


Рисунок 7.4 – Однополупериодная схема выпрямления с умножением напряжения (схема второго рода)

При этом

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

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 $U_C = 2U_{2m}$.

Необходимое значение напряжения получают, подключая нагрузку одним выводом к общей точке (любой из клемм вторичной обмотки трансформатора), вторым – к точке в схеме (снизу или сверху), в зависимости от требуемой величины выходного напряжения.

Так как из-за несимметричности схемы (рис. 7.4) происходит подмагничивание сердечника трансформатора, то для устранения данного явления используют комбинацию рассмотренных ранее схем (рис. 7.5).

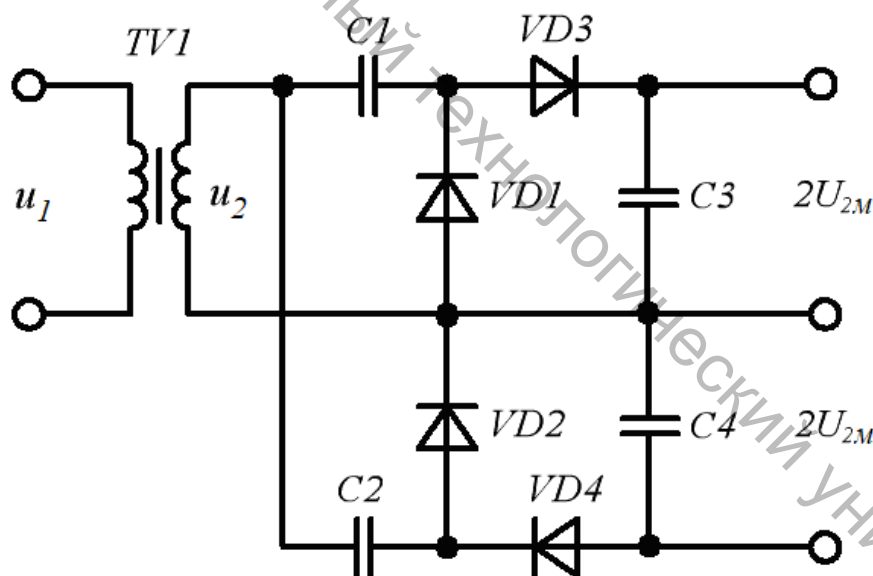


Рисунок 7.5 – Комбинированная схема выпрямления с умножением напряжения

Порядок выполнения работы в программе Electronics Workbench

1. Произвести моделирование схем рисунков 7.1–7.5 с заменой трансформатора источником переменного синусоидального напряжения (элемент AC Voltage Source  библиотеки компонентов Sources) и

подключением параллельно к резистору нагрузки вольтметра (элемент Voltmeter  библиотеки компонентов Indicators).

Установив указанные преподавателем значения напряжения источника и сопротивления нагрузки, а также значения емкости конденсаторов (в соответствии с данными таблицы 7.1), измерить напряжение на нагрузке. Результаты измерений занести в таблицу 7.1.

Таблица 7.1 – Результаты эксперимента

С, мкФ Схема	5	50	500
Рис. 7.1			
Рис. 7.2			
Рис. 7.3			
Рис. 7.4			
Рис. 7.5			

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Рисунки 7.1, 7.2, 7.3, 7.4 и 7.5.
3. Таблица 7.1 с результатами экспериментов.

Контрольные вопросы

1. Пояснить принцип действия исследованных в лабораторной работе схем выпрямления с удвоением (умножением) напряжения.
2. Дать сравнительную оценку исследованных в лабораторной работе схем выпрямления с удвоением (умножением) напряжения.

Лабораторная работа 8

Исследование биполярных транзисторов

Цель работы: изучение принципа действия и основных свойств биполярных транзисторов, исследование их параметров и вольтамперных характеристик.

Теоретические сведения

Биполярный транзистор – трехслойный полупроводниковый прибор с двумя p – n -переходами и тремя выводами, которые называются эмиттер,

коллектор и база. Основное назначение биполярного транзистора – усиление мощности входного сигнала. В зависимости от порядка чередования слоев различают биполярные транзисторы типа $p-n-p$ и $n-p-n$. Рассмотрим принцип работы биполярного транзистора типа $p-n-p$.

Особенностью конструкции биполярного транзистора (рис. 8.1) является то, что база выполняется в виде очень тонкого слоя, концентрация основных носителей заряда в котором значительно меньше, чем в прилегающих к ней областях эмиттера и коллектора.

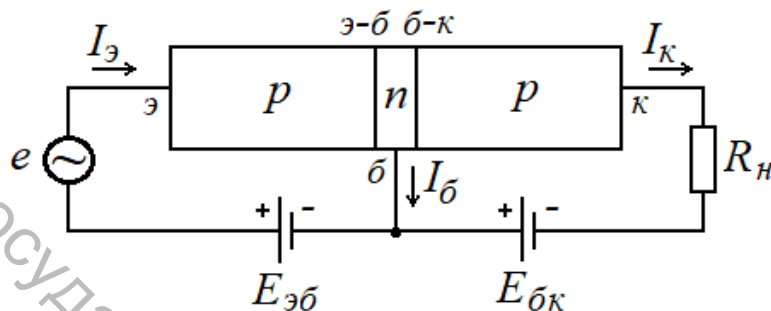


Рисунок 8.1 – Схема биполярного транзистора

Полярность источника ЭДС $E_{эб}$ на рисунке 8.1 соответствует прямому включению эмиттерно-базового $p-n$ -перехода (э-б), и в цепи эмиттера проходит ток $I_{э}$. При этом «дырки» из области эмиттера попадают в область базы, где происходит их рекомбинация с электронами. Так как концентрация электронов в базе невелика, основная часть попавших в неё «дырок» не участвует в рекомбинации и остается свободной, перемещаясь под действием электрического поля источника. Таким образом, эти «дырки» оказываются в зоне действия относительно большого отрицательного потенциала источника ЭДС $E_{бк}$ и, пересекая базово-коллекторный $p-n$ -переход, образуют ток коллектора $I_{к}$.

Аналогично функционирует биполярный транзистор типа $n-p-n$. Отличие заключается только в противоположной полярности источников ЭДС и в противоположном знаке зарядов, создающих ток коллектора.

На электрических принципиальных схемах биполярные транзисторы изображают следующим образом (рис. 8.2):



Рисунок 8.2 – Графическое обозначение биполярных транзисторов типа $p-n-p$ (а) и $n-p-n$ (б)

Рассмотренная выше схема подключения биполярного транзистора (рис. 8.1) называется схемой с общей базой. На принципиальных электрических схемах она изображается следующим образом (рис. 8.3):

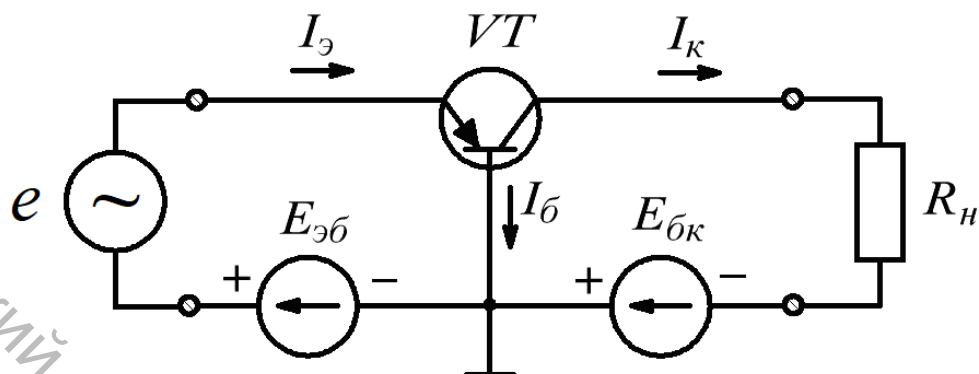


Рисунок 8.3 – Схема биполярного транзистора с общей базой

Недостатками схемы с общей базой являются низкое входное сопротивление (единицы Ом), большое выходное сопротивление (сотни кОм) и отсутствие усиления по току.

Более широкое применение в электронных приборах получила схема биполярного транзистора с общим эмиттером (рис. 8.4).

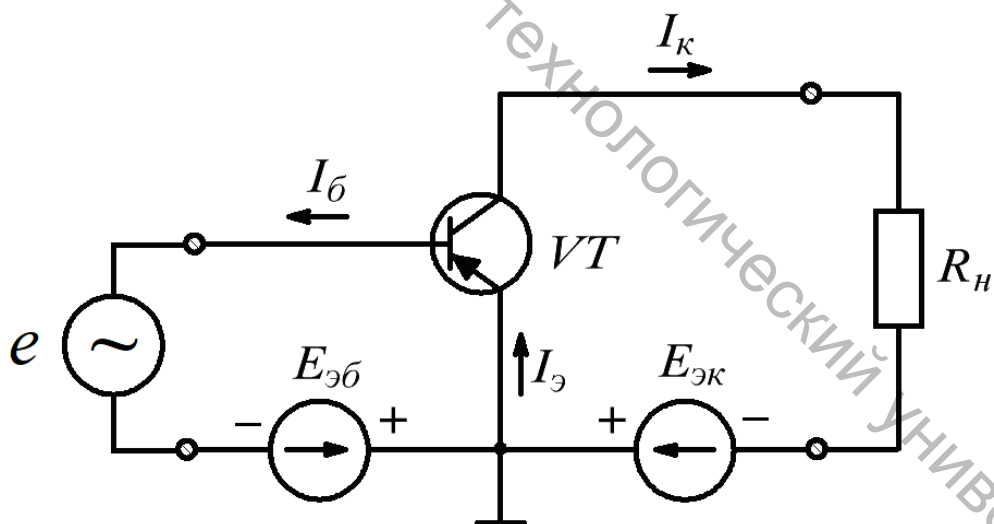


Рисунок 8.4 – Схема биполярного транзистора с общим эмиттером

В отличие от схемы с общей базой данная схема обладает значительно большим входным сопротивлением (сотни Ом). Выходное сопротивление схемы тоже достаточно велико (десятки кОм), что позволяет проектировать многокаскадные схемы без специальных согласующих устройств. Коэффициент передачи по току β составляет десятки-сотни единиц.

Связь между входными и выходными током и напряжением биполярного транзистора определяют с помощью статических входных (рис. 8.5) и выходных (рис. 8.6) характеристик.

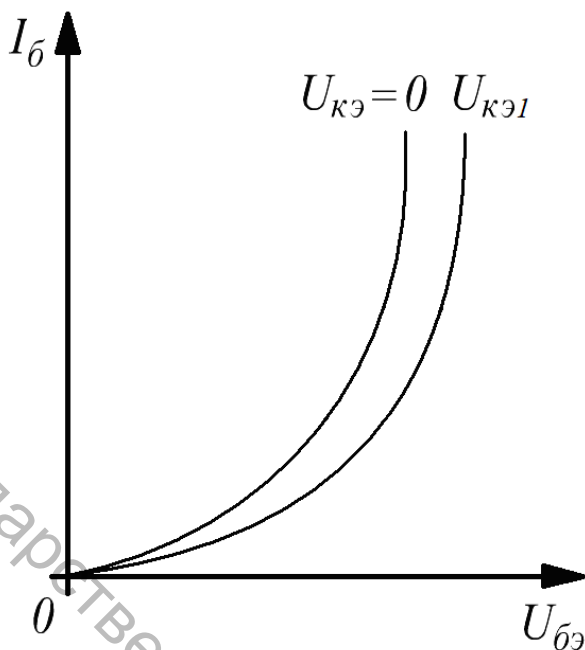


Рисунок 8.5 – Входные характеристики биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером

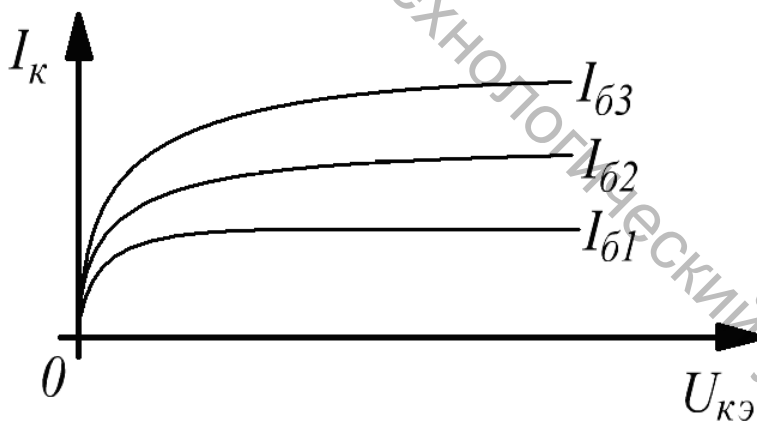


Рисунок 8.6 – Выходные характеристики биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером

Каждая из входных статических характеристик определяется при поддержании неизменным напряжения между коллектором и эмиттером транзистора $U_{кэ}$ (рис. 8.5). Каждая из выходных статических характеристик определяется при поддержании неизменным тока базы транзистора $I_б$ (рис. 8.6).

Порядок выполнения работы в программе Electronics Workbench

1. Произвести моделирование схемы на рисунке 8.7, выбрав в качестве транзистора элемент PNP Transistor панели Transistors (модель КТ3107Е). В случае необходимости кнопками Rotate и Flip Horizontal повернуть транзистор в требуемое положение. Из библиотеки компонентов Sources выбрать генератор ЭДС Battery и генератор тока DC Current Source.

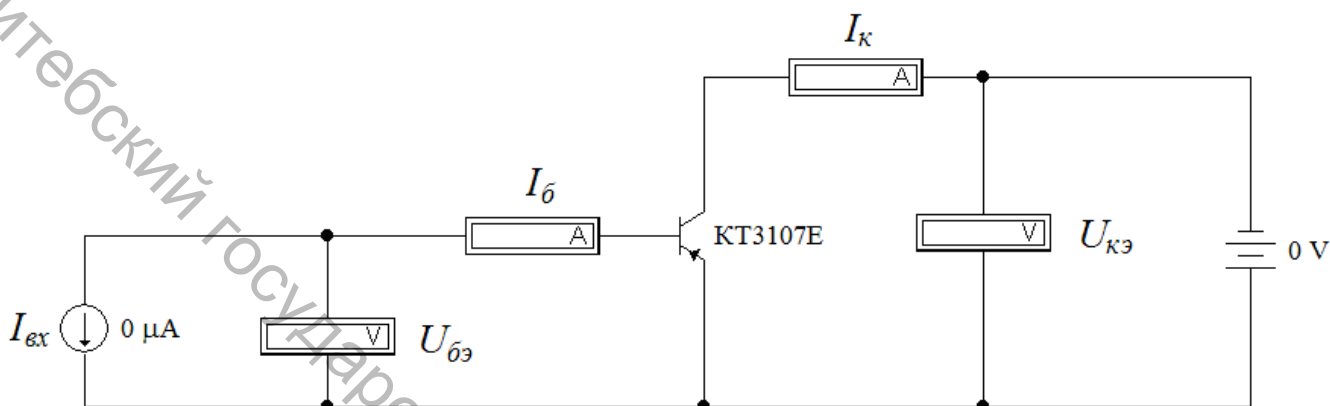


Рисунок 8.7 – Схема для исследования характеристик биполярного транзистора

2. Для построения входных характеристик транзистора установить фиксированные значения напряжения $U_{кэ}$, указанные в таблице 8.1.

Таблица 8.1 – Данные для построения входных характеристик транзистора

$U_{кэ} = 0 В$			$U_{кэ} = -5 В$		
$I_{вх}, мкА$	$I_{б}, мкА$	$U_{бэ}, В$	$I_{вх}, мкА$	$I_{б}, мкА$	$U_{бэ}, В$
0			0		
5			5		
10			10		
15			15		
20			20		
25			25		
30			30		
50			50		
100			100		
200			200		
300			300		

По результатам эксперимента построить в масштабе входные характеристики $I_{\bar{o}}(U_{\bar{o}\bar{э}})$ биполярного транзистора (по аналогии с рисунком 8.5).

3. Для построения выходных характеристик транзистора установить фиксированные значения тока базы $I_{\bar{o}}$, указанные в таблице 8.2. Изменяя значения напряжения между коллектором и эмиттером $U_{кэ}$ согласно таблице 8.2, измерить ток коллектора $I_{к}$. Результаты измерений занести в таблицу 8.2.

Таблица 8.2 – Данные для построения выходных характеристик транзистора

$I_{\bar{o}} = 50 \text{ мкА}$		$I_{\bar{o}} = 100 \text{ мкА}$		$I_{\bar{o}} = 200 \text{ мкА}$	
$I_{к}, \text{мкА}$	$U_{кэ}, \text{В}$	$I_{к}, \text{мкА}$	$U_{кэ}, \text{В}$	$I_{к}, \text{мкА}$	$U_{кэ}, \text{В}$
	0		0		0
	1		1		1
	2		2		2
	3		3		3
	4		4		4
	5		5		5
	7		7		7
	10		10		10
	15		15		15
	20		20		20
	25		25		25
	30		30		30

По результатам эксперимента построить выходные характеристики $I_{к}(U_{кэ})$ биполярного транзистора (по аналогии с рисунком 8.6).

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Рисунок 8.4.
3. Таблицы 8.1 и 8.2 с результатами экспериментов.
4. Входные характеристики $I_{\bar{o}}(U_{\bar{o}\bar{э}})$ биполярного транзистора по данным таблицы 8.1.
5. Выходные характеристики $I_{к}(U_{кэ})$ биполярного транзистора по данным таблицы 8.2.

Контрольные вопросы

1. Что такое биполярный транзистор, и на чем основан принцип его работы?
2. Какие существуют схемы подключения биполярных транзисторов.
3. Что представляют собой входные и выходные характеристики биполярного транзистора?

Лабораторная работа 9

Исследование однокаскадного усилителя низкой частоты

Цель работы: изучение назначения элементов и исследование характеристик усилителей низкой частоты, выполненных на биполярных транзисторах (БТ).

Теоретические сведения

Электронным усилителем (ЭУ) 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 в активных управляемых элементах (УЭ), как правило, биполярных и полевых транзисторах.

Основными параметрами ЭУ являются:

1. Коэффициент усиления по напряжению:

$$K_U = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}. \quad (9.1)$$

2. Коэффициент усиления по току:

$$K_I = \frac{I_{вых}}{I_{вх}}. \quad (9.2)$$

2. Коэффициент усиления по мощности:

$$K_P = \frac{P_{вых}}{P_{вх}}. \quad (9.3)$$

Основными характеристиками ЭУ являются:

1. Амплитудная характеристика (АХ) – зависимость амплитуды выходного сигнала от амплитуды сигнала на входе.
2. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) – зависимость коэффициента усиления ЭУ от частоты подаваемого на его вход сигнала.
3. Фазочастотная характеристика (ФЧХ) – зависимость фазового сдвига между выходным и входным сигналами от частоты подаваемого на вход ЭУ сигнала.

В зависимости от того, какой из выводов БТ в ЭУ 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 (т.е. усиливается мощность).

Наибольшее распространение среди усилительных каскадов получила схема с ОЭ и термостабилизацией режима покоя (рис. 9.1).

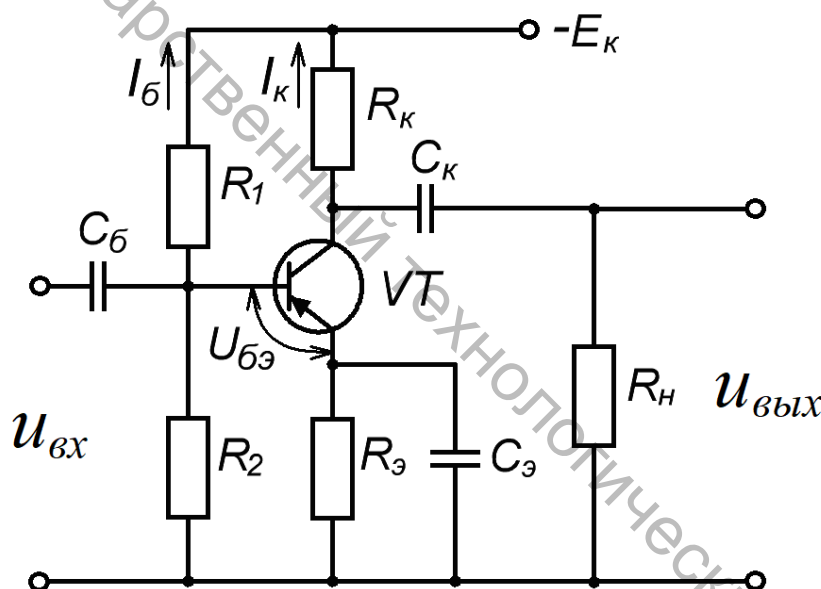


Рисунок 9.1 – Усилительный каскад на БТ с ОЭ и термостабилизацией режима покоя

Основными элементами схемы являются:

- источник питания E_k , осуществляющий подачу энергии в выходную цепь ЭУ 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 БТ.

Остальные элементы схемы являются вспомогательными. Конденсаторы $C_{\bar{o}}$ и C_k являются разделительными. $C_{\bar{o}}$ используется для развязки входной цепи ЭУ 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 образуют делитель напряжения и задают параметры начального режима работы БТ: ток покоя базы $I_{\bar{o}0}$ и напряжение покоя между базой и эмиттером $U_{\bar{o}э0}$.

Рассмотрим принцип действия данного ЭУ.

При отсутствии входного сигнала во входной и в выходной цепях ЭУ протекают создаваемые источником питания E_k токи покоя усилителя $I_{\bar{o}0}$ и I_{k0} , поддерживающие БТ в активном (проводящем) состоянии.

При подаче на вход ЭУ переменного напряжения:

- в случае отрицательной полуволны напряжения $u_{вх}$ отрицательное напряжение на базе БТ увеличивается, увеличивается и ток базы $i_{\bar{o}}$; БТ начинает работать в пропускном режиме, ток его коллектора i_k возрастает, а выходное напряжение (согласно второму закону Кирхгофа) становится менее отрицательным:

$$u_{вых} = -E_k + i_k R_k; \quad (9.4)$$

- в случае положительной полуволны $u_{вх}$ напряжение на базе БТ становится менее отрицательным, ток $i_{\bar{o}}$ уменьшается, БТ прикрывается, уменьшается ток i_k , а выходное напряжение согласно (9.4) становится более отрицательным.

В результате форма усиливаемого сигнала сохраняется неизменной, а амплитуда увеличивается, так как $|E_k| \gg |u_{вх}|$.

