

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования

МИРЭА - Российский технологический университет

---

**В.К. Битюков, Д.С. Симачков**

## **СХЕМОТЕХНИКА ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ**

Методические указания  
по выполнению лабораторных работ  
для студентов, обучающихся по направлениям  
бакалавриата 11.03.01 Радиотехника,  
11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и  
системы связи, 11.03.03 Конструирование и  
технология электронных средств и  
специальности 11.05.01 Радиоэлектронные  
системы и комплексы

*Утверждено редакционно-издательским советом РТУ  
МИРЭА в качестве методического пособия для студентов*

Подготовлено на кафедре радиоволновых процессов и технологий

Рецензенты: д.т.н. профессор Г.В. Куликов,

д.т.н. профессор В.Ю. Кириллов

### **Битюков В.К.**

Схемотехника электронных устройств: Методические указания по выполнению лабораторных работ / В.К. Битюков, Д.С. Симачков. — М.: РТУ МИРЭА, 2020. — 45 с.

В методических указаниях по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Схемотехника электронных устройств» изложены вопросы физики и схемотехники DC/DC преобразователей, построенных по топологии с накачкой заряда, а также регулируемых и нерегулируемых выпрямителей. Значительное внимание уделено методике экспериментального исследования их основных характеристик и параметров.

Данные методические указания предназначены для студентов, обучающихся по направлениям бакалавриата 11.03.01 Радиотехника, 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи, 11.03.03 Конструирование и технология электронных средств и специальности 11.05.01 Радиоэлектронные системы и комплексы

## ВВЕДЕНИЕ

Лабораторные работы по дисциплине «Схемотехника электронных устройств» выполняются на четырех учебных стендах, созданных на основе макетов, разработанных и изготовленных в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» (СПбГЭТУ) и одном учебно-научном стенде, разработанном и изготовленном в РТУ МИРЭА. Подробные описания макетов СПбГЭТУ приведены в [1], а стенд МГТУ МИРЭА описан в статье [2]. Методические аспекты выполнения лабораторных работ и обработки полученных экспериментальных данных приведены в [2...5].

В первой лабораторной работе изучается принцип работы, физика и схемотехника DC/DC преобразователя, построенного по топологии с накачкой заряда.

Экспериментальное исследование процессов, протекающих в схемах однофазных неуправляемых выпрямителей, а также влияния пассивных сглаживающих фильтров на основные характеристики и параметры неуправляемых выпрямителей реализуется во второй лабораторной работе.

На изучение принципа действия и схемотехники управляемого выпрямителя (УВ), построенного по схеме со средней точкой и экспериментальное исследование процессов, протекающих в УВ, а также влияния характера нагрузки на процессы, характеристики и параметры УВ направлена третья лабораторная работа.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

### СТАБИЛИЗИРОВАННЫЙ DC/DC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ, ПОСТРОЕННЫЙ ПО ТОПОЛОГИИ С НАКАЧКОЙ ЗАРЯДА

#### 1.1. Цель работы

Изучение принципов работы, физики и схемотехники импульсных стабилизированных ИВЭ понижающего и повышающего типа с накачкой заряда.

#### 1.2. DC/DC преобразователи по топологии с накачкой заряда

В типовых импульсных DC/DC преобразователях для накопления энергии и последующей передачи ее в нагрузку используются индуктивности (дрессели, трансформатора), то есть устройства, обладающие индуктивностью. В магнитном поле этих устройств и накапливается энергия, поступающая со входа и передаваемая затем на выход преобразователя.

В DC/DC преобразователях, построенных по топологии с накачкой заряда (Charge Pump), для накопления и переноса энергии используются конденсаторы, которые называются «летающими» конденсаторами или переключаемыми конденсаторами. «Летающий» конденсатор выполняет функции накопления и управляемого переноса энергии со входа преобразователя на его выход.

Преобразователи с накачкой заряда применяются в малогабаритных ИВЭ, как правило, получающих энергию от литий-ионных батарей. С помощью таких преобразователей можно получить стабилизированное выходное напряжение как выше, так и ниже напряжения батареи. Невысокая стоимость и малые массогабаритные характеристики выгодно отличают их от преобразователей, имеющих другой принцип работы.

Принцип работы DC/DC преобразователей с накачкой заряда состоит в том, что в течение некоторого времени летающий конденсатор заряжается входным напряжением  $U_{вх}$ , а затем в течение некоторого времени передает накопленную энергию выходному конденсатору, параллельно которому включена нагрузка  $R_{н}$ .

Отсутствие в DC/DC преобразователях с накачкой заряда статических электромагнитных устройств делает их применение более

предпочтительным по сравнению с преобразователями с индуктивностями в тех случаях, когда требуется электропитание с малым энергопотреблением (менее 200 мА), малой занимаемой площадью на печатной плате и минимальной высотой.

Модельная схема рассматриваемого типа DC/DC преобразователей может быть представлена мостовой схемой, в диагональ которой по переменному току включен «летающий» конденсатор, а диагонально расположенные ключи моста работают синхронно попарно и поочередно.

В функционировании таких преобразователей различают две фазы: фаза накопления энергии «летающим» конденсатором (рисунок 1.1) и фаза передачи энергии «летающего» конденсатора в нагрузку (рисунок 1.2).

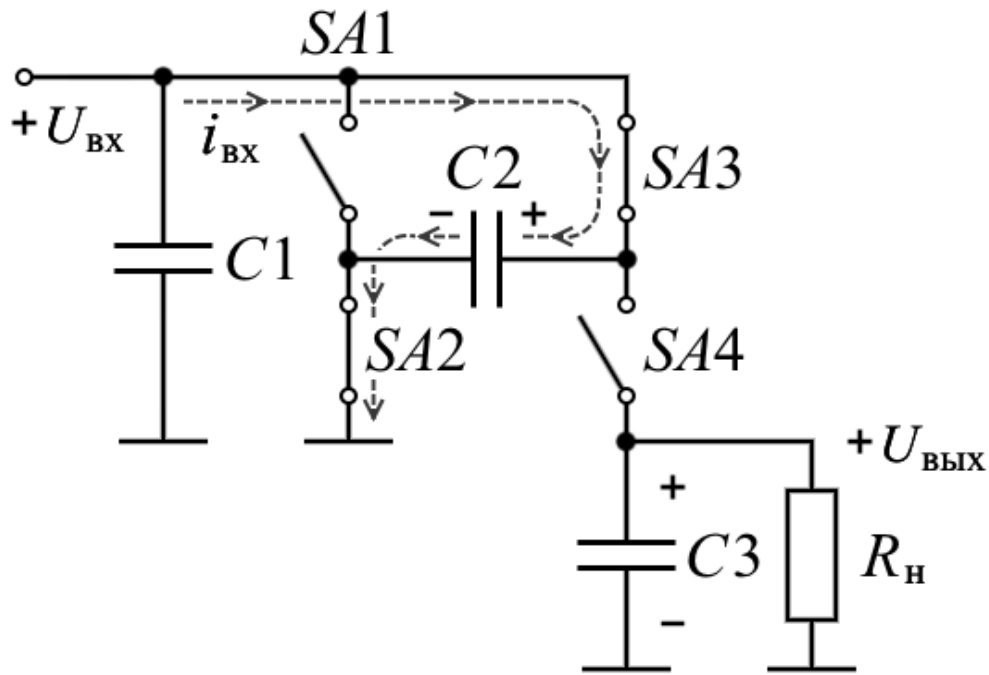


Рисунок 1.1 - Схема DC/DC преобразователя в фазе накопления энергии «летающим» конденсатором

В фазе накопления энергии «летающим» конденсатором  $C2$  ключи  $SA1$  и  $SA4$  разомкнуты, а ключи  $SA3$  и  $SA2$  замкнуты и ток  $i$  протекает по цепи:  $+U_{ВХ} \rightarrow SA3 \rightarrow C2 \rightarrow SA2 \rightarrow \text{«земля»}$ . «Летающий» конденсатор  $C2$  заряжается практически до входного напряжения, то есть  $U_{C2} = U_{ВХ}$ . Полярность напряжения  $U_{C2}$  на «летающем» конденсаторе указана на рисунке 1.1. В этой фазе напряжение на нагрузке  $R_H$  определяет выходной конденсатор  $C3$ .

В фазе передачи энергии «летающего» конденсатора  $C2$  (рисунок 1.2) в нагрузку ключи  $SA1$  и  $SA4$  замкнуты, а ключи  $SA3$  и  $SA2$  разомкнуты и ток  $i$  протекает по цепи:  $+U_{ВХ} \rightarrow SA1 \rightarrow C2 \rightarrow$

$SA4 \rightarrow C3 || R_H \rightarrow \text{«земля»}$ .

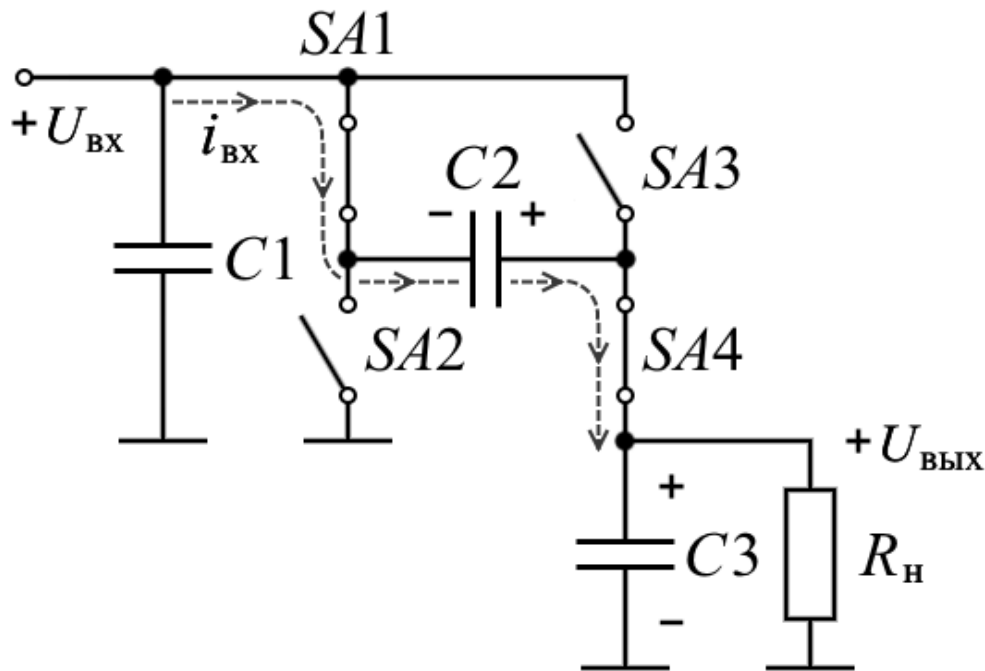


Рисунок 1.2 - Схема DC/DC преобразователя в фазе передачи энергии «летающего» конденсатора в нагрузку

Из схемы, приведенной на рисунке 1.2, видно, что входное напряжение  $U_{ВХ}$  и напряжение  $U_{C2}$  на «летающем» конденсаторе  $C2$  включены последовательно. По этой причине выходной конденсатор  $C3$  заряжается до напряжения равного  $U_{ВХ} + U_{C2}$ . Учитывая, что  $U_{C2} = U_{ВХ}$ , то можно записать  $U_{ВЫХ} = 2 \cdot U_{ВХ}$ . Фактически рассматриваемый преобразователь работает в режиме удвоителя напряжения.

На входе преобразователей обычно включают входной конденсатор  $C1$ .

В качестве «летающих» конденсаторов используются керамические конденсаторы емкостью  $\sim 0,1 \dots 10$  мкФ с малым внутренним сопротивлением.

Частота преобразования  $f_{П}$  в DC/DC преобразователях с накачкой заряда задается соответствующим драйвером в интервале от  $\sim 50$  кГц до  $\sim 4$  МГц. В datasheet на микросхемы, реализующие такие преобразователи, указывается конкретное значение частоты преобразования  $f_{П}$ . Например, в микросхемах LTC3260 (Linear Technology), разработанных в 2016 году и реализующих двухполярные DC/DC преобразователи, используется накачка заряда. Эта микросхема является комбинированной. Отрицательное напряжение вырабатывает инвертор с накачкой заряда, за которым следует LDO (линейный стабилизатор с малым падением напряжения), а

положительное выходное напряжение вырабатывает LDO положительного напряжения. Тактовая частота системы накачки заряда отрицательного выходного напряжения составляет 2 МГц.

Более того, частота преобразования микросхем может изменяться в процессе ее работы из-за внешних эксплуатационных причин.

Характерные диаграммы напряжений для рассматриваемого преобразователя приведены на рисунке 1.3. У устойчиво работающего преобразователя выделяют две фазы работы.

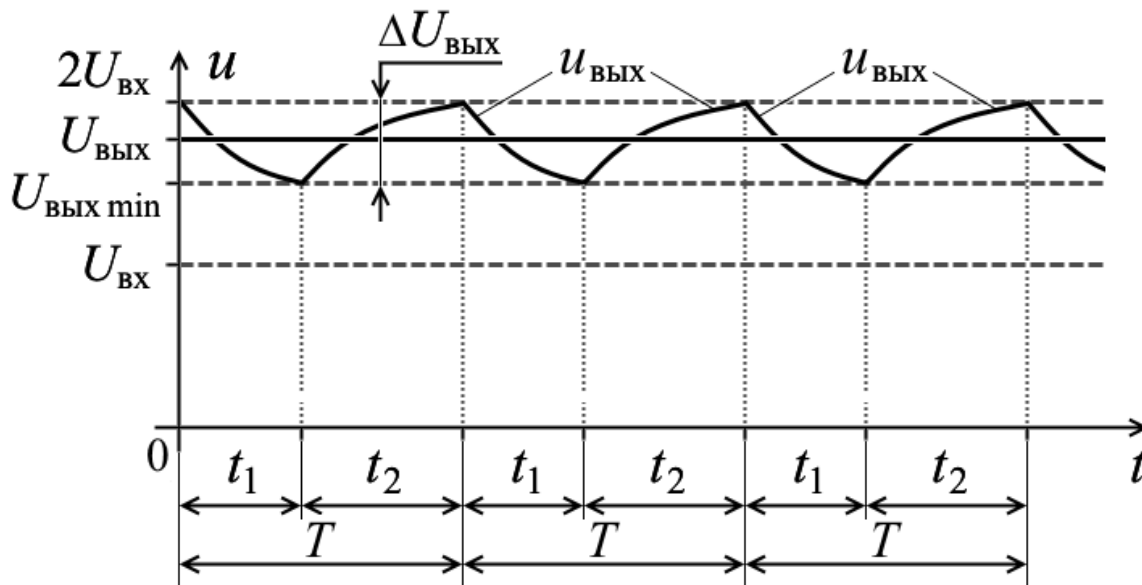


Рисунок 1.3 - Диаграммы напряжений для DC/DC преобразователя с накачкой заряда

В течение первой фазы работы преобразователя (интервал времени на рисунке 1.3 обозначен  $t_1$ ) выходной конденсатор  $C3$  разряжается на нагрузку  $R_H$  и мгновенное выходное напряжение  $u_{ВЫХ}$  преобразователя уменьшается по экспоненциальному закону от  $2 \cdot U_{ВХ}$  до  $U_{ВЫХ min}$ .

