

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра теоретической и общей электротехники

Л.В. БЫКОВСКАЯ  
В.В. БЫКОВСКИЙ

**ИССЛЕДОВАНИЕ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ  
И ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ В  
«ELECTRONICS WORKBENCH»**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ЛАБОРАТОРНОМУ ПРАКТИКУМУ

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом  
государственного образовательного учреждения высшего профессионального  
образования «Оренбургский государственный университет»

Оренбург 2003

ББК 32.852.2я7  
Б 95  
УДК 621.382.2(07)

Рецензент

кандидат технических наук, доцент Дормидонов Ю.А.

Б 95      **Быковская Л.В., Быковский В.В.**  
**Исследование полупроводниковых диодов и выпрямителей в**  
**«Electronics Workbench»: Методические указания к лабора-**  
**торному практикуму – Оренбург: ОГУ, 2003. – 28с.**

Лабораторный практикум включает в себя три лабораторные работы по исследованию полупроводниковых диодов и схем выпрямителей переменного тока в системе схемотехнического моделирования Electronics Workbench.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторных работ по курсу "Общая электротехника и основы электроники".

ББК 32.852.2Я7

© Быковская Л.В., Быковский В.В., 2003

© ГОУ ОГУ, 2003

## Введение

Система виртуального схемотехнического моделирования Electronics Workbench предназначена для моделирования и анализа электрических схем. Работа в реальной лаборатории требует больших временных затрат на подготовку эксперимента. Electronics Workbench – электронная лаборатория – позволяет сделать изучение электрических схем более доступным. Ошибки экспериментатора в реальной лаборатории могут привести к большим материальным потерям, в то время как, работая в Electronics Workbench, студент застрахован от случайного поражения током, а приборы не выйдут из строя из-за неправильно собранной схемы. Кроме того, быстрее выявляются ошибки, а студент имеет больше возможностей для проявления творческого подхода.

Программа Electronics Workbench (рисунок 1) использует стандартный интерфейс Windows, что значительно облегчает её использование.

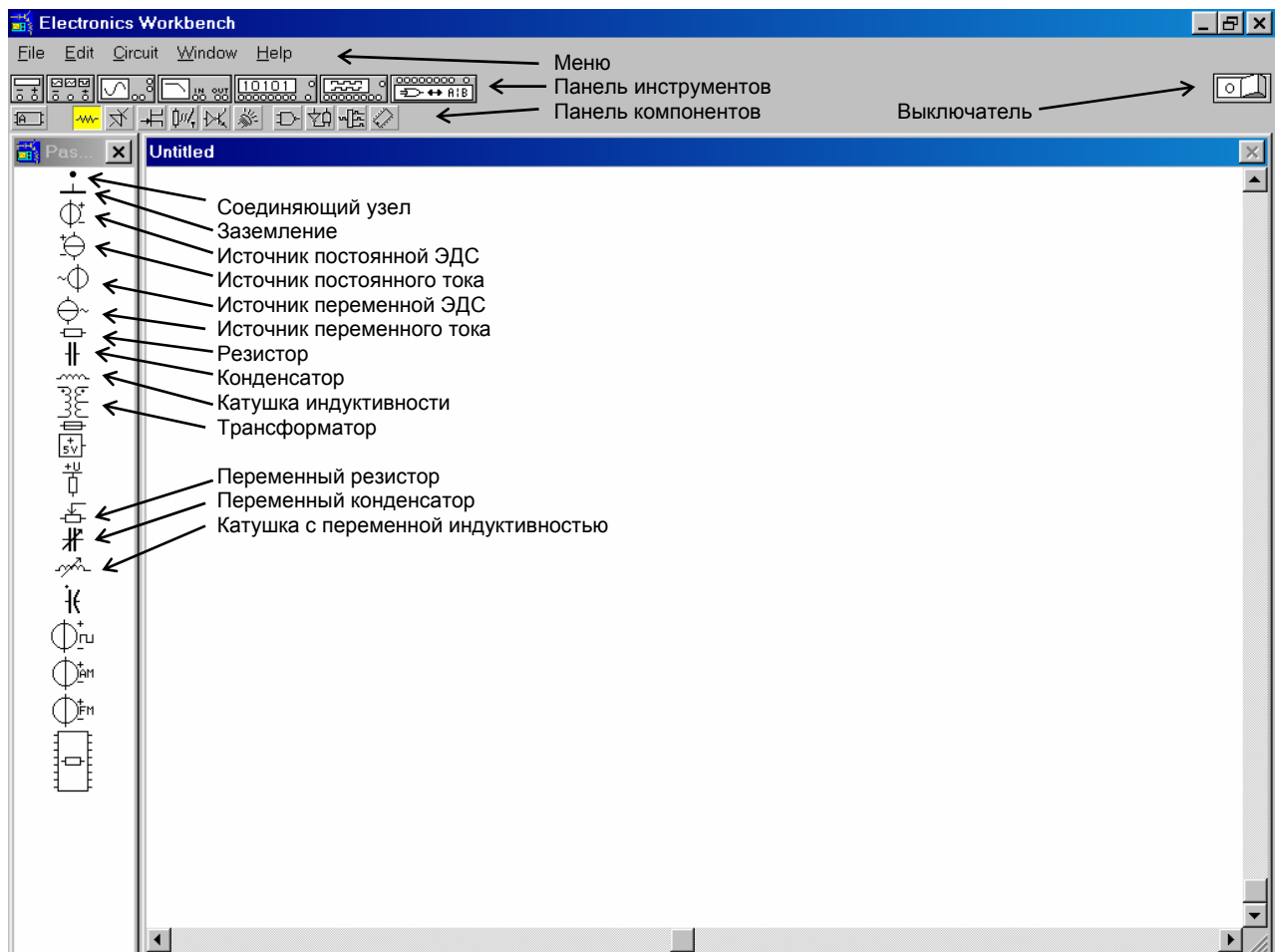


Рисунок 1

На рисунке 1 показаны основные элементы, используемые для моделирования и анализа электрических схем. Моделирование схем осуществляется путём выбора необходимых элементов из библиотеки компонентов и перемещением их с помощью «мыши» на рабочее поле. Двойным щелчком левой кнопки «мыши» на элементе можно открыть диалоговое окно, в кото-

ром указаны параметры этого элемента. Вращение элементов на рабочем поле осуществляется нажатием комбинацией клавиш <Ctrl>+<R>. Соединяя выводы элементов между собой, получаем электрическую схему. Для изменения значения элемента необходимо выделить его и дважды нажать левую кнопку «мыши». Для ввода условного обозначения элемента необходимо, выделив элемент, нажать клавиши <Ctrl>+<L>. Ниже показана панель активных компонентов (рисунок 2).

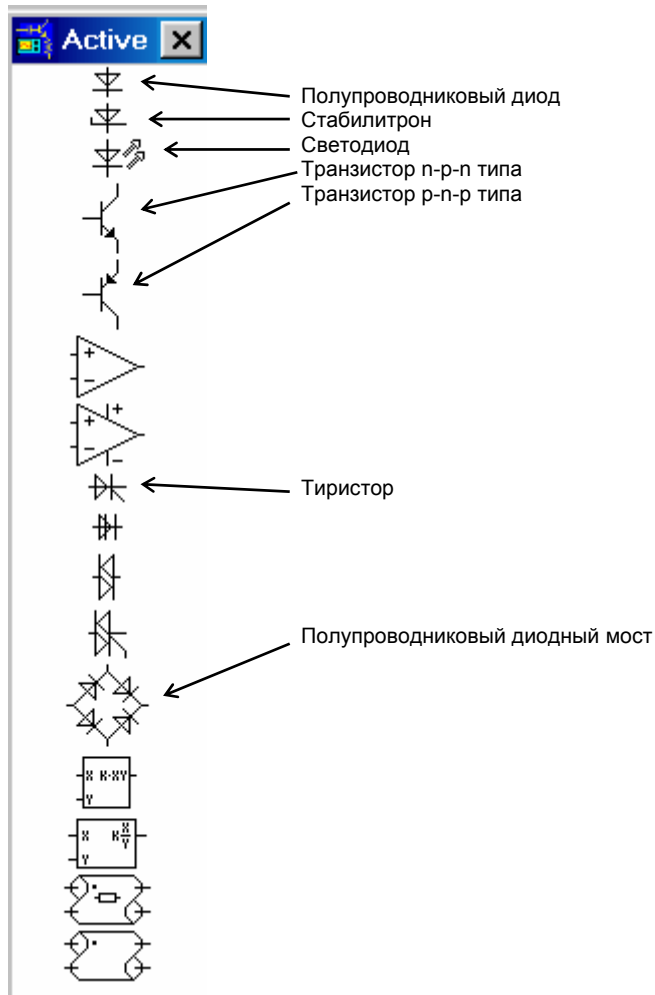


Рисунок 2

# 1 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДИОДА И СТАБИЛИТРОНА

**Цель работы:** изучить принцип действия и основные характеристики полупроводниковых диода и стабилитрона.

### 1.1 Краткие теоретические сведения

Полупроводниковый диод представляет собой монокристалл, в котором созданы области различной проводимости: дырочной ( $p$ -типа) и электронной ( $n$ -типа). Граница между этими областями называется  $p$ - $n$  переходом (рисунок 1.1,а). Если к кристаллу приложить напряжение так, чтобы к  $p$ -области был приложен отрицательный потенциал, а к  $n$ -области – положительный, то носители, притягиваясь к разноименным полюсам, создадут около  $p$ - $n$  перехода область, лишенную носителей.

