



Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Башкирский государственный  
аграрный университет»

Методические указания к  
практическим занятиям

ОП.09 Основы электроники  
и системотехники

Кафедра электрических машин и  
электрооборудования

## **ОП.09 ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ И СХЕМОТЕХНИКИ**

Методические указания  
к практическим занятиям по дисциплине  
ч.1 Основы электроники

### **Специальность**

13.02.11 Техническая эксплуатация и обслуживание электрического и  
электромеханического оборудования (по отраслям)

Профиль получаемого образования  
технический

Квалификация (степень) выпускника  
Техник

Уфа 2022

Составитель: преподаватель Кафиев И.Р.

Рецензент: доцент кафедры теплоэнергетики и физики  
канд. техн. наук, доцент Инсафуддинов С.З.

Ответственный за выпуск: и.о. зав. кафедрой электрических машин и  
электрооборудования канд. техн. наук Акчурин С.В.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1 Практическое занятие № 1 Расчет электронных схем методом нагрузочных линий	5
2 Практическое занятие № 2 Расчет электронных схем, содержащих полупроводниковые диоды и стабилитроны	7
3 Практическое занятие № 3 Расчет параметров биполярного транзистора	14
4 Практическое занятие № 4 Расчет параметров полевого транзистора	19
5 Практическое занятие № 5 Расчет режимов транзисторных электронных ключей	24
6 Методические рекомендации по организации СРО в соответствии с рабочей программой дисциплины	29
Библиографический список	30

## **ВВЕДЕНИЕ**

Методические указания к практическим занятиям по дисциплине (Часть 1 Основы электроники) по дисциплине ОП.09 Основы электроники и системотехники призваны способствовать освоению раздела 1 Основы электроники рабочей программы по указанной дисциплине.

Структура методических указаний включает шесть разделов, пять из которых отражают содержание соответствующего практического занятия. Тематика практических занятий полностью соответствует содержанию рабочей программы ОП.09 Основы электроники и системотехники для подготовки техников по специальности 13.02.11 Техническая эксплуатация и обслуживание электрического и электромеханического оборудования (по отраслям).

Раздел 6 включает методические рекомендации по организации СРО по данной дисциплине в соответствии с рабочей программой.

Содержание методических указаний направлено на углубленное изучение обучающимися наиболее важных разделов теоретического курса и включает методические рекомендации, примеры решения типовых задач, необходимые нормативные, информационные и справочные данные, а также вопросы для самоконтроля.

# 1 ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 1

## РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ МЕТОДОМ НАГРУЗОЧНЫХ ЛИНИЙ

Цель занятия: получить практические навыки в расчете электронных схем методом нагрузочных линий.

Задание:

- 1) Изучить методику расчета электронных схем методом нагрузочных линий;
- 2) Решить примеры по расчету электронных схем методом нагрузочных линий.

### 1.1 Краткие теоретические сведения

Вольтамперные характеристики (ВАХ) элементов электронных схем отражают основные функциональные свойства элемента и ограничения его рабочих параметров [1]. Использование ВАХ в расчетах электронных схем (графо-аналитические методы расчетов) позволяет сделать расчет не только проще, но и наглядней, легко провести анализ тенденций изменения расчетного режима работы элемента от изменения собственных параметров и внешних воздействий. Одним из наиболее распространенных методов графо-аналитического расчета является метод нагрузочных линий.

Суть метода нагрузочных линий можно пояснить на следующем примере. Пусть имеется электрическая цепь, представленная на рисунке 1.1(а), состоящая из последовательно включенных в цепь постоянного напряжения  $E$  резистора  $R$  и нелинейного элемента (НЭ). При этом известна ВАХ этого НЭ – кривая 1 на рисунке 1.1(б). Закон Ома для рассматриваемой цепи имеет вид [2]

$$E = U_R + U_{НЭ} = IR + U_{НЭ}. \quad (1.1)$$

Резистор  $R$  – линейный элемент, уравнение его ВАХ –  $I = U_R / R$ , график представляет собой прямую, проходящую через центр координат. ВАХ НЭ не описана аналитически, поэтому невозможно найти силу тока в цепи  $I$  непосредственно из приведенного выше уравнения.

Можно рассматривать  $R$ , как нагрузку НЭ и построить график зависимости тока  $I$  через  $R$  (одинакового для  $R$  и НЭ) от напряжения на НЭ -  $U_{НЭ}$  - эта линия (в данном случае – прямая) и называется нагрузочной линией (НЛ). Одна точка НЛ соответствует воображаемому случаю, когда все напряжение  $E$  приложено к  $R$  (воображаемое к.з. в НЭ,  $U_{НЭ} = 0$ ), при этом ток максимален и равен [2]

$$I_M = E / R.$$

Вторая точка НЛ соответствует воображаемому случаю, когда ток в цепи равен нулю (воображаемый обрыв внутри НЭ), при этом падение напряжения на  $R$  так же равно нулю, а  $U_{НЭ} = E$ . Очевидно, что все промежуточные точки искомого графика лежат на прямой, соединяющей эти точки – линия 2 на рисунке 1.1, б. Поскольку ток через  $R$  и НЭ один и тот же, его величина будет од-

нозначно определяться точкой пересечения линий 1 и 2 (ВАХ НЭ и нагрузочной прямой резистора) – эта точка называется рабочей точкой (РТ) НЭ.