В течение второй фазы работы преобразователя (интервал времени на рисунке 1.3 обозначен  $t_2$ ) выходной конденсатор  $C3$  подзаряжается и мгновенное выходное напряжение  $u_{ВЫХ}$  увеличивается от  $U_{ВЫХ min}$  до  $2 \cdot U_{ВХ}$ . Размах пульсаций выходного напряжения  $\Delta U_{ВЫХ} = 2 \cdot U_{ВХ} - U_{ВЫХ min}$ . Видно, что после соответствующей фильтрации мгновенного выходного напряжения  $u_{ВЫХ}$  постоянная составляющая выходного напряжения  $U_{ВЫХ}$  превышает  $U_{ВХ}$  и приближается к  $2U_{ВХ}$ .

Передача энергии со входа на выход рассмотренного DC/DC преобразователя происходит лишь в течение второй фазы, то есть это однотактная схема.

Частота колебаний мгновенных значений напряжения на нагрузке равна частоте коммутаций ключей.

При проектировании DC/DC преобразователей особое внимание обращают на устранение главных их недостатков: малая нагрузочная способность, повышенные пульсации и стабильность выходного напряжения.

Проблема малой нагрузочной способности была решена применением в качестве «летающих» конденсаторов керамических конденсаторов, которые имеют низкое внутреннее сопротивление и емкость до сотен микрофард. Это позволило переносить большие заряды на высоких частотах (до  $\sim 4$  МГц).

Проблема повышенных пульсаций была решена применением двухтактной схемы DC/DC преобразователя, реализующей удвоитель напряжения, (рисунок 1.4 и рисунок 1.5).

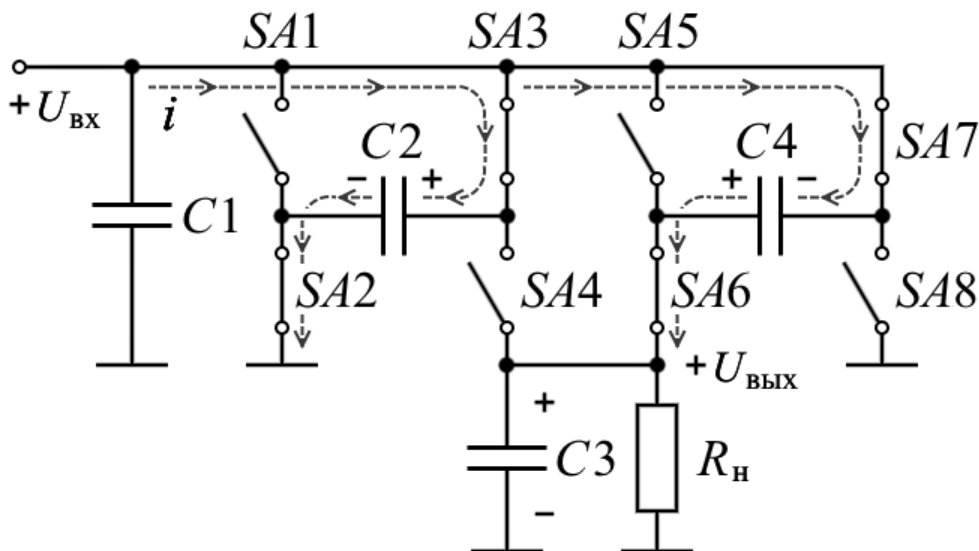


Рисунок 1.4 - Схема двухтактного DC/DC преобразователя в первом такте его работы

Схема двухтактного преобразователя с накачкой заряда представляет собой два однотактных преобразователя, включенных параллельно и работающих в противофазе на одну нагрузку.

У устойчиво работающего преобразователя выделяют два такта работы.

В первом такте работы DC/DC преобразователя (рисунок 1.4) ключи SA1, SA4 и SA5, SA8 разомкнуты, а ключи SA3, SA2 и SA7, SA6 замкнуты, «летающий» конденсатор C2 подзарядается до напряжения практически равного  $U_{ВХ}$ , а «летающий» конденсатор C4, включенный последовательно со входным напряжением, разряжается на выходной конденсатор C3, параллельно которому включена нагрузка  $R_H$ .



Во втором такте работы DC/DC преобразователя (рисунок 1.5) ключи  $SA1$ ,  $SA4$  и  $SA5$ ,  $SA8$  замкнуты, а ключи  $SA3$ ,  $SA2$  и  $SA7$ ,  $SA6$  разомкнуты, «летающий» конденсатор  $C4$  подзаряжается до напряжения практически равного  $U_{ВХ}$ , а «летающий» конденсатор  $C2$ , включенный последовательно со входным напряжением, разряжается на выходной конденсатор  $C3$ , параллельно которому включена нагрузка  $R_H$ .

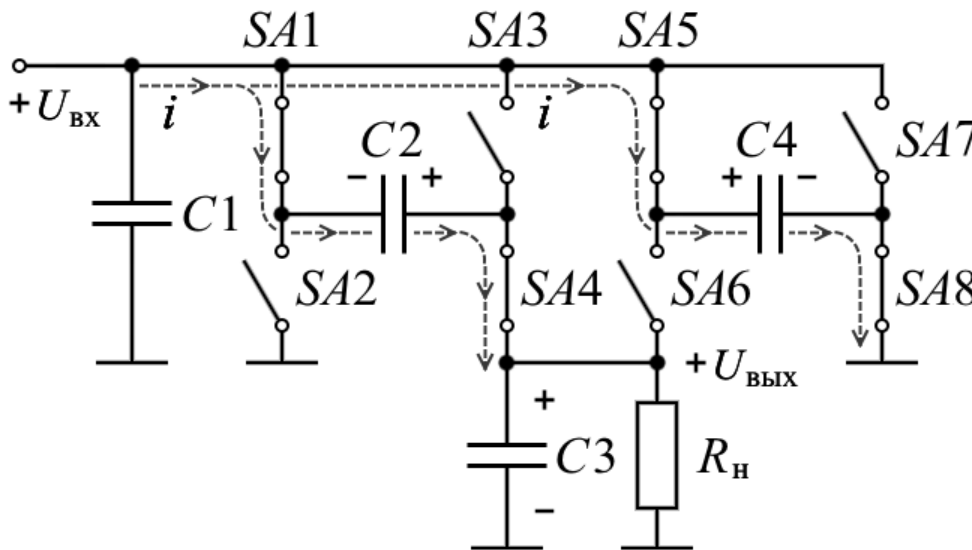


Рисунок 1.5 - Схема двухтактного DC/DC преобразователя во втором такте его работы

Цепи, по которым протекают токи, формирующие выходное напряжение, на рисунке 1.4 и рисунке 1.5 показаны штриховой линией.

Следовательно, в первый такт работы преобразователя «летающий» конденсатор  $C2$  подзаряжается до напряжения  $U_{ВХ}$ , а «летающий» конденсатор  $C4$  разряжается на нагрузку. Во второй такт работы преобразователя конденсатор  $C4$  подзаряжается до напряжения  $U_{ВХ}$ , а конденсатор  $C2$  разряжается на нагрузку. Таким образом передача энергии в нагрузку проходит непрерывно, а значит  $U_{ВЫХ} = 2 \cdot U_{ВХ} = const$  и размах пульсаций  $\Delta U_{ВЫХ}$  выходного напряжения  $U_{ВЫХ}$  практически равен нулю.

Стабилизация выходного напряжения  $U_{ВЫХ}$  в DC/DC преобразователях реализуется четырьмя алгоритмами: изменением способа коммутации, преобразованием с пропуском импульсов, преобразованием с постоянной частотой и применением комбинированного алгоритма управления, представляющего собой сочетание алгоритмов управления с пропуском импульсов и преобразования с постоянной частотой.

Основные сведения о некоторых микросхемах, выполненных по топологии с накачкой заряда, для построения DC/DC преобразователей приведены в таблице 1.1.

*Таблица 1.1 - Основные сведения о микросхемах с накачкой заряда для построения DC/DC преобразователей*

№ п.п .	Тип микросхе мы	Функция микросхемы	$U_{ВХ}$ В	$U_{ВЫХ}$ В	$I_{ВЫХ}$ мА	$f_{п}$ кГц	Производителе
1	LM27762	Низкошумящий инвертирующий DC/DC преобразователь с положительными и отрицательными LDO стабилизаторами	2,7 ... 5,5	$\pm 1,5$ ... $\pm 5,0$	25 0	200 0	Texas Instruments
2	LTC3260	Инвертирующий DC/DC преобразователь с двумя малошумящими LDO стабилизаторами	4,5 ... 32,0	До $\pm 0,9$ 4 $U_{ВХ}$	10 0	50 ... 500	Linear Technology Corporation
3	LTC3245	Повышающе-понижающий DC/DC преобразователь	2,7 ... 38,0	3,3; 5,0; 2,5 ... 5,0	25 0	450	Linear Technology Corporation
4	MAX1759	Повышающе-понижающий DC/DC преобразователь	1,6 ... 5,5	3,3; 2,5 ... 5,5	10 0		Maxim Integrated Products

### 1.3. Описание лабораторного стенда

Структурная схема стенда и принципиальная схема модуля накачки заряда представлены в [2...4]. Разработаны два типа макетов, отличающихся объектом исследований. Одним из таких объектов является микросхема МАХ1759, другим – микросхема МСР1253. Микросхемы имеют отличия по некоторым параметрам. Функциональные схемы макетов отражены на их передних панелях. В качестве примера на рисунке 1.6 показана одна из них.

На передней панели имеется выключатель питания макета от промышленной сети переменного напряжения 220 В и частотой 50 Гц, шесть кнопок управления переключателями, гнезда ХТ1 и ХТ2 для измерения входного тока  $I_{\text{вх}}$ , ХТ3 и ХТ4 для измерения входного напряжения  $U_{\text{вх}}$ , ХТ5 и ХТ6 для измерения выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$ , ХТ7 и ХТ8 для измерения выходного тока  $I_{\text{вых}}$ , ХТ9 и ХТ10 для вывода импульсов динамического управления нагрузкой и несколько индикаторов. Динамическое управление нагрузкой осуществляется путем периодического разрыва ее цепи. При этом период коммутации составляет примерно 300 мкс, а промежуток времени, в течение которого нагрузка находится в разрыве, составляет примерно 30 мкс. Входное напряжение изменяется с помощью переключателя SA1, напряжение на выходе микросхемы – с помощью переключателя SA2, сопротивление нагрузки – с помощью переключателя SA4, а подключение и отключение динамической нагрузки осуществляется с помощью переключателя SA3. Измерение  $I_{\text{вх}}$  и  $I_{\text{вых}}$  осуществляется путем измерения напряжения  $U_{\text{изм}}(I)$  на выходе усилителей DA1 и DA3, которые подключаются к включенным в цепи измеряемых токов резисторам R1 и R19 сопротивлением  $R_I = 0,2 \text{ Ом}$ . Усилители имеют коэффициент усиления  $k_{\text{ус}} = 100$ . В этом случае величина соответствующего тока может быть рассчитана по формуле.

$$I = \frac{U_{\text{изм}}(I)}{R_I \cdot k_{\text{ус}}} \quad (1.1)$$

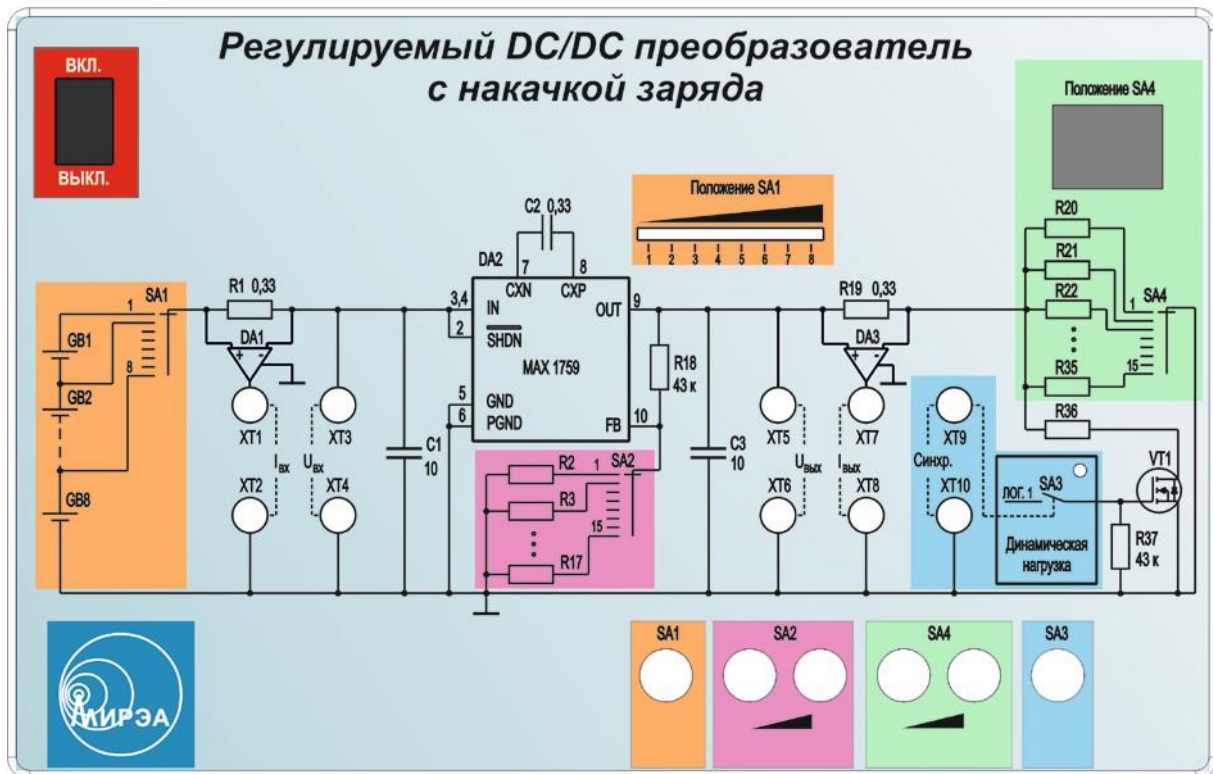


Рисунок 1.6 - Передняя панель макета с микросхемой MAX1759

Передняя панель макета с микросхемой MCP1253 выглядит аналогично представленной на рисунке 1.6.