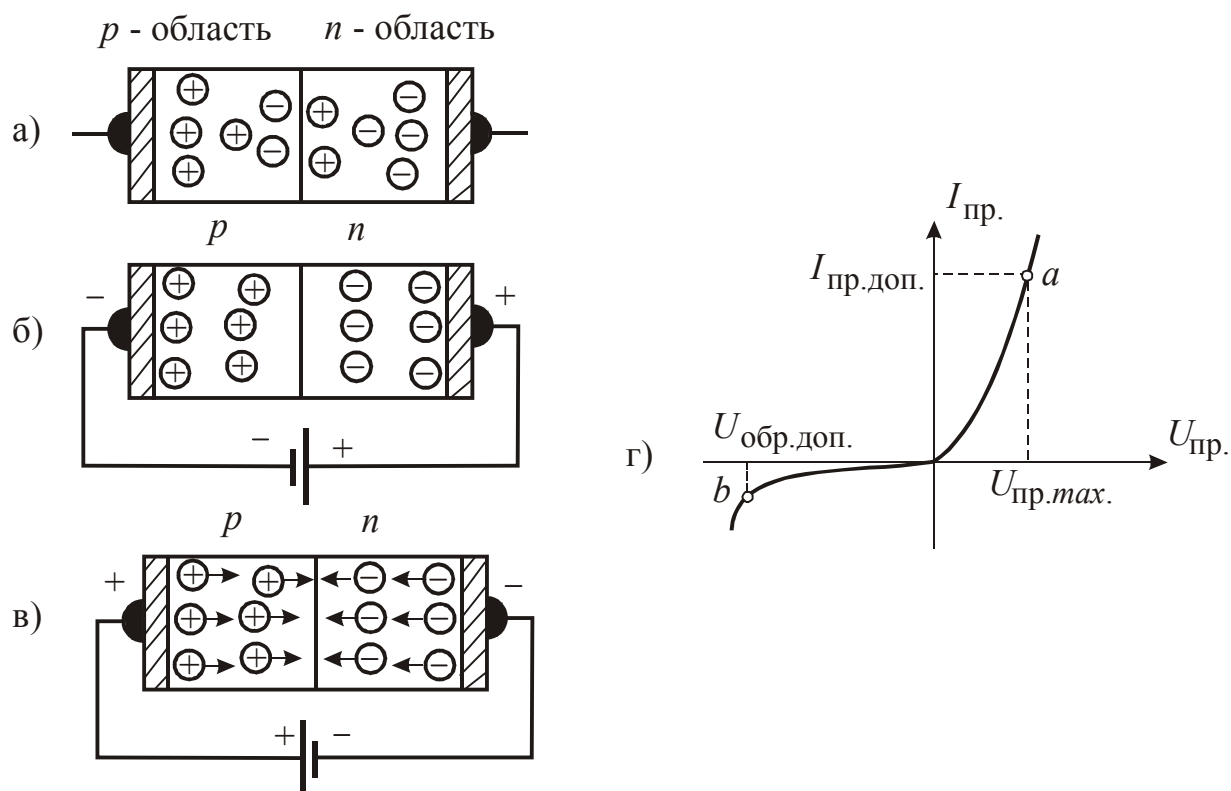


Рисунок 1.1 – Полупроводниковые диоды и их характеристики

Эта область как бы разрывает цепь, и ток в этой цепи отсутствует. Такая полярность напряжения называется запирающей или обратной и соответствует закрытому состоянию диода (рисунок 1.1,б).

Противоположная полярность напряжения перемещает носители навстречу друг другу, и происходит переход (инжекция) носителей в «чужую» область. В результате во внешней цепи появляется ток. Такая полярность напряжения называется прямой или отпирающей и соответствует открытому диоду (рисунок 1.1,в). Типичная вольтамперная характеристика полупроводникового диода изображена на рисунке 1.1,г. Здесь ветвь  $0a$  соответствует

проводящему (прямому) направлению, а ветвь  $0b$  – непроводящему (обратному). В прямом направлении диод характеризуют допустимым током  $I_{\text{пр.доп.}}$  и соответствующим ему падением напряжения на диоде  $U_{\text{пр.мах}}$ .

В обратном направлении диод характеризуют допустимым значением напряжения  $U_{\text{обр.мах}}$ , которое может быть приложено к диоду.

Наличие у диода критического обратного напряжения, при котором наступает электрический (не тепловой) пробой, позволяет использовать полупроводниковый диод в схемах стабилизации напряжения. Одна из возможных схем стабилизации представлена на рисунке 1.2. Выходное напряжение схемы с большой точностью поддерживается на заданном уровне  $U_{\text{вых}} = \text{const}$ , равном критическому (пробивному) напряжению диода. Разница между входным и выходным напряжениями гасится на сопротивлении  $R_{\Gamma}$ .

Если входное напряжение возрастает, то увеличивается и обратный ток диода, возрастает ток  $I$  и падение напряжения на гасящем сопротивлении  $R_{\Gamma}$ . Приращение напряжений  $U_{\text{вх}}$  и  $\Delta I \cdot R_{\Gamma}$  взаимно компенсируются, а  $U_{\text{вых}}$  сохраняется на заданном уровне.

Диод, используемый для стабилизации напряжения, называется стабилитроном. Недостаток данной схемы – зависимость пробивного напряжения стабилитрона, а следовательно, и выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  от температуры. Эту зависимость можно существенно уменьшить, включив последовательно со стабилитроном компенсирующий диод в прямом направлении.

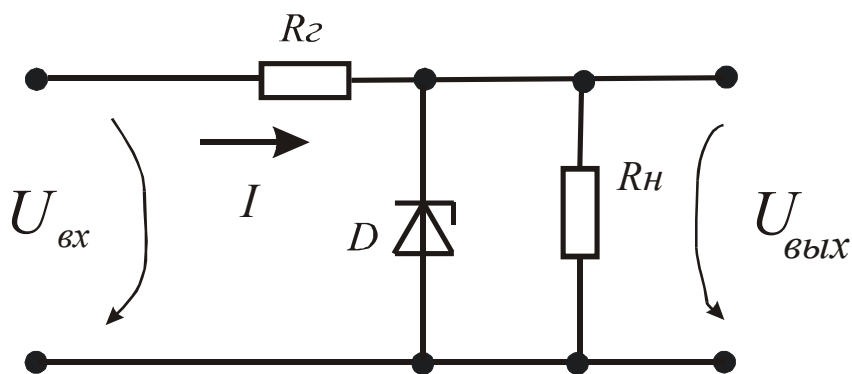


Рисунок 1.2

## 1.2 Программа работы.

### 1.2.1 Эксперимент 1: Снятие вольтамперной характеристики диода.

Откройте файл *лаб1\_электроника\_1* (рисунок 1.3). Для снятия прямой ветви ВАХ переключатель установите в правое положение. Включите схему.

Последовательно устанавливая значение ЭДС источника от 6 до 0 В, запишите значения напряжения  $U_{\text{пр}}$  и тока  $I_{\text{пр}}$  диода в таблицу 1.1.

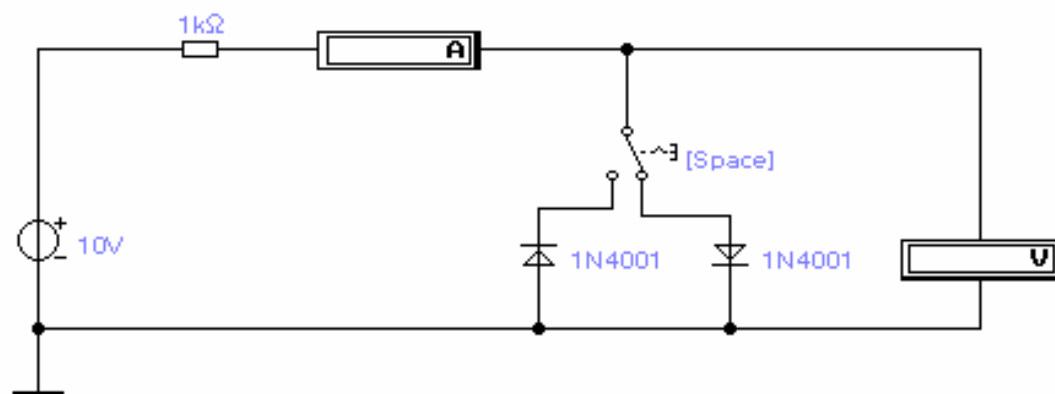


Рисунок 1.3

Таблица 1.1 – Прямая ветвь ВАХ диода

Е, В	U <sub>пр</sub> , мВ	I <sub>пр</sub> , мА

Для снятия обратной ветви ВАХ переключатель установите в левое положение. Последовательно устанавливая значение ЭДС источника от 0 до 20 В, запишите значения напряжения  $U_{об}$  и тока  $I_{об}$  диода в таблицу 1.2.

Таблица 1.1 – Обратная ветвь ВАХ диода

Е, В	U <sub>об</sub> , В	I <sub>об</sub> , мА

По полученным данным постройте графики  $I_{пр}=f(U_{пр})$  и  $I_{об}=f(U_{об})$ .

1.2.2 Эксперимент 2: Получение вольтамперной характеристики диода на экране осциллографа.

Откройте файл *лаб1\_электроника\_2* (рисунок 1.4). Включите схему. На ВАХ, появившейся на экране осциллографа, по горизонтальной оси считывается напряжение на диоде в милливольтках (канал А), а по вертикальной – ток в миллиамперах (канал В, 1 мВ соответствует 1 мА). Обратите внимание на изгиб ВАХ.

Начертите полученную ВАХ.

1.2.3 Эксперимент 3: Измерение напряжения и вычисление тока через стабилитрон.

Откройте файл *лаб1\_электроника\_3* (рисунок 1.5). Измерьте значение  $U_{ст}$  на стабилитроне при значениях ЭДС источника от 0 до 35 В. Результаты измерений занесите в таблицу 1.3.

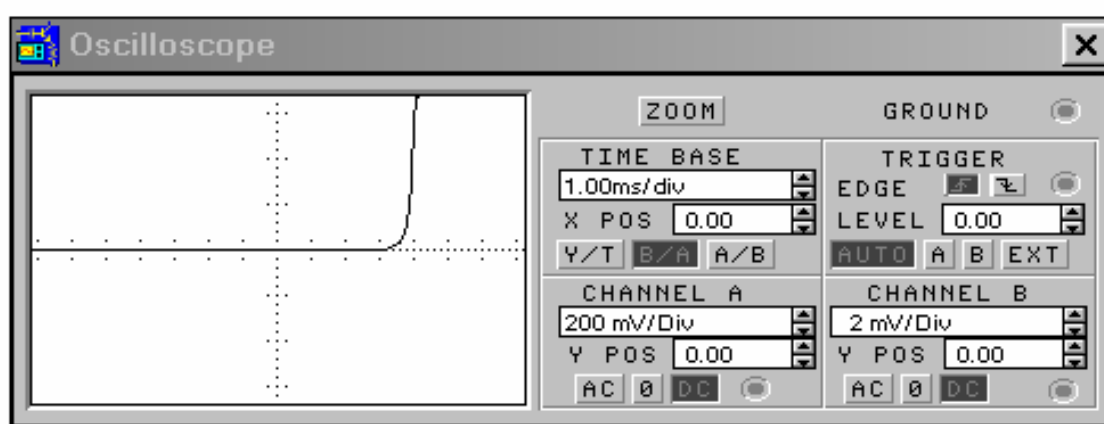
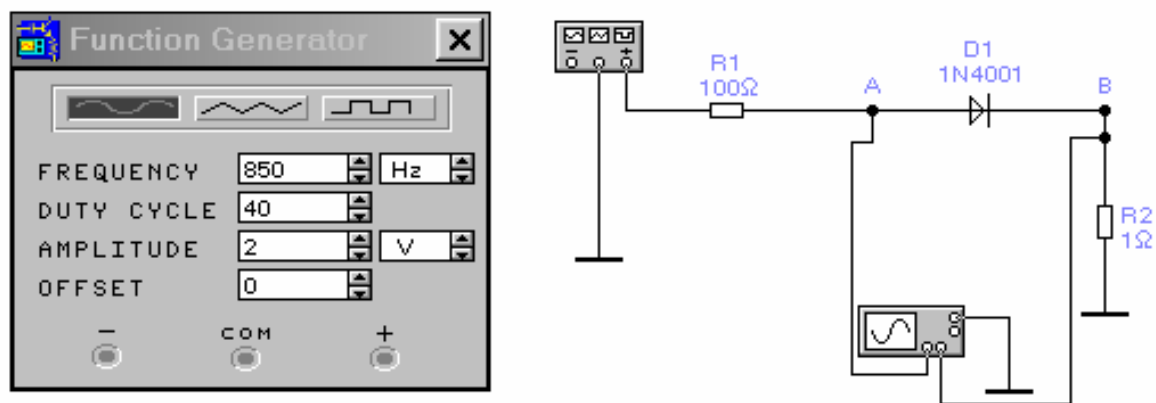