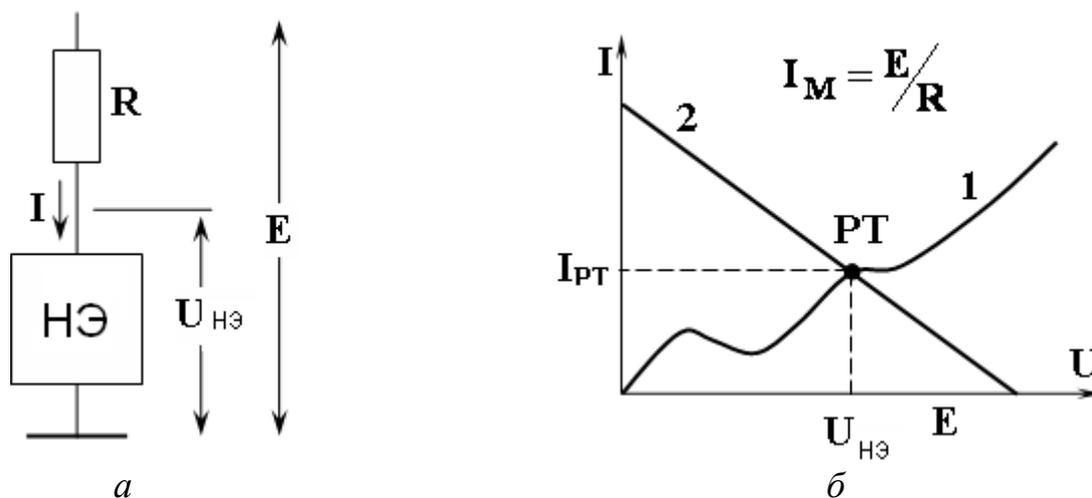


Рисунок 1.1 Электрическая цепь с нелинейным элементом: а – схема; б - ВАХ НЭ и нагрузочная прямая

## 1.2 Пример решения задачи

Для схемы, приведенной на рисунке 1.1, а, рассчитать мощности, рассеиваемые на резисторе  $P_R$  и на НЭ  $P_{НЭ}$  и общую мощность, отбираемую от источника питания  $P$ , если  $I_M = 10 \text{ mA}$ ,  $E = 10 \text{ В}$ , а координаты РТ  $7 \text{ В}$ ;  $4 \text{ mA}$ .

Уравнение анализируемой цепи (закон Ома для полной цепи)

$$E = U_R + U_{НЭ} = I R + U_{НЭ} .$$

Согласно условиям задачи и ВАХ НЭ (рисунок 1.1)  $U_{НЭ} = 7 \text{ В}$ , следовательно  $U_R = E - U_{НЭ} = 10 - 7 = 3 \text{ В}$ . Сила тока, протекающего через  $R$  и НЭ  $I = 4 \text{ mA}$ . Таким образом, искомые мощности равны

$$\begin{aligned} P_R &= U_R I = 3 \times 4 = 12 \text{ мВт}, \\ P_{НЭ} &= U_{НЭ} I = 7 \times 4 = 28 \text{ мВт}, \\ P &= E I = 10 \times 4 = 40 \text{ мВт} = P_R + P_{НЭ}. \end{aligned}$$

## 1.3 Типовые задачи для решения на практическом занятии

Задача 1.3.1 Устройство, аналогичное НЭ (рисунок 1.1), имеет ВАХ в форме ломаной линии, проходящей через следующие точки:  $(0 \text{ В}; 0 \text{ mA})$ ,  $(2 \text{ В}; 2 \text{ mA})$ ,  $(4 \text{ В}; 10 \text{ mA})$ ,  $(14 \text{ В}; 15 \text{ mA})$ . Данное устройство подключено к источнику постоянного напряжения  $E = 10 \text{ В}$  через резистор  $R$  по схеме рисунка 1.1, а. Построить нагрузочную прямую и определить координаты РТ. Значения сопротивления резистора  $R$  приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 Варианты значений сопротивления резистора  $R$

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
$R$ [кОм]	1,0	2,0	10,0	0,5	0,4	0,8	5,0	4,0

Задача 1.3.2 По координатам РТ, полученным при решении задачи 1.3.1 рассчитать мощности, рассеиваемые на резисторе  $R_R$  и на НЭ –  $P_{НЭ}$  и общую мощность  $P$ , отбираемую от источника питания.

Задача 1.3.3 Используя исходные данные задачи 1.3.1 изобразить нагрузочные прямые и РТ, соответствующие изменению сопротивления резистора  $R$  в 2 раза в сторону увеличения и в сторону уменьшения (например, если  $R = 1$  кОм, то нужно рассмотреть случай  $R' = 2$  кОм и  $R'' = 0.5$  кОм).

Задача 1.3.4. Используя исходные данные задачи 1.3.1 изобразить нагрузочные прямые и РТ, соответствующие изменению напряжения на 5 В в сторону увеличения и в сторону уменьшения, т.е. для  $E' = 5$  В и  $E'' = 15$  В..

Задача 1.5. Решить задачи 1.3.1 – 1.3.4 для устройства, ВАХ которого имеет форму ломаной линии, проходящей через следующие точки (таблица 1.2).

Таблица 1.2 Координаты ВАХ нелинейного элемента

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
т.1 (В; мА)	(0;-2)	(0;-2)	(0;-2)	(0;0)	(0;0)	(0;2)	(0;2)	(0;2)
т.2 (В; мА)	(2;2)	(2;0)	(2;4)	(3;3)	(4;6)	(2;2)	(2;4)	(2;6)
т.3 (В; мА)	(8;8)	(6;12)	(8;10)	(6;12)	(8;10)	(10;10)	(8;10)	(10;10)
т.4 (В; мА)	(14;8)	(14;16)	(14;16)	(14;16)	(14;10)	(14;12)	(14;10)	(14;16)

#### 1.4 Вопросы для самоконтроля

- 1) Пояснить сущность метода нагрузочных линий?
- 2) Какая линия называется нагрузочной?
- 3) Что называется рабочей точкой транзистора?
- 4) Как построить нагрузочную линию?

## 2 ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 2 РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ, СОДЕРЖАЩИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ И СТАБИЛИТРОНЫ

Цель занятия: получить практические навыки расчета электронных схем аналитическими и графическими методами.

Задание:

- 1) Решить примеры по расчету электронных схем аналитическими методами;
- 2) Решить примеры по расчету электронных схем графическими методами.

### 2.1 Краткие теоретические сведения

Полупроводниковый диод [от греческого di- двойной и (электр)од] - двухэлектродный электронный прибор, изготовленный на основе полупровод-

никового кристалла и имеющий одностороннюю проводимость. Применяется в электрической и электронной аппаратуре для выпрямления переменного тока, детектирования, преобразования частоты, переключения цепей и др. Наиболее распространены полупроводниковые диоды на базе p-n перехода.

Основными исходными полупроводниковыми материалами из которых изготавливаются диоды (и иные полупроводниковые приборы) являются:

Si – кремний и его соединения (для большей части p-p приборов);

Ge – германий и его соединения;

Ga – галлий и его соединения;

In – индий и его соединения.