Используемые в качестве объекта исследований микросхемы MAX1759 и MCP1253 являются преобразователем DC-DC, которые стабилизируют выходное напряжение при изменении входного напряжения в диапазоне как выше, так и ниже выходного. Данное свойство весьма необходимо, например, при использовании в качестве источника питания различной малогабаритной аппаратуры Li+ батарей, которые в течение срока службы меняют своё напряжение от 3,6 В до 1,5 В. В этом случае для того, чтобы получать на выходе преобразователя DC-DC напряжение 3,3 В, сначала требуется понижающий преобразователь. При снижении напряжения батареи ниже 3,3 В требуется повышающий преобразователь. Уникальные возможности поддержания выходного напряжения ниже или выше входного напряжения достигаются применением оригинальной схемы управления, которая реализует либо режим регулируемого удвоителя напряжения ( $U_{ВХ} < U_{ВЫХ}$ ), либо режим понижающего стробируемого ключа ( $U_{ВХ} > U_{ВЫХ}$ ), в зависимости от входного напряжения и тока нагрузки.

Все сигналы постоянного напряжения измеряются мультиметром 34405А. Регистрация форм переменных составляющих сигналов, подаваемых на закрытые входы осциллографа GDS-820С.

## 1.4. Программа выполнения работы

Перед выполнением работы необходимо ознакомиться с экспериментальным стендом и лабораторным макетом, изучить его переднюю панель, гнезда для подключения измерительного оборудования и кнопки управления. После этого включить компьютер, мультиметр, осциллограф и макет.

### 1.4.1. Исследование регулировочных характеристик $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$

Регулировочные характеристики представляют зависимость выходных параметров от входных. В схемах стабилизаторов напряжения выходными параметрами являются  $U_{\text{вых}}$  и  $I_{\text{вых}}$ , а входными  $U_{\text{вх}}$  и  $I_{\text{вх}}$ . Поскольку зависимости выходных параметров от входных изменяются с изменением сопротивления нагрузки, нужно ограничить область изменения некоторых определяющих параметров. Так как система управления макетом позволяет получать только 8 дискретных значений  $U_{\text{вх}}$ , уменьшать их число нецелесообразно. Но при каждом значении  $U_{\text{вх}}$  для анализа работы преобразователя достаточно ограничиться тремя значениями  $U_{\text{вых}}$ , находящимися в начале, середине и конце диапазона устанавливаемых значений, например, 2,5 В; 3,6 В и 5,2 В. В связи с большим объемом получаемой экспериментальной информации из 15 возможных значений выбора сопротивления нагрузки  $R_{\text{н}}$  можно выбрать лишь два значения, например, минимальное значение  $R_{\text{н1}} = 50 \text{ Ом}$  (соответствует установке значения 15 на индикаторе положения SA4), и максимальное значение  $R_{\text{н2}} = 820 \text{ Ом}$  (положение 1 на том же индикаторе). Таким образом, для каждого из двух выбранных значений сопротивления нагрузки результаты измерений могут быть занесены в таблицы, аналогичные таблице 1.2, форма которой приведена ниже. Все значения выходного напряжения целесообразно устанавливать при максимальном значении напряжения на входе. Обозначим его как  $U_{\text{вых0}}$ .

Таблица 1.2 - Результаты измерений при  $R_{\text{н1}} = 50 \text{ Ом}$  и  $U_{\text{вых0}} \cong 2,5 \text{ В}$

№ п.п	$U_{\text{вх}}, \text{ В}$	$I_{\text{вх}}, \text{ А}$	$U_{\text{вых}}, \text{ В}$	$I_{\text{вых}}, \text{ А}$	$U_{\text{вых}} \text{ р-р}, \text{ мВ}$	КПД, %
1						
...						
8						

В эту таблицу, кроме полученных с помощью мультиметра 34405 А результатов измерений  $U_{\text{вх}}$ ,  $I_{\text{вх}}$ ,  $U_{\text{вых}}$  и  $I_{\text{вых}}$ , впоследствии будет целесообразно добавить результаты измерений на осциллографе GDS-820С величин пульсаций измерений выходного напряжения от пика до пика  $U_{\text{вых}p-p}$  и результаты расчета коэффициента полезного действия (КПД). Затем при установленном значении сопротивления нагрузки  $R_{\text{н1}} = 50$  Ом нужно провести аналогичные циклы измерений для двух других значений выходного напряжения  $U_{\text{вых0}} \cong 3,6$  В и  $U_{\text{вых0}} \cong 5,2$  В и их результаты занести в аналогичные таблицы. При выполнении подобных циклов измерений при  $R_{\text{н2}}$  будет нужно оформить еще три таблицы.

#### ***1.4.2. Исследование форм переменных составляющих $U_{\text{вых}}$***

Формы переменных составляющих выходного напряжения позволяют понять принцип и алгоритм работы конкретных DC/DC преобразователей с накачкой заряда. Поэтому нужно получить формы  $U_{\text{вых}}$  для всех режимов, регулировочные характеристики которых будут получены ранее. Это нужно сделать с помощью осциллографа GDS-820С. В результате будут получены 6 файлов, в каждом из которых сохранены формы 8 сигналов, соответствующих 8 значениям входного напряжения, постоянные значения которых приведены в каждой из таблиц. Для регистрации форм в осциллографе нужно установить закрытые входы для обоих каналов, при этом к каналу 1 подключить сигнал  $U_{\text{вх}}$ , а к каналу 2 сигнал  $U_{\text{вых}}$ . Можно использовать однократный запуск от сигнала в канале 1 возрастающим фронтом. Включая с помощью кнопки SA1 различные значения входного напряжения  $U_{\text{вх}}$ , будут получены файлы с формами, пример которых показан на рисунке 1.7.

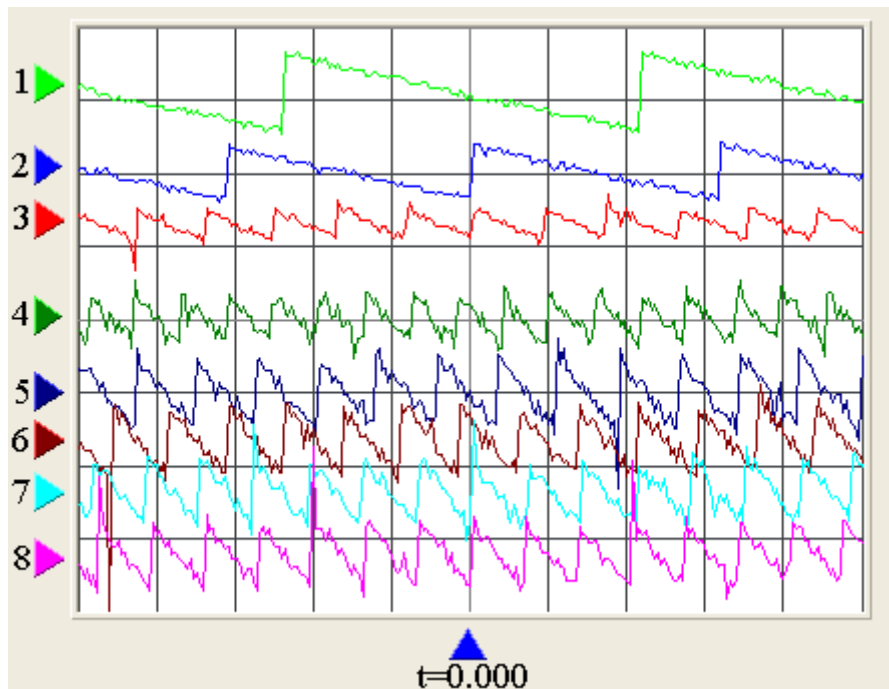


Рисунок 1.7 - Формы переменной составляющей выходного напряжения при  $U_{\text{вых0}} \cong 2,5 \text{ В}$ ,  $R_{\text{н1}} = 50 \text{ Ом}$  и различных входных напряжениях: 1, 2 – 50 мкс/дел., 100 мВ/дел.; 3 – 50 мкс/дел., 50 мВ/дел.; 4, 5, 6, 7, 8 – 50 мкс/дел., 20 мВ/дел.

Всего при выполнении лабораторной работы должно быть получено 6 таких рисунков.

При проведении этих измерений целесообразно установить оптимальные условия регистрации форм переменной составляющей  $U_{\text{вых}}$  в каждом режиме. В подписи к рисунку 1.7 в качестве примера указаны цены делений, которые могут быть использованы при такой регистрации.

#### 1.4.3. Исследование нагрузочных характеристик $U_{\text{вых}} = f(I_{\text{вых}})$

Для получения нагрузочных характеристик с помощью кнопок SA4 путем переключения нагрузочных резисторов можно получить 15 пар значений  $U_{\text{вых}}$  и  $I_{\text{вых}}$  для каждого из значений входного напряжения  $U_{\text{вх}}$ . При каждом из них можно устанавливать различные значения выходного напряжения. С целью ограничения объема экспериментальных исследований без уменьшения информативности достаточно выбрать три значения входного напряжения  $U_{\text{вх}}$ : минимальное, которое составляет примерно 1,7 В, среднее, составляющее  $\sim 3,0 \text{ В}$ , и максимальное  $\sim 5,5 \text{ В}$ . При этом для каждого из приведенных величин входного напряжения значения выходного напряжения  $U_{\text{вых0}}$  нужно устанавливать примерно равными 2,5 В, 3,6 В

и 5,2 В, то есть значениям, использованным при исследовании регулировочных характеристик как минимальное, среднее и максимальное. Эти измерения нужно осуществлять с помощью мультиметра Agilent 34405. Результаты измерений можно заносить в предварительно заготовленную в программе Word таблицу. В этой таблице указать значения тока  $I_{\text{вых}}$ , рассчитанные по формуле (1.1) на основании результатов измерений  $U_{\text{изм}}(I)$  на клеммах ХТ7 и ХТ8.

Важное значение имеет зависимость форм пульсаций выходного напряжения от тока нагрузки. Пульсации также зависят от величин входного и выходного напряжения. С целью ограничения объема исследований достаточно провести регистрацию форм сигналов переменной составляющей выходного напряжения хотя бы для двух значений выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$ , примерно равных минимальному и максимальному значению 2,5 В и 5,2 В при одном и том же значении входного напряжения  $U_{\text{вх}} \sim 5,5$  В.

### **1.5. Оформление отчета**

Содержание отчета о работе должно отвечать требованиям, изложенным в описании работы.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2**

### **ОДНОФАЗНЫЙ НЕУПРАВЛЯЕМЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ**

#### **2.1. Цель работы**

Экспериментальное исследование процессов, протекающих в схемах однофазных неуправляемых выпрямителей, а также влияния пассивных сглаживающих фильтров на основные характеристики и параметры неуправляемых выпрямителей.

#### **2.2. Описание лабораторного макета**

На лицевой панели лабораторного макета размещена упрощенная принципиальная электрическая схема (рисунок 2.1), органы управления, индикации и измерения.



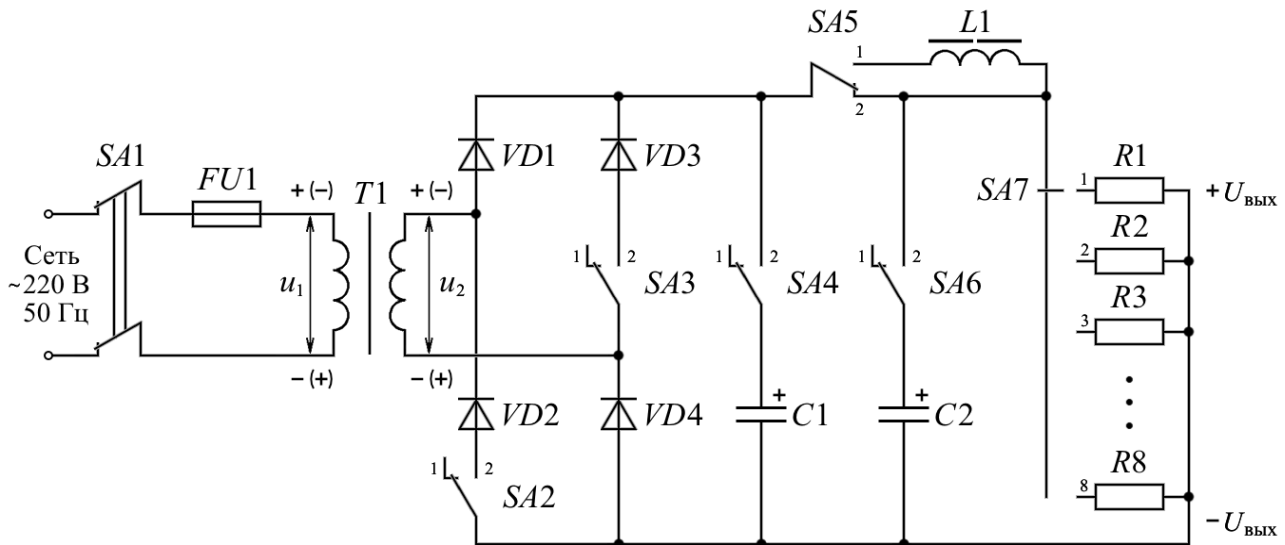


Рисунок 2.1 - Принципиальная электрическая схема лабораторного макета для исследования однофазных неуправляемых выпрямителей, работающих на резистивную, резистивно-емкостную и резистивно-индуктивную нагрузку

Лабораторный макет, помимо исследуемого выпрямителя, содержит встроенный мультиметр для измерения тока первичной обмотки трансформатора  $I_1$ , тока вторичной обмотки трансформатора  $I_2$ , напряжения на вторичной обмотке трансформатора  $U_2$ , выпрямленного напряжения до сглаживающего фильтра  $U_B$ , напряжения на нагрузке  $U_{\text{вых}}$  и тока в цепи нагрузки  $I_N$ . Выбор указанных выше измеряемых параметров (амплитуда, среднее квадратическое (действующее, зффективное) значение, постоянная составляющая) осуществляется соответствующими кнопками, расположенными на лицевой панели макета снизу от дисплея.