Работа данного каскада зависит от температурного режима. При изменении температуры изменяется прежде всего I_{k0} , а значит и коэффициент усиления тока БТ. Это может привести к переходу БТ в работу на нелинейных участках характеристик, в результате чего нарушится форма выходного сигнала.

Для термостабилизации усилительного каскада в цепь эмиттера БТ включен резистор $R_э$, создающий отрицательную обратную связь (ООС) по току. При изменении температуры БТ изменяется напряжение между его базой и эмиттером $U_{\bar{o}э0}$ за счет изменения напряжения на $R_э$. Изменение $U_{\bar{o}э0}$

приводит к изменению $I_{\delta 0}$, а значит и $I_{к0}$. Таким образом, $I_{к0}$ будет поддерживаться на заданном уровне.

Емкость C_9 шунтирует R_9 по переменному току, исключая тем самым проявление ООС в ЭУ по переменным составляющим. Отсутствие C_9 привело бы к уменьшению коэффициентов усиления ЭУ.

Так как в схеме с ОЭ фаза выходного сигнала противоположна фазе входного, такой ЭУ называют инвертирующим.

Порядок выполнения работы на унифицированном стенде УИЛС-1

1. Для выполнения работы выбрать модуль «RC-УСИЛИТЕЛИ НЧ», схема которого представлена на рисунке 9.2, и разместить его на наборном поле. Собрать схему, соответствующую рисунку 9.1, замкнув клеммы разъемов 1 и 4 схемы. Подключить к клеммам $K4$ и $K6$ нагрузку, используя блок переменного сопротивления стенда и установив на нем указанное преподавателем значение сопротивления нагрузки.

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

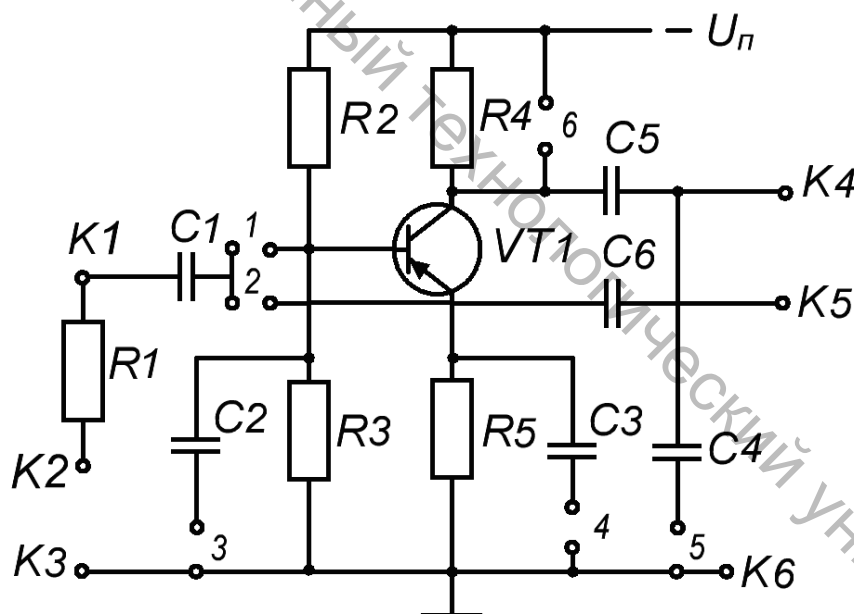


Рисунок 9.2 – Схема модуля «RC-УСИЛИТЕЛИ НЧ»

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 9.1, вольтметром измерить напряжение сигнала на выходе усилителя. Результаты измерений занести в таблицу 9.1.

Таблица 9.1 – Результаты эксперимента

$U_{вх}, B$	0,01	0,03	0,05	0,07	0,1	0,5	1	3
$U_{вых}, B$								

По результатам эксперимента построить характеристику усилителя $U_{вых}(U_{вх})$.

4. Для получения АЧХ усилителя установить напряжение на входе схемы равным 0,03 В (в процессе проведения опыта это значение необходимо поддерживать постоянным). Изменяя в соответствии с данными таблицы 9.2 частоту входного сигнала, измерить выходное напряжение усилителя. Результаты измерений занести в таблицу 9.2.

Таблица 9.2 – Результаты эксперимента и расчета

f	20 Гц	50 Гц	100 Гц	500 Гц	1 кГц	5 кГц	10 кГц	50 кГц	100 кГц	150 кГц	200 кГц
$U_{вых}, B$											
K_U											
$lg f$											

Рассчитать значения K_U и $lg f$. Результаты расчета занести в таблицу 9.2. Построить АЧХ усилителя в форме зависимости $K_U(lg f)$.

Порядок выполнения работы в программе Electronics Workbench

1. Произвести моделирование схемы усилительного каскада на БТ с ОЭ (рис. 9.3). Вольтметр схемы (на вкладке Value окна параметров вольтметра Voltmeter properties) перевести в положение «АС». Изменяя напряжение входного сигнала в соответствии с данными таблицы 9.1, измерить напряжение сигнала на выходе усилителя. Результаты измерений (показания вольтметра, зафиксированные в момент включения схемы) занести в таблицу 9.1.

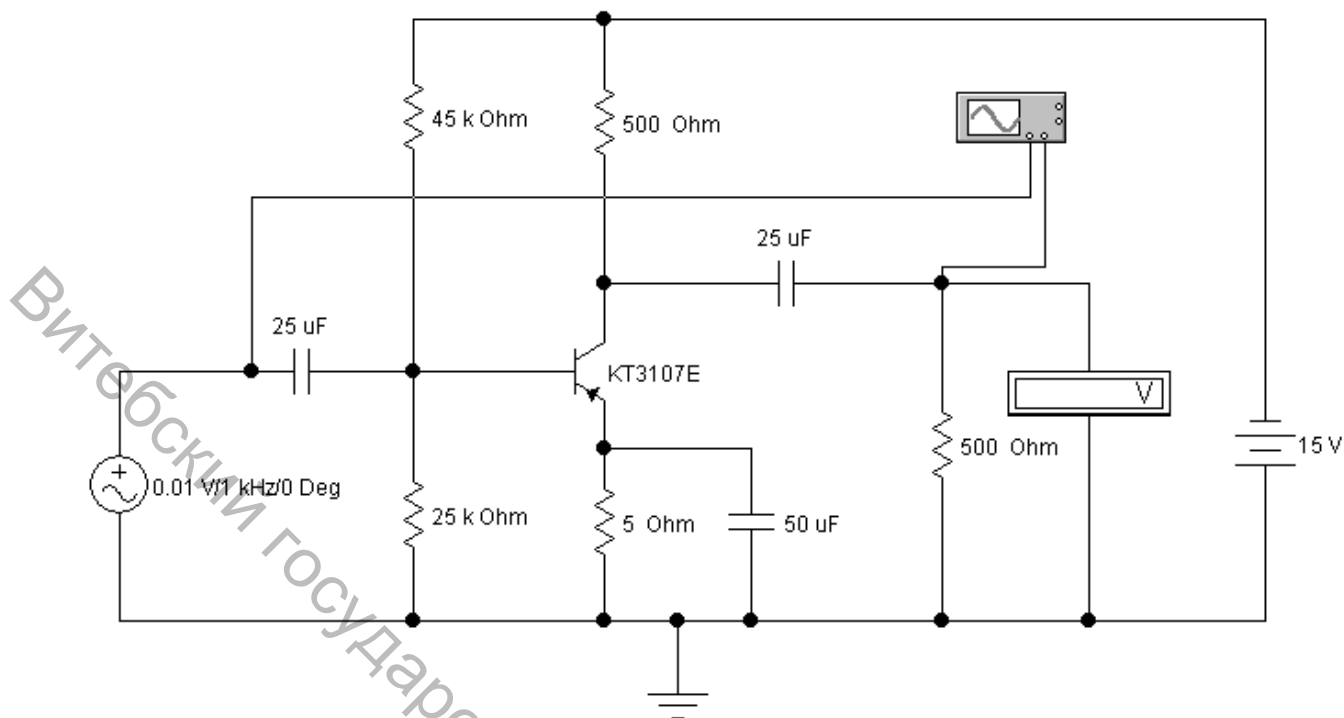


Рисунок 9.3 – Схема моделирования усилительного каскада на БТ с ОЭ

По результатам эксперимента построить 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 9.2 частоту входного сигнала, измерить выходное напряжение усилителя. Результаты измерений (показания вольтметра, зафиксированные в момент включения схемы) занести в таблицу 9.2.

Рассчитать значения K_U и $lg f$. Результаты расчета занести в таблицу 9.2. Построить АЧХ усилителя в форме зависимости $K_U(lg f)$.

3. Для получения осциллограмм напряжений схемы при отсутствии нелинейных искажений сигнала установить напряжение на входе схемы $0,01 В$ и частоту сигнала $1 кГц$. Настройку осциллографа произвести в соответствии с рисунком 9.4.

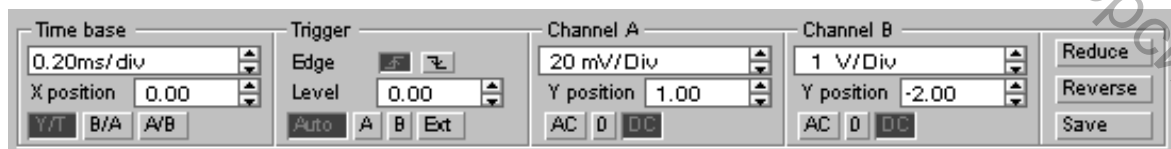


Рисунок 9.4 – Настройки осциллографа

Зарисовать в масштабе осциллограммы напряжений на входе и на выходе схемы в соответствии с рисунком 9.5.

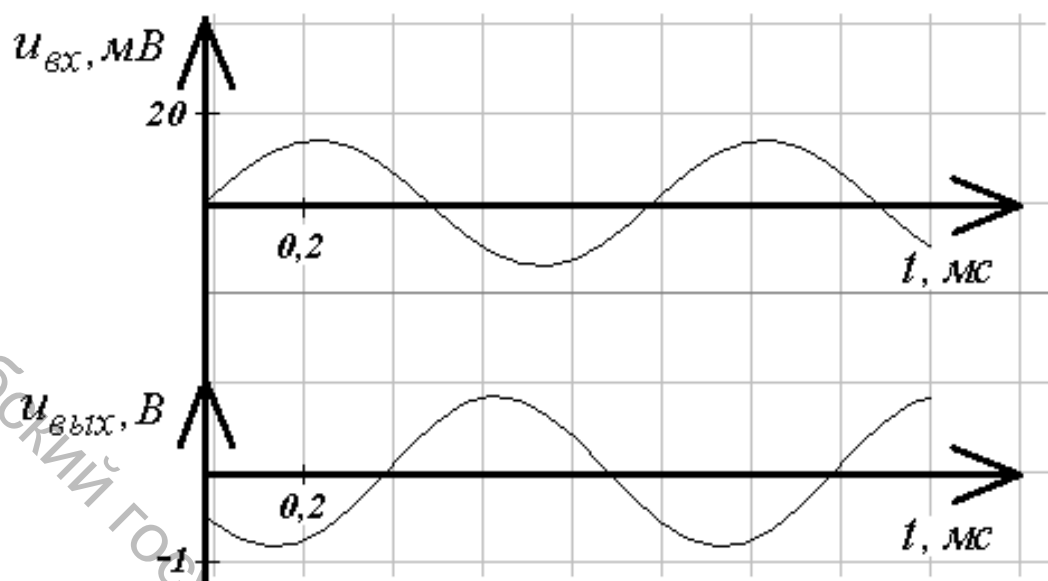


Рисунок 9.5 – Осциллограммы напряжений при отсутствии нелинейных искажений сигнала

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 и на выходе схемы в соответствии с рисунком 9.6.

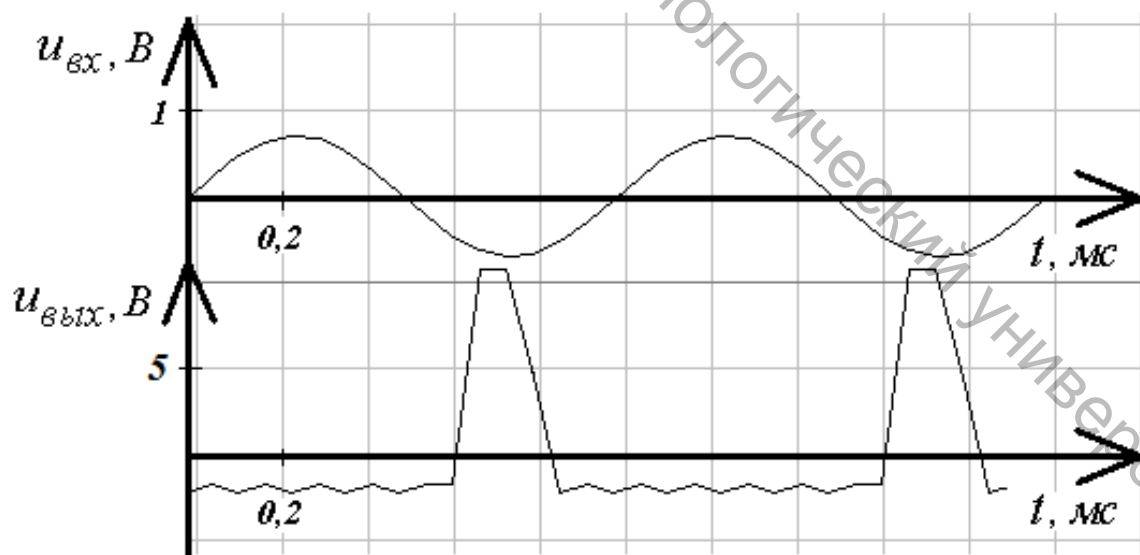


Рисунок 9.6 – Осциллограммы напряжений при наличии нелинейных искажений сигнала

Содержание отчета
(при выполнении работы на унифицированном стенде УИЛС-1)

1. Название и цель работы.
2. Рисунок 9.1.
3. Таблицы 9.1 и 9.2 с результатами экспериментов.
4. Характеристика усилителя $U_{вых}(U_{вх})$ по данным таблицы 9.1.
5. АЧХ усилителя в форме зависимости $K_U(lg f)$ по данным таблицы 9.2.

Содержание отчета
(при выполнении работы в программе Electronics Workbench)

1. Название и цель работы.
2. Рисунок 9.1.
3. Таблицы 9.1 и 9.2 с результатами моделирования схемы рисунка 9.3.
4. Характеристика усилителя $U_{вых}(U_{вх})$ по данным таблицы 9.1.
5. АЧХ усилителя в форме зависимости $K_U(lg f)$ по данным таблицы 9.2.
6. Осциллограммы напряжений $u_{вх}(t)$ на входе и $u_{вых}(t)$ на выходе усилителя при отсутствии и при наличии нелинейных искажений сигнала.

Контрольные вопросы

1. Что такое ЭУ и на чем основан принцип его работы?
2. Каковы основные параметры и характеристики ЭУ?
3. Поясните назначение элементов схемы ЭУ на БТ с ОЭ и термостабилизацией режима покоя.

Лабораторная работа 10

Исследование мультивибратора

Цель работы: изучение устройства и принципа работы мультивибратора, определение зависимости его параметров от параметров элементов схемы.

Теоретические сведения

Мультивибратор – автоколебательное устройство, генерирующее последовательность прямоугольных импульсов, амплитуда U_m , частота f и

коэффициент заполнения Q которых определяются 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 на биполярных транзисторах по типовой схеме (рис. 10.1).

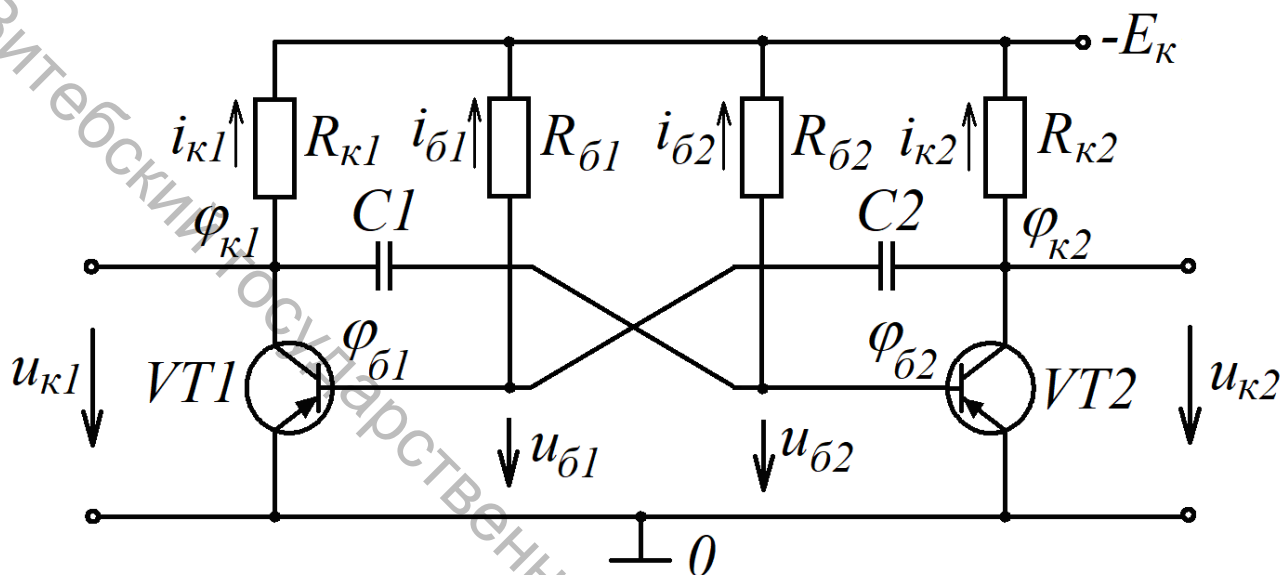


Рисунок 10.1 – Мультивибратор на БТ

Схема симметрична по структуре, параметры симметричных элементов одинаковы: $R_{K1} = R_{K2}$, $R_{Б1} = R_{Б2}$, $C1 = C2$, транзисторы $VT1$ и $VT2$ одного типа. База одного транзистора соединена с коллектором другого через конденсатор, чем обеспечивается положительная обратная связь (ПОС).

Так как схема симметрична, то при подаче напряжения питания от источника E_K токи коллекторов i_{K1} и i_{K2} 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 i_{K1} скачком возрос в сравнении с i_{K2} . При этом увеличится падение напряжения на резисторе R_{K1} , а потенциал коллектора φ_{K1} станет менее отрицательным. Напряжение на коллекторе u_{K1} получит положительное приращение, которое полностью приложится к напряжению на базе $u_{Б2}$ транзистора $VT2$, так как напряжение на конденсаторе $C1$ скачком измениться не может. Потенциал базы $\varphi_{Б2}$ транзистора $VT2$ станет менее отрицательным, транзистор $VT2$ прикроется, и ток его коллектора i_{K2} уменьшится. Вследствие этого произойдет уменьшение падения напряжения на резисторе R_{K2} и потенциал коллектора φ_{K2} станет более отрицательным.

Отрицательный скачок напряжения $u_{к2}$ передастся на базу транзистора $VT1$ и, суммируясь с отрицательным потенциалом $\varphi_{б1}$, еще более откроет транзистор $VT1$. Ток $i_{к1}$ снова возрастет. Это вызовет новый положительный скачок напряжения $u_{к1}$, 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 $VT1$ полностью откроется и будет находиться в насыщенном состоянии, а транзистор $VT2$ полностью закроется и будет находиться в режиме отсечки. С этого момента действие ПОС прекращается и лавинообразный процесс заканчивается.

По окончании лавинообразного процесса напряжение $u_{к1}$ будет близким к нулю (рис. 10.2), а напряжение $u_{к2}$ будет примерно равным $-E_k$. Состояние схемы по окончании лавинообразного процесса называется квазиустойчивым равновесием, так как в этом состоянии мультивибратор не может находиться длительное время.

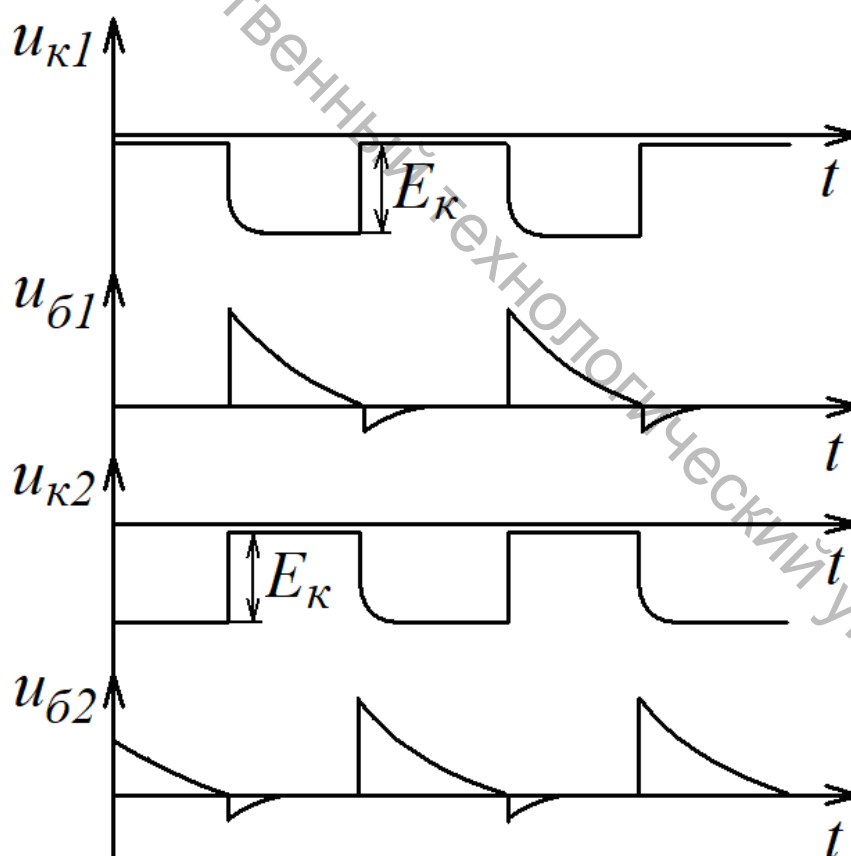


Рисунок 10.2 – Временные диаграммы напряжений мультивибратора

Открытое состояние транзистора $VT1$ поддерживается отрицательным смещением на базе, подаваемым от источника питания E_k через резистор $R_{\bar{6}1}$; транзистор $VT2$ закрыт положительным потенциалом на конденсаторе $C1$.