В зависимости от сферы применения, промышленностью выпускаются различные типы полупроводниковых диодов, отличающихся своими техническими характеристиками и параметрами.

Выпрямительный диод – предназначен для использования в выпрямителях переменного тока низкой частоты (обычно не выше 50 кГц). Основными параметрами такого диода являются максимальный прямой ток (от долей Ампер до килоАмпер – в зависимости от марки) и максимальное обратное напряжение (достигает 2000 В). Помимо одиночных диодов выпускаются диодные сборки и диодные столбы.

Высокочастотные и импульсные диоды предназначены для использования в цепях переменного и импульсного тока высокой частоты (до ГГц). Основными параметрами такого диода, помимо максимального (импульсного) прямого тока и максимального обратного напряжения, являются величины паразитной емкости и время восстановления рабочих свойств при прохождении импульсного тока.

Светодиод – диод предназначенный для непосредственного преобразования электрической энергии в энергию светового излучения. Обычные светодиоды формируют некогерентное излучение, лазерные светодиоды - когерентное. В зависимости от выбранного материала и структуры p-n перехода излучение может лежать в инфракрасной, видимой или ультрафиолетовой области спектра. Основные параметры: цвет свечения (длина волны), яркость (Кд/м<sup>2</sup>) или сила света (мкКд),  $I_{пр.маx}$  (типовое значение - 20 мА),  $U_{пр.маx}$  (от 1,7 В для инфракрасных, и – до 4,2 В для синих и ультрафиолетовых),  $U_{об.маx}$  (единицы - десятки В);

Фотодиод – диод, обратный ток которого (так называемый фототок) изменяется пропорционально интенсивности светового потока, падающего на p-n переход. В зависимости от выбранного материала и структуры p-n перехода максимум спектральной чувствительности фотодиода может лежать в инфракрасной, видимой или ультрафиолетовой области спектра. Основные параметры: область рабочего спектра (длина волны максимума спектральной чувствительности), яркость (Кд/м<sup>2</sup>) или сила света (мкКд),  $I_{пр.маx}$  (типовое значение - 20 мА),  $U_{пр.маx}$  (от 1,7 В для инфракрасных до 4,2 В для синих и ультрафиолетовых),  $U_{об.маx}$  (единицы - десятки В);

Кроме перечисленных, существует еще целый ряд типов полупроводниковых диодов.

Вольтамперная характеристика (ВАХ) — это зависимость тока  $I$ , протекающего через диод, от напряжения  $U$ , приложенного к диоду. Вольтамперной характеристикой называют и график этой зависимости.

В первом приближении можно считать, что ВАХ диода определяется идеализированным описанием характеристики p-n перехода:

$$I = I_s \cdot \left( e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1 \right), \quad (2.1)$$

где  $I_s$  – тепловой ток (ток насыщения – saturation current (англ.)), обусловленный генерацией неосновных носителей в областях, прилегающих к области p-n-перехода;

$\varphi_T = kT/q$  – потенциал Ферми (температурный потенциал) – здесь:

$k$  – постоянная Больцмана ( $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К =  $8,62 \cdot 10^{-5}$  эВ/К);

$T$  – абсолютная температура, К;

$q$  – элементарный заряд ( $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

Для кремния, при температуре  $+27^\circ\text{C}$  ( $300^\circ\text{K}$ ) –  $\varphi_T \approx 0,026$  В.

Однако часто это идеализированное описание дает неприемлемую погрешность. Особенно большая погрешность возникает при вычислении тока диода, включенного в обратном направлении ( $U < 0$ ,  $I < 0$ ). Вычисленный по рассматриваемому выражению ток ( $I = -I_s$ , при  $|U| \gg \varphi_T$ ) для кремниевых диодов оказывается на несколько порядков меньше реального. Следует отметить, что в некоторых практических расчетах обратным током вообще можно пренебречь.

Прямая ветвь ВАХ реального диода ( $U > 0$ ,  $I > 0$ ) отличается от идеализированной из-за того, что на нее влияют:

- сопротивления слоев полупроводника;
- сопротивления контактов металл-полупроводник.

Влияние указанных сопротивлений приводит к тому, что напряжение на реальном диоде при заданном токе несколько больше (обычно на доли вольта), чем это следует из формулы.

Обратная ветвь ВАХ реального диода ( $U < 0$ ,  $I < 0$ ). Основные причины того, что реально обратный ток обычно на несколько порядков больше тока  $I_s$ , следующие:

- термогенерация носителей непосредственно в области p-n-перехода;
- поверхностные утечки.

Термогенерация в области p-n-перехода оказывает существенное влияние на ток потому, что область перехода обеднена подвижными носителями заряда, и процесс рекомбинации (обратный процессу генерации и в определенном смысле уравнивающий его) здесь замедлен.

При комнатной температуре для кремниевых приборов ток термогенерации обычно существенно превышает тепловой ток  $I_s$ .

Для ориентировочных расчетов можно считать, что с повышением температуры ток  $I_s$  удваивается примерно на каждые  $5^\circ\text{C}$ , а ток термогенерации удваивается примерно на каждые  $10^\circ\text{C}$ . При температуре около  $100^\circ\text{C}$  ток  $I_s$  сравнивается с током термогенерации.

Типовая ВАХ полупроводникового диода приведена на рисунке 2.1.