Рисунок 1.4

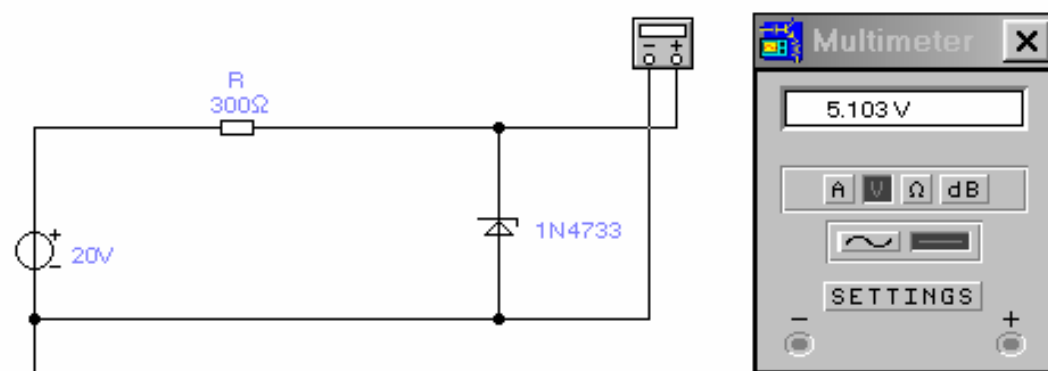


Рисунок 1.5

Таблица 1.3 – Данные для построения ВАХ стабилитрона

Е, В	U <sub>ст</sub> , мВ	I <sub>ст</sub> , мА



Вычислите ток  $I_{ст}$  стабилитрона для каждого значения напряжения  $U_{ст}$  по формуле

$$I_{cm} = \frac{E - U_{cm}}{R}.$$

Результаты вычислений занесите в таблицу 1.3. По данным таблицы постройте ВАХ стабилитрона и оцените по ней напряжение стабилизации. Оно определяется точкой на вольтамперной характеристике, в которой ток стабилитрона резко увеличивается.

1.2.4 Эксперимент 4: Получение вольтамперной характеристики стабилитрона на экране осциллографа.

Откройте файл *лаб1\_электроника\_4* (рисунок 1.6). Включите схему. Начертите полученную ВАХ и определите по ней напряжение стабилизации.

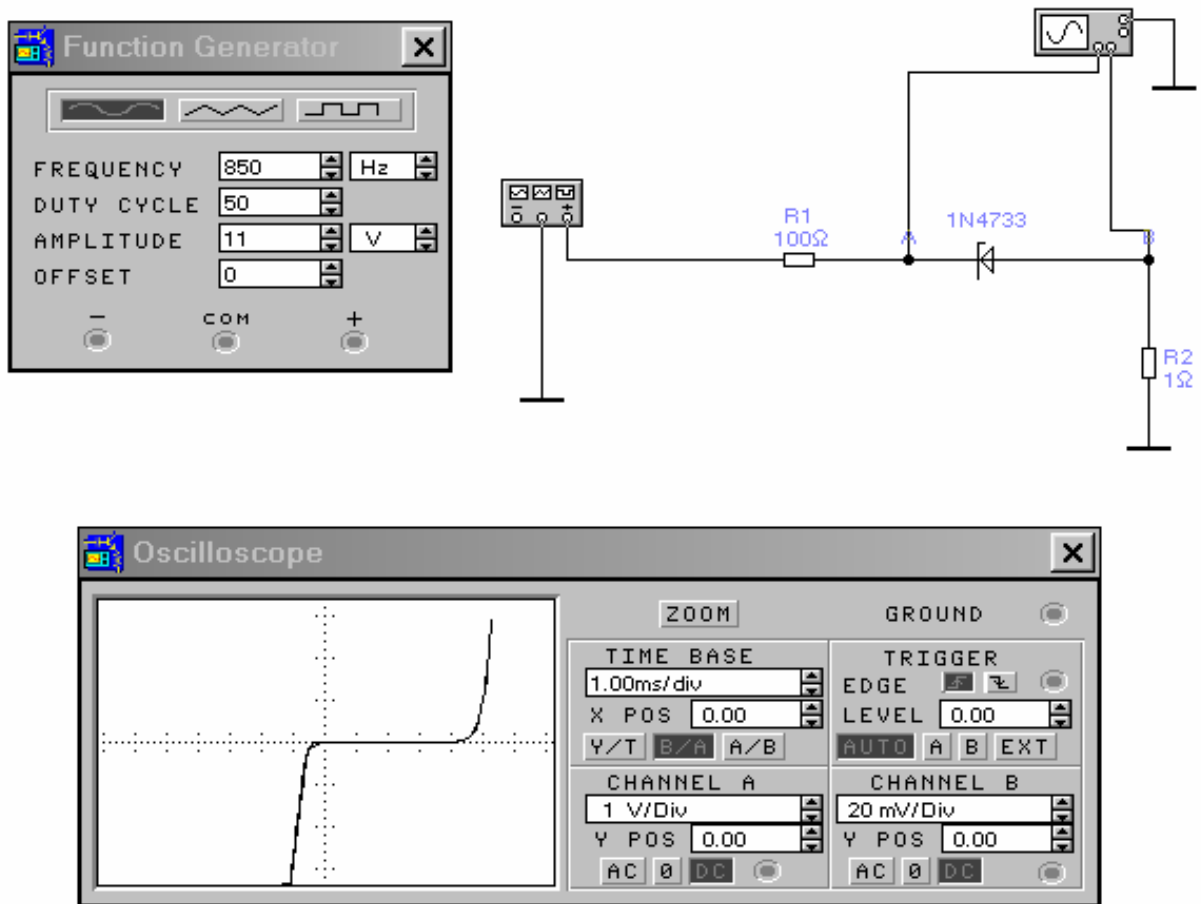


Рисунок 1.6

### 1.3 Контрольные вопросы

1.3.1 Сравните напряжения на диоде при прямом и обратном смещении по порядку величин. Почему они различны?

1.3.2 Чему равны сопротивления идеального диода в прямом и обратном направлениях?

1.3.3 Сравните токи через диод при прямом и обратном смещении по порядку величин. Почему они различны?

1.3.4 Сравните относительное изменение напряжения на стабилитроне с относительным изменением питающего напряжения. Оцените степень стабилизации.

1.3.5 Чем ограничивается наибольший прямой ток через диод?

1.3.6 Назовите электроды диода и стабилитрона.

## 2 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУПРАВЛЯЕМЫХ ОДНОФАЗНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

**Цель работы:** изучить принцип действия и основные характеристики неуправляемых однофазных выпрямителей, ознакомиться с принципом действия и основными характеристиками сглаживающих фильтров.

#### 2.1 Краткие теоретические сведения

Для преобразования переменного напряжения в постоянное напряжение применяют выпрямительные устройства. В выпрямительное устройство обычно входят трансформатор, один или несколько вентилях, сглаживающий фильтр, электронный стабилизатор постоянного напряжения. В зависимости от условий работы отдельные элементы выпрямительного устройства могут отсутствовать. В настоящей работе исследуются неуправляемые однофазные однополупериодные и двухполупериодные выпрямители. Схема однополупериодного выпрямителя приведена на рисунке 2.1,а.

Для упрощения анализа будем считать диод идеальным, т.е. будем полагать, что его сопротивление в прямом направлении равно нулю, а в обратном – бесконечности. Тогда в течение первого полупериода входного напряжения, когда на аноде диода  $D$  будет положительный относительно катода потенциал, диод будет открыт. Напряжение  $u_2$  на вторичной обмотке трансформатора будет непосредственно приложено к нагрузке  $R_H$  и в ней возникнет ток  $i_H$  (рисунок 2.2,б), который будет повторять форму напряжения на вторичной обмотке трансформатора. В течение второго полупериода входного напряжения на аноде диода  $D$  будет отрицательный относительно катода потенциал, диод будет закрыт, а ток в нагрузке окажется равным нулю.

Постоянная составляющая выходного напряжения однополупериодной схемы выпрямителя:

$$u_{H.c.p.} = u_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} u_{2m} \sin \omega t dt = \frac{u_{2m}}{\pi} = \frac{\sqrt{2}u_2}{\pi}, \quad (1)$$

где  $u_2$  – действующее значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора.

Из переменных составляющих максимальную амплитуду  $u_{1m}$  имеет составляющая с частотой  $\omega$ , которая может быть легко найдена из разложения выходного напряжения в ряд Фурье. В однополупериодной схеме выпрямителя  $u_{1m} = 1,57u_0$ , т.е. пульсации выходного напряжения велики, что является ее существенным недостатком.