Конденсатор $C1$ при этом начинает перезаряжаться по цепи: $0, VT1, C1, R_{\bar{6}2}, -E_k$ (рис. 10.1). Ток перезарядки и напряжение на конденсаторе изменяются с постоянной времени $\tau_{n1} = R_{\bar{6}2}C1$. В момент времени, когда напряжение на конденсаторе $C1$ упадет до нуля, транзистор $VT2$ откроется, появится ток i_{k2} и в схеме произойдет аналогичный предыдущему лавинообразный процесс, в результате которого транзистор $VT1$ полностью закроется, а $VT2$ 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

1. Для выполнения работы выбрать модуль «МУЛЬТИВИБРАТОРЫ», схема которого представлена на рисунке 10.3, и разместить его на наборном поле. Подать напряжение питания $12 В$ с блока постоянных напряжений в соответствии с обозначением полярности на модуле. Подготовить к работе осциллограф, используя внешнюю синхронизацию осциллографа подачей сигнала с гнезда $K1$ модуля.

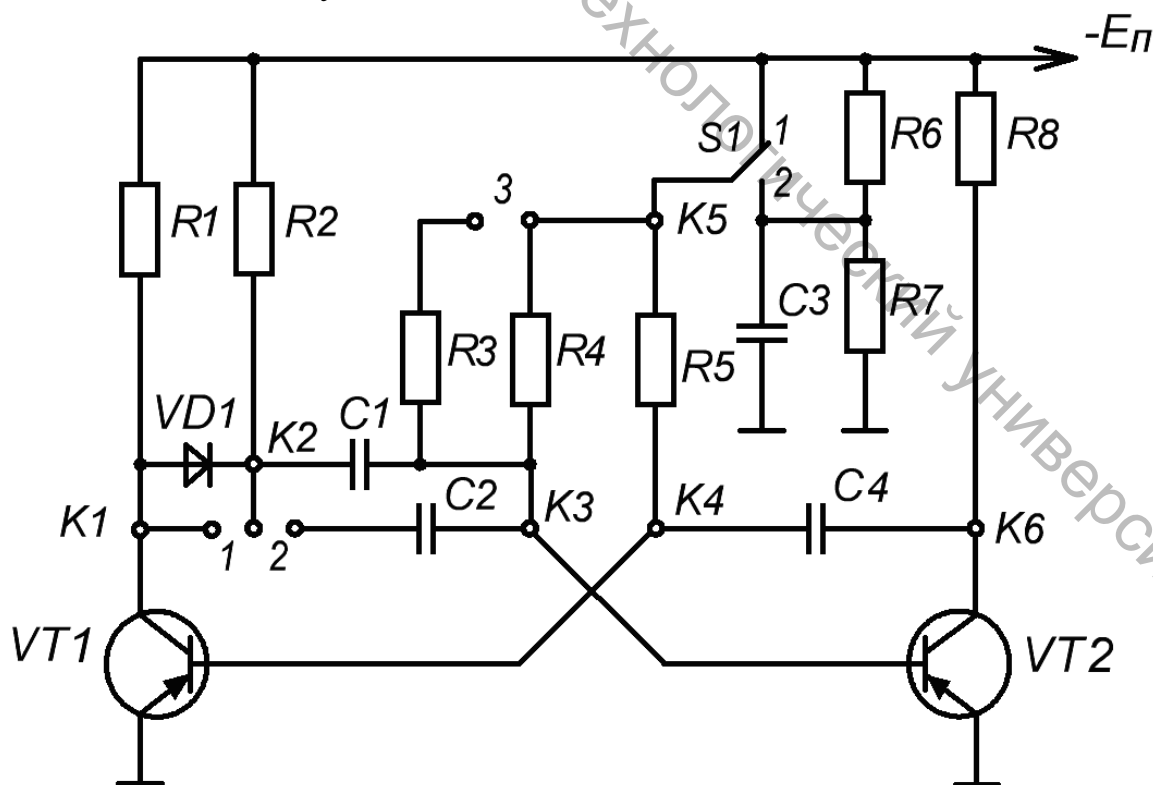


Рисунок 10.3 – Схема модуля «МУЛЬТИВИБРАТОРЫ»

2. Подключая вход осциллографа поочередно к гнездам $K1$, $K6$, $K4$, $K3$, зарисовать осциллограммы напряжений $u_{K1}(t)$, $u_{K2}(t)$, $u_{B1}(t)$, $u_{B2}(t)$. Устанавливая при помощи перемычек 2, 3 и переключателя $S1$ различные варианты времязадающей цепи, зарисовать осциллограммы напряжений $u_{K1}[C1||C2](t)$, $u_{K1}[R3||R4](t)$, $u_{K1}[S1(2)](t)$ для точки $K1$ модуля.

Исследовать влияние диода $VD1$ на форму выходного импульса, зарисовав осциллограмму напряжения $u_{K1}[\text{без } VD1](t)$ для точки $K1$ модуля при замкнутом накоротко диоде $VD1$.

3. По зарисованным осциллограммам на коллекторах транзисторов определить, обозначив в соответствии с рисунком 10.4 длительности полупериодов: T_1 – нахождения транзистора в режиме насыщения, T_2 – нахождения транзистора в режиме отсечки.

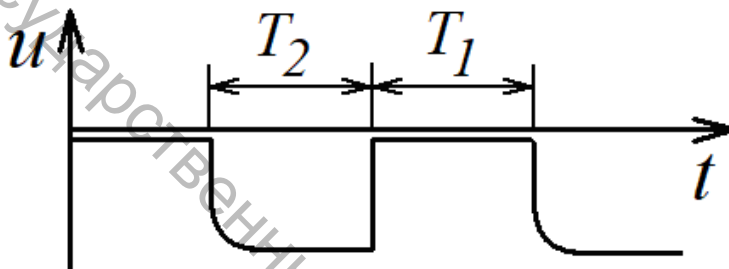


Рисунок 10.4 – Длительности полупериодов

По значениям T_1 и T_2 рассчитать коэффициент заполнения:

$$Q = \frac{T_1}{T_1 + T_2} \quad (10.1)$$

и частоту импульсов мультивибратора:

$$f = \frac{1}{T_1 + T_2}. \quad (10.2)$$

Значения T_1 , T_2 , Q и f записать в отчет по лабораторной работе в соответствии с порядком чередования осциллограмм.

Порядок выполнения работы в программе Electronics Workbench

1. Произвести моделирование схемы мультивибратора на биполярных транзисторах в соответствии с рисунком 10.5.

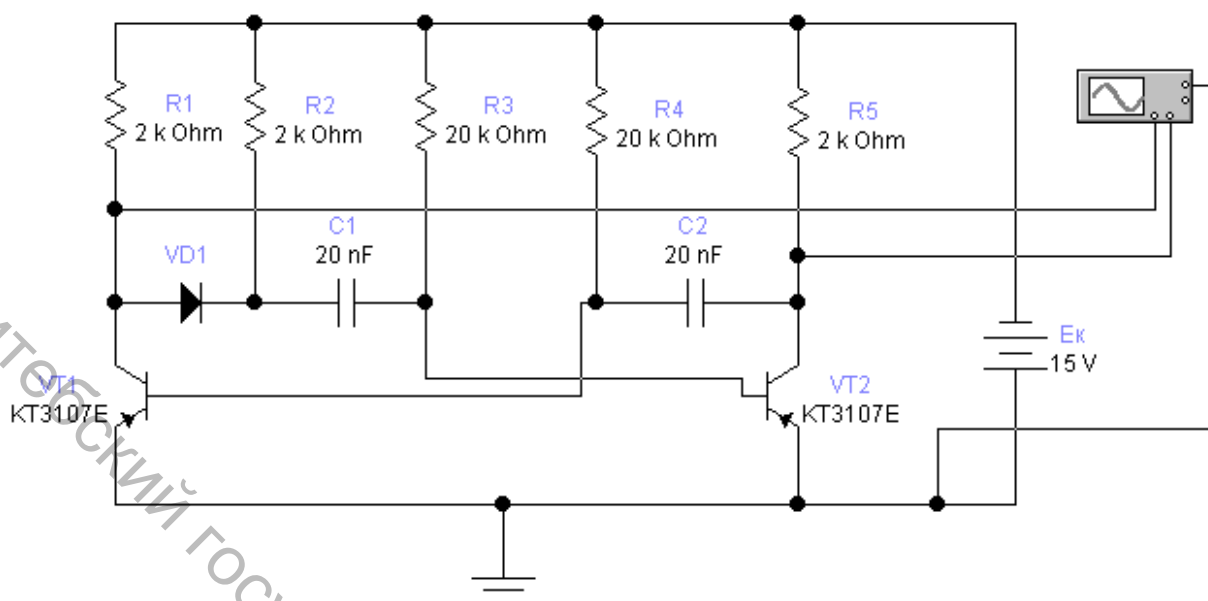


Рисунок 10.5 – Схема моделирования мультивибратора на биполярных транзисторах

2. Зарисовать в масштабе осциллограммы напряжений на коллекторах транзисторов $u_{к1}(t)$ и $u_{к2}(t)$ в соответствии с рисунком 10.6.

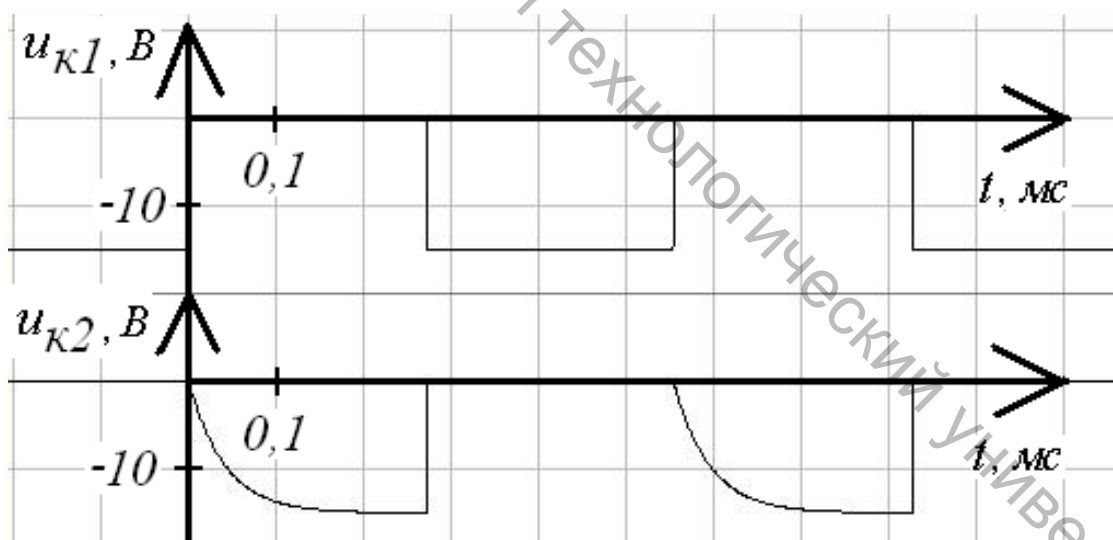


Рисунок 10.6 – Осциллограммы напряжений на коллекторах транзисторов

3. Подключив входы осциллографа к базам обоих транзисторов, зарисовать в масштабе осциллограммы напряжений на базах транзисторов $u_{б1}(t)$ и $u_{б2}(t)$ в соответствии с рисунком 10.7.

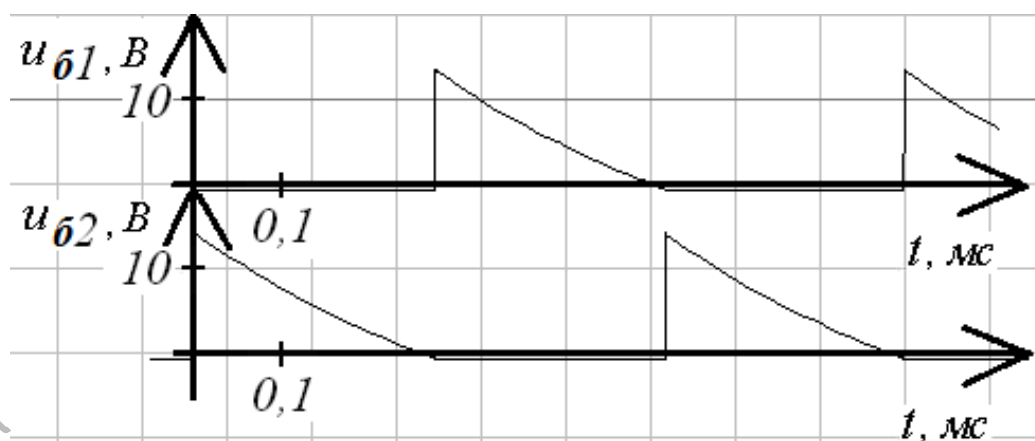


Рисунок 10.7 – Осциллограммы напряжений на базах транзисторов

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

– осциллограмму напряжения $u_{к1}[R_{б2}/2](t)$, уменьшив в два раза сопротивление резистора $R3$;

– осциллограмму напряжения $u_{к1}[2C_1](t)$, увеличив в два раза емкость конденсатора $C1$.

– осциллограмму напряжения $u_{к1}[\text{без } VD1](t)$, замкнув накоротко диод $VD1$.

5. По зарисованным осциллограммам импульсов на коллекторах транзисторов определить, обозначив в соответствии с рисунком 10.4, длительности полупериодов: T_1 – нахождения транзистора в режиме насыщения, T_2 – нахождения транзистора в режиме отсечки.

По значениям T_1 и T_2 рассчитать по (10.1) коэффициент заполнения и по (10.2) частоту импульсов мультивибратора. Значения T_1 , T_2 , Q и f записать в отчет по лабораторной работе в соответствии с порядком чередования осциллограмм.

Содержание отчета

(при выполнении работы на унифицированном стенде УИЛС-1)

1. Название и цель работы.
2. Рисунок 10.3.
3. Осциллограммы напряжений: $u_{к1}(t)$, $u_{к2}(t)$, $u_{б1}(t)$, $u_{б2}(t)$, $u_{к1}[C1 \parallel C2](t)$, $u_{к1}[R3 \parallel R4](t)$, $u_{к1}[SI(2)](t)$, $u_{к1}[\text{без } VD1](t)$.
4. Обозначение на осциллограммах напряжений на коллекторах транзисторов длительностей полупериодов T_1 и T_2 и определение их значений.
5. Расчет Q и f для осциллограмм напряжений на коллекторах транзисторов.

Содержание отчета (при выполнении работы в программе Electronics Workbench)

1. Название и цель работы.
2. Рисунок 10.1.
3. Осциллограммы напряжений: $u_{к1}(t)$, $u_{к2}(t)$, $u_{б1}(t)$, $u_{б2}(t)$, $u_{к1}[R_{б2}/2](t)$, $u_{к1}[2C_1](t)$, $u_{к1}[безVD1](t)$.
4. Обозначение на осциллограммах напряжений на коллекторах транзисторов длительностей полупериодов T_1 и T_2 и определение их значений.
5. Расчет Q и f для осциллограмм напряжений на коллекторах транзисторов.

Контрольные вопросы

1. Что такое мультивибратор?
2. Поясните принцип действия мультивибратора.
3. Поясните методику расчёта длительности, коэффициента заполнения и частоты генерации импульсов мультивибратора.

Лабораторная работа 11

Исследование генератора пилообразного напряжения

Цель работы: изучение устройства и принципа работы генератора пилообразного напряжения, определение зависимости его параметров от параметров элементов схемы.

Теоретические сведения

Генератором пилообразного напряжения (ГПН) называется устройство, у которого выходное напряжение в течение интервала времени рабочего хода t_p линейно нарастает, а затем за короткий интервал времени обратного хода t_o возвращается к начальному значению (рис. 11.1).

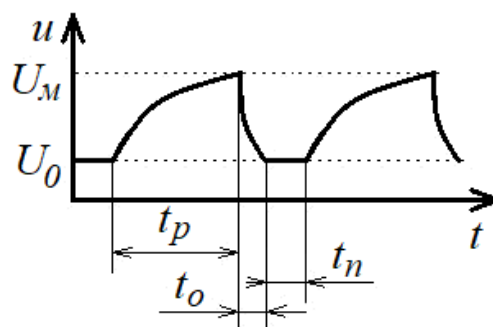


Рисунок 11.1 – Диаграмма напряжения на выходе ГПН

Также иногда такие устройства называют генераторами линейно-изменяющегося напряжения (ГЛИН). Их широко применяют в устройствах развёртки, преобразователях время – амплитуда, знакогенераторах и других устройствах радиоэлектроники.

ГПН работает как в автоколебательном, так и в ждущем режимах. Принцип работы простейших ГПН в ждущем режиме основан на использовании интегрирующей цепи (конденсатора) вместе с электронным ключом (транзистором).

Недостаток большинства таких схем – нелинейность изменяющегося напряжения u_C на конденсаторе. В простых схемах ГПН к концу зарядки конденсатора ток зарядки уменьшается, и линейность изменения u_C нарушается. Повысить линейность пилообразного напряжения можно, обеспечив зарядку конденсатора стабильным током.

Схема ГПН в ждущем режиме с токостабилизирующей цепью представлена на рисунке 11.2.

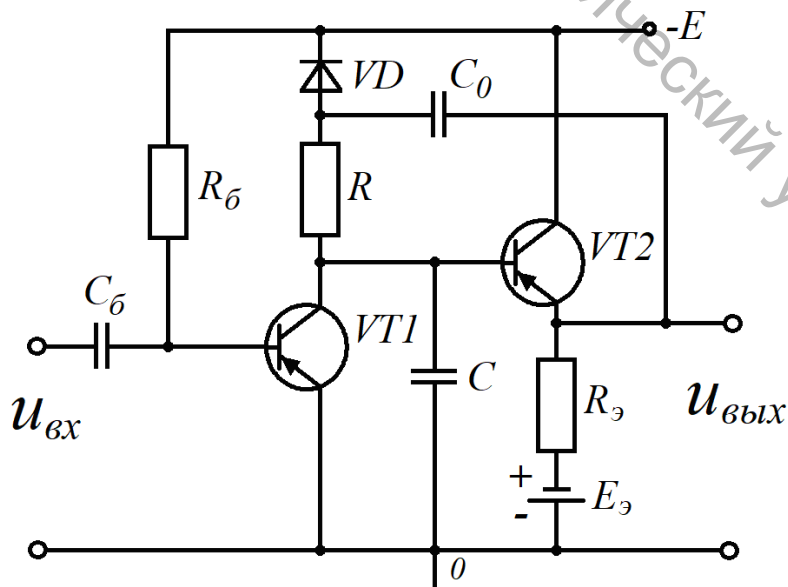


Рисунок 11.2 – Схема ГПН с токостабилизирующей цепью

В исходном состоянии транзистор $VT1$ открыт и насыщен, $VT2$ за счёт дополнительного источника E_3 также открыт. При подаче на вход положительного импульса $VT1$ закрывается, и конденсатор C начинает заряжаться по цепи $0, C, R, VD, -E_k$. Приращение напряжения на конденсаторе C через $VT2$ и конденсатор C_0 полностью прикладывается к аноду диода VD . Емкость C_0 выбирается много больше C , чтобы за время заряда конденсатора C напряжение на конденсаторе C_0 не успевало заметно измениться. Таким образом, потенциал анода VD становится ниже $-E_k$ и VD закрывается, а заряд конденсатора C продолжается по цепи $0, C, R, C_0, VT2, -E_k$. При этом ток заряда конденсатора C будет постоянным, так как напряжение на резисторе R за счёт постоянного приращения на аноде VD с ростом u_C остаётся постоянным.

При снятии входного импульса транзистор $VT1$ открывается, и конденсатор C разряжается через его малое сопротивление.

Порядок выполнения работы на унифицированном стенде УИЛС-1

1. Для выполнения работы выбрать модуль «ГЕНЕРАТОР ПИЛООБРАЗНОГО НАПРЯЖЕНИЯ», схема которого представлена на рисунке 11.3, и разместить его на наборном поле. Подать напряжение питания 12 В с блока постоянных напряжений в соответствии с обозначением полярности на модуле. Подготовить к работе осциллограф, используя внешнюю синхронизацию осциллографа подачей сигнала с гнезда K2 модуля.

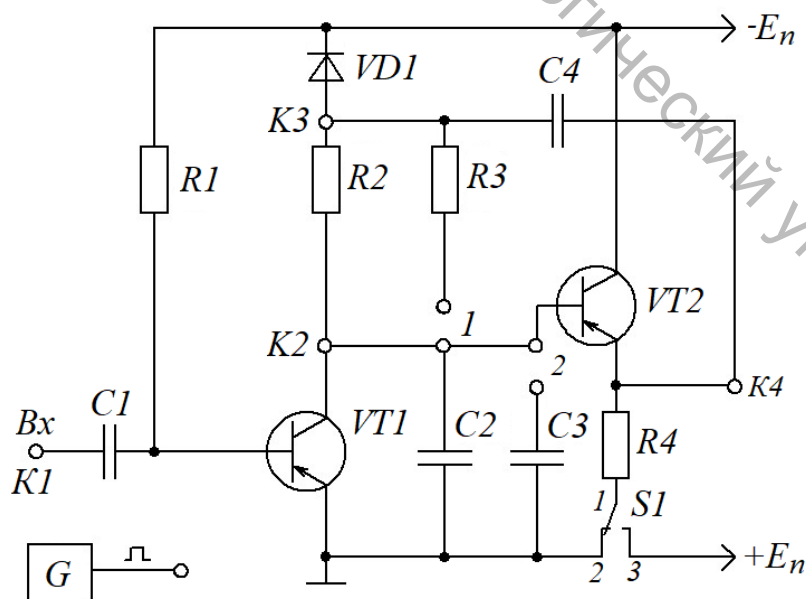


Рисунок 11.3 – Схема модуля «ГЕНЕРАТОР ПИЛООБРАЗНОГО НАПРЯЖЕНИЯ»

2. Подключая вход осциллографа поочередно к выходу генератора прямоугольных импульсов G , гнездам $K2$, $K4$, $K3$, зарисовать осциллограммы напряжений $u_{ген}(t)$, $u_{K1}(t)$, $u_{э2}(t)$, $u_{R2}(t)$. Устанавливая при помощи перемычек 1, 2 и переключателя $S1$ различные варианты времязадающей цепи, зарисовать осциллограммы напряжений $u_{K1}[C2||C3](t)$ и $u_{K1}[R2||R3](t)$ для точки $K2$ модуля. Переведя переключатель $S1$ в положение 3, зарисовать осциллограмму напряжения $u_{э2}[S1(3)](t)$ для точки $K4$ модуля.