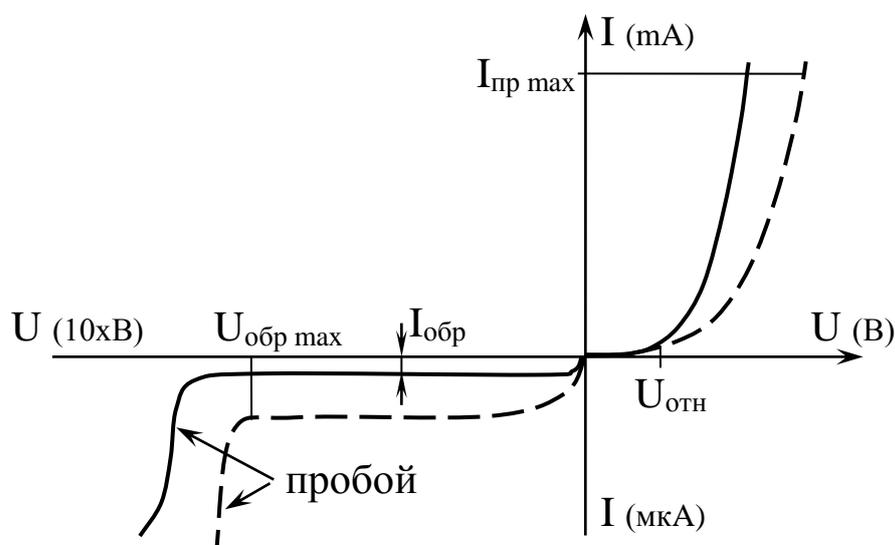


Рисунок 2.1 Типовая ВАХ выпрямительного диода

————— при  $t = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$

- - - - - при  $t = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$

Наиболее часто используемые параметры, применяемые к диодам различных подклассов [2]:

$U_{от}$  – напряжение отпирания диода (типичное значение для кремниевых (Si) диодов 0,6-0,8 В, для германиевых – 0,3-0,4 В);

$I_{пр.макс}$  – максимально допустимый постоянный прямой ток;

$U_{пр}$  – постоянное прямое напряжение, соответствующее заданному току (чаще всего –  $I_{пр.макс}$ );

$U_{обр.макс}$  – максимально допустимое обратное напряжение диода (положительная величина);

$I_{обр.макс}$  – максимально допустимый постоянный обратный ток диода (положительная величина; если реальный ток больше, чем  $I_{обр.макс}$ , то диод считается непригодным к использованию);

$r_{диф}$  – дифференциальное сопротивление диода (при заданном режиме работы),  $r_{ст} = dU/dI$ .

В настоящее время существуют диоды, предназначенные для работы в очень широком диапазоне токов и напряжений. Для наиболее мощных диодов  $I_{пр.макс}$  составляет килоамперы, а  $U_{обр.макс}$  – киловольты.

Стабилитрон – это полупроводниковый диод, сконструированный для работы в режиме электрического пробоя.

В указанном режиме при значительном изменении тока стабилитрона напряжение изменяется незначительно. В разных типах стабилитронов может иметь место туннельный, лавинный или смешанный тип электрического про-

боя. В низковольтных, (до 5,7 В) стабилитронах имеет место туннельный пробой, а в высоковольтных – лавинный пробой.

Типовая ВАХ полупроводникового стабилитрона приведена на рисунке 2.2.

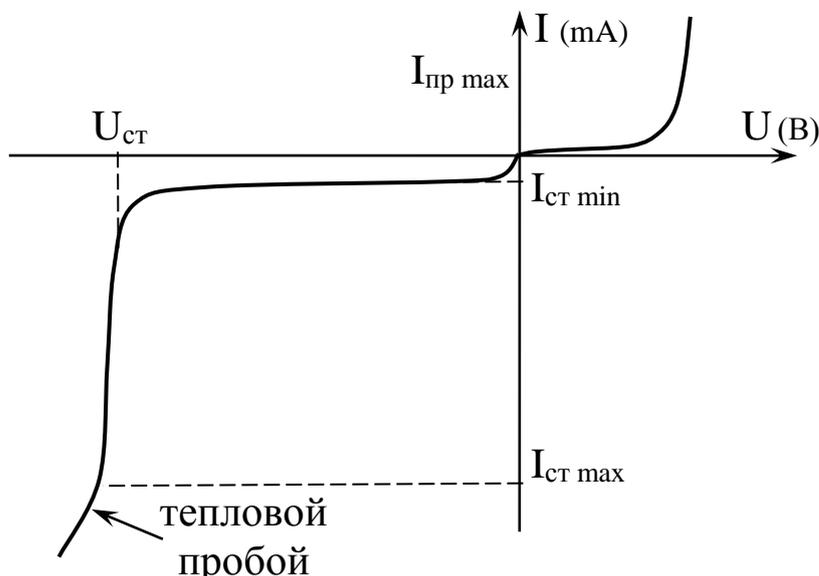


Рисунок 2.2 Типовая ВАХ стабилитрона

Основные параметры стабилитрона [2]:

$U_{ст}$  – напряжение стабилизации (при заданном токе в режиме пробоя);

$I_{ст.мин}$  – минимально допустимый ток стабилизации;

$I_{ст.макс}$  – максимально допустимый ток стабилизации;

$r_{ст} = dU/dI$  – дифференциальное сопротивление стабилитрона (на участке пробоя), типовое значение – единицы - десятки Ом;

$\alpha_{ст} = dU_{ст}/dT$  (В/°С) - температурный коэффициент напряжения стабилизации;

Величины  $U_{ст}$ ,  $I_{ст.мин}$  и  $I_{ст.макс}$  принято указывать как положительные.

Пример применения стабилитрона показан на схеме так называемого параметрического стабилизатора напряжения (рисунок 2.3).

Если напряжение  $U_{вх}$  настолько велико, что стабилитрон находится в режиме пробоя, то изменения этого напряжения практически не вызывают изменения напряжения  $U_{вых}$  (при изменении напряжения  $U_{вх}$  изменяется только ток  $I$ , а также напряжение  $U_R = I \cdot R$ ).

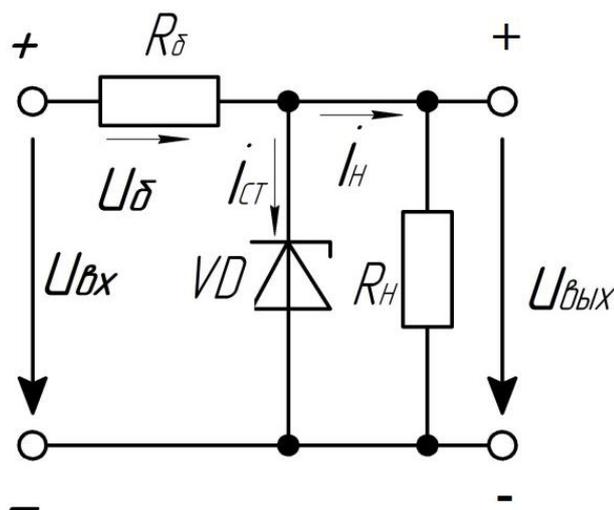


Рисунок 2.3 Схема параметрического стабилизатора

Для графоаналитического расчета схем с диодами используется метод нагрузочных линий (рисунок 2.4).