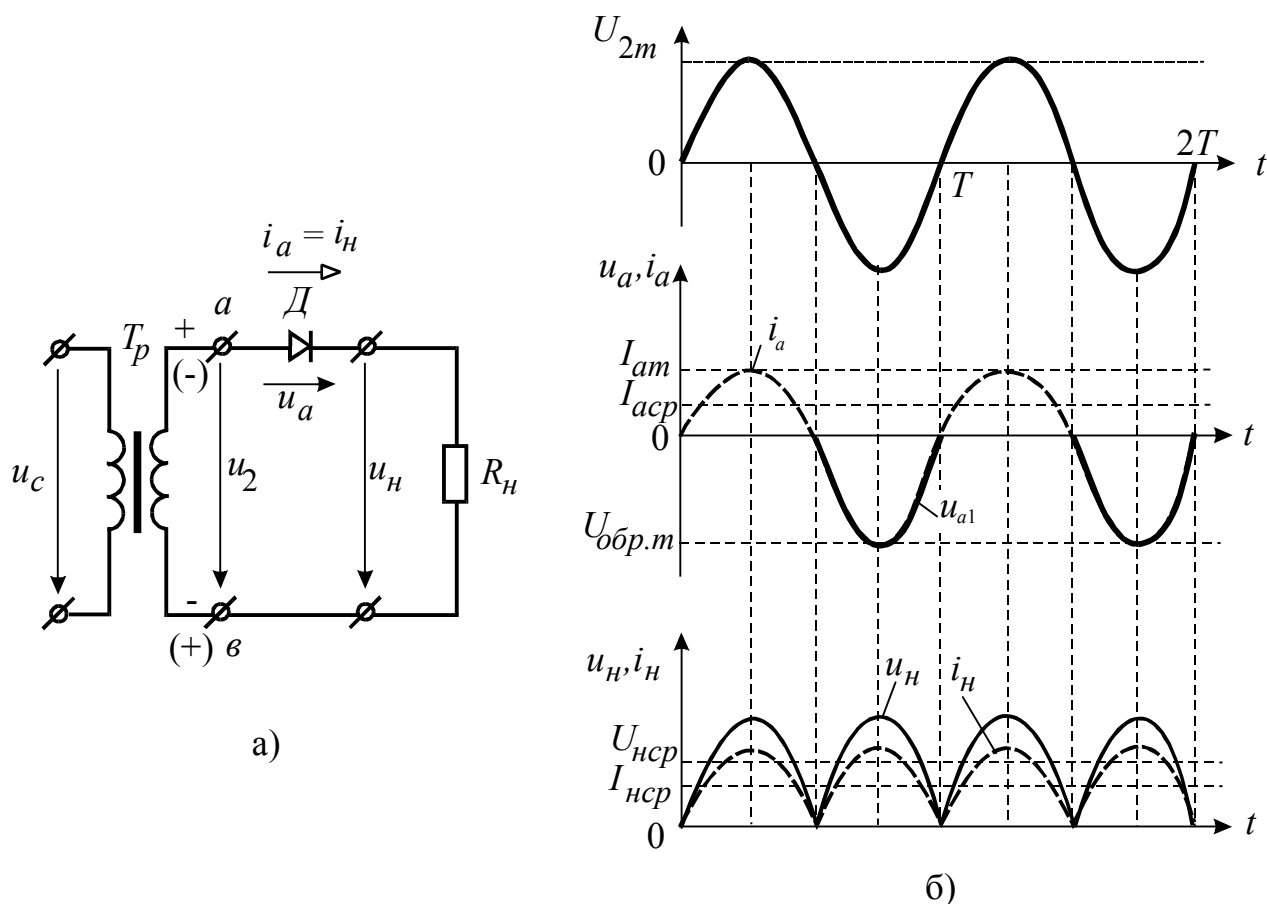


Рисунок 2.1 – Схема (а) и временные диаграммы (б) однополупериодного выпрямителя.

При проектировании однополупериодных выпрямителей важно правильно выбрать тип диода, который удовлетворительно работал бы в такой схеме. Этот выбор проводят на основе двух соображений. Во-первых, допустимый ток диода должен превышать величину  $I_m$ . Во-вторых, диод должен обладать определенной электрической прочностью. Последняя связана с тем, что в течение тех полупериодов, когда диод закрыт, к нему приложено напряжение, равное напряжению на вторичной обмотке трансформатора, причем это напряжение имеет обратную для диода полярность («минус» на аноде). Максимальная величина этого напряжения, называемая обратным напряжением  $u_{обр.}$ , в нашем случае равна амплитуде напряжения на вторичной обмотке трансформатора  $u_{2m}$ , т.е. в однополупериодной схеме выпрямителя

$$u_{обр.} = u_{2m}, \quad (2)$$

а допустимое обратное напряжение диода должно быть больше  $u_{2m}$ .

Один из вариантов двухполупериодного выпрямителя, собранного по мостовой схеме, приведен на рисунке 2.2,а. Здесь переменное напряжение подводится к одной диагонали моста, а выпрямленное напряжение снимается с другой.

Рассмотрим работу схемы. Пусть в некоторый момент времени переменное напряжение на вторичной обмотке трансформатора таково, что по-

тенциал точки  $a$  выше потенциала точки  $b$ . Тогда от точки  $a$  («+» источника напряжения) ток будет проходить через диод  $D_1$  к точке 2, далее через нагрузку к точке  $b$  и через диод  $D_3$  к точке  $b$  («-» источника напряжения). В течение следующего полупериода, когда потенциал точки  $b$  выше потенциала точки  $a$ , ток от точки  $b$  будет проходить через диод  $D_4$ , нагрузку и диод  $D_2$  к точке  $a$ . Для первого полупериода направление тока показано сплошными стрелками, для второго полупериода – пунктирными стрелками. В любой полупериод ток через нагрузку проходит в одном направлении.

Временные диаграммы напряжений и токов для мостовой схемы выпрямителя приведены на рисунке 2.2,б.

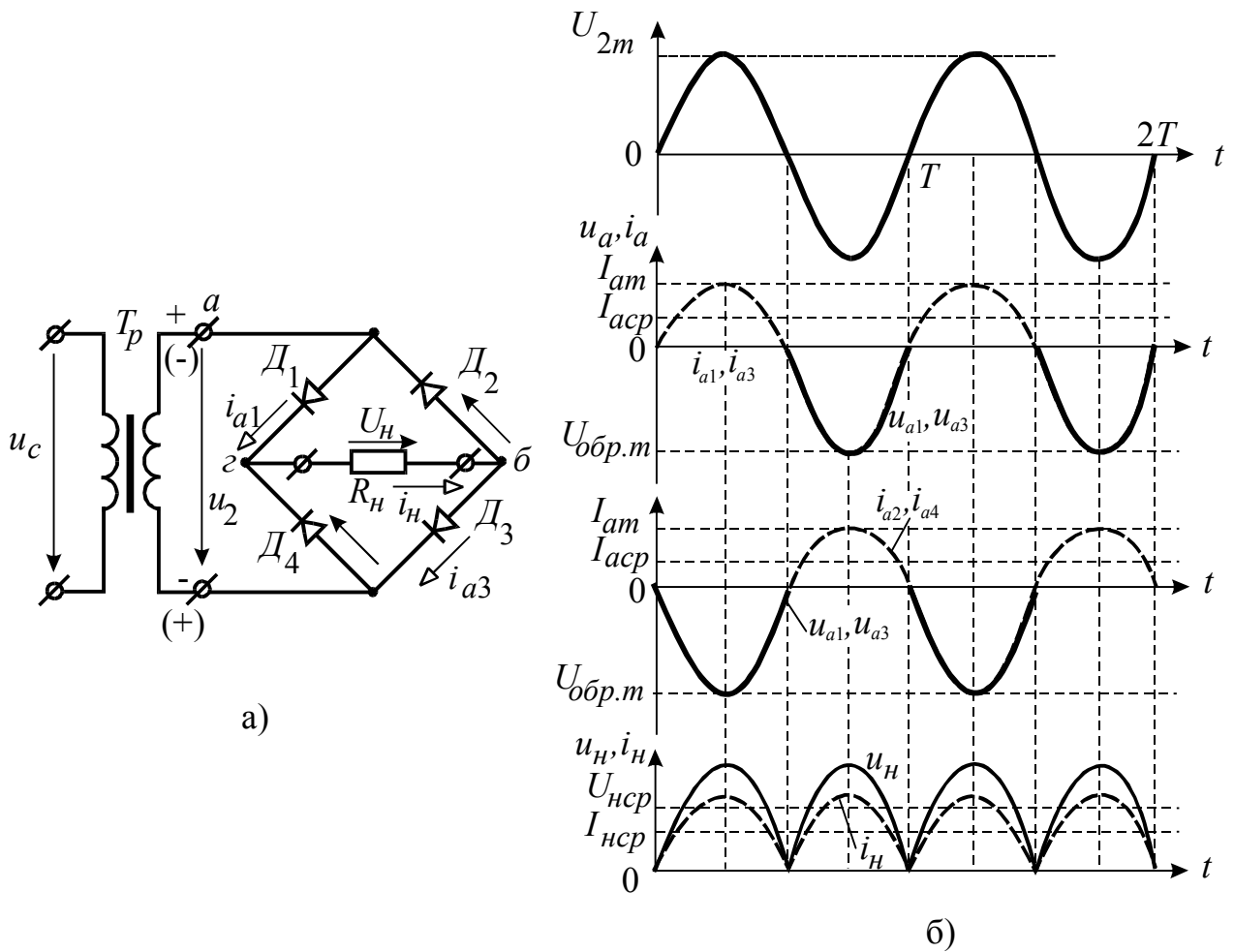


Рисунок 2.2 – Схема (а) и временные диаграммы (б) двухполупериодного выпрямителя

Отношение действующего значения напряжения вторичной обмотки к среднему значению выпрямленного напряжения равно коэффициенту формы синусоидального напряжения, поэтому:

$$u_2 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot u_n \approx 1,11 \cdot u_n. \quad (3)$$

Максимальное значение обратного напряжения на вентиле равно амплитудному значению приложенного напряжения, так как в один из полупериодов, когда ток проходит через вентили 1 и 3, вентили 2 и 4 оказываются включенными параллельно и к ним приложено напряжение  $u_2$ , а в другой полупериод напряжение  $u_2$  приложено к параллельно включенным вентилям 1 и 3. Таким образом,

$$u_{\text{обр. max}} = u_{2m} = \sqrt{2} \cdot u_2 = \frac{\pi}{2} \cdot u \approx 1,57 \cdot u_n. \quad (4)$$

Среднее значение тока вентиля

$$I_{a. cp} = 0,5 \cdot I_n. \quad (5)$$

Емкостной фильтр  $C_\phi$  включают параллельно нагрузочному резистору  $R_n$  (рисунок 2.3,а). При таком включении конденсатор  $C_\phi$  заряжается через вентиль до амплитудного значения напряжения  $u_{2m}$  в момент времени, когда напряжение  $u_2$  на вторичной обмотке трансформатора превышает напряжение  $u_C$  на конденсаторе (рисунок 2.3,б). Этому режиму соответствует интервал времени  $t_1 - t_2$ . В течение интервала времени  $t_2 - t_3$  напряжение  $u_C > u_2$ , вентиль закрыт, а конденсатор разряжается через нагрузочный резистор  $R_n$  с постоянной времени  $\tau = C_\phi \cdot R_n$ . При этом напряжение  $u_n$  снижается до некоторого наименьшего значения. Начиная с момента времени  $t_3$ , напряжение  $u_C$  на конденсаторе становится меньше напряжения  $u_2$ . Вентиль открывается, конденсатор  $C_\phi$  начинает заряжаться, и процессы повторяются. Как показывают временные диаграммы (рисунок 2.3,б), при включении емкостного фильтра напряжение  $u_n$  не уменьшается до нуля, а пульсирует в некоторых пределах, увеличивая среднее значение выпрямленного напряжения.