3. По зарисованным осциллограммам пилообразного напряжения определить, обозначив в соответствии с рисунком 11.4, размеры a и b (в мм), а также угол φ .

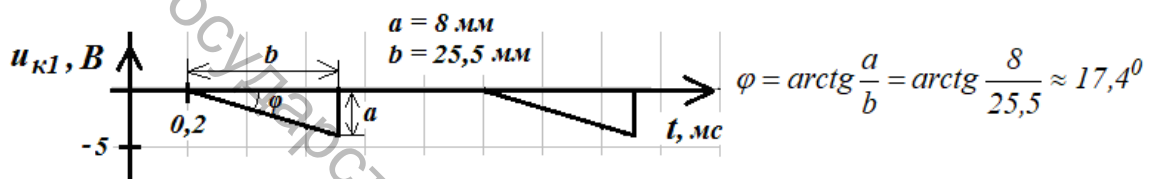


Рисунок 11.4 – Расчет параметров сигналов ГПН

Порядок выполнения работы в программе Electronics Workbench

1. Произвести моделирование схемы ГПН с токостабилизирующей цепью (рис. 11.5).

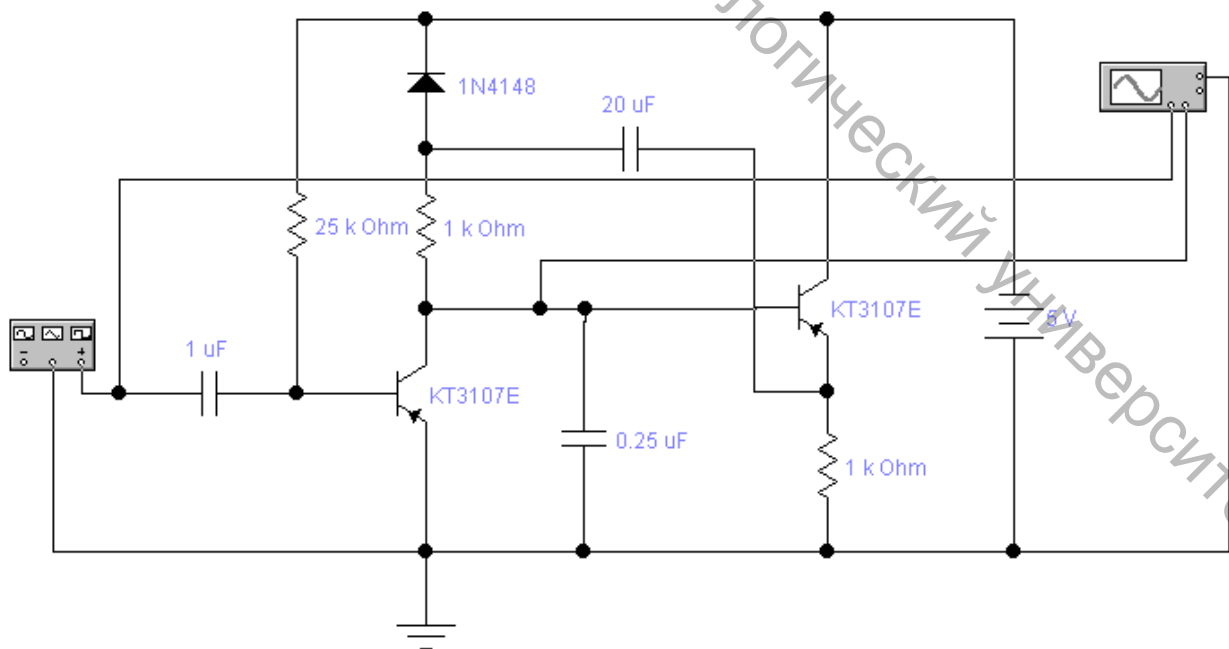


Рисунок 11.5 – Схема моделирования ГПН с токостабилизирующей цепью

Параметры генератора прямоугольных импульсов установить в соответствии с рисунком 11.6.

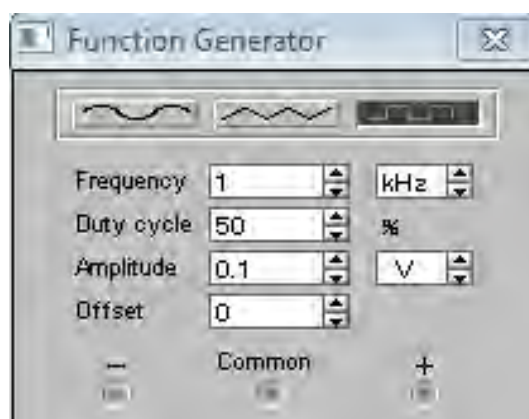


Рисунок 11.6 – Параметры генератора прямоугольных импульсов

2. Зарисовать осциллограммы напряжений $u_{ген}(t)$ на выходе генератора прямоугольных импульсов и $u_{к1}(t)$ на коллекторе управляемого генератором транзистора (рис. 11.7) в масштабе, указанном на рисунке 11.8.

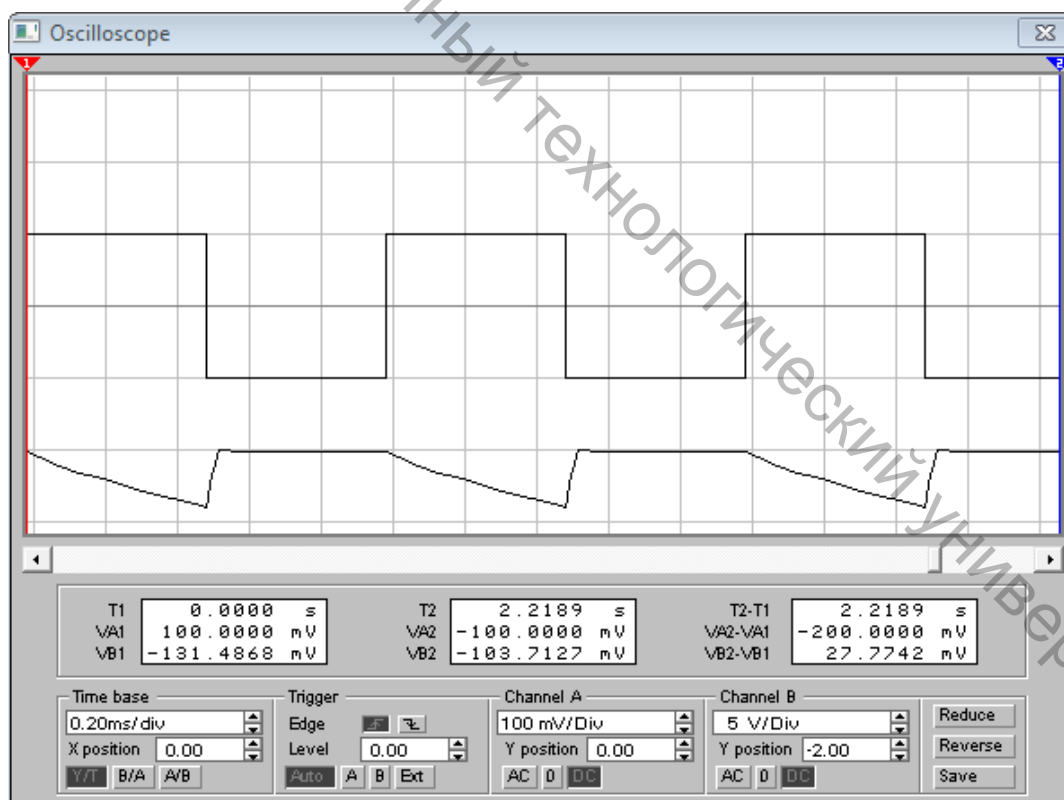


Рисунок 11.7 – Осциллограммы напряжений

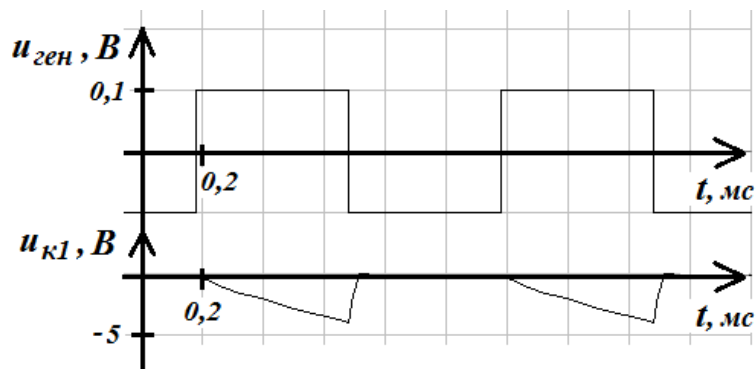


Рисунок 11.8 – Осциллограммы $u_{ген}(t)$ и $u_{к1}(t)$

3. Зарисовать в масштабе:

– осциллограмму напряжения $u_{э2}(t)$, подключив правый измерительный вход осциллографа (Channel B) к эмиттеру транзистора VT2 (рис. 11.2);

– осциллограмму напряжения $u_R(t)$, подключив правый измерительный вход осциллографа (Channel B) к верхнему выводу резистора R (рис. 11.2);

– осциллограмму напряжения $u_{к1}[2C](t)$, увеличив в два раза емкость конденсатора C (рис. 11.2).

– осциллограмму напряжения $u_{к1}[R/2](t)$, уменьшив в два раза сопротивление резистора R (рис. 11.2).

4. По всем зарисованным осциллограммам пилообразного напряжения определить, обозначив в соответствии с рисунком 11.4, размеры a и b (в мм), а также угол φ .

Содержание отчета

(при выполнении работы на унифицированном стенде УИЛС-1)

1. Название и цель работы.
2. Рисунок 11.2.
3. Осциллограммы напряжений: $u_{ген}(t)$, $u_{к1}(t)$, $u_{э2}(t)$, $u_{R2}(t)$, $u_{к1}[C2 \parallel C3](t)$, $u_{к1}[R2 \parallel R3](t)$, $u_{э2}[S1(3)](t)$.
4. Обозначение на осциллограммах пилообразного напряжения размеров a и b , и определение их значений.
5. Расчет угла φ для осциллограмм пилообразного напряжения.

Содержание отчета

(при выполнении работы в программе Electronics Workbench)

1. Название и цель работы.
2. Рисунок 11.2.

3. Осциллограммы напряжений: $u_{ген}(t)$, $u_{к1}(t)$, $u_{э2}(t)$, $u_R(t)$, $u_{к1}[2C](t)$, $u_{к1}[R/2](t)$.

4. Обозначение на осциллограммах пилообразного напряжения размеров a и b , и определение их значений.

5. Расчет угла φ для осциллограмм пилообразного напряжения.

Контрольные вопросы

1. Что такое ГПН?
2. Поясните принцип действия ГПН с токостабилизирующей цепью.
3. Поясните методику расчёта параметров пилообразного напряжения.

Лабораторная работа 12

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, имеющие два входа, инвертирующий и неинвертирующий, и один общий выход. Они 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.

Условное обозначение ОУ представлено на рисунке 12.1.

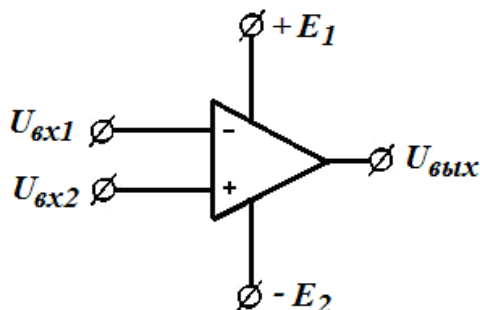


Рисунок 12.1 – Условное обозначение ОУ

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.

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). Изменяя характеристики ООС, получают следующие типовые схемы с ОУ.

Инвертирующий усилитель. Предназначен для усиления сигнала $U_{вх}$, поступающего на инвертирующий вход ОУ (рис. 12.2). Выходной сигнал имеет фазу, противоположную фазе входного сигнала.

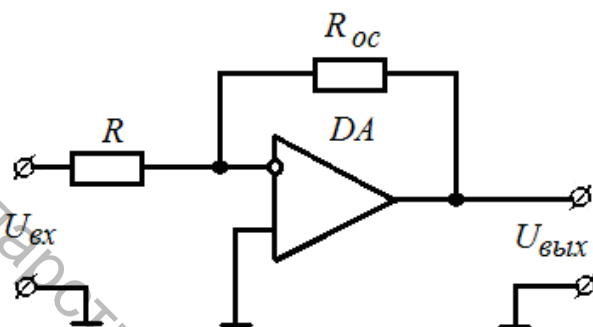


Рисунок 12.2 – Инвертирующий усилитель на ОУ

Коэффициент усиления такой схемы:

$$K_U = -\frac{R_{oc}}{R} \quad (12.1)$$

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. 12.3).

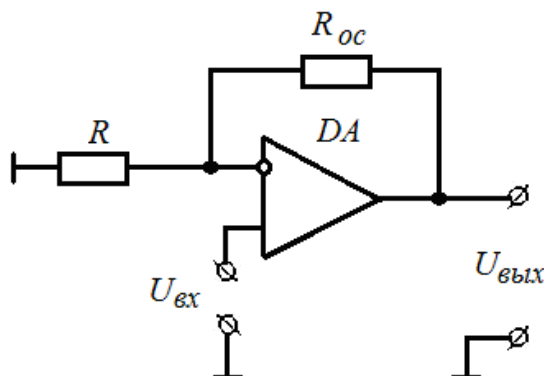


Рисунок 12.3 – Неинвертирующий усилитель на ОУ

Коэффициент усиления такой схемы:

$$K_U = 1 + \frac{R_{oc}}{R}. \quad (12.2)$$

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

Инвертирующий сумматор. Предназначен для суммирования нескольких входных сигналов с изменением на 180° фазы выходного сигнала (рис. 12.4).

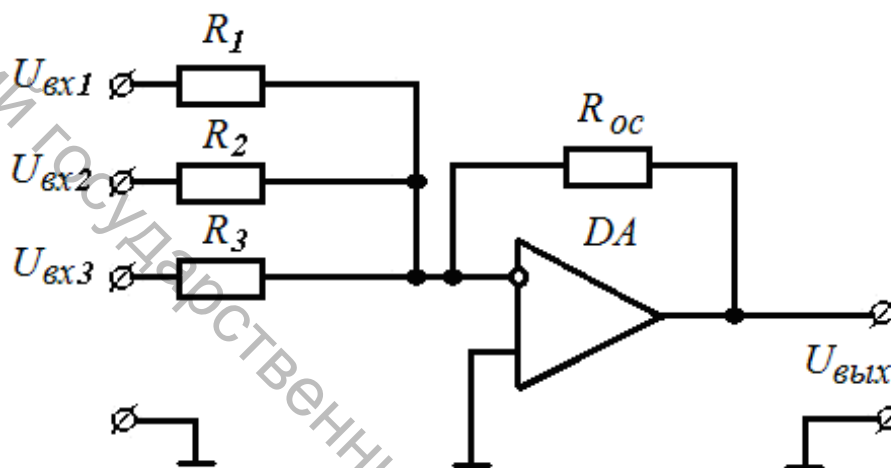


Рисунок 12.4 – Инвертирующий сумматор на ОУ

Принимая $R_1 = R_2 = \dots = R_n = R$, получают:

$$U_{вых} = -\frac{R_{oc}}{R}(U_{вх1} + U_{вх2} + \dots + U_{вхn}). \quad (12.3)$$

Неинвертирующий сумматор получают подключением таких же параллельных ветвей, что и на рисунке 12.4, к неинвертирующему входу ОУ. Тогда

$$U_{вых} = \frac{R + R_{oc}}{nR}(U_{вх1} + U_{вх2} + \dots + U_{вхn}), \quad (12.4)$$

Дифференциальный (разностный) усилитель. Предназначен для получения на выходе ОУ сигнала, пропорционального алгебраической разности сигналов, поступающих на неинвертирующий и инвертирующий входы (рис. 12.5).

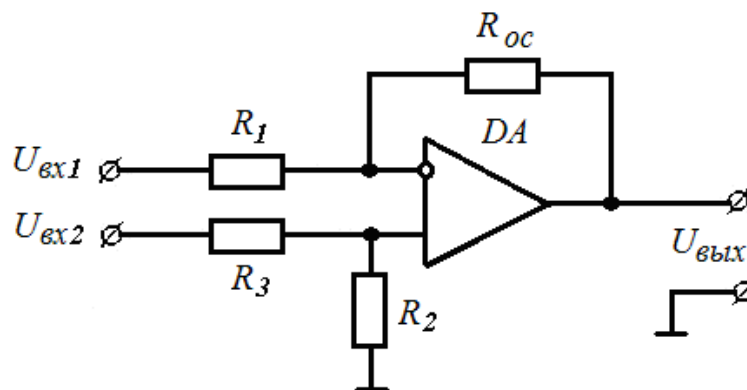


Рисунок 12.5 – Дифференциальный (разностный) усилитель на ОУ

При этом если $R_1 = R_3$, а $R_{oc} = R_2$, то

$$U_{вых} = \frac{R_{oc}}{R_1} (U_{вх2} - U_{вх1}). \quad (12.5)$$

Интегратор. Предназначен для получения на выходе ОУ сигнала, пропорционального по времени интегралу входного сигнала (рис. 12.6).

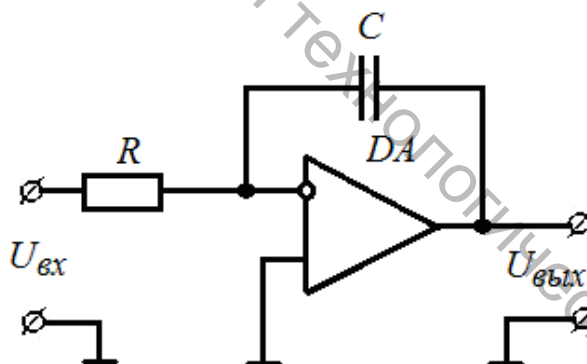


Рисунок 12.6 – Интегратор на ОУ

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

$$u_{вых} = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_{вх} dt. \quad (12.6)$$

Дифференциатор. Предназначен для получения на выходе ОУ сигнала, пропорционального по времени дифференциалу входного сигнала (рис. 12.7).

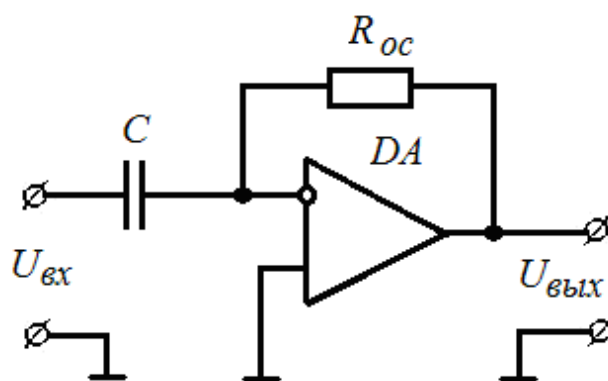


Рисунок 12.7 – Дифференциатор на ОУ

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

$$u_{\text{вых}} = -R_{\text{ос}} C \frac{du_{\text{вх}}}{dt}. \quad (12.7)$$

Компаратор сигнала. Предназначен для сравнения двух сигналов: опорного $U_{\text{он}}$ (постоянного или медленно изменяющегося) и входного $U_{\text{вх}}$, имеющего большую скорость изменения во времени.

Различают компараторы напряжений без гистерезиса и с гистерезисом.

Компараторы первой группы (рис. 12.8) позволяют получать передаточную характеристику, изображенную на рисунке 12.9

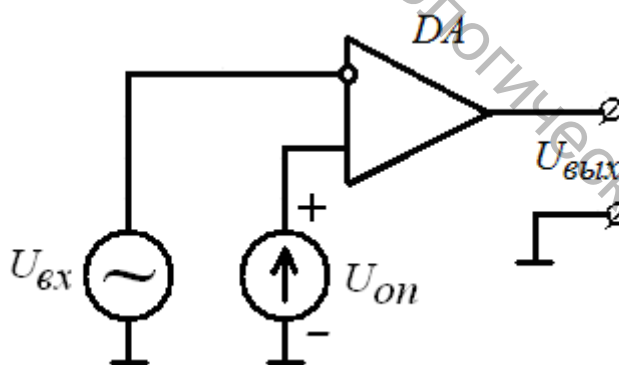


Рисунок 12.8 – Компаратор напряжений без гистерезиса на ОУ

При изменении полярности на входах ОУ изменяется полярность выходного напряжения. Так как в интервале $0 \div t_1$ (рис. 12.9) выполняется условие $U_{\text{он}} > U_{\text{вх}}$, то $U_{\text{вых}}$ совпадает по фазе с $U_{\text{он}}$. В интервале $t_1 \div \infty$, когда $U_{\text{он}} < U_{\text{вх}}$, сигнал на выходе инвертируется.

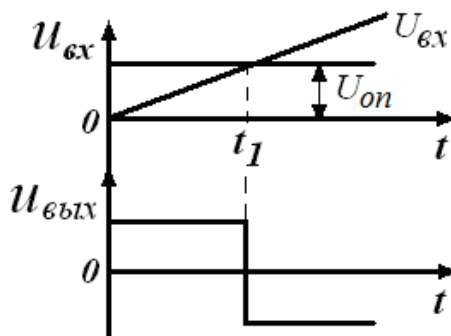


Рисунок 12.9 – Графики напряжений компаратора без гистерезиса

Компараторы второй группы (рис. 12.10) состоят из ОУ, охваченных положительной обратной связью (ПОС) по неинвертирующему входу с помощью резисторов R_1 и R_2 .

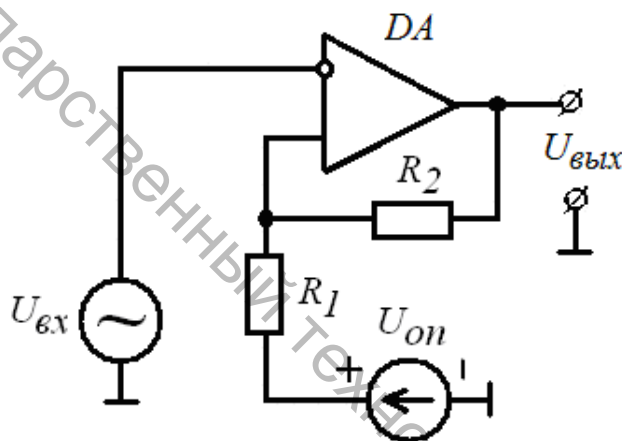


Рисунок 12.10 – Компаратор напряжений с гистерезисом на ОУ

Компаратор такого типа называют триггером Шмитта или пороговым устройством. Его передаточная характеристика изображена на рисунке 12.11.