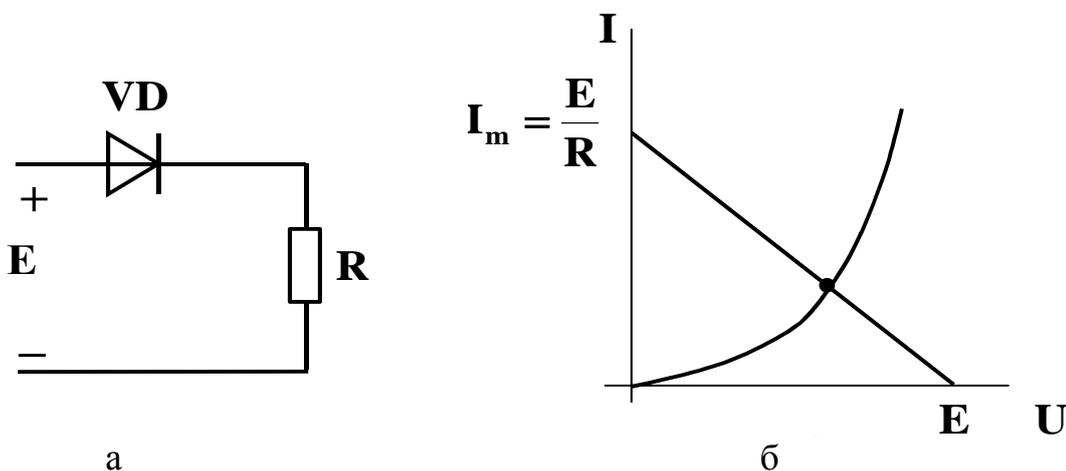


Рисунок 2.4 Электрическая цепь, содержащая полупроводниковый диод:  
а – схема; б - ВАХ полупроводникового диода и нагрузочная прямая

## 2.2 Пример решения задачи

Задача 2.2.1 Диодный мостовой выпрямитель питается от стандартной сети 220В/50Гц и нагружен на резистор сопротивлением 270 Ом.

Необходимо определить требования к основным параметрам диодов ( $I_{пр.мах}$  и  $U_{обр.мах}$ ), используемым в данном выпрямителе.

Решение:

$$U_{обр.мах} \geq U_{сети\ ампл.} = U_{сети\ действ.} \cdot \sqrt{2} \approx 220 \cdot 1,41 \approx 311\text{ В};$$

$$I_{пр.мах} \geq (U_{сети\ ампл.} - 2U_{пр.мах\ диода}) / R_H;$$

поскольку  $U_{пр.мах\ диода} \approx 1\text{ В} \ll U_{сети\ ампл.}$ ,

$$I_{пр.мах} \geq U_{сети\ ампл} / R_H = 311 / 270 \approx 1,15\text{ А}.$$

С учетом возможных колебаний сетевого напряжения, а так же округленности справочных данных электронных элементов, можно округлить искомые величины в сторону увеличения.

Ответ: В данном выпрямителе могут быть использованы диоды, паспортные данные, которых удовлетворяют следующим требованиям:  $I_{пр.маx} \geq 1,2 \dots 1,5$  А, (расчетное - 1,15 А),  $U_{обр.маx} \geq 350 \dots 400$  В (расчетное - 311 В).

## 2.3 Типовые задачи для самостоятельного решения

Задача 2.3.1 Однофазный мостовой выпрямитель собран на диодах типа КД202В ( $I_{пр.маx}=5$  А,  $U_{обр.маx} = 100$  В,  $U_{пр.маx}= 1.0$  В) питается переменным синусоидальным напряжением 36 В / 50 Гц. Величина тока нагрузки выпрямителя  $I_n$  может меняться в диапазоне от  $I_{нmin} = 1$  А до  $I_{нmax} = 4$  А.

Требуется определить - какая мощность  $P_{VD}$  рассеивается на одном диоде выпрямителя в режиме минимальной и максимальной нагрузки.

Задача 2.3.2 Схема параметрического стабилизатора приведена на рисунке 1.3. Параметры стабилитрона:  $U_{ст} = 7,5$  В,  $I_{ст.min} = 3$  мА,  $I_{ст.маx} = 30$  мА. Сопротивление нагрузки  $R_n=750$  Ом. Питающее напряжение  $U= +12$  В.

Требуется рассчитать номинальное сопротивление резистора R, обеспечивающего работу стабилизатора. Принять ток стабилитрона  $I_{VD}=10$  мА.

Задача 2.3.3 Схема параметрического стабилизатора приведена на рисунке. Параметры стабилитрона:  $U_{ст} = 7,5$  В,  $I_{ст.min} = 3$  мА,  $I_{ст.маx} = 30$  мА. Сопротивления:  $R_n=750$  Ом

Требуется рассчитать минимальное питающее напряжение  $U_{min}$  при котором стабилизатор сохранит работоспособность.

Таблица 2.1 Варианты значений сопротивления резистора R

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
R [Ом]	100	200	150	500	400	360	180	80

Задача 2.3.4 Схема параметрического стабилизатора приведена на рисунке. Параметры стабилитрона:  $U_{cm} = 7,5$  В,  $I_{cm.min} = 3$  мА,  $I_{cm.маx} = 30$  мА. Сопротивления:  $R_n=750$  Ом,  $R=150$  Ом.

Требуется рассчитать максимальное питающее напряжение  $U_{маx}$  при котором стабилизатор сохранит работоспособность.

## 2.4 Вопросы для самоконтроля

- 1) Дать определение полупроводниковому диоду.
- 2) Дать определение стабилитрону.
- 3) Пояснить сущность аналитического метода расчета электронных схем.
- 4) Дать определение ВАХ диода.
- 5) Назовите основные параметры стабилитрона.

### 3 ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 3 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Цель занятия: получить практические навыки расчета параметров биполярного транзистора.

Задание:

3) Решить примеры по расчету параметров биполярного транзистора по его ВАХ;

4) Решить примеры по расчету дифференциальных параметров  $T$  – об-разной схемы биполярного транзистора.