В макете предусмотрена возможность дискретного изменения сопротивления нагрузки выпрямителя, схемы выпрямителя и вида сглаживающего фильтра. Ключи SA2 и SA3 позволяют реализовать однофазные одноктактную и двухтактную схемы выпрямления, а также одноктактную схему с обратным диодом. При этом функцию обратного диода выполняют последовательно включенные диоды VD3 и VD4. Состояние ключей индицируется соответствующими светодиодами.

Наличие двух выходов на внешний осциллограф (разъемы CP-50 на задней стенке макета) позволяет одновременно наблюдать формы токов и напряжений в различных точках схемы:  $i_1$ ,  $u_2$ ,  $i_2$ ,  $i_{VD1}$ ,  $i_{VD3}$ ,  $u_{VD1}$ ,  $u_B$ ,  $i_{C1}$ ,  $u_N$ . Для исследования взаимосвязи сигналов во времени рекомендуется на один из каналов цифрового двухлучевого осциллографа постоянно подавать опорный сигнал (например,

напряжение на вторичной обмотке трансформатора  $U_2$ ) и с помощью этого сигнала осуществлять запуск осциллографа. Последовательное подключение всех необходимых сигналов к выходам на осциллограф осуществляется кнопочными переключателями сектора «Осциллограф». Следует иметь в виду, что выходы на осциллограф предназначены только для регистрации формы сигналов, и они не могут быть использованы для проведения измерений, поскольку выводимые сигналы промасштабированы для получения близких амплитудных значений с целью упрощения регистрации. Для правильной передачи форм сигналов, включая постоянную составляющую, входы каналов осциллографа должны быть открытыми. Условно это обозначается как вход по постоянному напряжению (DC или .....).

### 2.3. Программа выполнения работы

Перед выполнением работы необходимо ознакомиться с лабораторным макетом «**Однофазный выпрямитель**», изучить его переднюю панель, гнезда для подключения измерительного оборудования на задней панели и кнопки управления, проверить надежность соединения осциллографа и макета через коаксиальные кабели, убедиться в правильности подключения макета «**вых.1**» с первым каналом осциллографа «**СН 1**» и «**вых.2**» со вторым каналом осциллографа «**СН 2**». После этого включить осциллограф, лабораторный макет и компьютер. Сопоставьте функциональную схему макета, показанную на рисунке 2.1, со схемой, имеющейся на макете.

#### 2.3.1. Исследование нагрузки

Используя кнопки «**управление схемой**», установите переключатели:  $SA_2$ ,  $SA_3$ ,  $SA_4$ ,  $SA_5$  и  $SA_6$  в положения 1 «**Выкл.**». При этом все светодиоды на панели «**управление схемой**» не должны светиться.

На панели «**осциллограф**» установите ток и напряжение вторичной обмотки трансформатора  $T_1$ :

- для канала 1 – напряжение  $u_2$ ,
- для на канала 2 – ток  $i_2$ .

На цифровом осциллографе нажмите кнопку «**AUTO**».

Изменяя положение переключателя  $SA_7$  «**нагрузка**» на лабораторном макете, определите:

- а) какое положение переключателя  $SA_7$  соответствует

максимальному сопротивлению нагрузки?

- б) какое положение переключателя  $SA7$  соответствует максимальному количеству потребителей?

Сохраните соответствующие осциллограммы и добавьте их вместе с пояснениями в отчет.

### 2.3.2. Исследование одноктного выпрямителя и сглаживающих фильтров

Для одноктного выпрямителя ключи  $SA2$  и  $SA3$  должны быть установлены в положение 1 «**ВЫКЛ.**», при этом светодиоды  $VD2$  и  $VD3$  не горят.

#### 1. Выпрямительное устройство без фильтра

Соберите требуемую схему: выпрямительное устройство (ключи  $SA2$  и  $SA3$ ) – согласно пункту задания, выходной сглаживающий фильтр (ключи  $SA4$ ,  $SA5$  и  $SA6$ ) – в положение 1 «**ВЫКЛ.**» (светодиоды **не горят**), переключатель  $SA7$  «**нагрузка**» в соответствии с вариантом вашей группы.

Вариант группы определяет положение переключателя  $SA7$  «**нагрузка**», который необходимо использовать во всех заданиях, где сопротивление нагрузки неизменно  $R_H = const$ . Выбрать можно любой вариант в пределах положения переключателя нагрузки от 2 до 8 (кроме положения 1) из соображений, что данный вариант не использовался ни одной подгруппой среди студентов вашей группы.

Составьте характерные диаграммы токов и напряжений выпрямительного устройства, работающего на резистивную нагрузку.

Для этого необходимо сохранить следующие осциллограммы:  $u_2$ ,  $i_{VD1}$ ,  $u_{VD1}$  и  $u_H$ . Из полученных рисунков требуется составить диаграммы работы устройства с единой временной шкалой. Порядок сохранения осциллограмм и составления из них полноценной диаграммы описан в *Приложении А*.

#### 2. Выпрямительное устройство с емкостным фильтром

Соберите требуемую схему: выпрямительное устройство (ключи  $SA2$  и  $SA3$ ) – согласно пункту задания, выходной сглаживающий фильтр (ключи  $SA4$ ,  $SA5$  и  $SA6$ ) – в положение 1

«**выкл.**» (светодиоды **не горят**), переключатель  $SA7$  «**нагрузка**» в соответствии с вариантом вашей группы.

Переведите ключ  $SA4$  в положение 2 «**вкл.**» и убедитесь, что светодиод  $C1$  на панели «**управление схемой**» светится.

Получите характерные диаграммы токов и напряжений выпрямительного устройства, работающего на емкостную нагрузку.

Для этого необходимо получить и сохранить следующие осциллограммы:  $u_2, i_{VD1}, u_{VD1}, i_{C1}$  и  $u_H$ . Из полученных рисунков требуется составить диаграммы работы устройства с единой временной шкалой (см. *Приложении А*).

### 3. Выпрямительное устройство с индуктивным фильтром

Соберите требуемую схему: выпрямительное устройство (ключи  $SA2$  и  $SA3$ ) – согласно пункту задания, выходной сглаживающий фильтр (ключи  $SA4, SA5$  и  $SA6$ ) – в положение 1 «**выкл.**» (светодиоды **не горят**), переключатель  $SA7$  «**нагрузка**» в соответствии с вариантом вашей группы.

Переведите ключ  $SA5$  в положение 2 «**вкл.**» и убедитесь, что светодиод  $L1$  на панели «**управление схемой**» светится.

Составьте характерные диаграммы токов и напряжений выпрямительного устройства, работающего на индуктивную нагрузку.

Для этого необходимо получить и сохранить следующие осциллограммы:  $u_2, i_{VD1}, u_{VD1}, u_B$  и  $u_H$ . Из полученных рисунков требуется составить диаграммы работы устройства с единой временной шкалой (см. *Приложении А*).

### 4. Выпрямительное устройство с Г-образным фильтром

Соберите требуемую схему: выпрямительное устройство (ключи  $SA2$  и  $SA3$ ) – согласно пункту задания, выходной сглаживающий фильтр (ключи  $SA4, SA5$  и  $SA6$ ) – в положение 1 «**выкл.**» (светодиоды **не горят**), переключатель  $SA7$  «**нагрузка**» в соответствии с вариантом вашей группы.

Переведите ключи  $SA5$  и  $SA6$  в положение 2 «**вкл.**» и убедитесь, что светодиоды  $L1$  и  $C2$  на панели «**управление схемой**» светятся.

Составьте характерные диаграммы токов и напряжений выпрямительного устройства, работающего на смешанную нагрузку.

Для этого необходимо получить и сохранить следующие осциллограммы:  $u_2, i_{VD1}, u_{VD1}, i_{C1}, u_B$  и  $u_H$ . Из полученных рисунков

требуется составить диаграммы работы устройства с единой временной шкалой (см. *Приложении А*).

### 5. Выпрямительное устройство с П-образным фильтром

Соберите требуемую схему: выпрямительное устройство (ключи  $SA2$  и  $SA3$ ) – согласно пункту задания, выходной сглаживающий фильтр (ключи  $SA4$ ,  $SA5$  и  $SA6$ ) – в положение 1 «**ВЫКЛ.**» (светодиоды **не горят**), переключатель  $SA7$  «**нагрузка**» в соответствии с вариантом вашей группы.

Переведите ключи  $SA4$ ,  $SA5$  и  $SA6$  в положение 2 «**ВКЛ.**» и убедитесь, что светодиоды  $C1$ ,  $L1$  и  $C2$  на панели «**управление схемой**» светятся.

Составьте характерные диаграммы токов и напряжений выпрямительного устройства, работающего на смешанную нагрузку.

Для этого необходимо получить и сохранить следующие осциллограммы:  $u_2$ ,  $i_{VD1}$ ,  $u_{VD1}$ ,  $i_{C1}$ ,  $u_B$  и  $u_H$ . Из полученных рисунков требуется составить диаграммы работы устройства с единой временной шкалой (см. *Приложении А*).

### 6. Выпрямительное устройство с индуктивным фильтром и обратным диодом

Соберите требуемую схему: выпрямительное устройство (ключи  $SA2$  и  $SA3$ ) – согласно пункту задания, выходной сглаживающий фильтр (ключи  $SA4$ ,  $SA5$  и  $SA6$ ) – в положение 1 «**ВЫКЛ.**» (светодиоды **не горят**), переключатель  $SA7$  «**нагрузка**» в соответствии с вариантом вашей группы.

Переведите ключи  $SA3$  и  $SA5$  в положение 2 «**ВКЛ.**» и убедитесь, что светодиоды  $VD3$  и  $L1$  на панели «**управление схемой**» светятся.

Составьте характерные диаграммы токов и напряжений выпрямительного устройства, работающего на индуктивную нагрузку.

Для этого необходимо получить и сохранить следующие осциллограммы:  $u_2$ ,  $i_{VD1}$ ,  $i_{VD3}$ ,  $u_{VD1}$ ,  $u_B$  и  $u_H$ . Из полученных рисунков требуется составить диаграммы работы устройства с единой временной шкалой (см. *Приложении А*).

### 2.3.3. Исследование двухтактного (мостового) выпрямителя и сглаживающих фильтров

Установите переключатели SA2 и SA3 в положение 2 «вкл.» и не выключайте их (светодиоды VD2 и VD3 должны светиться). Проведите исследования по программе, аналогичной пп. 1, 2, 3, 4 и 5 предыдущего параграфа, за исключением пп. 6 с индуктивным фильтром и обратным диодом.

### 2.3.4. Исследование нагрузочных характеристик

Нагрузочной характеристикой называют зависимость выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  от тока нагрузки  $I_{\text{н}}$  при постоянном входном напряжении  $U_{\text{вх}}$ , то есть

$$U_{\text{вых}} = f(I_{\text{н}}) \text{ при } U_{\text{вх}} = \text{const.}$$

Изменяя сопротивление нагрузки (переключатель SA7), снимите нагрузочные характеристики следующих устройств и результаты внесите в таблицу 2.1:

- однотактного выпрямителя без фильтра;
- однотактного выпрямителя с емкостным фильтром;
- однотактного выпрямителя с индуктивным фильтром и обратным диодом;
- мостового выпрямителя без фильтров;
- мостового выпрямителя с индуктивным фильтром;
- мостового выпрямителя с П-образным фильтром.

Таблица 2.1 - Результаты измерений нагрузочных характеристик

$R_{\text{н}}$	1	2	3	4	5	6	7	8
$I_{\text{н}}$								
$U_{\text{н}}$								

#### Порядок выполнения задания

- Соберите исследуемую схему на макете;
- Подготовьте таблицы для записи полученных результатов на компьютере;
- Необходимые значения снимают с ЖК-дисплея на лабораторном макете, расположенном в правом верхнем углу, а кнопками управления под ним выбирают нужные параметры;
- Выберите «Действующее значение» и ток нагрузки  $I_{\text{н}}$ ;
- Изменяя положение переключателя SA7 «нагрузка» на

лабораторном макете, заполните верхнюю строку таблицы 2.1 для тока нагрузки  $I_H$ ;

6. Затем измените исследуемый параметр с тока нагрузки  $I_H$  на напряжение нагрузки  $U_H$  на лабораторном макете;
7. Изменяя положение переключателя SA7 «нагрузка» в обратном направлении, заполните нижнюю строку таблицы 2.1 для напряжения нагрузки  $U_H$ .
8. Повторите процедуры 1-7 для всех исследуемых схем.

Нагрузочной характеристикой будет являться линия аппроксимации, построенная по полученным значениям, например, с помощью программы Excel.