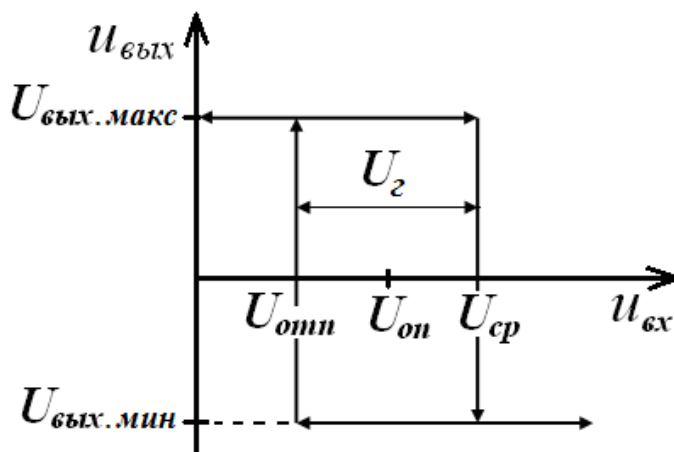


Рисунок 12.11 – Передаточная характеристика триггера Шмитта

При достижении $U_{вх} = U_{ср}$ происходит переключение компаратора в состояние $U_{вых.мин}$. Возвращение в состояние $U_{вых.макс}$ происходит при $U_{вх} = U_{ср}$. Таким образом, формируются пороги срабатывания и отпускания компаратора.

$$U_{ср} = U_{он} + \frac{U_{вых.макс} - U_{он}}{R_1 + R_2} R_1. \quad (12.8)$$

$$U_{отп} = U_{он} - \frac{|U_{вых.мин}| + U_{он}}{R_1 + R_2} R_1. \quad (12.9)$$

Тогда ширина зоны гистерезиса:

$$U_z = U_{ср} - U_{отп} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (U_{вых.макс} + |U_{вых.мин}|). \quad (12.10)$$

Схемы компараторов используются для преобразования формы сигнала, получения импульсов прямоугольной формы.

Так как при увеличении частоты сигналов из-за влияния паразитных емкостей в ОУ падает коэффициент усиления и увеличивается фазовый сдвиг между входным и выходным сигналами, то при некоторой критической частоте ООС превращается в ПОС, усилитель самовозбуждается и становится генератором незатухающих колебаний. Для обеспечения его устойчивости рассчитывают и включают в схему ОУ пассивные RC-цепи. Промышленностью выпускается как ОУ с внутренней коррекцией (RC-цепи включены в схему ОУ, но сужена полоса пропускания), так и с внешней коррекцией (с выводами для подключения RC-цепей).

Порядок выполнения работы в программе Electronics Workbench

1. Произвести моделирование схемы инвертирующего усилителя в соответствии с рисунком 12.12, установив следующие параметры:

- входное напряжение $U_{вх} = \text{№ компьютера} \times 0,01 (В)$;
- частота сигнала $f = \text{№ компьютера} (кГц)$;
- сопротивление нагрузки на выходе схемы

$$R_n = \text{№ компьютера} (кОм);$$

- сопротивление резистора $R_{ос} = \text{№ компьютера} (кОм)$;
- сопротивление резистора $R = 0,5 кОм$.

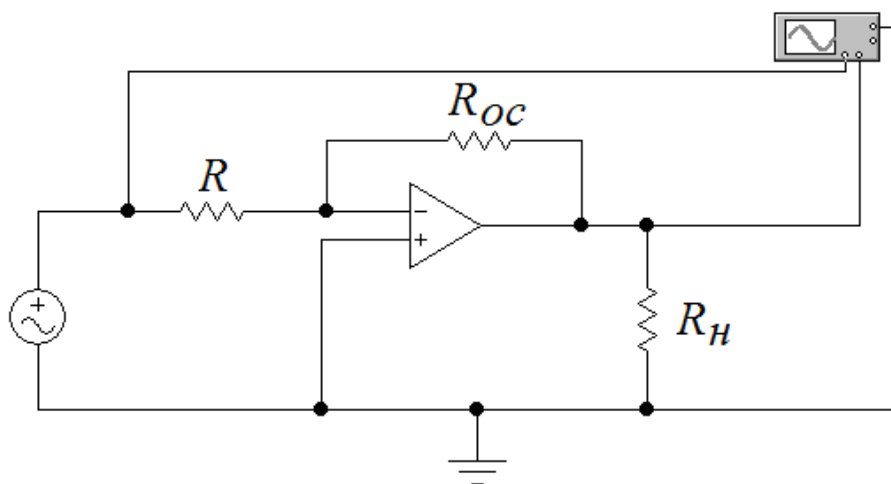


Рисунок 12.12 – Схема моделирования инвертирующего усилителя

Включив схему, получить осциллограммы напряжения $u_{\text{вх}}(t)$ на входе и $u_{\text{вых}}(t)$ на выходе усилителя в соответствии с рисунком 12.13.

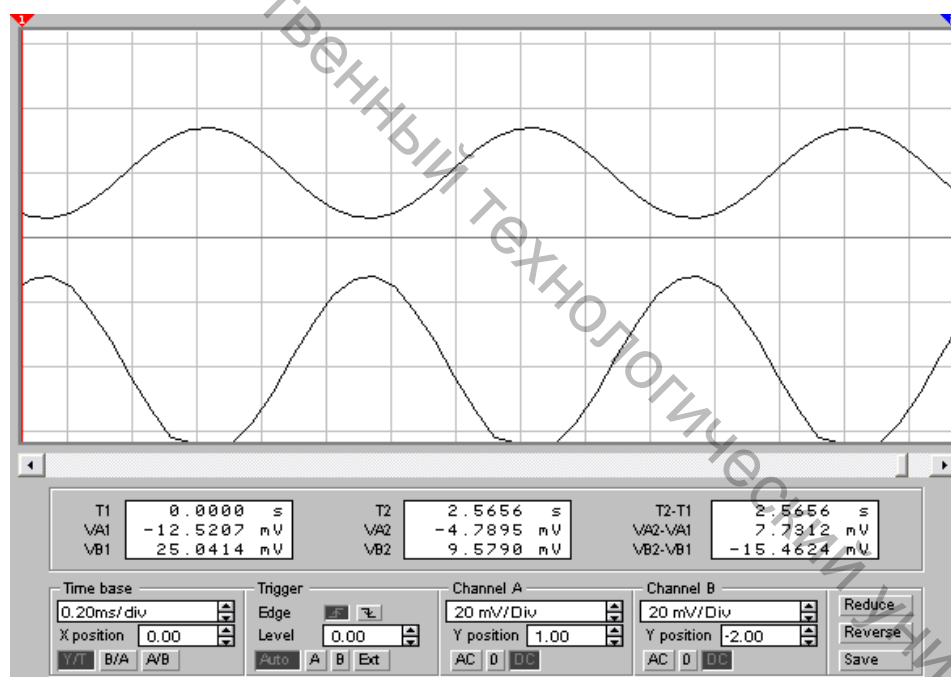


Рисунок 12.13 – Осциллограммы напряжения на входе и выходе усилителя

Зарисовать в масштабе полученные осциллограммы по аналогии с рисунком 9.5.

Рассчитать по (12.1) коэффициент усиления схемы K_U .

2. Произвести моделирование схемы неинвертирующего усилителя (рисунок 12.3), установив следующие параметры:

– входное напряжение $U_{вх} = N_{\text{компьютера}} \times 0,01 (В)$;

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

– сопротивление нагрузки на выходе схемы

$$R_n = N_{\text{компьютера}} (кОм);$$

– сопротивление резистора $R_{oc} = N_{\text{компьютера}} (кОм)$;

– сопротивление резистора $R = 1 кОм$.

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

Рассчитать по (12.2) коэффициент усиления схемы K_U .

3. Произвести моделирование схемы инвертирующего сумматора (рисунок 12.4), установив следующие параметры:

– входные напряжения

$$U_{вх1} = U_{вх2} = U_{вх3} = N_{\text{компьютера}} \times 0,01 (В);$$

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

– сопротивление нагрузки на выходе схемы

$$R_n = N_{\text{компьютера}} (кОм);$$

– сопротивление резистора $R_{oc} = N_{\text{компьютера}} (кОм)$;

– сопротивления резисторов $R_1 = R_2 = R_3 = 1 кОм$.

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

Рассчитать по (12.3) значение $U_{вых}$.

4. Произвести моделирование схемы дифференциального (разностного) усилителя (рис. 12.5), установив следующие параметры:

– входные напряжения $U_{вх1} = U_{вх2} = N_{\text{компьютера}} \times 0,01 (В)$;

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

– сопротивление нагрузки на выходе схемы

$$R_n = N_{\text{компьютера}} (кОм);$$

– сопротивления резисторов $R_{oc} = R_2 = N_{\text{компьютера}} (кОм)$;

– сопротивления резисторов $R_1 = R_3 = 1 кОм$.

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

Рассчитать по (12.5) значение $U_{вых}$.

5. Произвести моделирование схемы интегратора (рис. 12.6), установив следующие параметры:

– входное напряжение – прямоугольной формы (элемент Function generator  панели Instruments), $U_{ex1} = 1\text{ В}$;

– 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 $u_{ex}(t)$ и выходного $u_{вых}(t)$ сигналов с указанием масштабов.

6. Произвести моделирование схемы дифференциатора (рис. 12.7), установив следующие параметры:

– входное напряжение – пилообразной формы (элемент Function generator  панели Instruments), $U_{ex1} = 1\text{ В}$;

– частота сигнала $f = 1\text{ кГц}$;

– сопротивление нагрузки на выходе схемы

$R_n = \text{№ компьютера (кОм)}$;

– сопротивление резистора $R_{oe} = 500\text{ Ом}$;

– емкость конденсатора $C = 10\text{ мкФ}$.

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

7. Произвести моделирование схемы компаратора напряжений без гистерезиса (рис.12.8), установив следующие параметры:

– входное напряжение синусоидальной формы, $U_{ex} = 20\text{ В}$;

– частота сигнала $f = \text{№ компьютера (кГц)}$;

– опорное напряжение – постоянное (элемент Battery  панели Sources), $U_{on} = 10\text{ В}$;

– сопротивление нагрузки на выходе схемы

$R_n = \text{№ компьютера (кОм)}$.

Зарисовать в масштабе осциллограммы напряжения $u_{ex}(t)$ на входе и $u_{вых}(t)$ на выходе компаратора в соответствии с рисунком 12.14. Линию графика опорного напряжения U_{on} на рисунке 12.14 изобразить и обозначить самостоятельно.

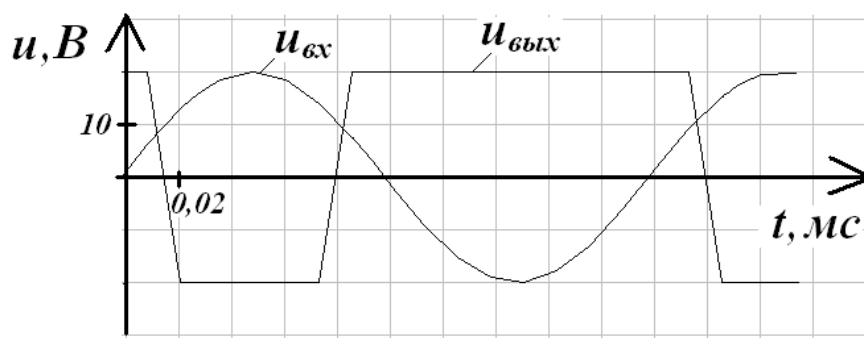


Рисунок 12.14 – Осциллограммы напряжения на входе и выходе компаратора без гистерезиса

8. Произвести моделирование схемы компаратора напряжений с гистерезисом (рисунок 12.10), установив следующие параметры:

- входное напряжение синусоидальной формы, $U_{вх} = 15 \text{ В}$;
- частота сигнала $f = \text{№ компьютера (кГц)}$;
- опорное напряжение – постоянное (элемент Battery  панели Sources), $U_{оп} = 5 \text{ В}$;
- сопротивление нагрузки на выходе схемы $R_n = \text{№ компьютера (кОм)}$;
- сопротивления резисторов $R_1 = R_2 = \text{№ компьютера (кОм)}$.

Зарисовать в масштабе осциллограммы напряжения на входе $u_{вх}(t)$ и выходе $u_{вых}(t)$ компаратора в соответствии с рисунком 12.15. Линию графика опорного напряжения $U_{оп}$ на рисунке 12.15 изобразить и обозначить самостоятельно.

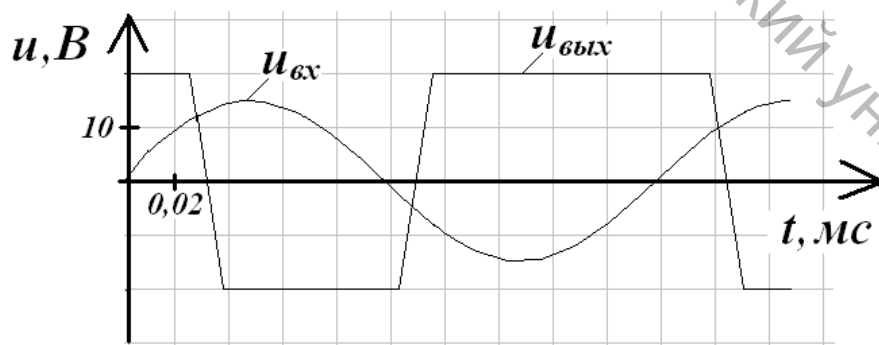


Рисунок 12.15 – Осциллограммы напряжения на входе и выходе компаратора с гистерезисом

Рассчитать по (12.8), (12.8) и (12.10) значения $U_{ср}$, $U_{отп}$ и U_z .

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Рисунок 12.2; осциллограммы напряжений $u_{ex}(t)$ и $u_{вых}(t)$; расчет K_U .
3. Рисунок 12.3; осциллограммы напряжений $u_{ex}(t)$ и $u_{вых}(t)$; расчет K_U .
4. Рисунок 12.4; осциллограммы напряжений $u_{ex}(t)$ и $u_{вых}(t)$; расчет $U_{вых}$.
5. Рисунок 12.5; осциллограммы напряжений $u_{ex}(t)$ и $u_{вых}(t)$; расчет $U_{вых}$.
6. Рисунок 12.6; осциллограммы напряжений $u_{ex}(t)$ и $u_{вых}(t)$.
7. Рисунок 12.7; осциллограммы напряжений $u_{ex}(t)$ и $u_{вых}(t)$.
8. Рисунок 12.8; осциллограммы напряжений $u_{ex}(t)$ и $u_{вых}(t)$.
9. Рисунок 12.10; осциллограммы напряжений $u_{ex}(t)$ и $u_{вых}(t)$; расчет U_{cp} , $U_{отп}$ и U_z .

Контрольные вопросы

1. Что такое ОУ?
2. Перечислите основные достоинства ОУ.
3. Поясните работу типовых схем с ОУ, изученных в лабораторной работе.

Лабораторная работа 13

Исследование схем стабилизации напряжения

Цель работы: изучение принципа работы схем стабилизации 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.

Стабилизаторы, свойства которых определяются параметрами входящих в их состав нелинейных элементов, называются параметрическими. Одним из таких нелинейных элементов является полупроводниковый стабилитрон, у которого напряжение в пределах участка обратной ветви от $I_{ст.мин}$ до $I_{ст.макс}$ не зависит от тока, протекающего через этот элемент. Схема простейшего параметрического стабилизатора представлена на рисунке 13.1.

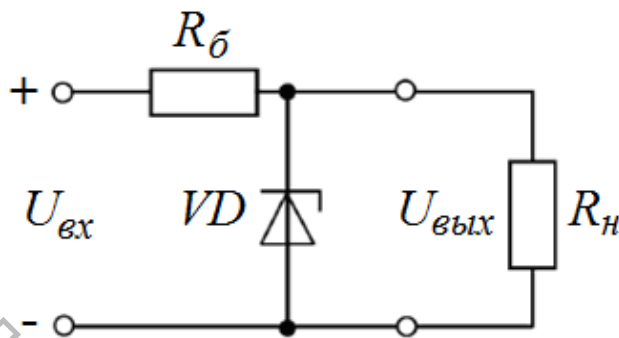


Рисунок 13.1 – Схема простейшего параметрического стабилизатора

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:

$$R_б = \frac{U_{вх} - U_н}{I_н + I_{ст.ном}}, \quad (13.1)$$

где $I_{ст.ном} = \frac{I_{ст.макс} - I_{ст.мин}}{2}$ – номинальный ток стабилитрона; $I_{ст.макс}$ и $I_{ст.мин}$ – максимальный и минимальный токи стабилитрона в режиме стабилизации.

Выходное сопротивление параметрического стабилизатора определяется дифференциальным сопротивлением стабилитрона:

$$R_{вых} = R_д = \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta I_{ст}} = \frac{U_{ст.макс} - U_{ст.мин}}{I_{ст.макс} - I_{ст.мин}}. \quad (13.2)$$

Коэффициент стабилизации параметрического стабилизатора:

$$K_{ст} = \frac{\Delta I_{ст} \cdot R_б}{U_{вх}} \cdot \frac{U_н}{\Delta I_{ст} \cdot R_д} = \frac{U_н}{U_{вх}} \cdot \frac{R_б}{R_д}. \quad (13.3)$$

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

Основные недостатки параметрических стабилизаторов: невозможность регулировки выходного напряжения; малое значение K_{cm} , особенно при больших токах нагрузки. Однако, за счет простоты и надежности, 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. 13.2).

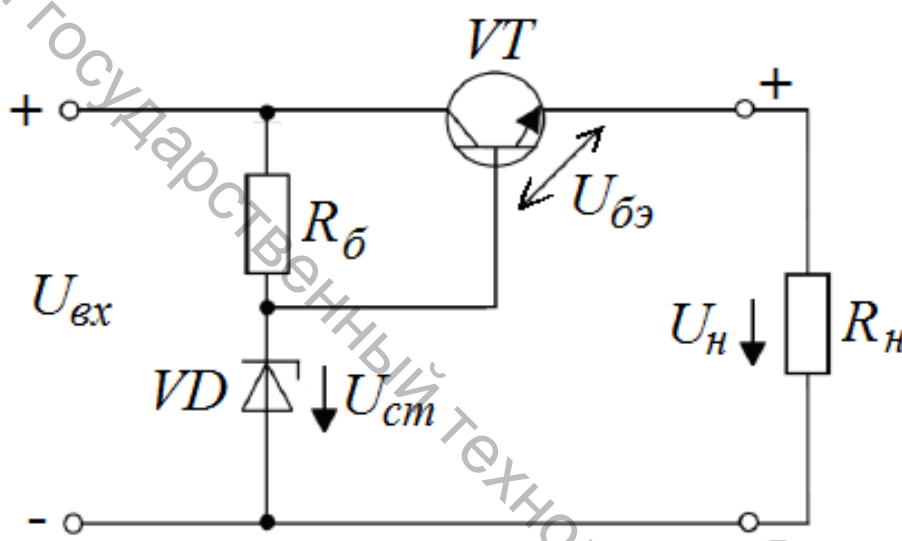


Рисунок 13.2 – Схема параметрического стабилизатора напряжения

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 $0,2 \div 0,6 \text{ В}$), что позволяет обойтись без измерительного элемента и преобразующего устройства. Работа стабилизатора заключается в том, что на стабилитроне создается опорное напряжение $U_{см}$, которое распределяется между переходом база-эмиттер транзистора и нагрузкой: $U_{см} = U_{бэ} + U_{н}$. Таким образом, устанавливается некоторое значение $U_{бэ} = U_{см} - U_{н}$, определяющее степень открытия транзистора VT , а значит и стабилизацию $U_{н}$.

Порядок выполнения работы в программе Electronics Workbench

1. Произвести моделирование схемы параметрического стабилизатора (рис. 13.3). Батарея $G2$ используется в схеме для имитации выпрямителя, источник переменного напряжения $G1$ – для имитации пульсаций выпрямленного напряжения на выходе выпрямителя.

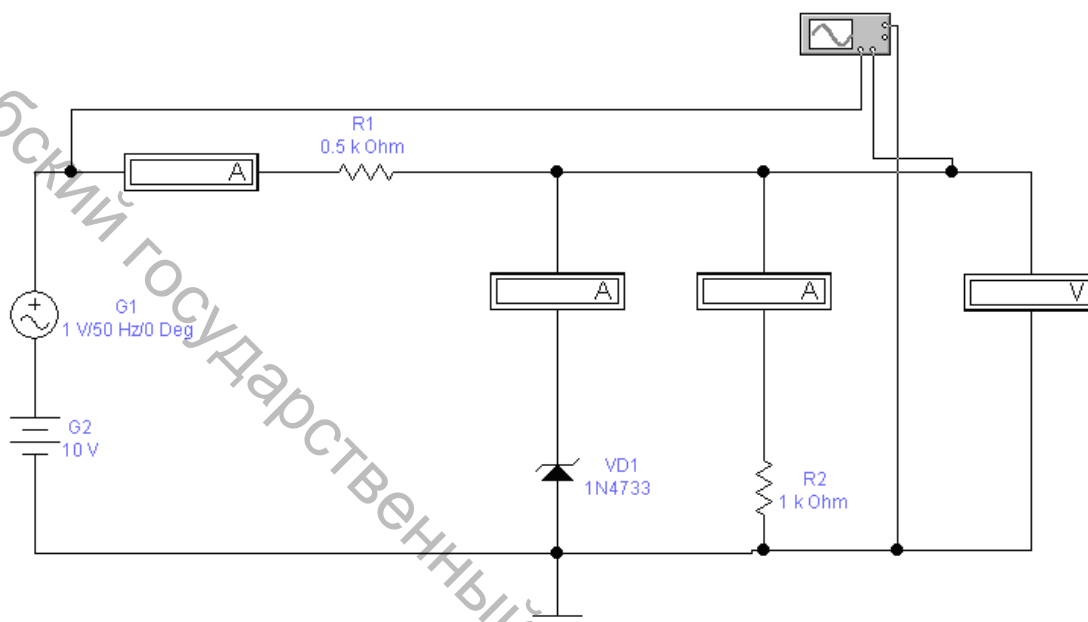


Рисунок 13.3 – Схема моделирования параметрического стабилизатора

2. Изменяя входное напряжение стабилизатора (напряжение батареи $G2$) в соответствии с данными таблицы 13.1, измерить ток на входе стабилизатора, ток стабилитрона, ток и напряжение нагрузки. Результаты измерений занести в таблицу 13.1.