#### 3.1 Краткие теоретические сведения

Биполярный транзистор – это полупроводниковый прибор с двумя  $p-n$ -переходами, имеющий три вывода, в котором выходной ток управляется входным током. Действие биполярного транзистора основано на использовании носителей заряда обоих знаков (дырок и электронов), а управление протекающим через него током осуществляется с помощью управляющего тока.

Биполярный транзистор является наиболее распространенным активным полупроводниковым прибором.

**Устройство транзистора.** Биполярный транзистор в своей основе содержит три слоя полупроводника ( $p-n-p$  или  $n-p-n$ ) и соответственно два  $p-n$  – перехода. Каждый слой полупроводника через невыпрямляющий контакт металл-полупроводник подсоединен к внешнему выводу.

Средний слой и соответствующий вывод называют базой, один из крайних слоев и соответствующий вывод называют эмиттером, а другой крайний слой и соответствующий вывод – коллектором.

На рисунке 3.1,*а* показано схематическое, упрощенное изображение структуры транзистора типа  $n-p-n$  и два допустимых варианта условного графического обозначения (рисунок 3.1,*б*). Кружок на схеме является символом корпуса транзистора. Кружок не ставится, если транзистор используется без корпуса, например, если транзистор входит в состав интегральной микросхемы.

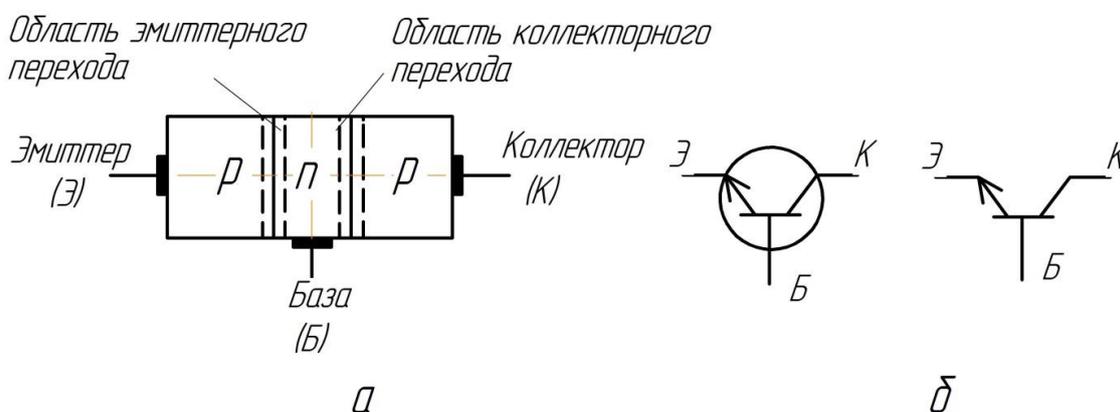


Рисунок 3.1 Биполярный транзистор типа  $n-p-n$ :  
*а* – структура; *б* - графическое обозначение

Транзистор  $p-n-p$  устроен аналогично, упрощенное изображение его структуры дано на рисунке 3.2, *а*. Более простой вариант условного графического обозначения – на рисунке 3.2, *б*.

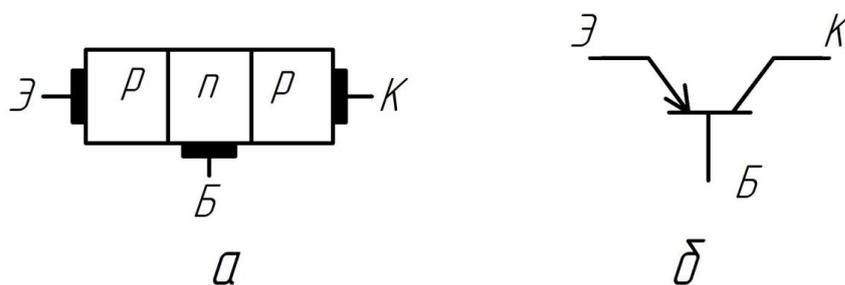


Рисунок 3.2 Биполярный транзистор типа  $p-n-p$ :  
*а* – структура; *б* – графическое обозначение

Транзистор называют биполярным, так как в процессе протекания электрического тока участвуют носители электричества двух знаков – электроны и дырки. Но в различных типах транзисторов роль электронов и дырок различна. Транзисторы типа  $n-p-n$  более распространены в сравнении с транзисторами типа  $p-n-p$ , так как обычно имеют лучшие параметры. Это можно объяснить тем, что основную роль в электрических процессах в транзисторах типа  $n-p-n$  играют электроны, а транзисторах типа  $p-n-p$  – дырки. Электроны же обладают подвижностью в два-три раза большей, чем дырки.

Важно отметить, что реально площадь коллекторного перехода значительно больше площади эмиттерного перехода, так как такая несимметрия значительно улучшает свойства транзистора.

**Количественные особенности структуры транзистора.** В основе работы биполярного транзистора типа  $n-p-n$  лежат те же физические процессы, которые рассмотрены при изучении полупроводникового диода. Особенности транзистора определяются особенностями его конструкции.

Основными элементами транзистора являются два соединенных  $p-n$  перехода. Это позволяет дать формальное представление структуры транзистора, показанное на рисунке 3.3. Для понимания принципа работы транзистора исключительно важно учитывать, что  $p-n$ -переходы транзистора сильно взаимодействуют. Это означает, что ток одного перехода сильно влияет на ток другого, и наоборот. Именно это взаимодействие радикально отличает транзистор от схемы с двумя диодами (рисунок 3.4).

В схеме с диодами ток каждого диода зависит от напряжения на нем самом и никак не зависит от тока другого диода.

Указанное взаимодействие имеет исключительно простую главную причину: очень малое расстояние между переходами транзистора (от 20 – 30 мкм до 1 мкм и менее). Это расстояние называют толщиной базы. Именно эта количественная особенность структуры создает качественное своеобразие транзистора.