Временные диаграммы двухполупериодного мостового выпрямителя с емкостным фильтром (рисунок 2.3, в) приведены на рисунке 2.3, г. Емкость конденсатора  $C_\phi$  выбирают такой величины, чтобы для основной гармоники выпрямленного напряжения сопротивление конденсатора было много меньше  $R_n$ , т.е.

$$\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{осн. гарм.}} \cdot C_\phi} \ll R_n \quad \text{или} \quad C_\phi \gg \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{осн. гарм.}} \cdot R_n}. \quad (7)$$

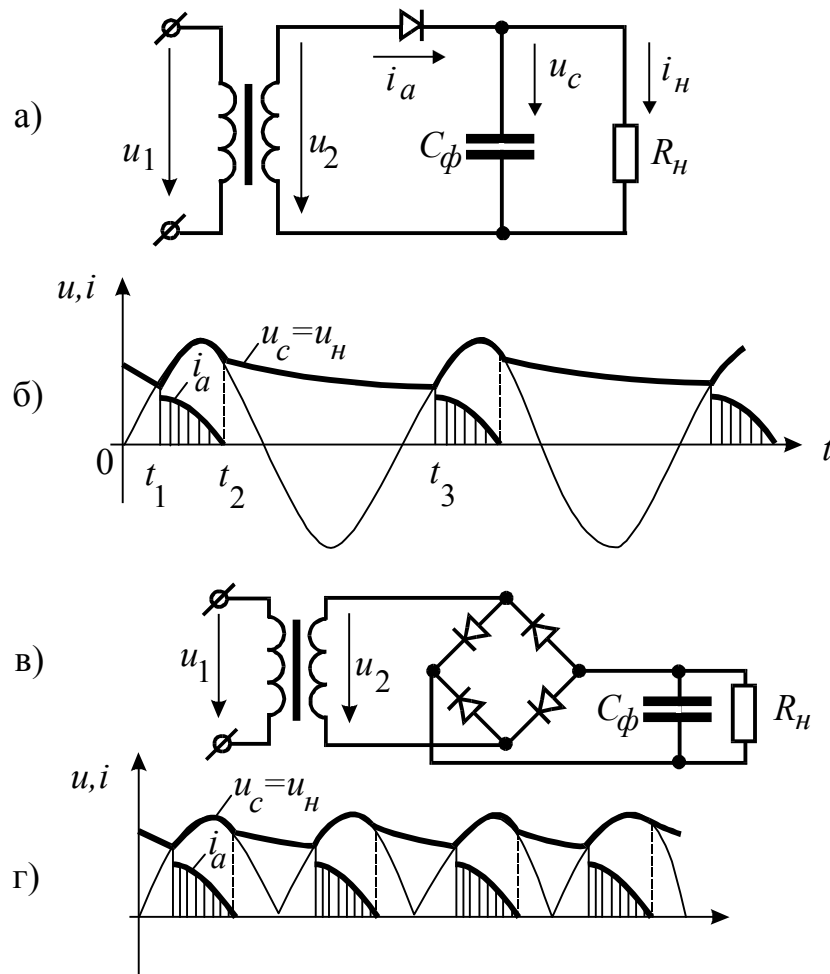


Рисунок 2.3 – Схемы емкостных фильтров с однополупериодным (а) и мостовым (в) выпрямителями; временные диаграммы напряжений и токов однополупериодного (б) и мостового (г) выпрямителей с емкостным фильтром.

При таком выборе величины емкости конденсатора постоянная времени разряда  $\tau_{\text{раз.}}$  значительно больше периода изменения выпрямленного напряжения

$$\tau_{\text{раз.}} = C_{\phi} \cdot R_{\text{н}} \gg \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{осн.гарм.}}} = T, \quad (8)$$

и конденсатор  $C_{\phi}$  разряжается сравнительно медленно, т.е. напряжение на нем уменьшается несущественно. Это приводит к увеличению среднего значения напряжения на нагрузочном резисторе  $u_{\text{н.ср.}}$ , по сравнению с величиной  $u_{\text{н.ср.}}$  при отсутствии фильтра и уменьшению переменной составляющей, а, следовательно, к снижению коэффициента пульсаций  $\varepsilon$ .

При использовании емкостных фильтров следует иметь в виду, что импульсы тока при открытом вентиле определяются сопротивлениями вентиля

и вторичной обмотки трансформатора, и могут достигать значительной величины.

Такие скачки тока могут привести к выходу вентиля из строя. Это особенно опасно для полупроводниковых и ионных электровакуумных диодов, так как их сопротивления при прямом включении имеют небольшую величину. Для ограничения величины тока через вентиль последовательно с ним следует включать добавочный резистор.

Применение емкостного фильтра более эффективно при высокоомном нагрузочном резисторе, так как выпрямленное напряжение и коэффициент сглаживания имеют большие величины, чем при низкоомном нагрузочном резисторе.

Оценка сглаживающего действия фильтра производится по коэффициенту фильтрации  $p$ , под которым понимают отношение коэффициента пульсации по основной гармонике на входе фильтра  $\varepsilon_1$  к коэффициенту пульсации на его выходе  $\varepsilon$

$$p = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon}. \quad (9)$$

Для практических расчетов обычно под коэффициентом пульсации понимают отношение

$$\varepsilon = \frac{\Delta u_{m\sim}}{u_{cp}}. \quad (10)$$

где  $\Delta u_{m\sim}$  – амплитуда переменной составляющей выпрямленного напряжения;

$u_{cp}$  – среднее значение выпрямленного напряжения, равное постоянной составляющей ряда Фурье.

Пример определения коэффициента пульсации напряжения на входе выпрямителя с фильтром приведен на рисунке 2.4.

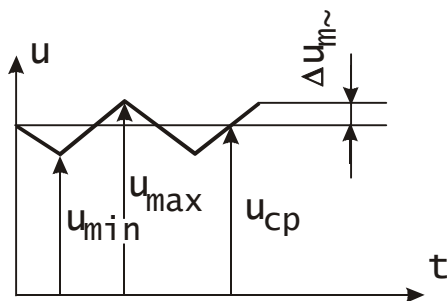


Рисунок 2.4 – Определение пульсаций выпрямителя

При работе выпрямительного устройства часть выпрямленного напряжения падает на активном сопротивлении вторичной обмотки трансформатора и на прямом сопротивлении открытого диода. Следовательно, с ростом величины выпрямленного тока  $I_{н.ср.}$  увеличивается падение напряжения на этих сопротивлениях и напряжение на нагрузочном устройстве  $u_n$  уменьшается. Зависимость  $u_n = f(I_n)$  называется внешней характеристикой. Эта характеристика является одной из важнейших характеристик выпрямительного устройства. Сопротивление открытого диода зависит от



величины тока, поэтому и зависимость  $u_H = f(I_H)$  нелинейна (рисунок 2.5, кривая 1). Если в выпрямительное устройство включен фильтр, то зависимость  $u_H = f(I_H)$  изменится. Емкостному фильтру соответствует кривая 2.

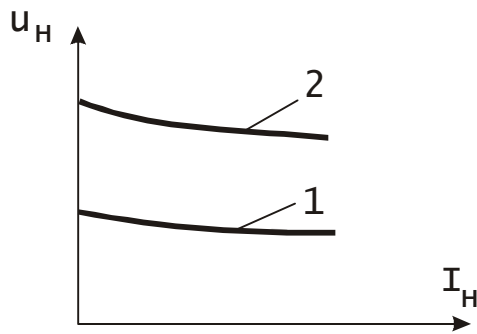


Рисунок 2.5 – Внешние характеристики выпрямителей

Помимо емкостных фильтров, для фильтрации выпрямленного напряжения можно использовать индуктивность (дроссель), включаемую последовательно с сопротивлением нагрузки.

## 2.2 Программа работы.

2.2.1 Эксперимент 1: Исследование однополупериодного выпрямителя. Откройте файл *лаб2\_электроника\_1* (рисунок 2.6).

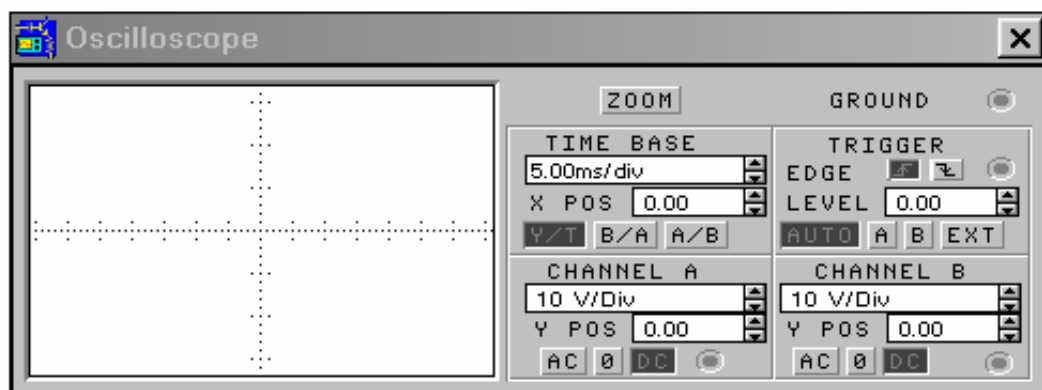
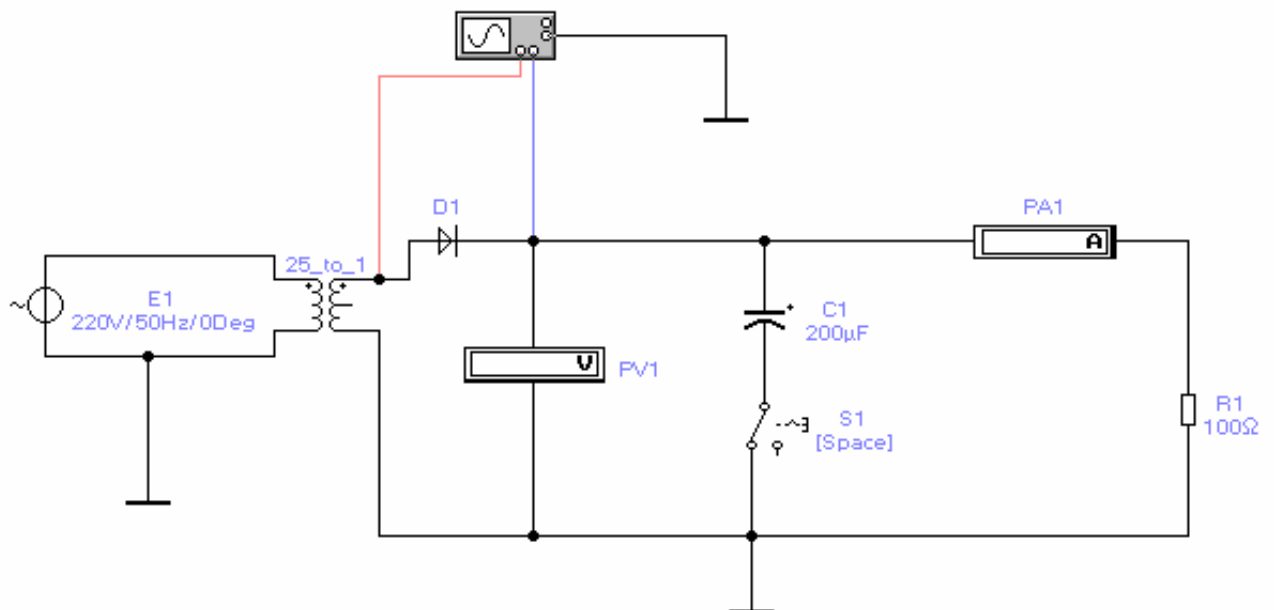


Рисунок 2.6

Сначала следует исследовать работу выпрямителя без емкостного фильтра, отключив его. На вход А осциллографа подается выходной сигнал, а на вход В – входной.

Зарисуйте осциллограммы.

Измерьте максимальные входные и выходные напряжения. Устанавливая различные значения сопротивления нагрузки выпрямителя (резистор  $R_1$ ), снимите показания вольтметра и амперметра, занеся их в таблицу 2.1.

Постройте внешнюю характеристику однополупериодного выпрямителя, работающего без емкостного фильтра.