Таблица 13.1 – Результаты эксперимента

$U_{вх}, В$	$I_{вх}, мА$	$I_{ст}, мА$	$I_{н}, мА$	$U_{н}, В$
10				
12				
14				
16				
18				
20				

Построить график зависимости $U_{н}(U_{вх})$.

3. Установить входное напряжение стабилизатора (напряжение батареи $G2$) равным 14 В . Изменяя сопротивление R_H нагрузки стабилизатора ($R2$ на рис. 13.3) в соответствии с данными таблицы 13.2, измерить ток на входе стабилизатора, ток стабилитрона, ток и напряжение нагрузки. Результаты измерений занести в таблицу 13.2.

Таблица 13.2 – Результаты эксперимента

$R_H, \text{Ом}$	$I_{вх}, \text{мА}$	$I_{ст}, \text{мА}$	$I_H, \text{мА}$	$U_H, \text{В}$
400				
600				
800				
1000				
1200				
1400				

Построить график зависимости $U_H(I_H)$.

4. Для получения осциллограмм напряжений схемы (рис. 13.4) установить параметры элементов в соответствии с рисунком 13.3.

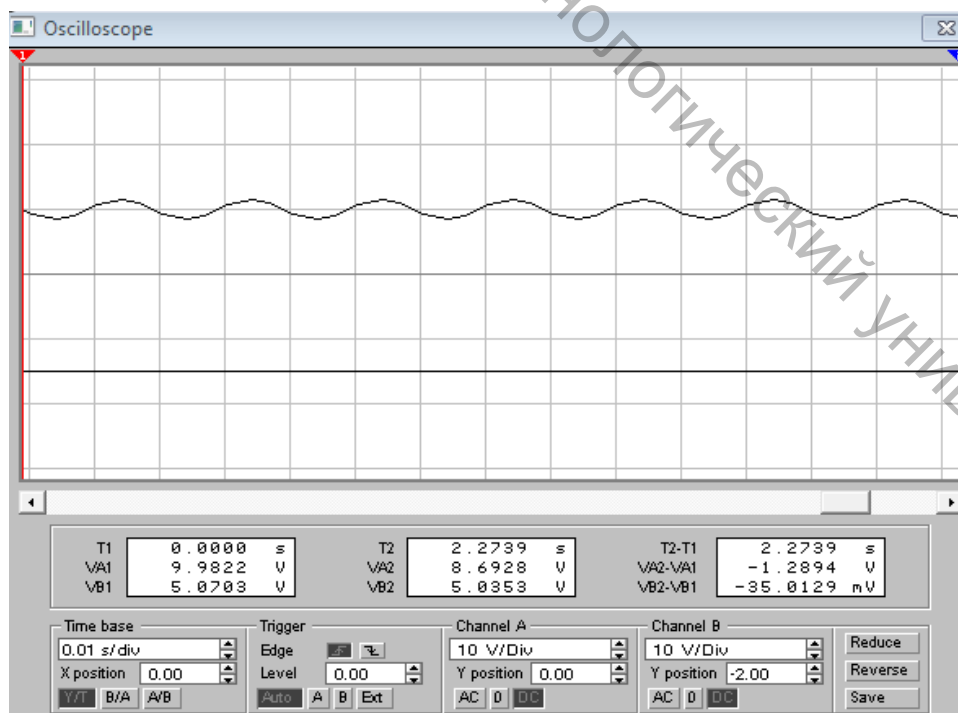


Рисунок 13.4 – Осциллограммы напряжений параметрического стабилизатора

Зарисовать в масштабе осциллограммы напряжений $u_{ex}(t)$ на входе схемы и $u_n(t)$ на резисторе нагрузке в соответствии с рисунком 13.5.

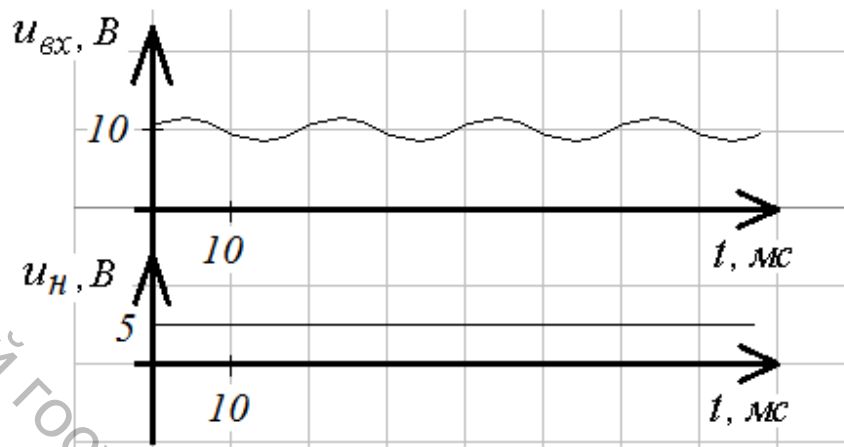


Рисунок 13.5 – Осциллограммы напряжений

5. Произвести моделирование схемы параметрического стабилизатора напряжения с повышенной нагрузочной способностью (рис. 13.6).

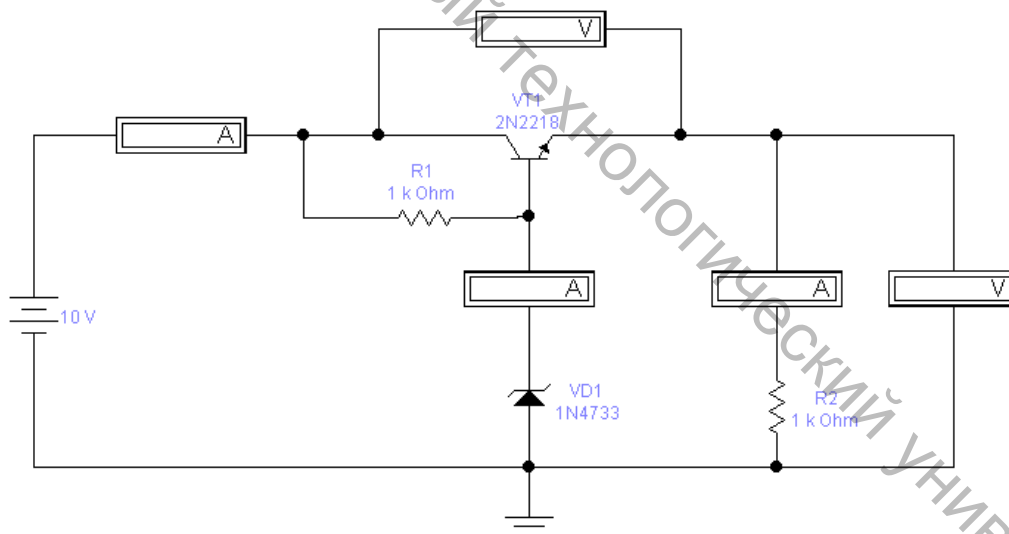


Рисунок 13.6 – Схема моделирования параметрического стабилизатора напряжения с повышенной нагрузочной способностью

6. Изменяя входное напряжение стабилизатора в соответствии с данными таблицы 13.3, измерить ток на входе стабилизатора, ток стабилитрона, ток и напряжение нагрузки, а также напряжение между коллектором и эмиттером регулирующего транзистора. Результаты измерений занести в таблицу 13.3.

Таблица 13.3 – Результаты эксперимента

$U_{вх}, В$	$I_{вх}, мА$	$I_{ст}, мА$	$I_n, мА$	$U_n, В$	$U_{VT1}, В$
10					
12					
14					
16					
18					
20					

Построить график зависимости $U_n(U_{вх})$.

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Рисунок 13.1.
3. Таблицы 13.1 и 13.2 с результатами моделирования схемы рисунка 13.3.
4. Осциллограммы напряжений $u_{вх}(t)$ и $u_n(t)$.
5. Графики зависимостей: $U_n(U_{вх})$ по данным таблицы 13.1 и $U_n(I_n)$ по данным таблицы 13.2.
6. Рисунок 13.2.
7. Таблица 13.3 с результатами моделирования схемы рисунка 13.6.
8. График зависимости $U_n(U_{вх})$ по данным таблицы 13.3.

Контрольные вопросы

1. Что такое стабилизатор?
2. Поясните принцип действия и основные параметры параметрического стабилизатора.
3. Перечислите недостатки параметрического стабилизатора.
4. Поясните принцип действия стабилизатора напряжения с повышенной нагрузочной способностью.

Лабораторная работа 14

Исследование комбинационных логических схем

Цель работы: ознакомление с принципами минимизации логических выражений, изучение комбинационных логических схем.

Теоретические сведения

Математическим аппаратом цифровых систем электроники является алгебра логики (булева алгебра), использующая двоичную систему счисления. Двоичный логический (цифровой) сигнал имеет два фиксированных уровня, условно обозначаемые логическим нулем (лог. 0) и логической единицей (лог. 1).

Функция двоичных переменных, принимающая значения 1 и 0, называется логической функцией. Элементарными логическими функциями являются: логическое сложение (дизъюнкция), логическое умножение (конъюнкция) и логическое отрицание (инверсия).

Логическая функция может быть выражена словесно, в алгебраической форме и переключательной таблицей (таблицей истинности).

В таблицу истинности включены все возможные комбинации входных сигналов и соответствующие им выходные сигналы. На основании таблицы истинности запись логического выражения производят в одной из двух форм: дизъюнктивной нормальной форме (ДНФ) или конъюнктивной нормальной форме (КНФ).

При записи логического выражения в ДНФ последовательность действий следующая: количество конъюнкций – минтермов (константа единицы) – принимают равным количеству строк таблицы истинности, в которых функция $y = 1$; знак инверсии ставят над переменными, которые в соответствующих строках равны 0; конъюнкции соединяют между собой логическим сложением.

При записи логического выражения в КНФ последовательность действий следующая: количество дизъюнкций – макстермов – принимают равным количеству строк таблицы истинности, в которых функция $y = 0$; над теми переменными, которые в соответствующих строках равны 1, ставят знак инверсии; дизъюнкции соединяют между собой логическим умножением.

Выражение, записанное на основании таблицы истинности, можно упростить (минимизировать), что приведет к упрощению реализующей его логической схемы, которую можно будет выполнить на меньшем количестве логических элементов. Один из способов – прямое применение основных законов и правил алгебры логики.

Например, применив их для выражения

$$y = \bar{a}\bar{b} + a\bar{b} + ab$$

получают:

$$y = \bar{a}b + a\bar{b} + ab = \bar{a}b + a(\bar{b} + b) = \bar{a}b + a \cdot 1 = \bar{a}b + a = b + a = a + b.$$

Другой способ минимизации – метод карт Карно. Для двух переменных карта Карно имеет вид:

Входы		Выход
a	b	y
0	0	
0	1	
1	0	
1	1	

$\bar{a}\bar{b}$	$\bar{a}b$
$a\bar{b}$	ab

Рисунок 14.1 – Связь таблицы истинности с картой Карно

Четыре квадрата Карты Карно (на рисунке справа) соответствуют четырем возможным комбинациям a и b в таблице истинности (на рисунке слева) для логического выражения с двумя переменными. Составим карту Карно для рассмотренной выше задачи.

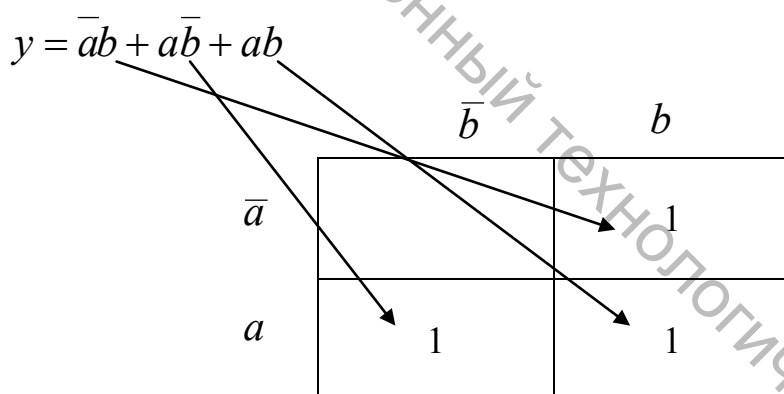


Рисунок 14.2 – Использование карты Карно для логического выражения с двумя переменными

Размещают логические единицы во всех квадратах, которым соответствуют произведения в исходном логическом выражении. В построенной таким образом карте соседние единицы объединяются в один контур группами по 2, 4 или 8 единиц. Соседними также считаются нижняя и верхняя строки карты, крайне левый и крайне правый столбцы. Одни и те же квадраты, заполненные единицами, могут входить в несколько контуров. Построение контуров продолжается до тех пор, пока все расположенные рядом единицы не окажутся внутри контуров. Каждый контур представляет собой новый член упрощенного логического выражения.

	$\bar{b}$	b
$\bar{a}$		1
a	1	1

Рисунок 14.3 – Минимизация логического выражения с помощью карты Карно

В данном случае получилось два контура, а это означает, что упрощенное логическое выражение будет состоять из двух членов, связанных логическим сложением:

$$y = (a\bar{b} + ab) + (ab + a\bar{b}) = a(\bar{b} + b) + b(a + \bar{a}) = a + b.$$

По способу функционирования логические устройства (и их схемы) делятся на два класса: комбинационные и последовательные.

В комбинационных устройствах (автоматах без памяти) каждый символ на выходе определяется лишь символами, действующими в данный момент времени на входах устройства, и не зависит от того, какие символы ранее действовали на этих входах. В последовательных устройствах (автоматах с памятью) выходной сигнал определяется не только набором символов, действующих на входах в данный момент времени, но и внутренним состоянием устройства, а последнее зависит от того, какие наборы символов действовали во все предшествующие моменты времени.

Синтез комбинационных схем заключается в проектировании логического устройства при заданных входных переменных и известной выходной функции. Этапы решения такой задачи:

- 1) составление математического описания;
- 2) анализ логических уравнений и получение минимальной формы для каждого из них в заданном базисе;
- 3) переход от логических уравнений к логической схеме.

Пример синтеза комбинационной схемы

Пусть исходное выражение имеет Y -запись через минтермы: $0, 2, 4, 6, 11, 13$. Составляют таблицу истинности для данного выражения (табл. 14.1)

Таблица 14.1 – Таблица истинности

a	b	c	d	y
0	0	0	0	1
0	0	0	1	0
0	0	1	0	1
0	0	1	1	0
0	1	0	0	1
0	1	0	1	0
0	1	1	0	1
0	1	1	1	0
1	0	0	0	0
1	0	0	1	0
1	0	1	0	0
1	0	1	1	1
1	1	0	0	0
1	1	0	1	1
1	1	1	0	0
1	1	1	1	0

Записывают уравнение, соответствующее таблице истинности:

$$y = \overline{a}\overline{b}\overline{c}\overline{d} + \overline{a}\overline{b}c\overline{d} + \overline{a}b\overline{c}\overline{d} + \overline{a}b\overline{c}d + \overline{a}bcd + a\overline{b}cd.$$

Минимизируют исходное уравнение с помощью карты Карно для четырех переменных (рис. 14.4).

	b		$\overline{b}$		
a				1	c
	1				$\overline{c}$
$\overline{a}$		1	1		$\overline{c}$
		1	1		c
	d		$\overline{d}$		

Рисунок 14.4 – Карта Карно для четырех переменных

Минимизированное логическое выражение имеет вид:

$$y = \bar{a}\bar{d} + \bar{a}bcd + ab\bar{c}d.$$

Строят комбинационную логическую схему на логических элементах. На рисунке 14.5 представлена схема на элементах И, ИЛИ, НЕ.

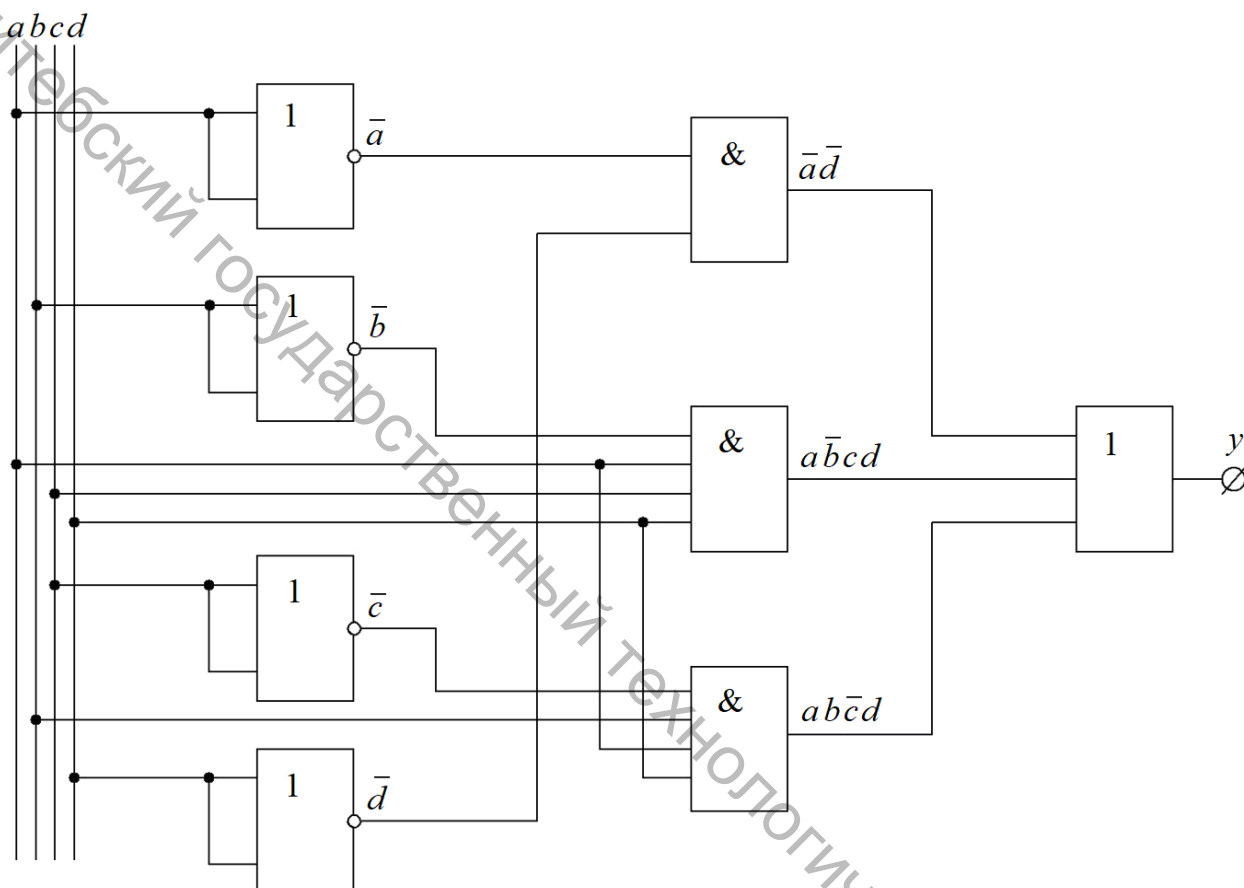


Рисунок 14.5 – Комбинационная логическая схема на элементах И, ИЛИ, НЕ

Комбинационную логическую схему можно построить в заданном базисе логических элементов (например, в базисе И-НЕ), преобразовав минимизированное логическое уравнение:

$$y = \bar{a}\bar{d} + \bar{a}bcd + ab\bar{c}d = \overline{\overline{\bar{a}\bar{d} + \bar{a}bcd + ab\bar{c}d}} = \overline{\overline{\bar{a}\bar{d}} \cdot \overline{\bar{a}bcd} \cdot \overline{ab\bar{c}d}} = \overline{\bar{a}\bar{d} \cdot abcd \cdot ab\bar{c}d}.$$

Комбинационная логическая схема на элементах И-НЕ представлена на рисунке 14.6.

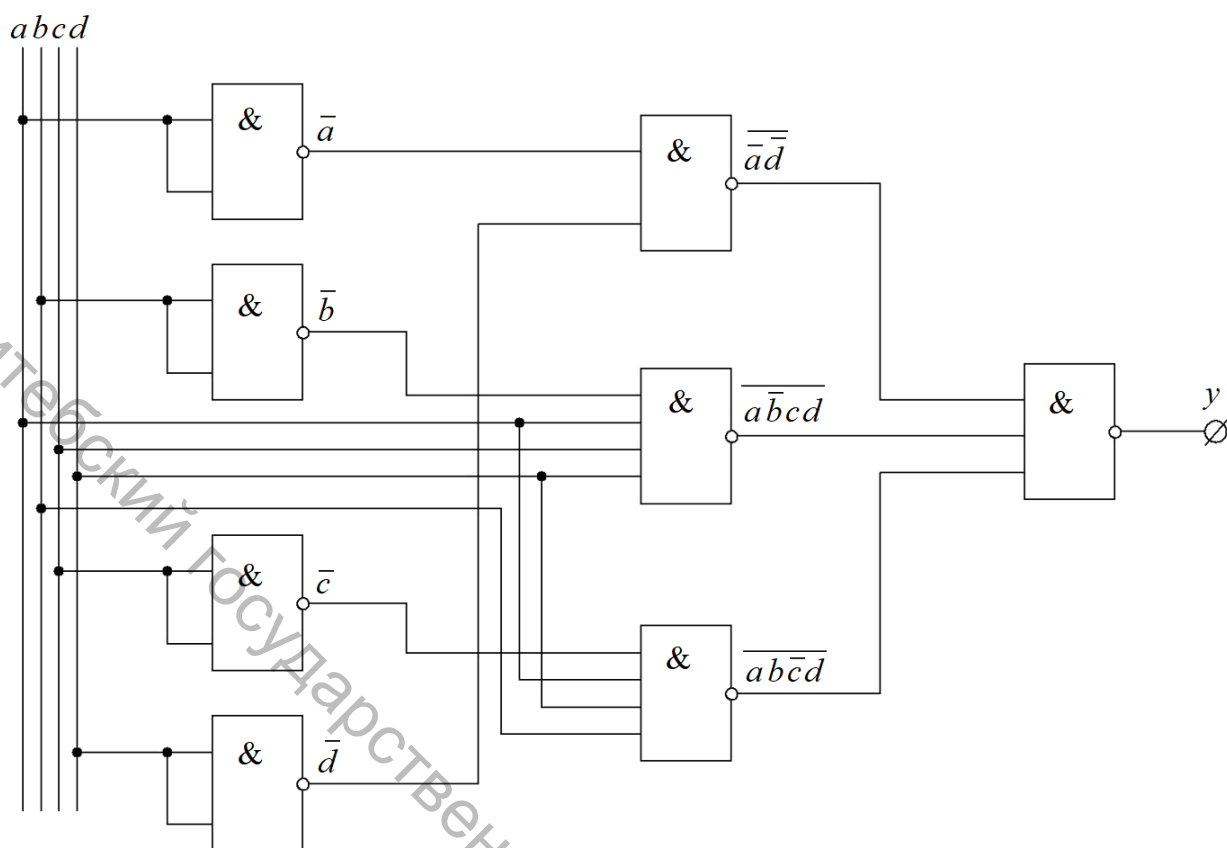
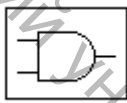
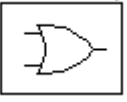
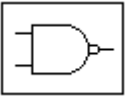
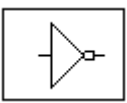


Рисунок 14.6 – Комбинационная логическая схема на элементах И-НЕ

Моделирование комбинационных логических схем можно произвести в программе Electronics Workbench. Для задания входных переменных a , b , c , d используют ключи, как показано на рисунке 14.7.