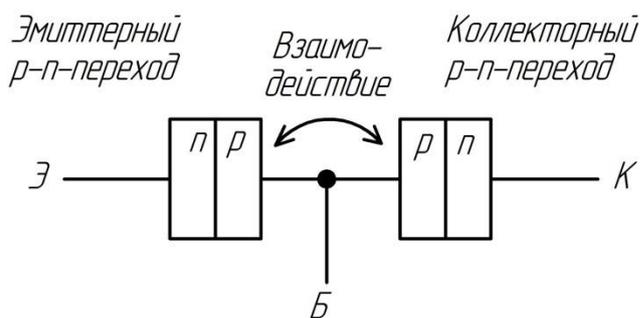


Рисунок 3.3 Структура транзистора

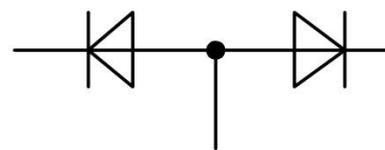


Рисунок 3.4 Схема с двумя диодами

**Основные физические процессы.** Концентрация атомов примеси (и свободных электронов) в эмиттере сравнительно велика, поэтому этот слой низкоомный. Концентрация атомов примеси (и дырок) в базе сравнительно низка, поэтому этот слой высокоомный. Концентрация атомов примеси (и свободных электронов) в коллекторе может быть как больше концентрации атомов примеси в базе, так и меньше ее. С помощью источников напряжения сместим эмиттерный переход в прямом, а коллекторный – в обратном направлении. Тогда через эмиттерный переход потечет ток  $I_э$ , который будет обеспечиваться главным образом инжекцией электронов из эмиттера в базу. Инжекция дырок из базы в эмиттер будет незначительна из-за указанного выше различия в концентрации атомов примесей.

Из-за малой толщины базы почти все электроны, пройдя базу, через так называемое время пролета достигают коллектора. Только малая доля электронов рекомбинирует в базе с дырками. Убыль этих дырок компенсируется протеканием тока базы  $I_б$ . Таким образом –  $I_б \ll I_э$ . Обратное смещение коллекторного перехода способствует тому, что электроны, подошедшие к нему, захватываются электрическим полем перехода и переносятся в коллектор. Таким образом, ток коллектора  $I_к$  лишь незначительно меньше тока эмиттера, т. е.  $I_к \approx I_э$ .

Основное свойство транзистора – способность к усилению сигнала базируется на существовании зависимости токов  $I_к$  и  $I_э$  от  $I_б$ . Данная зависимость приблизительно описывается формулами:

$$I_к = \beta_{см} I_б, \quad (3.1)$$

$$I_э = (\beta_{см} + 1) I_б, \quad (3.2)$$

где  $\beta_{см}$  – статический коэффициент передачи тока базы.

Термин статический подчеркивает тот факт, что этот коэффициент связывает постоянные токи. Типичное значение для современных транзисторов –  $\beta \approx 100 - 300$ .

Таким образом, если изменять величину тока  $I_б$  во времени, то токи  $I_к$  и  $I_э$  будут изменяться пропорционально, повторяя форму временной диаграммы  $I_б(t)$ , но при этом, их величины будут в сотни раз больше. В этом и заключается

эффект усиления биполярного транзистора – большой выходной ток  $I_{\kappa}$  ( $I_{\vartheta}$ ) управляется малым входным током  $I_{\delta}$ .

**Параметры транзистора.** При определении переменных составляющих токов и напряжений (т. е. при анализе на переменном токе) и при условии, что транзистор работает в активном режиме, его часто представляют в виде линейного четырехполюсника (рисунок 3.5). В четырехполюснике условно изображен транзистор с общим эмиттером.

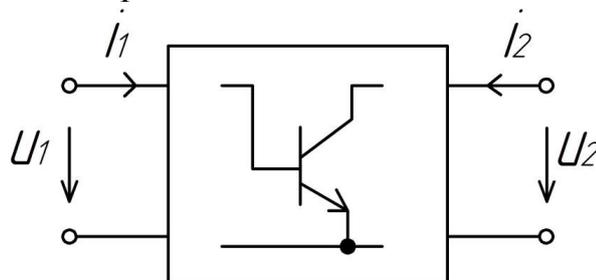


Рисунок 3.5 Транзистор в виде четырехполюсника

Для разных схем включения транзистора токи и напряжения этого четырехполюсника обозначают различные токи и напряжения транзистора. Например, для схемы с общим эмиттером эти токи и напряжения следующие:

$i_1$  – переменная составляющая тока базы;

$u_1$  – переменная составляющая напряжения между базой и эмиттером;

$i_2$  – переменная составляющая тока коллектора;

$u_2$  – переменная составляющая напряжения между коллектором и эмиттером.

Транзистор удобно описывать, используя так называемые h-параметры.

Входное сопротивление транзистора для переменного сигнала (при зако-

роченном выходе:  $u_2=0$ ): 
$$h_{11} = \left. \frac{u_1}{i_1} \right|_{u_2=0}.$$

Аналогично

$$h_{12} = \left. \frac{u_1}{u_2} \right|_{i_2=0}$$
 - коэффициент обратной связи по напряже-

нию.

Режим работы при  $i_1=0$  называют холостым ходом на входе.

Далее 
$$h_{21} = \left. \frac{i_2}{i_1} \right|_{u_2=0}$$
 - коэффициент передачи тока,

$$h_{22} = \left. \frac{i_2}{u_2} \right|_{i_1=0}$$
 - выходная проводимость.

При этом 
$$\begin{bmatrix} u_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ u_2 \end{bmatrix}, \quad \text{т.е.} \quad \begin{aligned} u_1 &= h_{11} \cdot i_1 + h_{12} \cdot u_2; \\ i_2 &= h_{21} \cdot i_1 + h_{22} \cdot u_2. \end{aligned}$$

Коэффициенты  $h_{ij}$  определяются опытным путем. Параметры, соответствующие схеме с общим эмиттером, обозначаются буквой «э», а схеме с общей базой – буквой «б».

### 3.2 Пример решения типовой задачи

**Задача 3.2.1** Входная и выходная вольтамперные характеристики (ВАХ) биполярного транзистора имеют вид, показанный на рисунке 3.6. По графикам ВАХ транзистора определить тип транзистора, и основные параметры его Т-образной схемы замещения.