Затем подключите емкостный фильтр и снимите и постройте внешнюю характеристику выпрямителя аналогично ранее описанному.

Зарисуйте осциллограммы напряжений при двух различных значениях емкостей фильтрующего конденсатора.

Таблица 2.1 – Внешняя характеристика однополупериодного выпрямителя

Параметр	Без фильтра				С емкостным фильтром			
$U_H$ , В								
$I_H$ , мА								

Вычислите для этих значений емкостей конденсатора фильтра среднее значение напряжения и коэффициент пульсаций.

2.2.2 Эксперимент 2: Исследование двухполупериодного выпрямителя с отводом от средней точки трансформатора.

Откройте файл *лаб2\_электроника\_2* (рисунок 2.7).

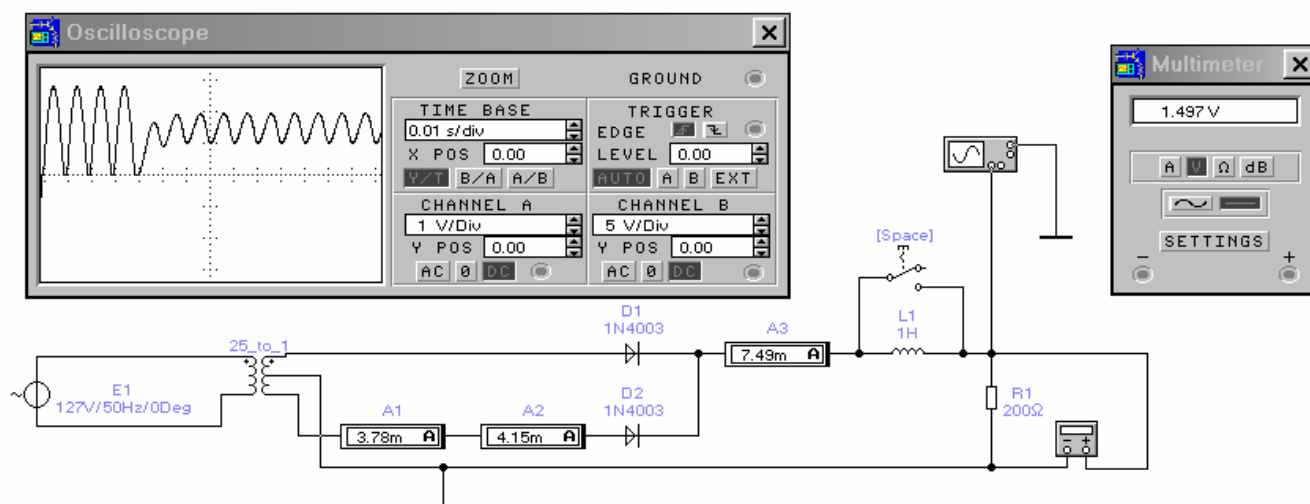


Рисунок 2.7

Сначала следует исследовать работу выпрямителя без индуктивного фильтра, отключив его с помощью выключателя. На вход А осциллографа подается выходной сигнал, а на вход В – входной.

Зарисуйте полученные осциллограммы.

Измерьте максимальные входные и выходные напряжения. Устанавливая различные значения сопротивления нагрузки выпрямителя (резистор  $R_1$ ), снимите показания мультиметра, работающего в режиме вольтметра, и амперметров, занеся их в таблицу 2.2. Амперметры  $A_1$  и  $A_3$  измеряют постоянную составляющую, а амперметр  $A_2$  – переменную. Сравните их показания.

Постройте внешнюю характеристику двухполупериодного выпрямителя, работающего без индуктивного фильтра.

Затем подключите индуктивный фильтр и снимите и постройте внешнюю характеристику выпрямителя аналогично ранее описанному.

Также зарисуйте осциллограммы напряжений при двух различных значениях фильтрующих индуктивностей.

Таблица 2.2 – Внешняя характеристика двухполупериодного выпрямителя с отводом от средней точки трансформатора

Параметр	Без фильтра					С индуктивным фильтром				
$U_H$ , В										
$I_H$ , мА										

Вычислите для этих значений индуктивности фильтра среднее значение напряжения и коэффициент пульсаций.

### 2.2.3 Эксперимент 3: Исследование мостового выпрямителя.

Откройте файл *лаб2\_электроника\_3* (рисунок 2.7).

Сначала следует исследовать работу выпрямителя без емкостного фильтра. На вход А осциллографа подается выходной сигнал, а на вход В – входной.

Зарисуйте осциллограммы напряжений.

Измерьте максимальные входные и выходные напряжения. Устанавливая различные значения сопротивления нагрузки выпрямителя (резистор  $R_1$ ), снимите показания вольтметра и амперметра, занеся их в таблицу 2.3.

Постройте внешнюю характеристику однополупериодного выпрямителя, работающего без емкостного фильтра.

Затем подключите емкостный фильтр, снимите и постройте внешнюю характеристику выпрямителя аналогично ранее описанному.

Также зарисуйте осциллограммы напряжений при двух различных значениях емкостей фильтрующего конденсатора.

Таблица 2.3 – Внешняя характеристика однополупериодного выпрямителя

Параметр	Без фильтра				С емкостным фильтром				
$U_H$ , В									
$I_H$ , мА									

Вычислите для этих значений емкостей конденсатора фильтра среднее значение напряжения и коэффициент пульсаций.

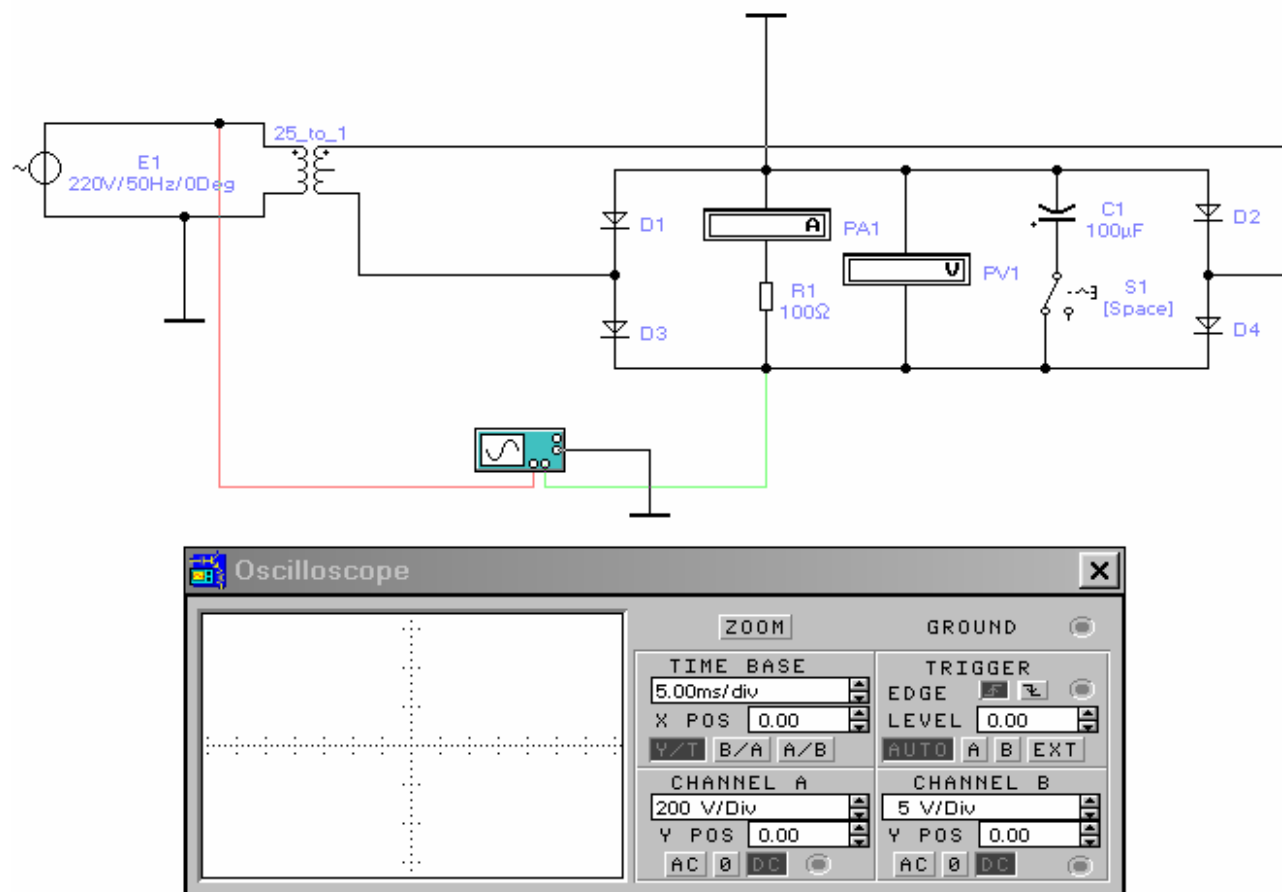


Рисунок 2.8

2.2.4 Определение зависимости амплитуды пульсации выходного напряжения от тока нагрузки для однополупериодного выпрямителя и мостового выпрямителя с фильтрами.

Используя файлы *лаб2\_электроника\_1* и *лаб2\_электроника\_3*, снять зависимость амплитуды пульсации выходного напряжения от тока нагрузки для обоих выпрямителей с фильтрами, занося показания в таблицу 2.4. Ток нагрузки следует изменять интервалами в 5 мА.

Таблица 2.4 – Зависимость амплитуды пульсаций выходного напряжения от тока нагрузки

Параметр	Однополупериодное выпрямление					Двухполупериодное выпрямление (мостовая схема)				
$U_{\text{пульс.}}, \text{ мВ}$										
$I_{\text{н}}, \text{ мА}$										

## 2.3 Контрольные вопросы

2.3.1 Что происходит с выходным напряжением выпрямителя при росте тока нагрузки: напряжение растет, падает или остается неизменным?

2.3.2 В каком случае среднее значение напряжения выпрямителя при изменении тока нагрузки изменяется значительно: без фильтра с фильтром?

2.3.3 В какой схеме выпрямителя при одном и том же среднем токе нагрузки течет больший ток через проводящий диод: в двухполупериодной мостовой, в однополупериодной, в двухполупериодной со средней точкой и двумя диодами?

2.3.4 Как зависит напряжение пульсаций выпрямителя с фильтром от тока нагрузки: напряжение пульсаций падает, растет, остается неизменным?

2.3.5 Одинаковы ли частоты входного и выходного сигналов в схемах одно- и двухполупериодного выпрямителей?

2.3.6 Каковы различия между входным и выходным сигналами одно- и двухполупериодных выпрямителей?

2.3.7 Какие факторы влияют на величину коэффициента пульсаций выпрямителя с емкостным фильтром на выходе?

2.3.8 Сравните средние значения выходного напряжения для схем одно- и двухполупериодного выпрямителей с емкостным фильтром на выходе при одинаковых нагрузках.

2.3.9 Как включают конденсатор и дроссель сглаживающего фильтра относительно нагрузки?