Важно! Нельзя соединять точки линией. График строится с помощью аппроксимации. Пример правильного построения нагрузочной характеристики с помощью аппроксимации представлен в *Приложении Б*.

В отчете на одном графике можно объединить нагрузочные характеристики для одного типа выпрямительного устройства, т.е. один график с тремя характеристиками для однотактного выпрямителя и один график с тремя характеристиками для мостовой схемы.

### **2.3.5. Вопросы по лабораторной работе**

- 1) Какой Г-образный фильтр следует выбрать  $C1 - L1$  или  $L1 - C2$  и почему? Ответ аргументируйте осциллограммами.
- 2) Для чего нужен обратный диод VD3 в индуктивном фильтре с обратным диодом? Чем режим работы этого устройства отличается от режима работы индуктивного фильтра без обратного диода?
- 3) В какой ситуации целесообразно выбрать схему однофазного однотактного выпрямителя без сглаживающего фильтра и в чём это устройство лучше всех остальных схем?
- 4) Можно ли использовать емкостной сглаживающий фильтр для нагрузки большой мощности? Ответ аргументируйте.
- 5) Что такое нагрузочная характеристика устройства? Что можно определить по нагрузочной характеристике?
- 6) Что показывает коэффициент пульсаций сглаживающего фильтра? Всегда ли стоит выбирать устройство с минимальным

коэффициентом пульсаций? Ответ аргументируйте.

- 7) Как влияет емкостной характер нагрузки на режим работы выпрямительных диодов? На что стоит обратить особое внимание? Ответ аргументируйте осциллограммами.
- 8) Почему П-образный фильтр хуже Г-образного для выпрямительного устройства? В чем это проявляется?
- 9) Можно ли использовать индуктивный сглаживающий фильтр для мощного электрического двигателя? Ответ аргументируйте.
- 10) Для чего нужны выходные сглаживающие фильтры? В чем их достоинства и какие у них недостатки?
- 11) Для каких устройств лучше всего выбрать самое сложное устройство с максимальным коэффициентом сглаживания пульсаций? Приведите примеры.
- 12) Достоинства и недостатки мостовой схемы выпрямителя перед однотактной?
- 13) Чем отличается пассивный сглаживающий фильтр от активного? Основные преимущества пассивного фильтра перед активным?



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

### УПРАВЛЯЕМЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ С ВОЛЬТОДОБАВКОЙ

#### 3.1. Цель работы

Изучение принципа действия и схемотехники управляемого выпрямителя с вольтодобавкой, построенного по схеме со средней точкой [6]. Экспериментальное исследование процессов, протекающих в УВ при резистивной нагрузке, а также влияния характера нагрузки на процессы, характеристики и параметры УВ.

#### 3.2. Описание лабораторного макета

Функциональная схема лабораторного макета УВ приведена на рисунке 3.1. В лабораторном макете УВ предусмотрены: возможность изменения характера нагрузки (резистивная или резистивно-индуктивная) переключателем  $SA4$ ; возможность подключения замыкающего (обратного) диода  $VD3$  (переключатель  $SA3$ ) при резистивно-индуктивной нагрузке, возможность подключения вольтодобавки при резистивно-индуктивной нагрузке (переключатель  $SA2$ ). Макет УВ, помимо исследуемого выпрямителя, содержит встроенный мультиметр для измерения силы тока  $i_1$  первичной обмотки трансформатора  $T1$ , силы тока  $i_2$  вторичной обмотки трансформатора, напряжения  $u_2$  на вторичной обмотке трансформатора, выпрямленного напряжения  $u_v$  до сглаживающего фильтра, напряжения  $u_n$  на нагрузке и силы тока  $i_n$  в цепи нагрузки  $R_n$ . Выбор измеряемой величины и измеряемого параметра (амплитуда, среднее квадратическое (действующее) значение, постоянная составляющая) осуществляется соответствующими кнопками, расположенными снизу от дисплея.

В макете предусмотрена возможность изменения угла регулирования (управления)  $\alpha^\circ$  (сектор “Угол регулирования”), сопротивления нагрузки  $R_n$  выпрямителя (сектор “Нагрузка”), схемы выпрямителя и вида сглаживающего фильтра (сектор “Управление схемой”).

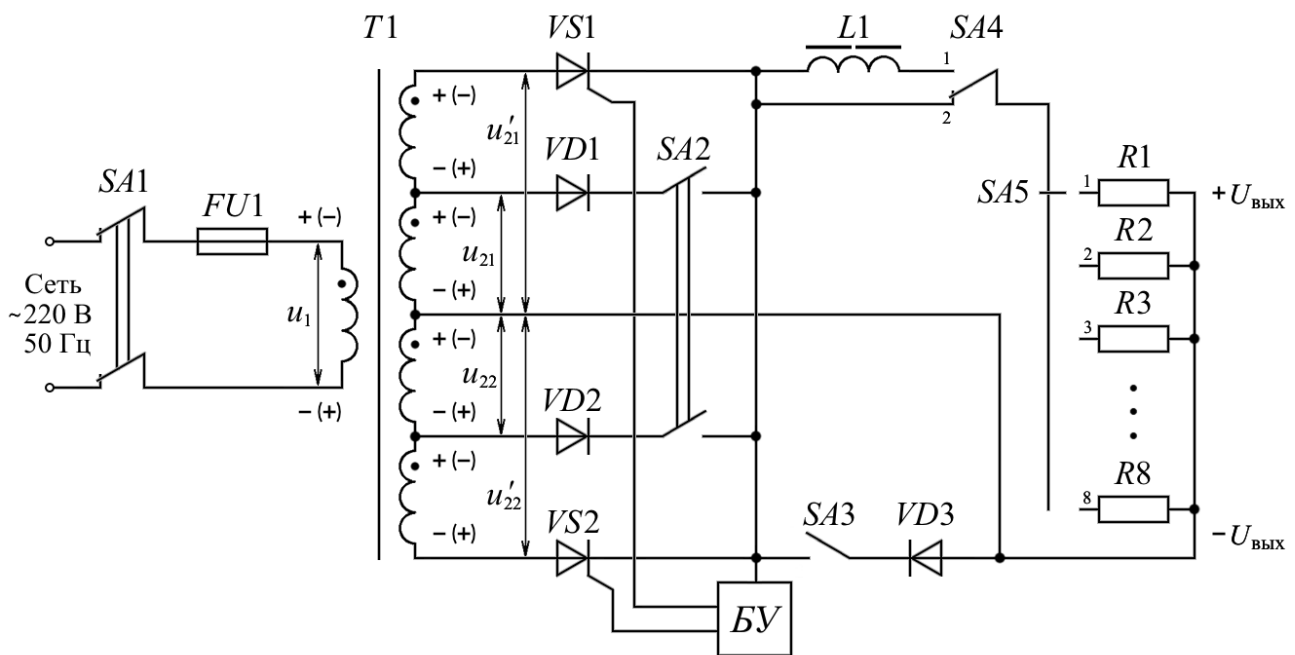


Рисунок 3.1 - Функциональная схема лабораторного макета для исследования управляемого выпрямителя

Наличие у макета двух выходов на внешний осциллограф позволяет одновременно наблюдать формы токов и напряжений в различных точках схемы:  $u_2$ ,  $i_{VS1}$ ,  $i_{VD1}$ ,  $i_{VD3}$ ,  $u_B$ ,  $u_H$ ,  $i_1$  и  $u_{VS1}$ . Для исследования взаимосвязи сигналов во времени рекомендуется на один из каналов двухлучевого осциллографа постоянно подавать опорный сигнал (например, напряжение на вторичной обмотке трансформатора  $u_2$ ).

### 3.3. Порядок выполнения работы

Перед выполнением работы необходимо ознакомиться со схемой лабораторного макета «**Управляемый выпрямитель**», изучить его переднюю панель, гнезда для подключения измерительного оборудования на задней панели и кнопки управления, проверить надежность соединения осциллографа и макета через коаксиальные кабели, убедиться в правильности подключения макета «**вых.1**» с первым каналом осциллографа «**СН 1**» и «**вых.2**» со вторым каналом осциллографа «**СН 2**». Включите лабораторный макет, компьютер и осциллограф. Сопоставьте функциональную схему макета, показанную на рисунке 3.1, со схемой, имеющейся на макете.

### 3.3.1. Исследование нагрузки

Используя кнопки «управление схемой», установите переключатели: SA2, SA3 и SA4 в положения 1 «**Выкл**». При этом все светодиоды на панели «управление схемой» не должны светиться. Установите угол регулирования  $\alpha^\circ = 0$ .

На ЖК-дисплее лабораторного макета выберите «Действующее значение» и ток нагрузки  $I_H$ .

Изменяя положение переключателя SA5 «нагрузка» на лабораторном макете, определите:

- а) какое положение переключателя SA5 соответствует максимальному сопротивлению нагрузки?
- б) какое положение переключателя SA5 соответствует максимальному количеству потребителей?



### 3.3.2. Исследование управляемого выпрямителя с резистивной нагрузкой

Соберите требуемую схему: диоды VD1, VD2 (ключ SA2) и выходной сглаживающий фильтр L1 с обратным диодом VD3 (ключи SA3 и SA4) – в положение 1 «**выкл.**» (все светодиоды **не горят**). Установите угол регулирования  $\alpha = 0^\circ$ , а переключатель SA5 «нагрузка» в номинальное положение (минимальное сопротивление нагрузки).

На панели «осциллограф» установите ток  $i_{VS1}$  через тринистор VS1 и напряжение нагрузки  $u_H$ :

- для канала 1 – ток тринистора  $i_{VS1}$ ,
- для на канала 2 – напряжение нагрузки  $u_H$ .

На цифровом осциллографе нажмите кнопку «**AUTO**». Измените временную шкалу (горизонтальная развертка) на осциллографе, повернув ручку «*scale*» вправо на одно деление. На экране должно отображаться не более трех периодов сигнала  $i_{VS1}$ .

На панели макета «угол регулирования» зажмите стрелку  «**вправо**» и держите до достижения угла регулирования  $\alpha = 175^\circ$ . Потом зажмите стрелку  «**влево**» до угла регулирования  $\alpha = 0^\circ$ .

Проделайте эту операцию несколько раз наблюдая за показаниями осциллографа, чтобы определить:

- а) как изменяются осциллограммы с увеличением угла регулирования  $\alpha^\circ$ ;
- б) какие два предельных угла регулирования существует и чем

отличаются осциллограммы на них;

- в) на что визуально похожи осциллограммы при угле регулирования  $\alpha = 90^\circ$ .

Ваши ответы с пояснениями добавьте в отчет, а при необходимости сохраните требуемые осциллограммы.

Составьте характерные диаграммы токов и напряжений управляемого выпрямителя, работающего на резистивную нагрузку, при разных углах регулирования  $\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  и  $175^\circ$ .

Для этого необходимо сохранить следующие осциллограммы:  $u_2, i_{VS1}, u_{VS1}$  и  $u_H$ . Из полученных рисунков требуется составить диаграммы работы устройства с единой временной шкалой. Порядок сохранения осциллограмм и составления из них полноценной диаграммы описан в *Приложении А*.

### **3.3.3. Исследование управляемого выпрямителя с индуктивным сглаживающим фильтром и обратным диодом**

Соберите требуемую схему: диоды  $VD1, VD2$  (ключ  $SA2$ ) – в положение 1 «**выкл.**» (светодиод **не горит**).

Включите выходной сглаживающий фильтр  $L1$  с обратным диодом  $VD3$ , для этого переведите ключи  $SA3, SA4$  – в положение 2 «**вкл.**» и убедитесь, что светодиоды  $L1$  и  $VD3$  на панели «**управление схемой**» светятся.

Установите угол регулирования  $\alpha = 0^\circ$ , а переключатель  $SA5$  «**нагрузка**» в номинальное положение (минимальное сопротивление нагрузки).

Составьте характерные диаграммы токов и напряжений управляемого выпрямителя со сглаживающим фильтром, при разных углах регулирования  $\alpha = 0^\circ, 60^\circ$  и  $135^\circ$ .

Для этого необходимо сохранить следующие осциллограммы:  $u_2, i_{VS1}, i_{VD3}, u_B, u_{VS1}$  и  $u_H$ . Из полученных рисунков требуется составить диаграммы работы устройства с единой временной шкалой (см. *Приложении А*).

### **3.3.4. Исследование управляемого выпрямителя с вольтодобавкой**

Соберите требуемую схему: диоды  $VD1, VD2$  (ключ  $SA2$ ) – в положение 2 «**вкл.**» и убедитесь, что светодиод для  $VD1, VD2$  на панели «**управление схемой**» светится. Выходной сглаживающий

фильтр  $L1$  с обратным диодом  $VD3$  (ключи  $SA3$  и  $SA4$ ) – в положение 1 «**выкл.**» (светодиоды **не горят**). Установите угол регулирования  $\alpha = 0^\circ$ , а переключатель  $SA5$  «**нагрузка**» в номинальное положение (минимальное сопротивление нагрузки).

Составьте характерные диаграммы токов и напряжений управляемого выпрямителя, работающего на резистивную нагрузку, при разных углах регулирования  $\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  и  $175^\circ$ .

Для этого необходимо сохранить следующие осциллограммы:  $u_2, i_{VS1}, i_{VD1}, u_{VS1}$  и  $u_H$ . Из полученных рисунков требуется составить диаграммы работы устройства с единой временной шкалой (см. *Приложении А*).

### 3.3.5. Исследование характеристик устройства

#### 1. Нагрузочная характеристика

Нагрузочной характеристикой называют зависимость выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  от тока нагрузки  $I_H$  при постоянном входном напряжении  $U_{\text{вх}}$ , то есть

$$U_{\text{вых}} = f(I_H) \text{ при } U_{\text{вх}} = \text{const.}$$

Изменяя сопротивление нагрузки (переключатель  $SA5$ ), снимите нагрузочные характеристики следующих устройств при неизменном угле регулирования  $\alpha = 90^\circ$ :

- управляемого выпрямителя;
- управляемого выпрямителя с индуктивным фильтром и обратным диодом;
- управляемого выпрямителя с вольтодобавкой.