Логические элементы находятся в библиотеке компонентов Logic Gates. Изображения логических элементов представлены в таблице 14.2.

Таблица 14.2 – Изображения логических элементов

И (AND)	
ИЛИ (OR)	
НЕ (NOT)	
И-НЕ (NAND)	
ИЛИ-НЕ (NOR)	

При необходимости установки элемента, имеющего более двух входов, выбирается и устанавливается на рабочее поле двухвходовой элемент (по умолчанию), затем двойным нажатием левой клавиши мыши открывается окно свойств элемента, выбирается вкладка Number of inputs (Количество входов) и устанавливается необходимое количество входов элемента.

В качестве индикаторного элемента используется индикатор логической единицы , находящийся в библиотеке компонентов Indicators. Данное устройство подключается к выходу схемы и не требует каких-либо настроек.

Пример реализации комбинационной логической схемы на элементах И-НЕ в программе Electronics Workbench приведен на рисунке 14.7.

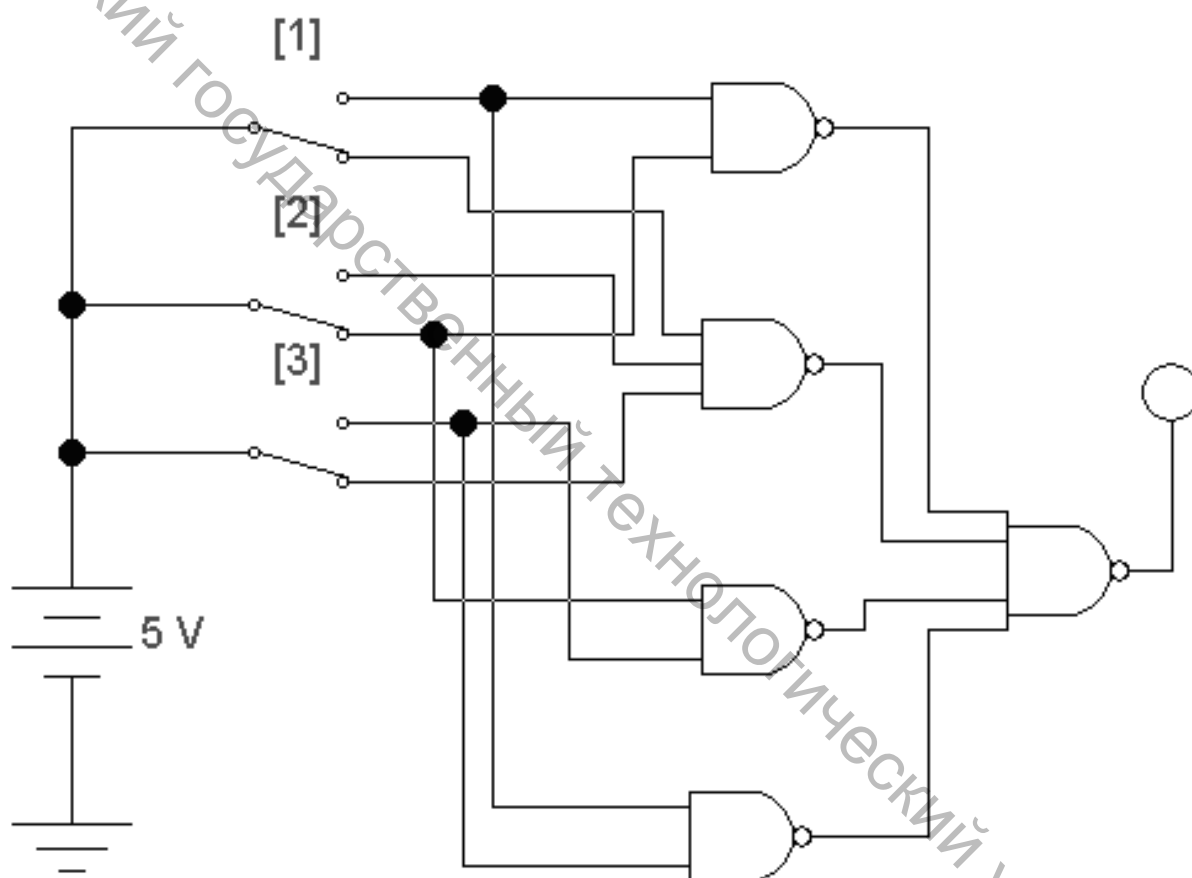


Рисунок 14.7 – Пример реализации комбинационной логической схемы на элементах И-НЕ в программе Electronics Workbench

Порядок выполнения работы в программе Electronics Workbench

1. Выписать из таблицы 14.3 Y-запись логического выражения через минтермы, соответствующую выданному преподавателем варианту.

Таблица 14.3 – Y-записи логических выражений через минтермы

<i>Вариант</i>	<i>Y-запись через минтермы</i>		<i>Вариант</i>	<i>Y-запись через минтермы</i>
1	0,2,4,5,6,11		16	3,8,9,10,14,15
2	0,4,5,7,9,12		17	0,3,5,7,9,11
3	0,1,3,7,11,15		18	2,5,7,8,11,15
4	2,3,6,8,10,12		19	2,4,6,7,10,13
5	1,4,5,7,10,12		20	0,2,4,8,12,15
6	1,3,4,7,13,14		21	0,3,4,5,9,10
7	1,2,5,7,9,13		22	0,5,8,12,14,15
8	1,4,5,8,12,13		23	1,2,3,6,8,10
9	1,2,4,6,7,10		24	0,4,5,9,13,14
10	2,9,10,12,14,15		25	0,1,2,5,9,13
11	2,4,6,9,12,14		26	0,3,4,7,9,11
12	2,8,11,12,13,14		27	0,2,4,7,11,13
13	3,4,6,7,10,13		28	0,1,2,6,10,14
14	1,6,10,11,14,15		29	2,6,7,9,12,13
15	5,6,9,12,13,15		30	4,6,9,13,14,15

2. Для данной Y-записи составить таблицу истинности для четырех переменных (по аналогии с таблицей 14.1).

3. Записать уравнение логической функции, соответствующее составленной таблице истинности.

4. Минимизировать записанное уравнение с помощью карты Карно для четырех переменных (по аналогии с рисунком 14.4).

5. В соответствии с минимизированным выражением построить комбинационную логическую схему на элементах И, ИЛИ, НЕ (по аналогии с рисунком 14.5).

6. Произвести моделирование комбинационной логической схемы на элементах И, ИЛИ, НЕ в программе Electronics Workbench.

7. Преобразовать минимизированное логическое уравнение для построения комбинационной логической схемы в базисе И-НЕ.

8. В соответствии с преобразованным выражением построить комбинационную логическую схему на элементах И-НЕ (по аналогии с рисунком 14.6).

9. Произвести моделирование комбинационной логической схемы на элементах И-НЕ в программе Electronics Workbench.

Содержание отчета

1. Название и цель работы.

2. Y-запись логического выражения через минтермы, соответствующая выданному преподавателем варианту.

3. Таблица истинности для четырех переменных, составленная для Y-записи варианта.

4. Уравнение логической функции, соответствующее составленной таблице истинности.

5. Карта Карно для четырех переменных, соответствующая уравнению логической функции.

6. Уравнение логической функции, полученное в результате минимизации с помощью карты Карно.

7. Комбинационная логическая схема на элементах И, ИЛИ, НЕ, соответствующая минимизированному уравнению логической функции.

8. Преобразованное минимизированное уравнение логической функции для построения комбинационной логической схемы в базисе И-НЕ.

9. Комбинационная логическая схема на элементах И-НЕ, соответствующая преобразованному минимизированному уравнению логической функции.

Контрольные вопросы

1. Что такое логический сигнал и логическая функция?
2. Что такое таблица истинности?
3. Поясните способы минимизации логических выражений.
4. В чем отличие комбинационных и последовательностных логических схем?

Лабораторная работа 15

Исследование триггеров

Цель работы: экспериментальное изучение структуры и принципа работы асинхронных и синхронных триггеров.

Теоретические сведения

Триггер – это устройство, обладающее двумя устойчивыми состояниями. Триггер имеет два выхода – прямой Q (*Quit* – выход, *англ.*) и инверсный $\bar{Q}$. Состояние триггера определяется логическим уровнем сигнала на его прямом выходе. Говорят, что триггер находится в единичном состоянии, если $Q = 1$, $\bar{Q} = 0$ и, соответственно, в нулевом, когда $Q = 0$, $\bar{Q} = 1$. У некоторых триггеров, в частности у *RS*-триггеров, имеется неопределенное состояние,

когда логические уровни сигналов на выходах одинаковы ($Q = \bar{Q}$). Такое состояние является запрещенным.

Переход триггера из одного состояния в другое происходит лавинообразно за счет внутренней глубокой положительной обратной связи.

По способу записи информации триггеры делятся на несинхронизируемые (асинхронные) и синхронизируемые (синхронные). По способу синхронизации триггеры подразделяются на: синхронные триггеры, управляемые потенциалом (статические или одноктактные триггеры), и синхронные триггеры, управляемые фронтом (называемые также динамическими или двухтактными триггерами).

У асинхронных триггеров изменение состояния на выходе происходит при любой смене входных сигналов. Однако если при формировании входных сигналов возникают короткие ложные импульсы, то они могут вызвать ложные срабатывания триггера. Это является основным недостатком асинхронных триггеров.

По способу функционирования различают RS -, D -, T -, JK -триггеры и др.

RS -триггер – это триггер с раздельной установкой состояний логического нуля и единицы (с раздельным запуском). Получил название по обозначению своих входов. Вход S (*Set* – установить, *англ.*) позволяет устанавливать выход Q триггера в единичное состояние ($Q = 1$). Вход R (*Reset* – сбросить, *англ.*) позволяет сбрасывать выход Q триггера в нулевое состояние ($Q = 0$).

В зависимости от логической структуры различают RS -триггеры с прямыми и инверсными входами. Условное обозначение асинхронного RS -триггера с прямыми входами приведено на рисунке 15.1, с инверсными входами – на рисунке 15.2.

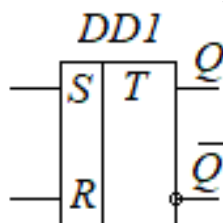


Рисунок 15.1 – Условное обозначение асинхронного RS -триггера с прямыми входами

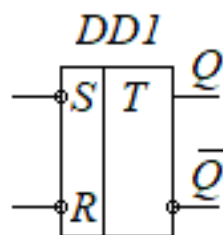


Рисунок 15.2 – Условное обозначение асинхронного RS -триггера с инверсными входами

Схема асинхронного RS -триггера с прямыми входами строится на логических элементах ИЛИ-НЕ (рис. 15.3), с инверсными входами – на логических элементах И-НЕ (рис. 15.4).

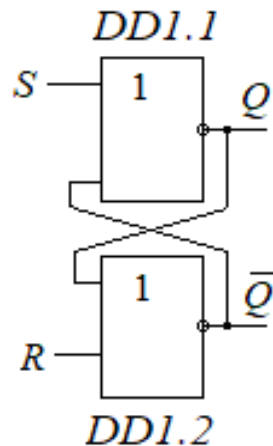


Рисунок 15.3 – Схема асинхронного RS -триггера с прямыми входами на логических элементах ИЛИ-НЕ

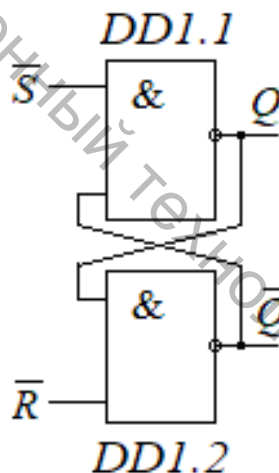


Рисунок 15.4 – Схема асинхронного RS -триггера с инверсными входами на логических элементах И-НЕ

Состояние любого триггера в зависимости от входных сигналов описывается таблицей истинности. Для RS -триггера с прямыми входами это таблица 15.1. В таблице истинности через Q^t и $\bar{Q}^t$ обозначены выходные логические уровни сигналов триггера до установки комбинации входных сигналов, а через Q^{t+1} и $\bar{Q}^{t+1}$ – состояние триггера после установки указанной комбинации входных сигналов. В последней строке на прямом и инверсном выходах триггера устанавливаются одинаковые уровни, что недопустимо. Для RS -триггера с прямыми входами комбинация $S = 1$, $R = 1$ является запрещенной.

Таблица 15.1 – Таблица истинности асинхронного RS -триггера с прямыми входами

Логическая комбинация информационных сигналов на входах триггера		Установившееся логическое состояние на выходах триггера после подачи информационных сигналов	
S	R	Q^{t+1}	$\bar{Q}^{t+1}$
0	1	0	1
1	0	1	0
0	0	Q^t	$\bar{Q}^t$
1	1	0	0

Таблица 15.2 является таблицей истинности для RS -триггера с инверсными входами. В ней запрещенной является комбинация $\bar{S} = 0, \bar{R} = 0$.

Таблица 15.2 – Таблица истинности асинхронного RS -триггера с инверсными входами

Логическая комбинация информационных сигналов на входах триггера		Установившееся логическое состояние на выходах триггера после подачи информационных сигналов	
$\bar{S}$	$\bar{R}$	Q^{t+1}	$\bar{Q}^{t+1}$
0	1	1	0
1	0	0	1
1	1	Q^t	$\bar{Q}^t$
0	0	1	1

Для исключения ложных срабатываний применяют синхронные триггеры, у которых изменение выходных состояний происходит в момент подачи специальных синхроимпульсов. Эти синхроимпульсы подаются после завершения переходных процессов в схемах формирования входных управляющих сигналов триггера. Вход C , на который подаются

синхроимпульсы называют синхровходом (иногда его называют тактовым входом).

Условное обозначение синхронного RS -триггера с прямыми входами приведено на рисунке 15.5.

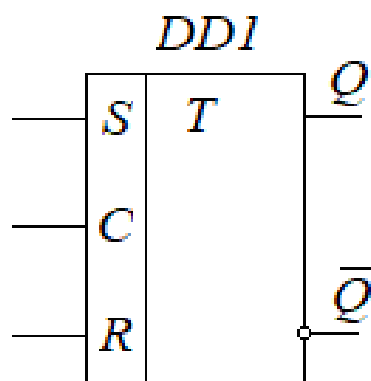


Рисунок 15.5 – Условное обозначение синхронного RS -триггера с прямыми входами

Схема синхронного RS -триггера с прямыми входами на логических элементах И-НЕ приведена на рисунке 15.6.

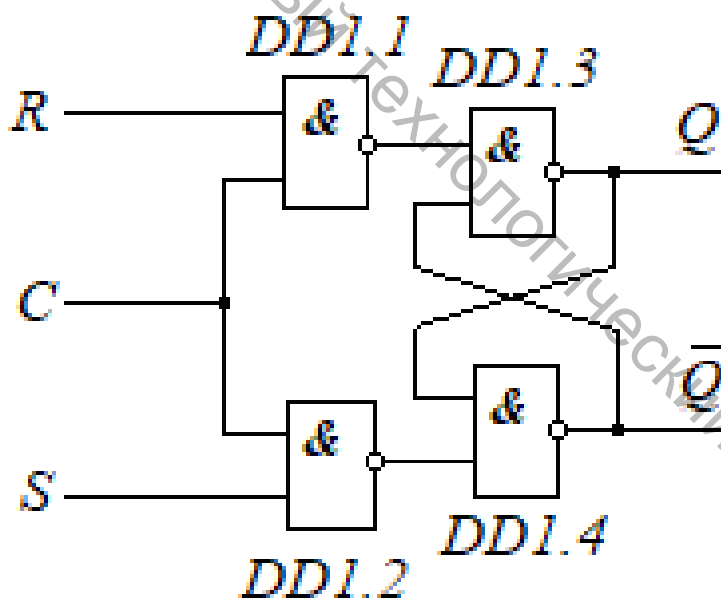


Рисунок 15.6 – Схема синхронного RS -триггера с прямыми входами на логических элементах И-НЕ

Состояние синхронного RS -триггера с прямыми входами описывается таблицей истинности (табл. 15.3). Первая строка таблицы соответствует режиму хранения, последняя – запрещенной комбинации. Символ «х» в таблице означает любой уровень логического сигнала.

Таблица 15.3 – Таблица истинности синхронного RS -триггера с прямыми входами

Логическая комбинация информационных сигналов на входах триггера			Установившееся логическое состояние на выходах триггера после подачи информационных сигналов	
C	S	R	Q^{t+1}	$\overline{Q}^{t+1}$
0	x	x	Q^t	$\overline{Q}^t$
1	0	0	Q^t	$\overline{Q}^t$
1	0	1	0	1
1	1	0	1	0
1	1	1	1	1

Динамическими триггерами называют синхронные триггеры, управляемые фронтом либо срезом синхроимпульсов. Их называют также двухтактными триггерами, поскольку процесс изменения их состояния происходит за два такта.

Любой динамический триггер состоит из двух одноктактных синхронных триггеров – ведущего (*master*) и ведомого (*slave*). Установка состояния ведущего триггера происходит в первом такте (например, при высоком уровне сигнала на синхровходе C). Установка ведомого – во втором такте, например, после изменения уровня сигнала на синхровходе C с высокого на низкий. В ведомый триггер перезаписывается состояние ведущего триггера.

К числу динамических триггеров относится JK -триггер – триггер с информационными входами J и K (англ. *Jump* – прыгай, *Keep* – держись). Условное обозначение JK -триггера приведено на рисунке 15.7, а его схема на логических элементах И-НЕ – на рисунке 15.8.

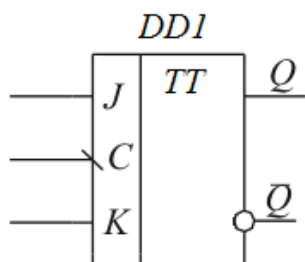


Рисунок 15.7 – Условное обозначение JK -триггера

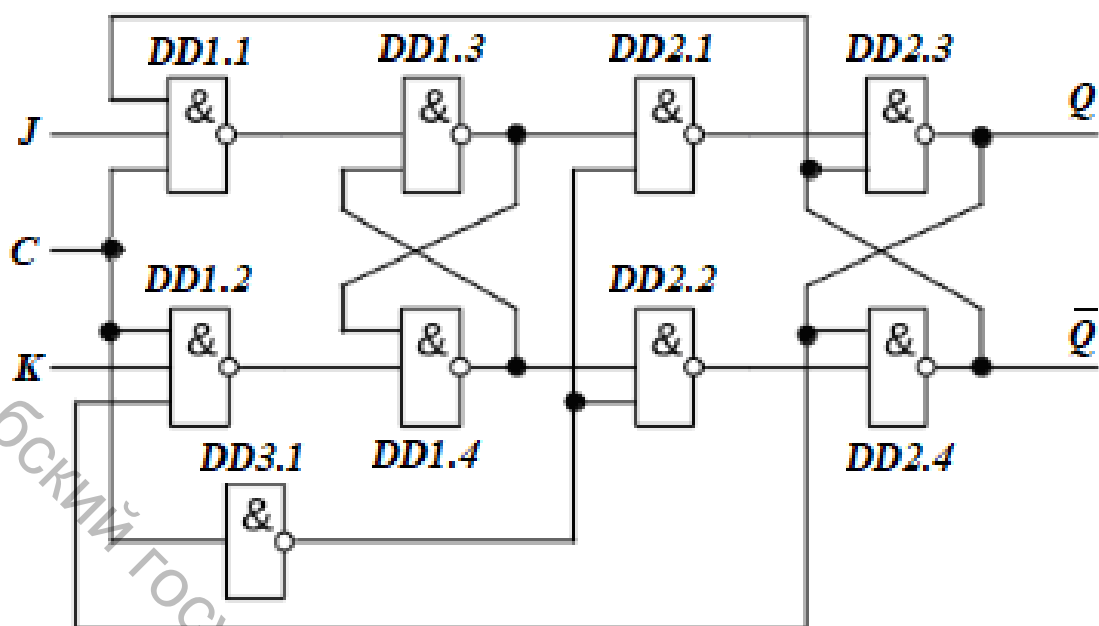


Рисунок 15.8 – Схема JK -триггера на логических элементах И-НЕ

Изменение либо подтверждение состояния триггера происходит по срезу синхроимпульса. Это показывает косая черта на синхровходе C в условном обозначении JK -триггера и знак « $\neg$ » в таблице истинности (табл. 15.4).

Таблица 15.4 – Таблица истинности JK -триггера

Логическая комбинация информационных сигналов на входах триггера			Установившееся логическое состояние на выходах триггера после подачи информационных сигналов	
C	J	K	Q^{t+1}	$\bar{Q}^{t+1}$
0	x	x	Q^t	$\bar{Q}^t$
1	0	0	Q^t	$\bar{Q}^t$
$\neg$	0	0	Q^t	$\bar{Q}^t$
$\neg$	0	1	0	1
$\neg$	1	0	1	0
$\neg$	1	1	x	x

В JK -триггере, по сравнению с синхронным RS -триггером, устранена неопределенность состояния при подаче на его информационные входы (J и K) активных уровней сигнала. JK -триггер инвертирует свое выходное состояние по каждому фронту сигнала (в данном случае по спадающему) на синхровходе C , то есть работает как счетный триггер.

JK -триггеры бывают универсальные и комбинированные. Универсальный JK -триггер путем коммутации выводов можно превратить в другой тип триггера: RS -, D - или T -триггер. Комбинированные JK -триггеры имеют дополнительные асинхронные S - и R -входы, предназначенные для предварительной установки триггера в определенное состояние (0 или 1).