### 3 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

#### ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО ОДНОФАЗНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ И НЕУПРАВЛЯЕМОГО ТРЕХФАЗНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

**Цель работы:** изучить принцип действия и основные характеристики управляемого однофазного выпрямителя и неуправляемого трехфазного выпрямителя.

##### 3.1 Краткие теоретические сведения

Для преобразования переменного напряжения в постоянное напряжение применяют выпрямительные устройства. В выпрямительное устройство обычно входят трансформатор, один или несколько вентилях, сглаживающий фильтр, электронный стабилизатор постоянного напряжения. В зависимости от условий работы отдельные элементы выпрямительного устройства могут отсутствовать.

Довольно часто в различных устройствах требуется регулировать величину выпрямленного напряжения. Такие выпрямители получили название управляемых выпрямителей. В них в качестве управляемых вентилях в настоящее время применяются тиристоры.

Тиристор – полупроводниковый переключатель – изготавливается из кремния и имеет три  $p-n$  перехода (рисунок 3.1,а). Напряжение питания  $E_a$  подается на тиристор так, что переходы  $\Pi_1$  и  $\Pi_3$  открыты, а переход  $\Pi_2$  закрыт. Ток  $I_a$ , проходящий через тиристор, при этом будет определяться высоким сопротивлением закрытого перехода. На рисунке 3.1,б приведены вольтамперные характеристики тиристора для положительных значений напряжений. С увеличением напряжения  $u_a$  ток тиристора возрастает незначительно. Но при достижении напряжения  $u_{вкл}$  (рисунок 3.1,б) наступает электрический пробой в переходе  $\Pi_2$ . При этом происходит лавинообразное увеличение числа носителей зарядов за счет лавинного умножения носителей в переходе  $\Pi_2$  движущимися дырками и электронами. В результате этого ток  $I_a$  увеличивается скачком и напряжение на тиристоре уменьшается.

В анодную цепь тиристора для ограничения тока включают резистор  $R_a$ . При скачкообразном росте анодного тока увеличивается падение напряжения на резисторе  $R_a$  и напряжение на тиристоре уменьшается. Изменение анодного тока после наступления электрического пробоя производится изменением величины  $R_a$  или  $E_a$ . Если снять питающее напряжение, то свойства  $p-n$  перехода  $\Pi_2$  восстанавливаются.

Напряжение  $u_{вкл}$  можно снизить введением дополнительных носителей в любой из слоев, образующих переход  $\Pi_2$ . Появление дополнительных носителей увеличивает число актов ионизации атомов в переходе, и поэтому

напряжение  $u_{\text{вкл}}$  уменьшается. Дополнительные носители зарядов, образующие ток  $I_y$ , вводятся в тиристор вспомогательной цепью от источника питания  $E_y$ . Влияние величины тока  $I_y$  на работу тиристора видно из рисунка 3.1,б.

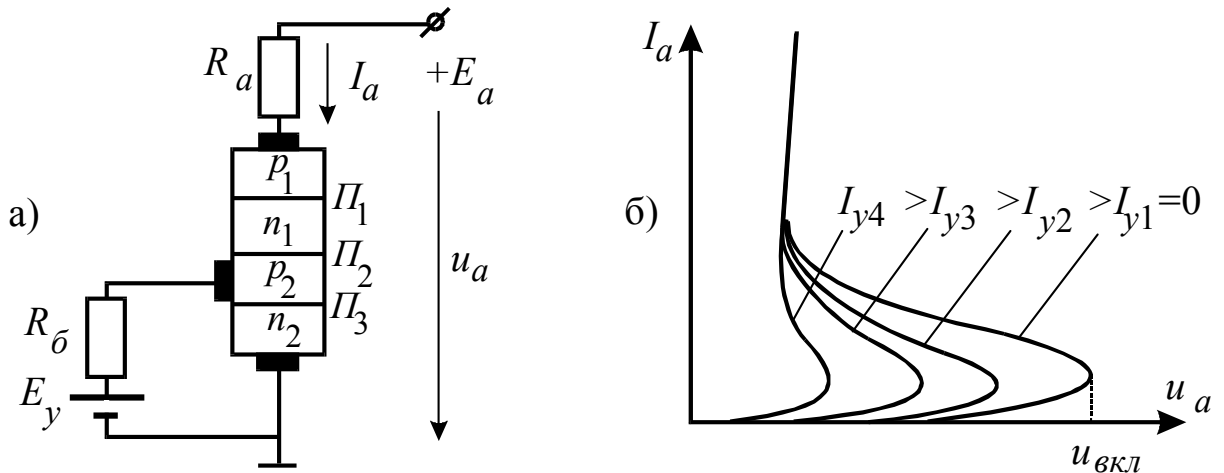


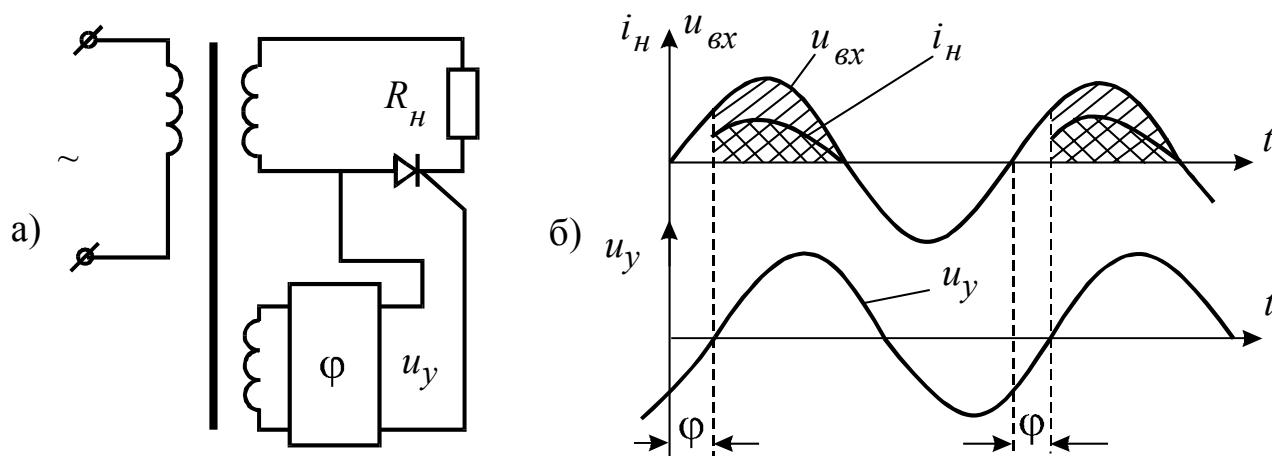
Рисунок 3.1 – Структурная схема (а) и вольт-амперные характеристики (б) тиристора

При включении тиристора в обратном направлении переходы  $\Pi_1$  и  $\Pi_3$  будут закрыты, и в нем появится весьма небольшой ток. Во избежание пробоя тиристора в обратном направлении необходимо, чтобы обратное напряжение было меньше  $u_{\text{обр.доп.}}$ .

Управление в выпрямителе сводится к управлению моментом отпирания тиристорov. Наиболее распространенный способ управления тиристорами – импульсно-фазовый; при этом на управляющий электрод тиристора периодически подаются импульсы напряжения  $u_y$ , которые могут сдвигаться во времени по отношению к моменту появления положительной полуволны коллекторного напряжения тиристора  $u_k$ .

В тех случаях, когда по условиям эксплуатации выпрямителя допускается некоторый разброс моментов отпирания тиристорov, вместо импульсного управления может быть применено фазовое управление синусоидальным током. Если, например, тиристор включить последовательно с сопротивлением нагрузки (рисунок 3.2,а) и управлять моментом включения тиристора сигналами переменного тока, то через нагрузку будут протекать импульсы тока (рисунок 3.2,б).

В приведенной схеме момент включения определяет фазовый сдвиг  $\varphi$  напряжения управления. Фазовый сдвиг создает регулируемый фазовращатель, включенный в цепь управляющего электрода.



**Рисунок 3.2** – Схема (а) и временные диаграммы (б) управляемого тиристорного выпрямителя

Трехфазные выпрямители применяют в устройствах большой и средней мощности. На рисунке 3.3,а изображена одна из возможных схем трехфазного выпрямителя. Ток через каждый диод может проходить только тогда, когда потенциал на его аноде выше потенциала на катоде. Это возможно в течении  $1/3$  периода, когда напряжение в данной фазе выше напряжений в двух других фазах. Так, например, когда открыт диод  $D_1$ , через него и нагрузку  $R_H$  проходит ток, определяемый  $u_A$ . В это время диоды  $D_2$  и  $D_3$  закрыты, т.к. потенциалы их катодов выше потенциалов анодов. В следующую треть периода открыт диод  $D_2$  и т.д. Характер изменения напряжения фаз, соответствующий открытому состоянию диодов, показан на рисунке 3.3,б. Если считать диоды идеальными, то напряжение на нагрузке  $R_H$  равно напряжению фазы с открытым диодом и, следовательно, ток в нагрузке изменяется по тому же закону, т.е. ток, проходящий через нагрузку, не падает до нуля, как это имело место в схемах одно- и двухполупериодного выпрямителей. Таким образом, пульсация тока в трехфазном выпрямителе относительно невелика и коэффициент пульсаций  $\varepsilon=0,25$ .

Среднее значение выпрямленного тока в нагрузке  $I_0 = 0,827I_m$ . В каждом диоде ток проходит в течении  $T/3$ , и поэтому его среднее значение  $I_{CP} = I_0/3$ .

Выпрямленное напряжение на нагрузке  $U_0 = 0,827U_m$ , но так как  $U_m = \sqrt{2}U$ , где  $U$  – действующее значение фазного напряжения на вторичной обмотке трансформатора, то  $U_0 = 1,17U$ .

Очевидно, что максимальное значение обратного напряжения на каждом диоде определяется амплитудой линейного напряжения  $U_{обр\ m} = \sqrt{3}U_m$ , а так как  $U_m = 1,21U_0$ , то  $U_{обр\ m} = 2,09U_0$ .

## 3.2 Программа работы.

3.2.1 Эксперимент 1: Исследование управляемого однофазного однополупериодного выпрямителя.

Откройте файл *лаб3\_электроника\_1* (рисунок 3.4).