Таблица 3.1 - Результаты измерений нагрузочных характеристик

$R_H$	1	2	3	4	5	6	7	8
$I_H$								
$U_H$								

#### Порядок выполнения задания

- Соберите исследуемую схему на макете;
- Подготовьте пустые таблички для записи полученных результатов на компьютере;
- Необходимые значения снимают с ЖК-дисплея на лабораторном макете в правом верхнем углу, а кнопками управления под ним выбирают нужные параметры;

4. Выберите «**Действующее значение**» и ток нагрузки  $I_H$ ;
5. Изменяя положение переключателя SA5 «**нагрузка**» на лабораторном макете, заполните верхнюю строку таблицы 3.1 для тока нагрузки  $I_H$ ;
6. Затем измените исследуемый параметр с тока нагрузки  $I_H$  на напряжение нагрузки  $U_H$  на лабораторном макете;
7. Изменяя положение переключателя SA5 «**нагрузка**» в обратном направлении, заполните нижнюю строку таблицы 3.1 для напряжения нагрузки  $U_H$ .
8. Повторите процедуры 1-7 для всех исследуемых схем.

Нагрузочной характеристикой будет являться линия аппроксимации, построенная по полученным значениям, например, с помощью программы Excel.

Важно! Нельзя соединять точки линией. График строится с помощью аппроксимации. Пример правильного построения нагрузочной характеристики с помощью аппроксимации представлен в **Приложении Б**. В отчете можно построить на одном графике все три характеристики.

## 2. Регулировочная характеристика

Регулировочная характеристика определяет влияние угла управления на среднее выпрямленное напряжение нагрузки при постоянном токе нагрузки, то есть

$$U_{\text{вых}} = f(\alpha) \text{ при } I_H = \text{const.}$$

Изменяя угол регулирования  $\alpha$ , снимите регулировочные характеристики следующих устройств при минимальном сопротивлении нагрузки:

- а) управляемого выпрямителя;
- б) управляемого выпрямителя с индуктивным фильтром и обратным диодом;
- в) управляемого выпрямителя с вольтодобавкой.

*Таблица 3.2 - Результаты измерений регулировочных характеристик*

$\alpha^\circ$	0	10	20	30	40	50	...	160	170	175
$U_H$							...			

Порядок выполнения задания аналогичен предыдущему пункту, только вместо сопротивления нагрузки изменяют угол регулирования, а нагрузка остается постоянной.

Регулировочной характеристикой будет являться линия

аппроксимации. В отчете можно построить на одном графике все три характеристики.

### ***3.3.6. Вопросы по лабораторной работе***

- 1) Что такое тринистор? Нарисуйте ВАХ тринистора и объясните принцип его работы.
- 2) Что такое угол регулирования  $\alpha$ ? Как он влияет на режим работы управляемого выпрямителя? Ответ аргументируйте осциллограммами.
- 3) Почему закрывается диод  $VD1$  в момент открывания тринистора  $VS1$  при угле регулирования меньше  $180^\circ$ ?
- 4) Что такое нагрузочная характеристика устройства? Что можно определить по нагрузочной характеристике?
- 5) Что такое регулировочная характеристика? Чем отличаются регулировочные характеристики управляемого выпрямителя с вольтодобавкой и без вольтодобавки?
- 6) Для чего нужен выходной сглаживающий фильтр? Для чего нужен обратный диод  $VD3$ ? Какое влияние оказывает сглаживающий фильтр на напряжение нагрузки?
- 7) Объясните работу управляемого выпрямителя с вольтодобавкой по рисунку 3.1 при угле регулирования  $\alpha = 90^\circ$ . При ответе используйте полученные осциллограммы.
- 8) По Вашему мнению, где может использоваться управляемый выпрямитель с вольтодобавкой? Приведите примеры.

## Приложение А

### Построение диаграмм на одном рисунке

На стандартном цифровом осциллографе за один раз можно построить только две осциллограммы, т.к. он является двухканальным.

При этом диаграммы работы устройства могут состоять из 4-х и более совмещенных осциллограмм с единой временной шкалой.

Для того, чтобы совместить множество двойных осциллограмм в одну диаграмму с единой временной шкалой, необходимо одну из осциллограмм выбрать в качестве опорного сигнала.

Таким сигналом рекомендуется выбрать переменное входное напряжение  $u_2$ , которое не изменяется ни от схемы к схеме, ни от изменения сопротивления и типа нагрузки.

Выберите напряжение  $u_2$  на панели «Осциллограф» для первого канала «канал1» и не изменяйте его, а все необходимые осциллограммы снимайте со второго канала «канал2», по очереди изменяя положение переключателя и сохраняя новую пару осциллограмм, например на съемный носитель. При этом важно соблюдать аккуратность в регулировании осциллограмм, чтобы не сбить настройки опорного сигнала на первом канале.

Таким образом, на всех парных осциллограммах будет присутствовать опорный сигнал, по которому легко будет совместить рисунки в любом редакторе изображений и получить диаграммы работы устройства на одном рисунке.

Полученный рисунок используется в отчете по лабораторным работам.

#### Пример получения диаграмм по описанной методике

1. Сохраняют полученные осциллограммы на USB-флеш-накопитель.

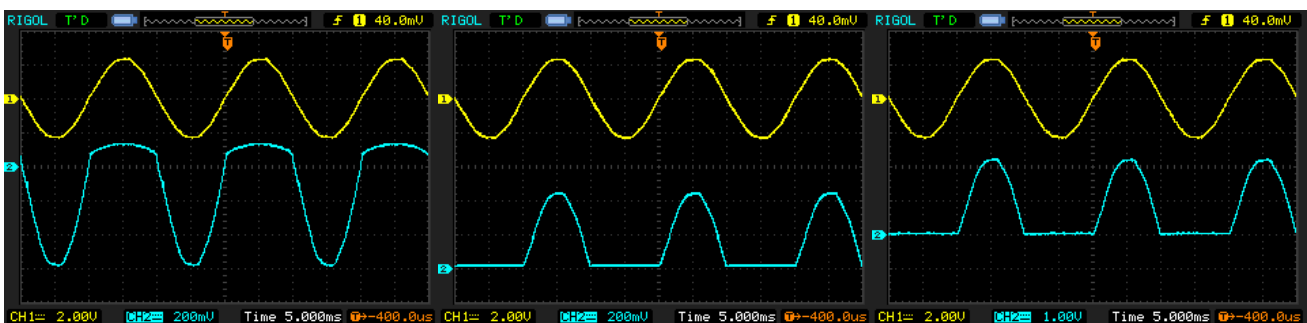
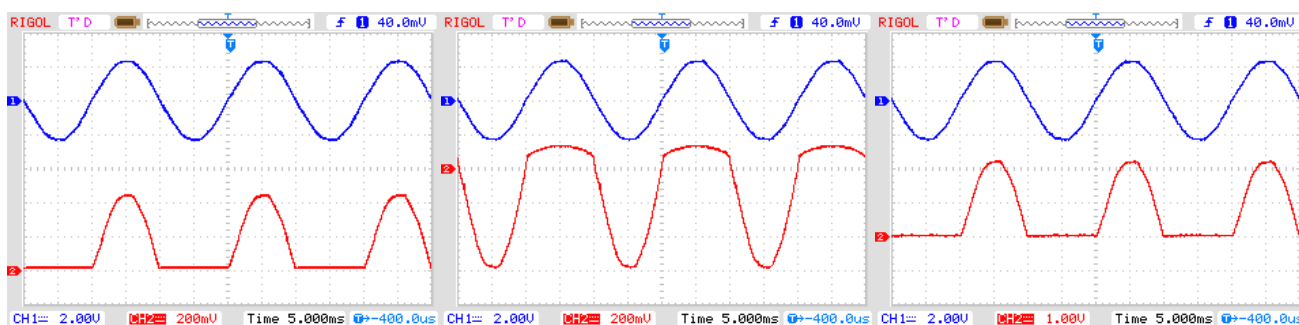


Рисунок А.1 - Три пары диаграмм с одним опорным сигналом  $u_2$

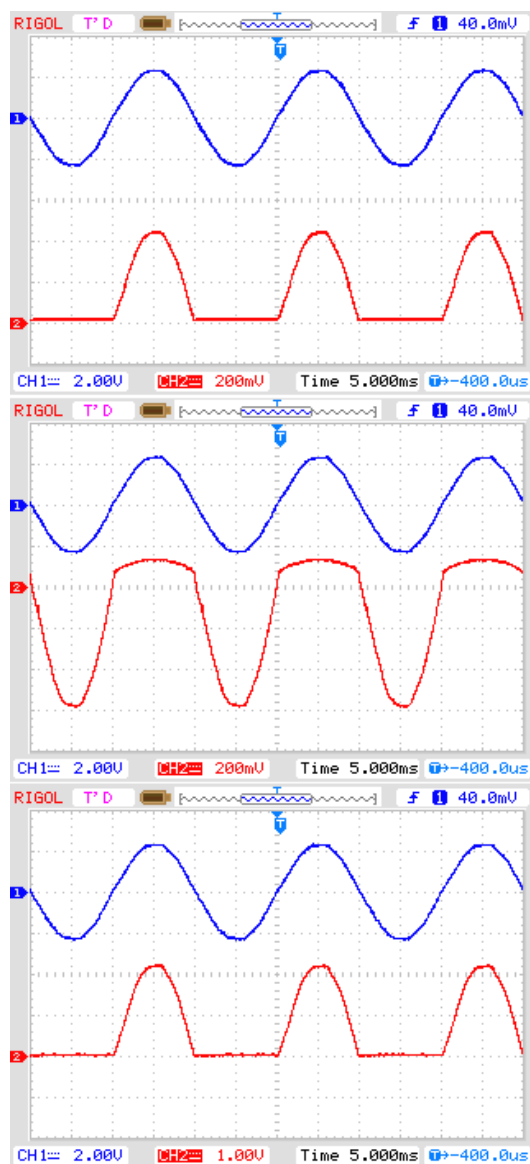


2. Выполняют инверсию цветов.



*Рисунок А.2 - Осциллограммы после инверсии цветов*

3. Осциллограммы объединяют в один рисунок так, чтобы опорные сигналы полностью совпадали по временной шкале.



*Рисунок А.3 - Диаграммы токов и напряжений, после объединения осциллограмм*

4. Редактируют полученные диаграммы: убирают повторяющиеся осциллограммы, обрезают рамки, добавляют и подписывают оси.

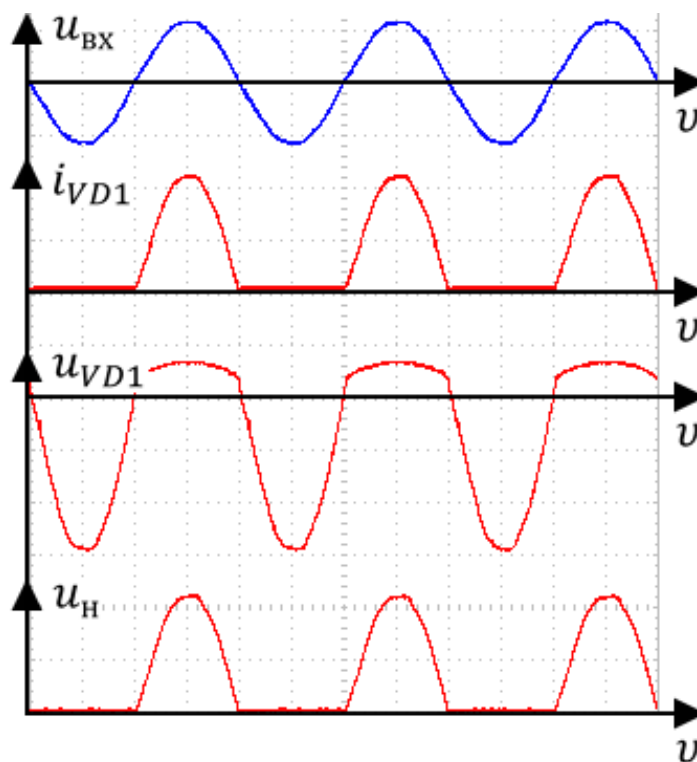


Рисунок А.4 - Диаграммы токов и напряжений устройства

## Приложение Б

### Нагрузочная характеристика и способы ее построения

*Нагрузочной характеристикой* устройства называется зависимость его выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  от тока нагрузки  $I_{\text{н}}$  при постоянном входном напряжении  $U_{\text{вх}}$ , то есть

$$U_{\text{вых}} = f(I_{\text{н}}) \text{ при } U_{\text{вх}} = \text{const.} \quad (\text{Б.1})$$

По нагрузочной характеристике определяется динамическое сопротивление (внутреннее, выходное, дифференциальное) сопротивление  $R_i$  устройства.

*Динамическое сопротивление*  $R_i$  определяется как модуль производной выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  по току нагрузки  $I_{\text{н}}$  при постоянном входном напряжении  $U_{\text{вх}}$ , то есть в дифференциальной форме выражение имеет вид:

$$R_i = \left| \frac{dU_{\text{вых}}}{dI_{\text{н}}} \right| \text{ при } U_{\text{вх}} = \text{const.} \quad (\text{Б.2})$$

В экспериментальных исследованиях изменения  $U_{\text{вых}}$  и  $I_{\text{н}}$  имеют конечные значения. Поэтому выражение (Б.2) для определения динамического сопротивления  $R_i$  можно записать в конечных разностях

$$R_i = \left| \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta I_{\text{н}}} \right| \text{ при } U_{\text{вх}} = \text{const}, \quad (\text{Б.3})$$

где  $\Delta I_{\text{н}}$  – изменение тока нагрузки,  $\Delta U_{\text{вых}}$  – изменение выходного напряжения, вызванное вариацией  $\Delta I_{\text{н}}$ .

В процессе выполнения лабораторной работы необходимо построить нагрузочные характеристики исследуемых устройств.