Порядок выполнения работы в программе Electronics Workbench

1. Для исследования асинхронного RS -триггера с прямыми входами, собрать схему, изображенную на рисунке 15.9. В качестве асинхронного RS -триггера использовать элемент RS Flip-Flop панели Digital. В качестве источника напряжения «логической единицы» использовать источник питания +Vcc Voltage Source с напряжением +5 В. В качестве переключателей использовать элементы Switch панели Basic. Управление переключателями назначить клавишами S и R в соответствии с рисунком 15.9. В качестве индикаторов логического сигнала использовать световые индикаторы Red Probe панели Indicators. В качестве заземления использовать элемент Ground панели Sources.

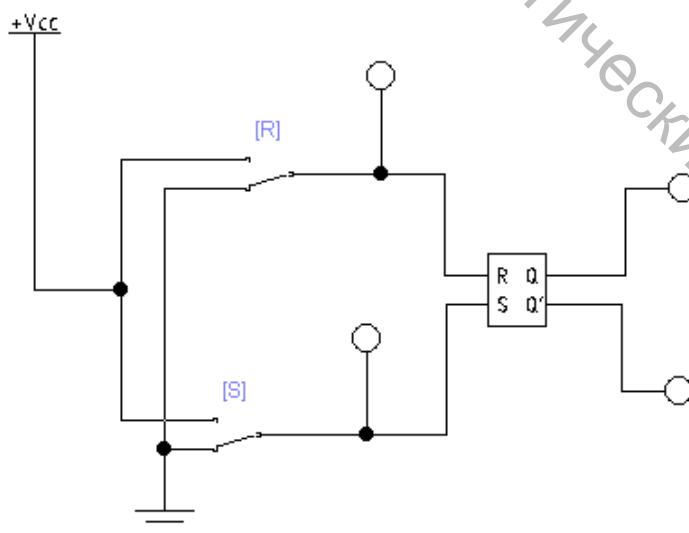


Рисунок 15.9 – Схема для исследования асинхронного RS -триггера с прямыми входами

Установить с помощью клавиш S и R на входах триггера уровни сигналов, соответствующие комбинации $S = 0$ и $R = 0$ (контакты переключателей S и R в нижнем положении).

Включив схему, зафиксировать уровни выходных логических сигналов Q и $\bar{Q}$ триггера при различных комбинациях логических сигналов на входах S и R . Красный цвет индикаторов соответствует высокому уровню напряжения ($+5В$ – уровень логической единицы), а белый – низкому ($0В$ – логический ноль). По результатам эксперимента заполнить таблицу истинности асинхронного RS -триггера с прямыми входами (табл. 15.5).

Таблица 15.5 – Таблица истинности асинхронного RS -триггера с прямыми входами

S	R	Q	$\bar{Q}$	Режим работы триггера
0	0			Хранение информации
0	1			Установка нуля
1	0			Установка единицы
1	1			Запрещенная комбинация

2. Для исследования асинхронного RS -триггера с инверсными входами, реализованного на логических элементах И-НЕ, собрать схему, изображенную на рисунке 15.10. В качестве логических элементов использовать элементы 2-Input NAND Gate  панели Logic Gates .

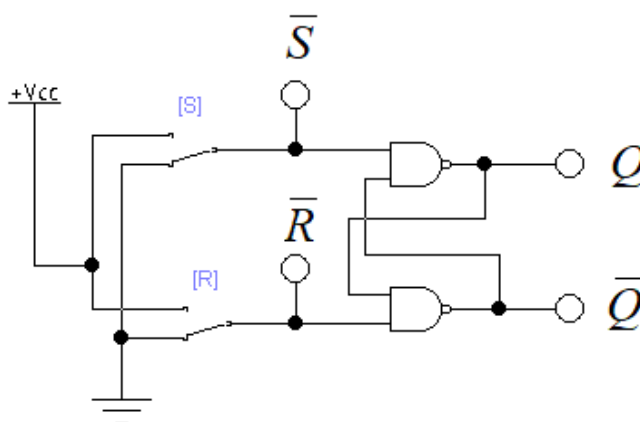


Рисунок 15.10 – Схема для исследования асинхронного RS -триггера с инверсными входами на логических элементах И-НЕ

Установить с помощью клавиш S и R на входах триггера уровни сигналов, соответствующие комбинации $\bar{S} = 0$ и $\bar{R} = 0$ (контакты переключателей S и R в нижнем положении).

Включив схему, зафиксировать уровни выходных логических сигналов Q и $\bar{Q}$ триггера при различных комбинациях логических сигналов на входах S и R . По результатам эксперимента заполнить таблицу истинности асинхронного RS -триггера с инверсными входами (табл. 15.6).

Таблица 15.6 – Таблица истинности асинхронного RS -триггера с инверсными входами

$\bar{S}$	$\bar{R}$	Q	$\bar{Q}$	Режим работы триггера
0	0			Запрещенная комбинация
0	1			Установка единицы
1	0			Установка нуля
1	1			Хранение информации

3. Для исследования синхронного RS -триггера с прямыми входами, реализованного на логических элементах И-НЕ, собрать схему, изображенную на рисунке 15.11.

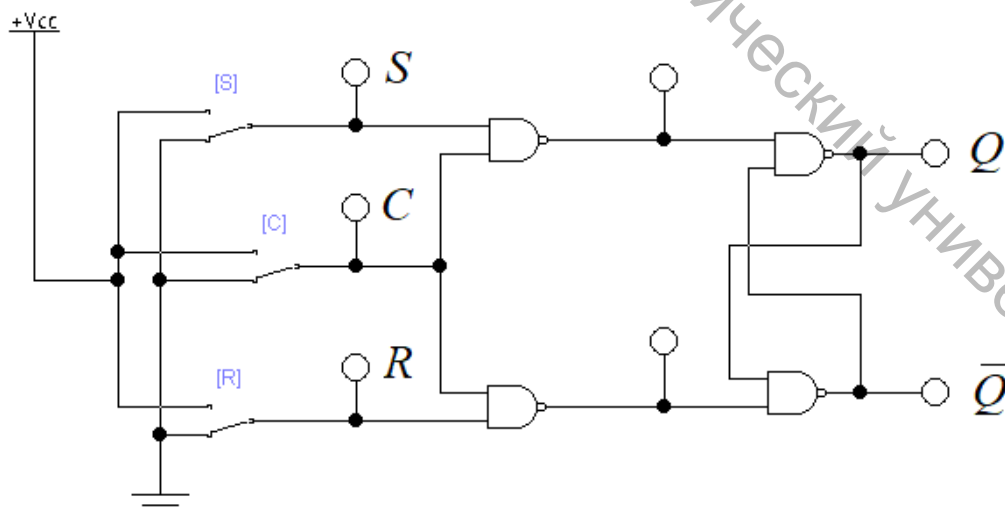


Рисунок 15.11 – Схема для исследования синхронного RS -триггера с прямыми входами на логических элементах И-НЕ

Установить с помощью клавиш S и R на входах триггера уровни сигналов, соответствующие комбинации $S=0$, $C=0$ и $R=0$ (контакты переключателей S , C и R в нижнем положении).

При первом включении схемы индикаторы выходов будут мигать. Это связано с тем, что моделирующая программа не может разрешить противоречие: $C=S=R=0$, то есть, задан режим хранения, но значения Q^t и $\bar{Q}^t$ при этом неизвестны.

Поэтому перед началом эксперимента обязательно должна быть произведена установка триггера в определённое состояние, например, логический 0. Для этого в схему необходимо ввести элемент Time-Delay Switch

(реле времени)  панели Basic  (рис. 15.12).

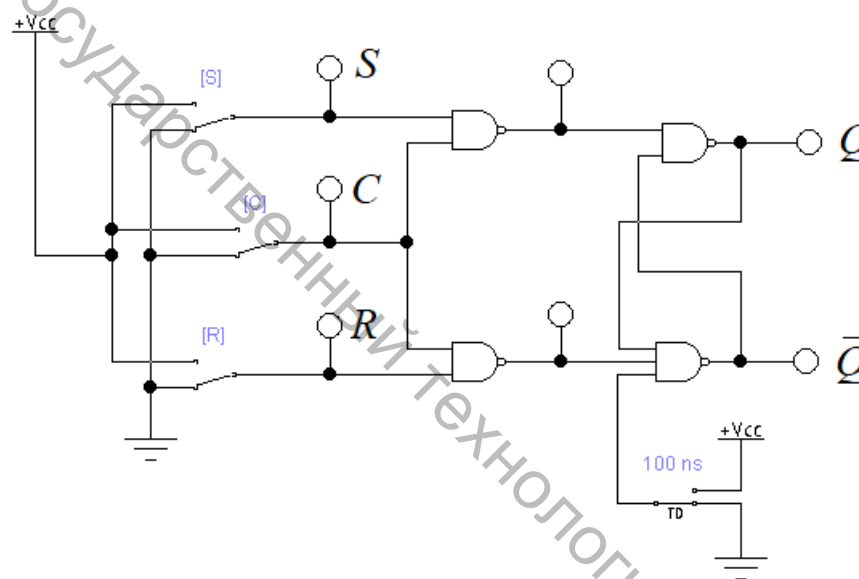


Рисунок 15.12 – Схема для исследования синхронного RS -триггера с установкой в начальное состояние

Двойным нажатием на данный элемент левой клавиши мыши вызвать диалоговое окно и установить $Time\ on = 100\ ns$, $Time\ off = 10000\ s$. Таким образом, в момент начала моделирования реле подаёт логический 0 на дополнительный вход статического элемента памяти, а через $100\ ns$ переключается и подаёт на этот вход логическую 1.

Так как в библиотеке компонентов нет пиктограммы трехвходового логического элемента 3И-НЕ, то необходимо сделать следующее: двойным нажатием левой клавиши мыши на логический элемент 2-Input NAND Gate  вызвать диалоговое окно, открыть вкладку Number of Inputs, установить переключатель в положение 3 и нажать «ОК» (рис. 15.13).

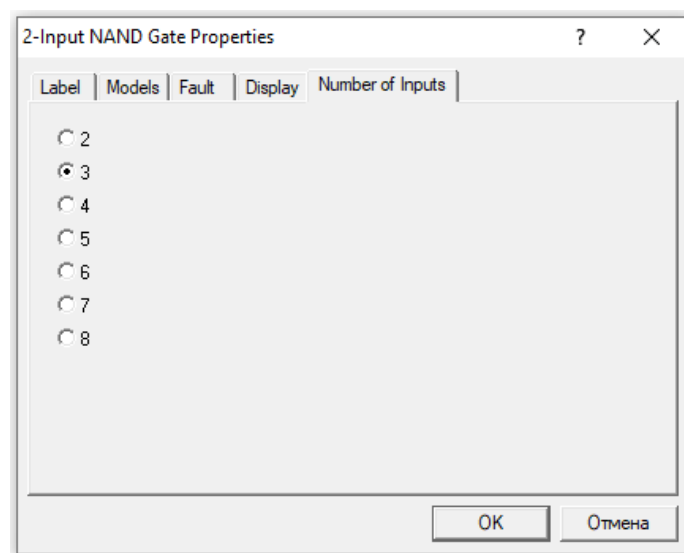


Рисунок 15.13 – Моделирование трехвходового логического элемента 3И-НЕ

Включив схему, зафиксировать уровни выходных логических сигналов Q и $\bar{Q}$ триггера при различных комбинациях логических сигналов на входах S , C и R . По результатам эксперимента заполнить таблицу истинности синхронного RS -триггера с прямыми входами (табл. 15.7).

Таблица 15.7 – Таблица истинности синхронного RS -триггера с прямыми входами

C	S	R	Q	$\bar{Q}$	Режим работы триггера
0	0	0			Хранение информации
1	0	0			Хранение информации
0	1	0			Хранение информации
1	1	0			Установка единицы
0	0	1			Хранение информации
1	0	1			Установка нуля
0	1	1			Хранение информации
1	1	1			Запрещенная комбинация

4. Для исследования комбинированного JK -триггера собрать схему, изображенную на рисунке 15.14. В качестве JK -триггера использовать элемент JK Flip-Flop with Active High Asynch Inputs панели Digital. Обозначения на пиктограмме данного JK -триггера: J , K – информационные входы, Δ – тактовый вход; вывод сверху – асинхронная предустановка триггера в единичное состояние ($Q = 1$) вне зависимости от состояния сигналов на входах (функционально аналогичен входу S RS -триггера); вывод снизу – асинхронная предустановка триггера в нулевое состояние (функционально аналогичен входу R RS -триггера).

Установить с помощью клавиш S , J , C , K и R на входах триггера уровни сигналов, соответствующие комбинации $S = 0$, $J = 0$, $C = 0$, $K = 0$ и $R = 0$ (контакты переключателей S , J , C , K и R в нижнем положении).

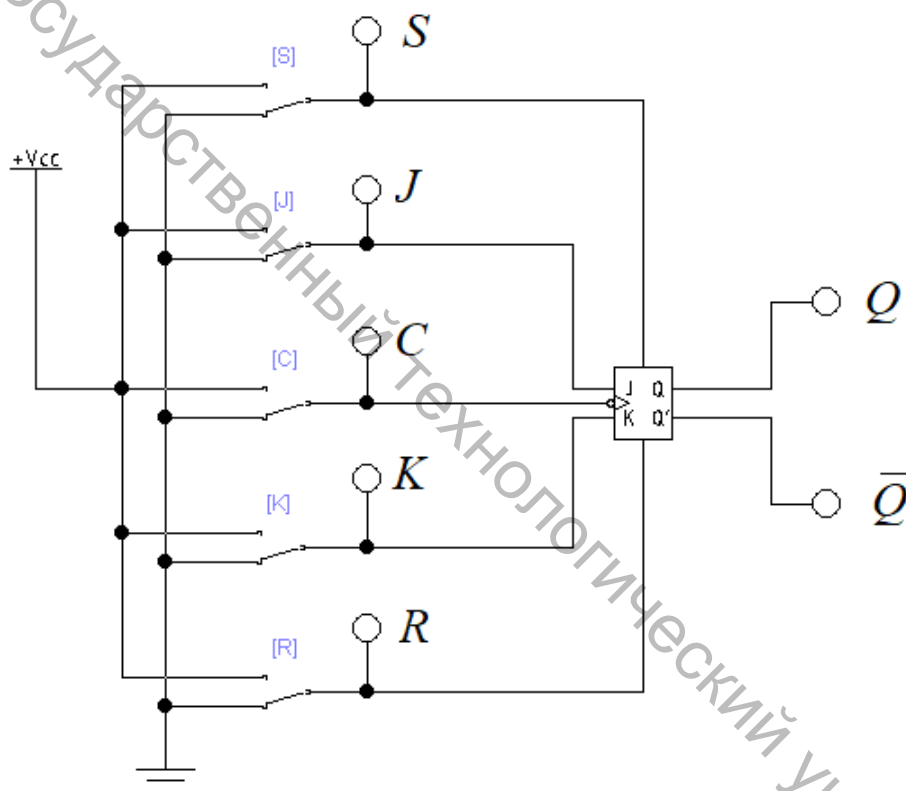


Рисунок 15.14 – Схема для исследования JK -триггера

Включив схему, убедиться в отсутствии сигналов на выходах JK -триггера. Осуществить предустановку триггера в нулевое состояние, установив на входе R триггера уровень сигнала $R = 1$. Убедиться, что на выходах триггера установятся уровни сигналов, соответствующие комбинации $Q = 0$ и $\bar{Q} = 1$.

Переведя контакт переключателя R в нижнее положение, установить на входе R триггера уровень сигнала $R = 0$. Убедиться, что комбинация сигналов на выходах триггера не изменится.

Устанавливая различные комбинации логических сигналов на входах J , C и K , зафиксировать уровни выходных логических сигналов Q и $\bar{Q}$ триггера. По результатам эксперимента заполнить таблицу истинности JK -триггера (табл. 15.8).

Таблица 15.8 – Таблица истинности JK -триггера

C	J	K	Q	$\bar{Q}$	Режим работы триггера
0	0	0			Хранение информации
1	0	0			Хранение информации
1	1	0			Установка единицы
1	0	1			Установка нуля
1	1	1			Счетный режим
1	1	1			Счетный режим

5. Для исследования JK -триггера, реализованного на логических элементах И-НЕ, собрать схему, изображенную на рисунке 15.15.

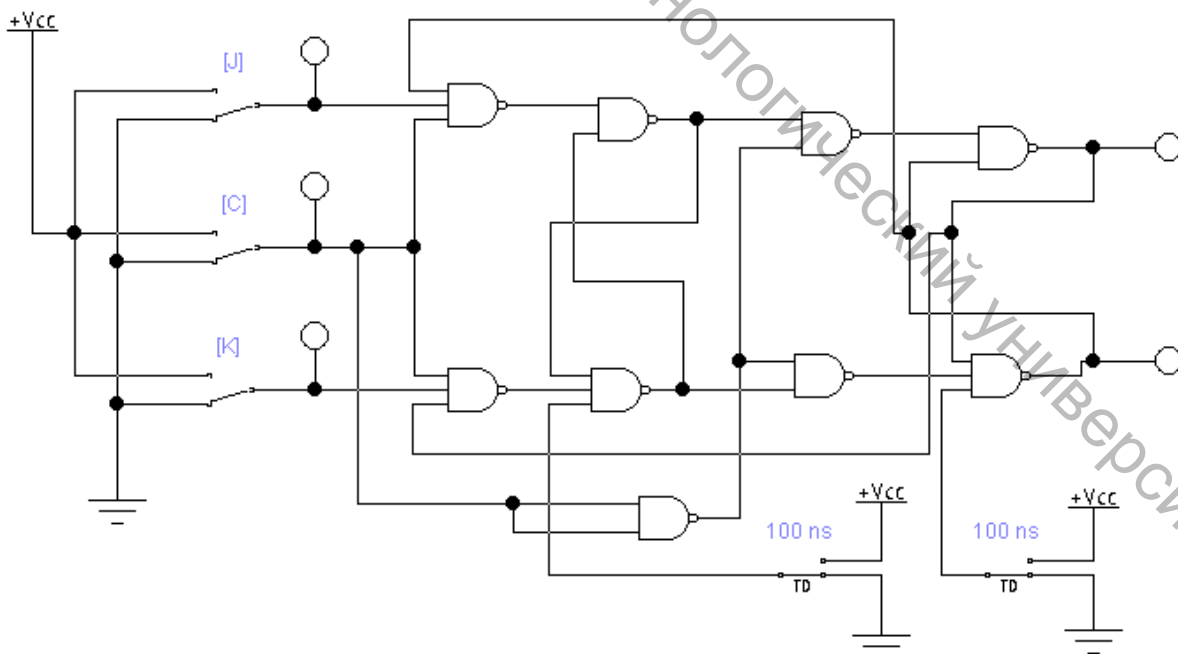


Рисунок 15.15 – Схема для исследования JK -триггера на логических элементах И-НЕ

Включив схему, зафиксировать уровни выходных логических сигналов Q и $\overline{Q}$ триггера при различных комбинациях логических сигналов на входах J , C и K . По результатам эксперимента убедиться в правильности заполнения таблицы истинности JK -триггера (табл.15.8) в п. 4.

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Рисунок 15.1.
3. Таблица 15.5 с результатами моделирования схемы рисунка 15.9.
4. Рисунок 15.4.
5. Таблица 15.6 с результатами моделирования схемы рисунка 15.10.
6. Рисунок 15.6.
7. Таблица 15.7 с результатами моделирования схемы рисунка 15.12.
8. Рисунок 15.7.
9. Таблица 15.8 с результатами моделирования схемы рисунка 15.14.
10. Рисунок 15.8.

Контрольные вопросы

1. Что такое триггер?
2. Поясните устройство и принцип действия асинхронных RS -триггеров.
3. Поясните устройство и принцип действия синхронных RS -триггеров.
4. Поясните устройство и принцип действия JK -триггера.

Литература

1. Алексеев, А. Г. Операционные усилители и их применение / А. Г. Алексеев, Г. В. Войшвилло. – Москва : Радио и связь, 1989. – 120 с.
2. Воронцов, И. В. Схемотехника : методические указания к лабораторным работам / И. В. Воронцов, В. П. Золотов. – Самара : Самарский государственный технический университет, 2000. – 59 с.
3. Гусев, В. Г. Электроника и микропроцессорная техника : учебник / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. – Москва : КНОРУС, 2013. – 800 с.
4. Дорошков, А. В. Теория и компьютерное моделирование устройств электроники : учебное пособие / А. В. Дорошков. – Санкт-Петербург : СПбГУНиПТ, 2006. – 131 с.
5. Забродин, Ю. С. Промышленная электроника : учебник для вузов / Ю. С. Забродин. – Москва : Высшая школа, 1982. – 496 с.
6. Королев, Г. В. Электронные устройства автоматики : учебное пособие для средних специальных учебных заведений / Г. В. Королев. – Москва : Высшая школа, 1991. – 256 с.
7. Морозов, А. Г. Электротехника, электроника и импульсная техника : учебник для вузов / А. Г. Морозов. – Москва : Высшая школа, 1987. – 448 с.
8. Никулин, В. И. Электроника : методические указания к лабораторным работам / В. И. Никулин. – Ставрополь : СКФУ, 2017. – 114 с.
9. Основы промышленной электроники : учебник для вузов / В. Г. Герасимов [и др.] ; под ред. В. Г. Герасимова. – Москва : Высшая школа, 1986. – 336 с.
10. Ткаченко, Ф. А. Техническая электроника / Ф. А. Ткаченко. – Минск : Дизайн ПРО, 2000. – 352 с.
11. Храпунова, М. О. Источники питания радиоэлектронных устройств : методические указания для выполнения лабораторных работ / М. О. Храпунова. – Брест : Филиал БрГТУ Политехнический колледж, 2017. – 84 с.
12. Электротехника и электроника : учебник / Б. И. Петленко [и др.] ; под ред. Б. И. Петленко. – Москва : Академия, 2007. – 320 с.
13. Электротехника с основами электроники : учебник для учащихся профессиональных училищ, лицеев и студентов колледжей / А. А. Федорченко, Ю. Г. Синдеев. – Москва : Дашков и К, 2007. – 416 с.

Учебное издание

ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

Лабораторный практикум

Составители:

Куксевич Виталий Федорович
Клименкова Светлана Александровна
Черненко Дмитрий Владимирович

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

Подписано к печати 23.05.2023. Формат 60x90 $\frac{1}{16}$. Усл. печ. листов 7,7.
Уч.-изд. листов 9,7. Тираж 2 экз. Заказ № 144.

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.