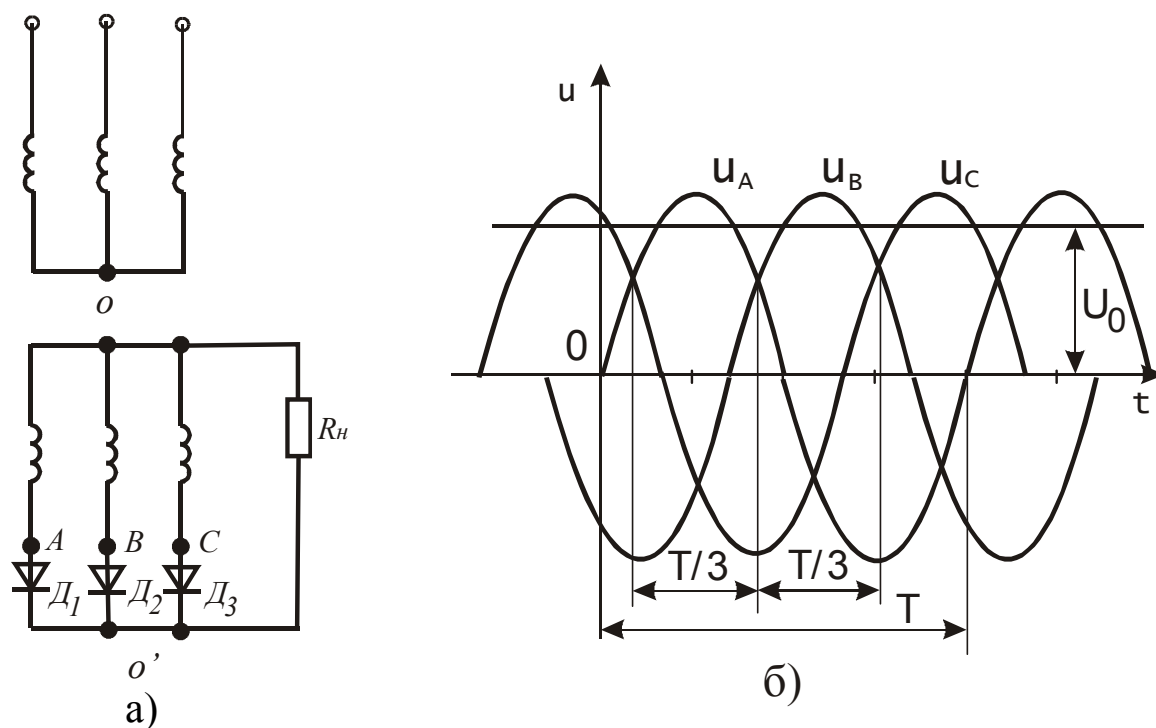


Рисунок 3.3 – Схема трехфазного выпрямителя (а) и фазные напряжения на нем (б)

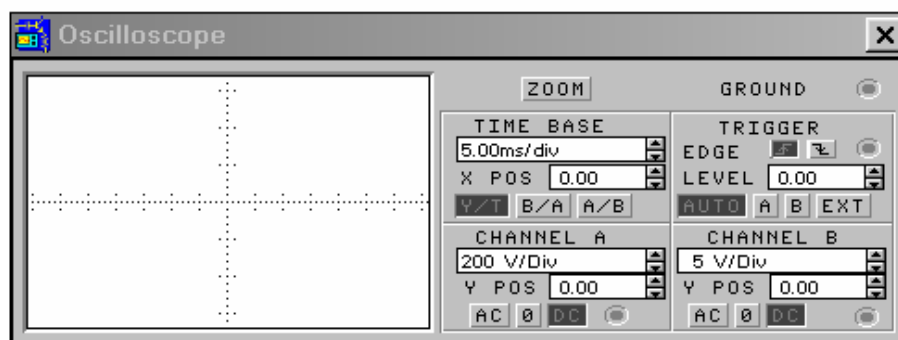
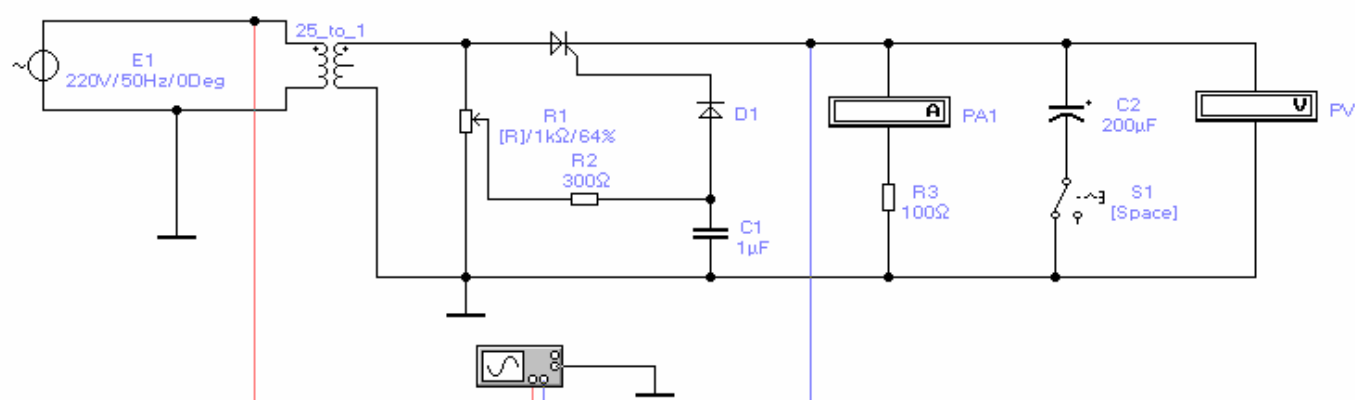


Рисунок 3.4

Сначала следует исследовать работу управляемого выпрямителя без емкостного фильтра, отключив его. На вход А осциллографа подается выходной сигнал, а на вход В – входной.

Зарисуйте полученные осциллограммы.

Измерьте максимальные входные и выходные напряжения. Устанавливая различные значения сопротивления нагрузки выпрямителя (резистор  $R_3$ ), снимите показания вольтметра и амперметра, занеся их в таблицу 3.1. Постройте внешние характеристики однополупериодного управляемого выпрямителя, работающего без емкостного фильтра, при разных моментах отпирания тиристора (регулируется сопротивлением  $R_1$ ). Момент отпирания определить из осциллограмм.

Таблица 3.1 – Внешняя характеристика однополупериодного управляемого выпрямителя без фильтра

Параметр	$\varphi_1 =$					$\varphi_2 =$				
$U_H$ , В										
$I_H$ , мА										

Затем подключите емкостный фильтр, снимите и постройте внешнюю характеристику выпрямителя аналогично ранее описанному.

Также зарисуйте осциллограммы напряжений при двух различных значениях емкостей фильтрующего конденсатора.

Вычислите для этих значений емкостей конденсатора фильтра среднее значение напряжения и коэффициент пульсаций.

3.2.2 Эксперимент 2: Исследование трехфазного однополупериодного выпрямителя.

Откройте файл *лаб3\_электроника\_2* (рисунок 3.5).

На вход А осциллографа подается выходной сигнал, а на вход В – входной.

Зарисуйте полученные осциллограммы.

Измерьте максимальные входные и выходные напряжения.

Устанавливая различные значения сопротивления нагрузки выпрямителя (резистор  $R_n$ ), снимите показания вольтметра и амперметра, занеся их в таблицу 3.2.

Постройте внешнюю характеристику трехфазного выпрямителя.

Таблица 3.2 – Внешняя характеристика трехфазного однополупериодного выпрямителя без фильтра

$U_H$ , В										
$I_H$ , мА										

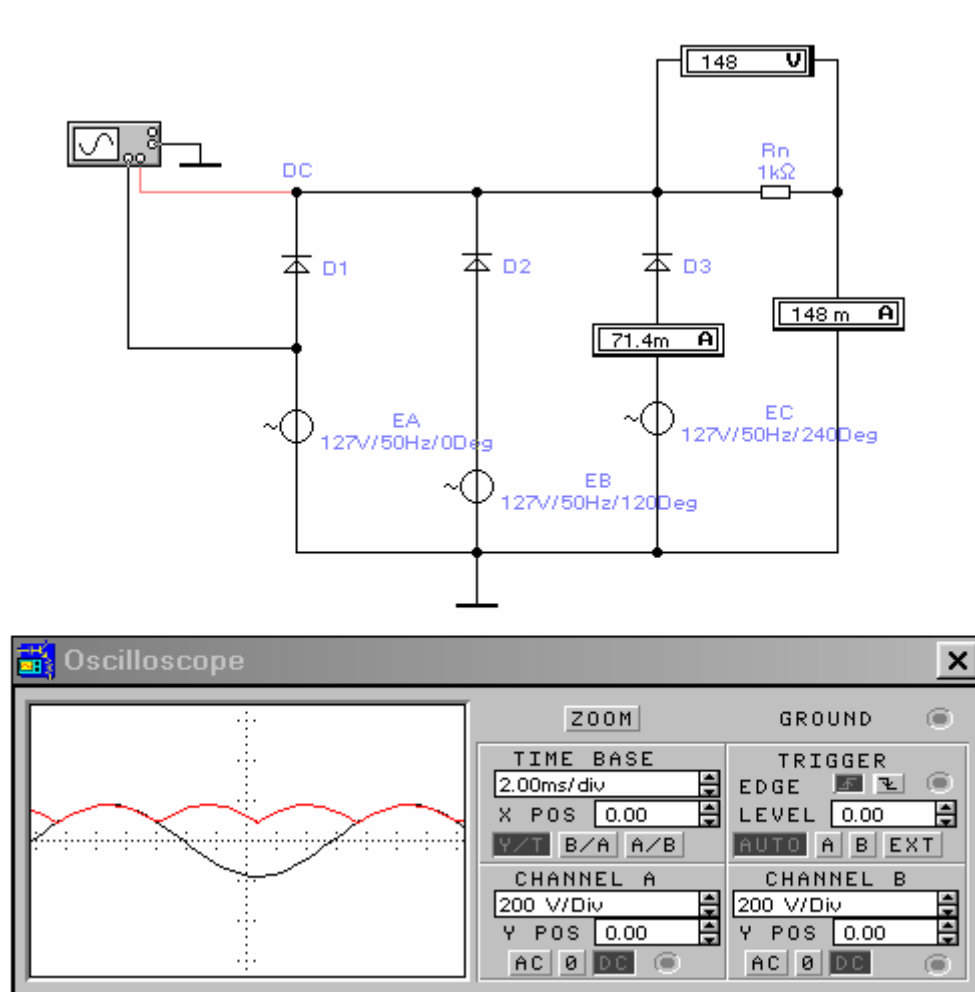


Рисунок 3.5

### 3.3 Контрольные вопросы

- 3.3.1 Назовите электроды тиристора.
- 3.3.2 Чему равен коэффициент пульсации для трехфазного выпрямителя? Сравните его значение со значением коэффициента пульсаций для однофазных выпрямителей.
- 3.3.3 Составьте структурную схему управляемого выпрямителя.
- 3.3.4 Как соотносятся токи и напряжения на входе и выходе трехфазного выпрямителя?

## **Список использованных источников**

- 1 Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. – М.: «Солон-Р», 1999. – 506 с.
- 2 Панфилов Д.И., Иванов В.С., Чепурин И.Н. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях: Практикум на Electronics Workbench: В 2 т./ Под общей ред. Д.И. Панфилова – Т.2: Электроника. – М.: ДОДЭКА, 2000. – 288 с.
- 3 Данилов И.А., Иванов П.М. Общая электротехника с основами электроники: Учеб. пособие для студ. неэлектротехн. спец. средних спец. учеб. заведений. – М.: Высш. шк., 1998. – 752 с.
- 4 Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высш. шк., 1978.