При экспериментальном исследовании характеристик ИВЭ, например, нагрузочной характеристики, получают  $n$  пар значений  $U_{\text{н}i}$  и  $I_{\text{н}i}$ , где  $i = 1, 2, \dots, n$ , а  $n$  – число измерений. Для этого с помощью переключателя «**Нагрузка**» изменяют ток нагрузки  $I_{\text{н}}$  и снимают показания напряжения нагрузки  $U_{\text{н}}$  с ЖК-дисплея макета. Убедитесь, что выбраны и отображаются «действующие значения» тока и напряжения нагрузки. Полученные значения записывают в таблицу Б.1.

Таблица Б.1 - Результаты измерений нагрузочных характеристик

$R_H$	1	2	3	4	5	6	7	8
$I_H$								
$U_H$								

Переход от экспериментальных точек к аналитической зависимости нагрузочной характеристики выполняют разными методами. Наиболее часто аппроксимации экспериментальных или расчетных данных применяется метод наименьших квадратов.

Аппроксимация (от лат. *proxima* – ближайшая) или приближение – научный метод, состоящий в замене одних объектов другими, в каком-то смысле близкими к исходным, но более простыми.

Метод наименьших квадратов (МНК) – математический метод, применяемый для решения различных задач, основанный на минимизации суммы квадратов отклонений некоторых функций от искомых переменных (рисунок Б.1).

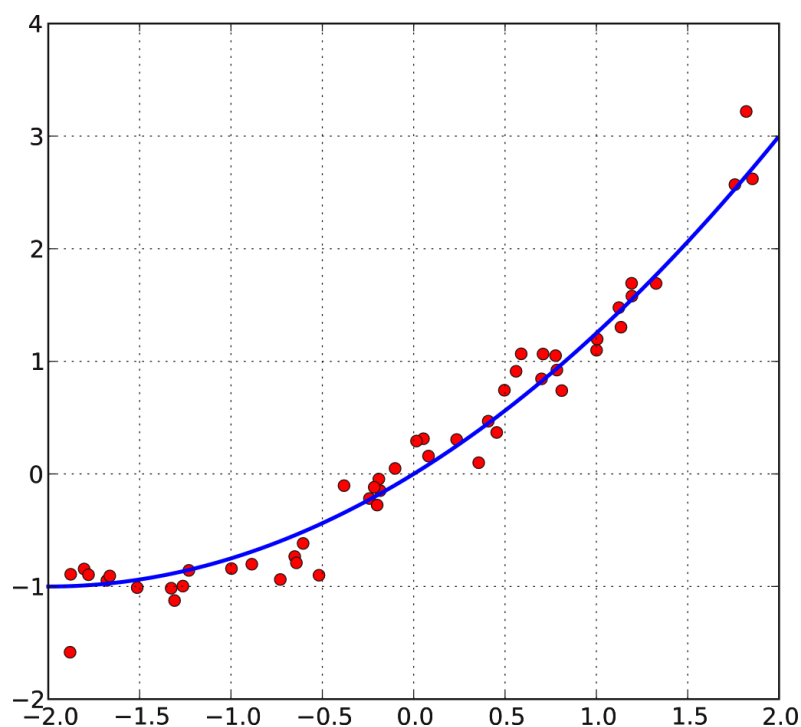


Рисунок Б.1 - Пример кривой, проведенной через точки, имеющие нормально распределённое отклонение от истинного значения

Нагрузочной характеристикой  $U_{\text{вых}} = f(I_H)$  будет являться линия аппроксимации, построенная по экспериментальным данным, например, с помощью программы Excel.

**Важно!** Нельзя соединять точки линией. График строится с помощью аппроксимации.

Пример №1 построение нагрузочной характеристики с помощью аппроксимации в программе Excel

Имеются следующие экспериментальные значения из таблицы Б.2.

Таблица Б.2 - Экспериментальные данные

$R_H$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_H, \text{мА}$	101	111	130	141	159	171	188	201	217	231
$U_H, \text{В}$	5,50	5,30	5,27	5,08	4,90	4,83	4,79	4,69	4,45	4,41

Таблица Б.2 с данными переносится в программу *Excel*, выделяют значения из таблицы (шаг 1) и с помощью «Вставка» (шаг 2) → «Точечная диаграмма (X,Y)» (шаг 3) → «Точечная» (шаг 4), как показано на рисунке Б.2 получают точечную диаграмму.

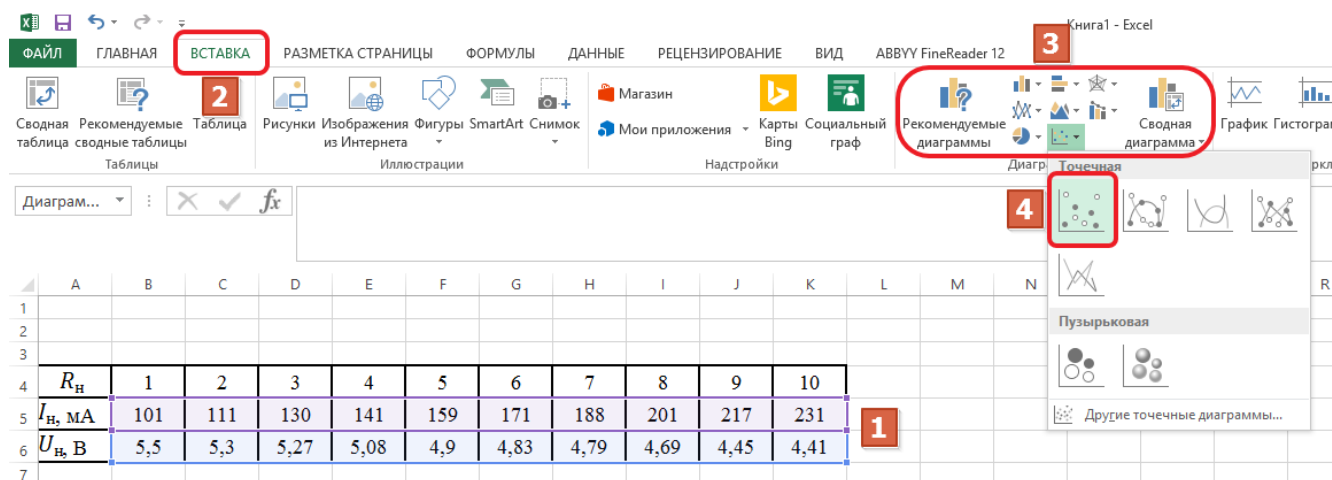

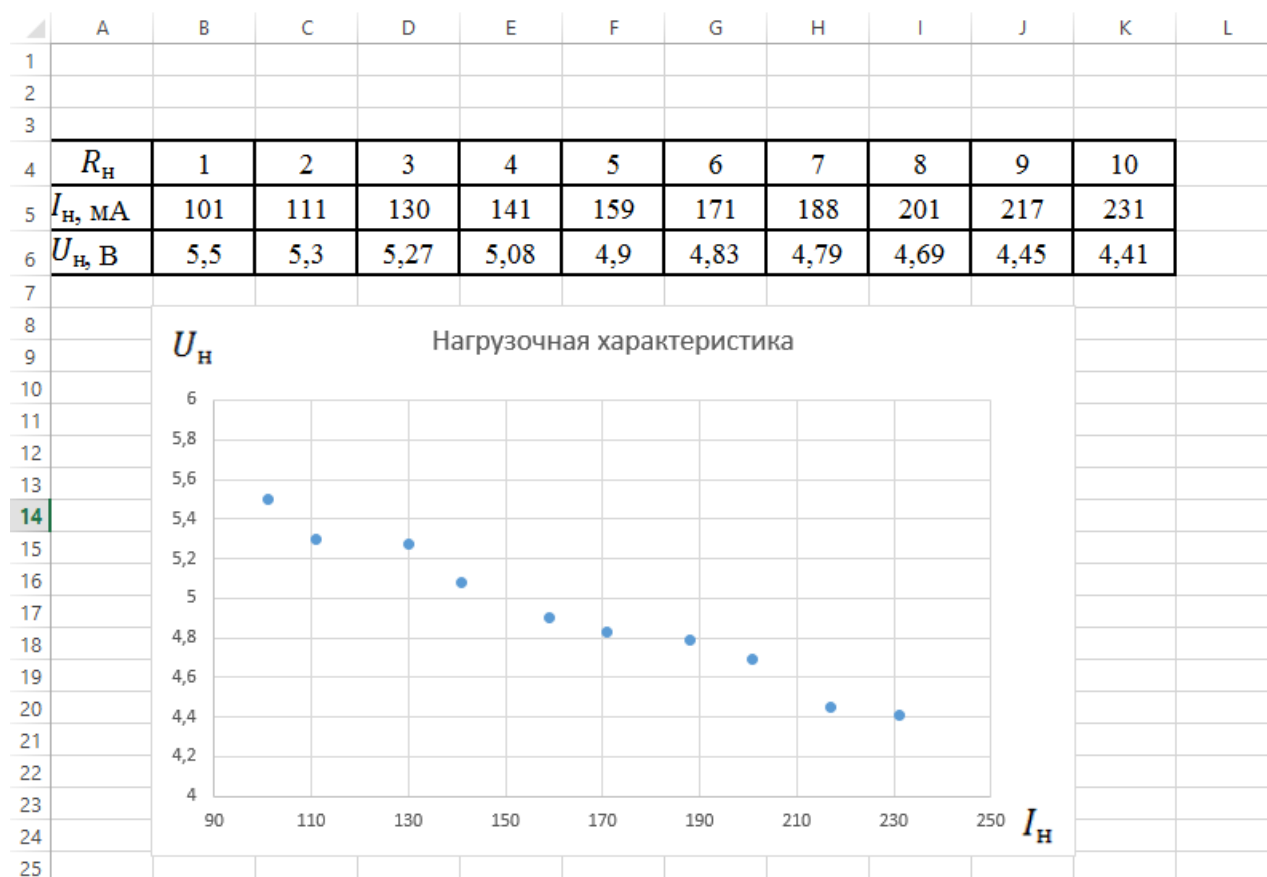


Рисунок Б.2 - Порядок построения точечной диаграммы в Excel

Выполняют редактирование полученной диаграммы: добавляют название, редактируют оси и подписывают их. Правильно отредактированная диаграмма представлена на рис. Б.3.

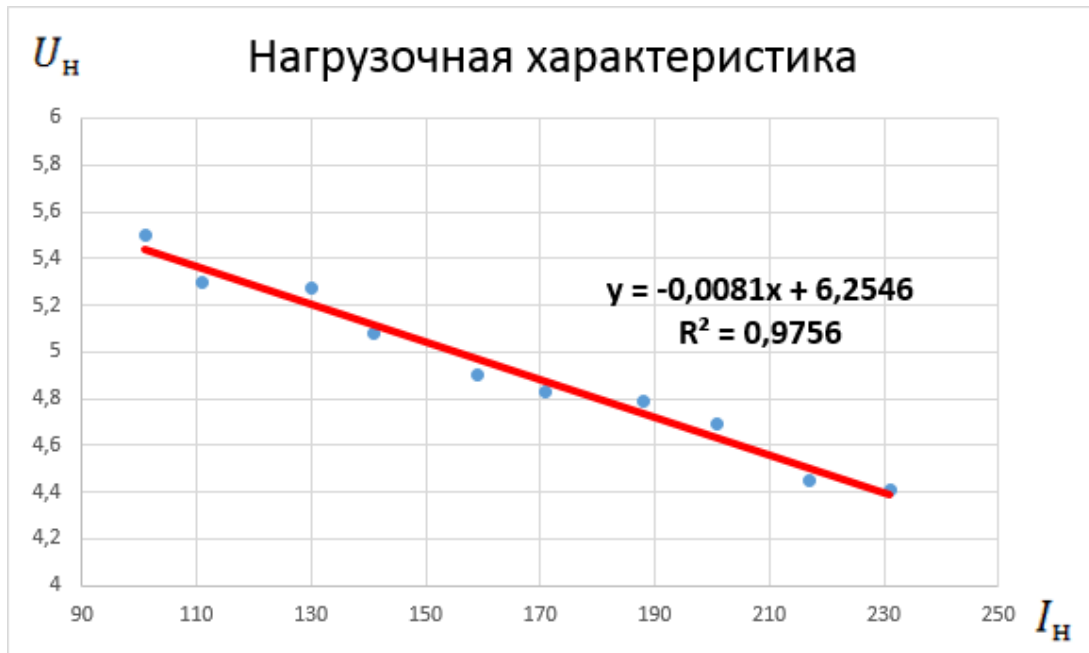
Для построения аппроксимации на диаграмме, необходимо добавить линию тренда либо через «Конструктор» → «Добавить элемент диаграммы» → «Линия тренда» → «Линейная», либо через плюсики  в верхнем правом углу диаграммы, где добавляется линия тренда и выбирается ее тип.

Тип линии тренда должен быть выбран на основании визуального анализа экспериментальных точек на диаграмме. В параметрах линии тренда включаются галочки «показывать уравнение на диаграмме» и «поместить на диаграмму ...  $R^2$ ».



*Рисунок Б.3 - Диаграмма нагрузочной характеристики после редактирования*

В результате проделанных операций получают необходимую диаграмму для нагрузочной характеристики, которую вставляют в отчет по лабораторным работам (рисунок Б.4).



*Рисунок Б.4 - Диаграмма аппроксимации нагрузочной характеристики*

## Приложение В

Содержание отчета по выполненной лабораторной работе следует излагать в такой последовательности.

- 1) На первом листе: расположить титульный лист
- 2) На втором листе: Сверху – название лабораторной работы. Ниже схему макета, нарисованную в графическом редакторе (рекомендуется использование программы «sPlan»). В оставшееся место разместите цели, задачи и описание выполнения лабораторной работы.
- 3) На третьем и последующих листах:  
Каждый пункт лабораторной работы необходимо расположить так, чтобы один пункт размещался ровно на одной странице. Сверху – название пункта работы. Ниже расположите принципиальную электрическую схему согласно выполняемому пункту. Под ней разместите эпюры. Каждый рисунок необходимо пронумеровать и подписать его название.
- 4) В последнем пункте необходимо составить таблицу, ее необходимо пронумеровать и подписать, под ней также разместить графики нагрузочной и регулировочной характеристик.
- 5) На предпоследнем листе отчета напишите выводы по работе, опишите проведенную работу.
- 6) На последнем листе перечислите используемую литературу, если таковая использовалась для выполнения лабораторной работы.

С примером отчета можете ознакомиться ниже.





МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«МИРЭА – Российский технологический университет»

**РТУ МИРЭА**

---

Институт радиотехнических и телекоммуникационных систем

Кафедра радиоволновых процессов и технологий

---

**Отчет по лабораторной работе № \_\_\_\_**

По дисциплине

«Схемотехника электронных устройств»

Студент \_\_\_\_\_ ФИО

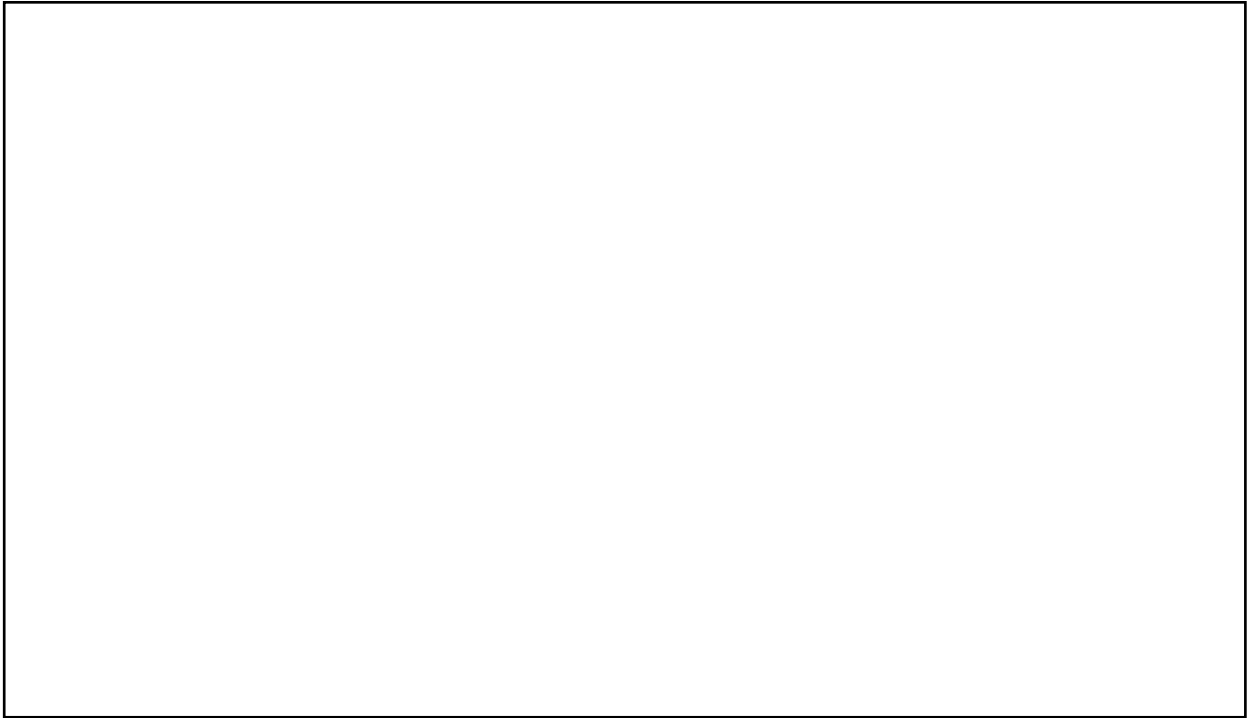
Группа \_\_\_\_\_

Работу принял

\_\_\_\_\_

Москва, 202\_

## Название лабораторной работы

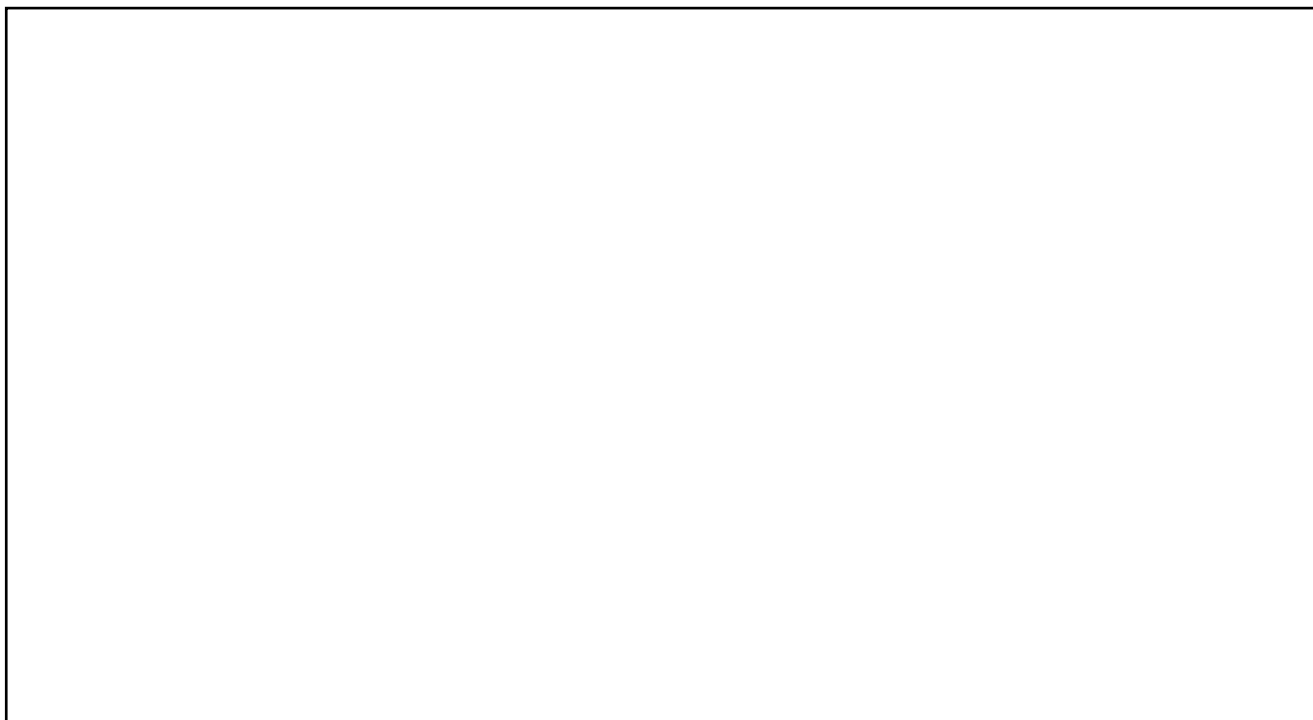


*Рисунок 1 - Принципиальная электрическая схема лабораторного макета*

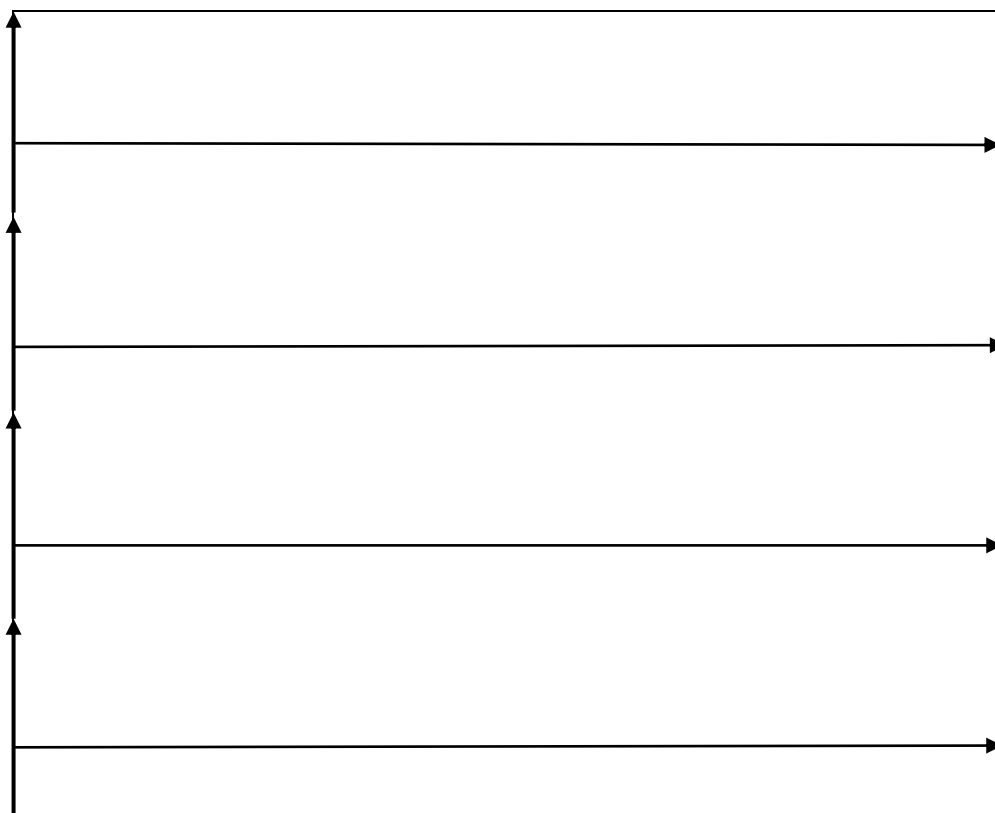
***Цель работы:***

***Описание лабораторного макета:***

### 1.1. Название пункта лабораторной работы



*Рисунок 2 - Принципиальная электрическая схема согласно пункту*

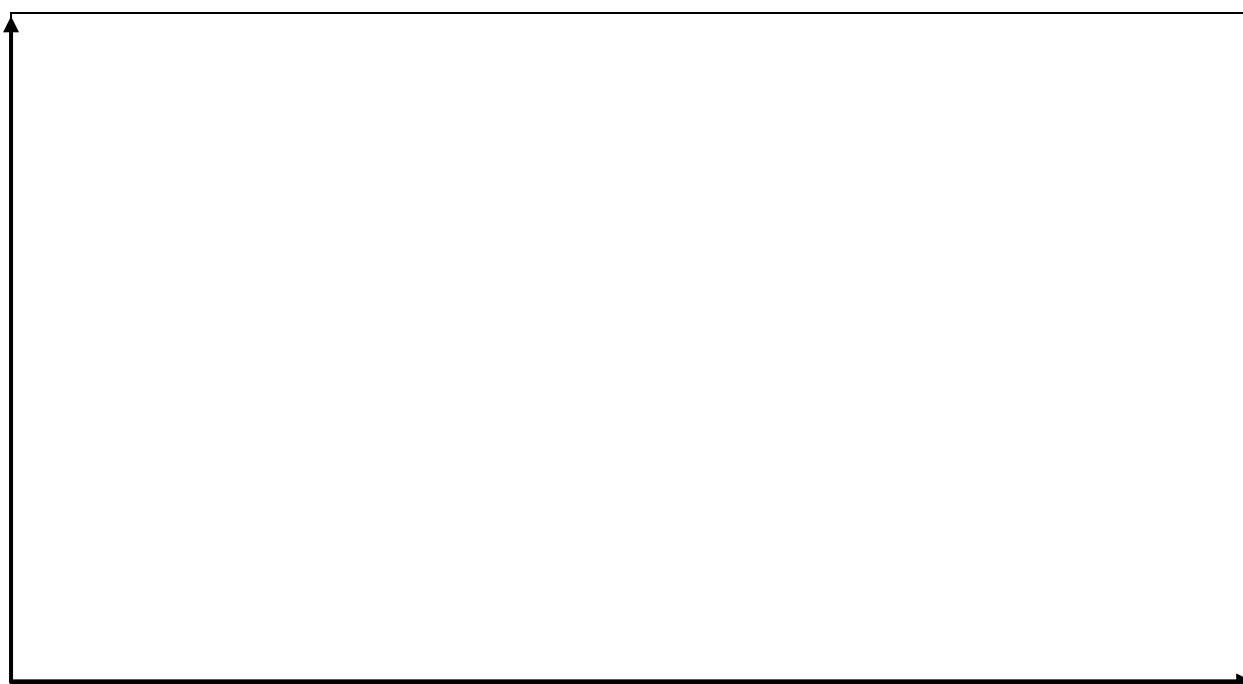


*Рисунок 3 - Диаграммы токов и напряжений ...*

## 1.2. Название пункта лабораторной работы

*Таблица 1 - Название*

	1	2	3	4	5	6	7	8



*Рисунок 3 - Название характеристики*

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Митрофанов А.В. Электропреобразовательные устройства. учебное пособие / А.В. Митрофанов, В.В. Полевой, В.Г. Сафин, А.А. Соловьев, Б.Г. Щапов - СПб.: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2002. – 76 с.
2. Битюков В.К., Богатов А.В., Михневич Н.Г., Петров В.А. Исследование характеристик стабилизированных источников вторичного электропитания, построенных на базе регулируемых DC/DC преобразователей с накачкой заряда // Научные технологии. 2012. Т. 13. № 5. - С. 5-15.
3. Битюков В.К., Петров В.А. Стабилизированные источники вторичного электропитания, построенные на базе регулируемых DC-DC преобразователей с накачкой заряда. Методические указания № 1287 по выполнению лабораторной работы. – М.: МГТУ МИРЭА, 2014. – 20 с.
4. Битюков В.К. Электропитание устройств и систем телекоммуникаций. Методические указания по выполнению лабораторных работ № 1364 / В.К. Битюков, В.А. Петров – М.: МГТУ МИРЭА, 2015. – 36 с.
5. Битюков В.К. Источники вторичного электропитания: учебник / В.К. Битюков, Д.С. Симачков, В.П. Бабенко. – 4-е изд. - М.: Вологда; Инфра-Инженерия, 2020. – 376 с.
6. Битюков В.К., Симачков Д.С. Методические особенности построения управляемых выпрямителей с вольтодобавкой // Учебный эксперимент в образовании. 2014. №1(69). - С. 64-79.