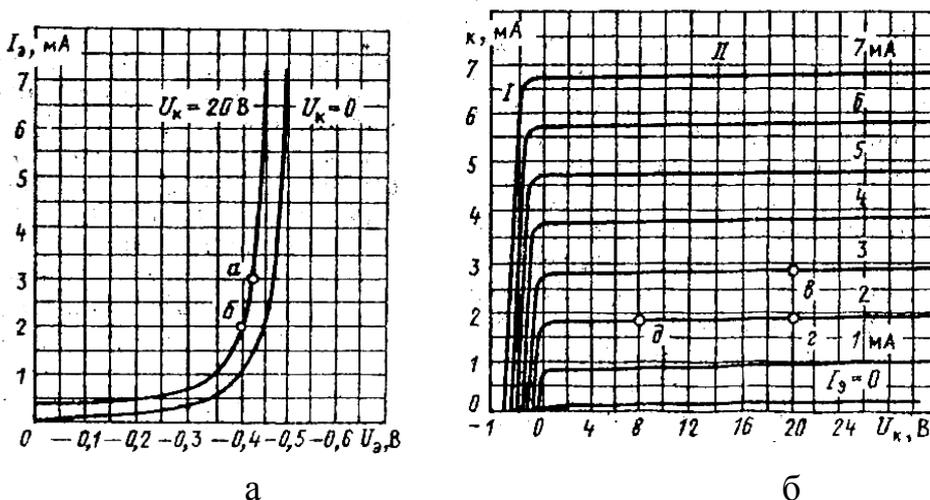


Рисунок 3.6 Вольтамперные характеристики биполярного транзистора:  
а – входная; б – выходная

Решение. Полярность внешних напряжений ( $U_э < 0$  и  $U_к > 0$ ) соответствует транзистору типа  $n-p-n$ . На рисунке 3.6 представлены его входная и выходная ВАХ для включения с общей базой. Эквивалентная Т-образная схема для такого транзистора описывается при помощи следующих параметров:  $\alpha = \Delta I_к / \Delta I_э | U_к = \text{const}$  - дифференциального коэффициента прямой передачи по току;  $r_э$  - дифференциального сопротивления открытого эмиттерного перехода;  $r_б$  - объемного сопротивления базы;  $r_к = \Delta U_к / \Delta I_к | I_э = \text{const}$  - дифференциального сопротивления коллекторного перехода.

1. Коэффициент прямой передачи  $\alpha$  находим по выходной ВАХ при  $U_к = 20$  В, взяв значения токов в точках в и г.

$$\alpha = (2,8 - 1,85) / (3,0 - 2,0) = 0,95.$$

2. Дифференциальное сопротивление найдем из известных соотношений:

$$r_э = \varphi_T / I_э_{cp} = 0,025 / (2,5 \cdot 10^{-3}) = 10 \text{ Ом}.$$

3. Входное сопротивление транзистора определим на участке аб:

$$r_{вх} = \Delta U_э / \Delta I_э = 0,025 / (1 \cdot 10^{-3}) = 25 \text{ Ом}.$$

4. Приближенное значение дифференциального сопротивления базы равно:

$$r_б = (r_{вх} - r_э) / (1 - \alpha) = (25 - 10) / (1 - 0,95) = 300 \text{ Ом}.$$

5. Дифференциальное сопротивление коллектора вычислим по выходной ВАХ на участке ГД:

$$r_k = 12 / (0,05 \cdot 10^{-3}) = 240 \text{ кОм.}$$

### 3.3 Типовые задачи для самостоятельного решения

Задача 3.3.1 Найти обратный ток коллекторного перехода для транзистора, описанного в задаче 3.2.1.

Задача 3.3.2 Чему равны ток инжекции коллекторного перехода и напряжение на коллекторном переходе, если цепь коллектора разомкнута (ток коллектора во внешней цепи равен нулю), а ток эмиттера равен 7 мА? (рисунок 3.6, б).

Задача 3.3.3 Почему с ростом эмиттерного тока точка пересечения графика выходной ВАХ (рис. 13.6, б) с осью абсцисс перемещается влево?

Задача 3.3.4 На какой из вольтамперных характеристик транзистора с общей базой заметнее проявляется эффект модуляции толщины базы?

Задача 3.3.5 Прямой ток эмиттера  $n-p-n$ -транзистора составляет  $I_e = 2$  мА, коллекторная цепь разорвана. Определить напряжение на эмиттерном и коллекторном переходах и напряжение эмиттер—коллектор, полагая  $I_{к0} = 2$  мкА,  $I_{э0} = 1,6$  мкА;  $\alpha = 0,98$ .

### 3.4 Вопросы для самоконтроля

- 1) Дать определение транзистору.
- 2) Какие параметры называются  $h$  – параметрами биполярного транзистора?
- 3) Какой электрод называется базой, какой – коллектором, а какой – эмиттером?
- 4) Какой транзистор называется  $n-p-n$  – типа, а какой –  $p-n-p$  – типа?
- 5) Написать зависимость тока эмиттера (коллектора) от тока базы транзистора.

## 4 ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 4 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

Цель занятия: получить практические навыки расчета параметров полевого транзистора.

Задание:

- 1) Решить примеры по расчету параметров полевого транзистора по его ВАХ;
- 2) Решить примеры по расчету дифференциальных параметров  $T$  – образной схемы биполярного транзистора.

### 4.1 Краткие теоретические сведения

Полевой транзистор является очень широко используемым активным (т. е. способным усиливать сигналы) полупроводниковым прибором.

Полевыми транзисторами называют активные полупроводниковые приборы, в которых выходным током управляют с помощью электрического поля (в биполярных транзисторах выходной ток управляется входным током).

Полевые транзисторы называют также униполярными, так как в процессе протекания электрического тока участвуют только основные носители.

Различают два вида полевых транзисторов: с управляющим переходом и с изолированным затвором.

**Устройство полевого транзистора.** Схематическое изображение структуры полевого транзистора с управляющим переходом и каналом  $p$ -типа приведено на рисунке 4.1, условное графическое обозначение этого транзистора – на рисунке 4.2, а. Стрелка указывает направление от слоя  $p$  к слою  $n$  (как и стрелка в изображении эмиттера биполярного транзистора). В интегральных микросхемах линейные размеры транзисторов могут быть меньше 1 мкм.

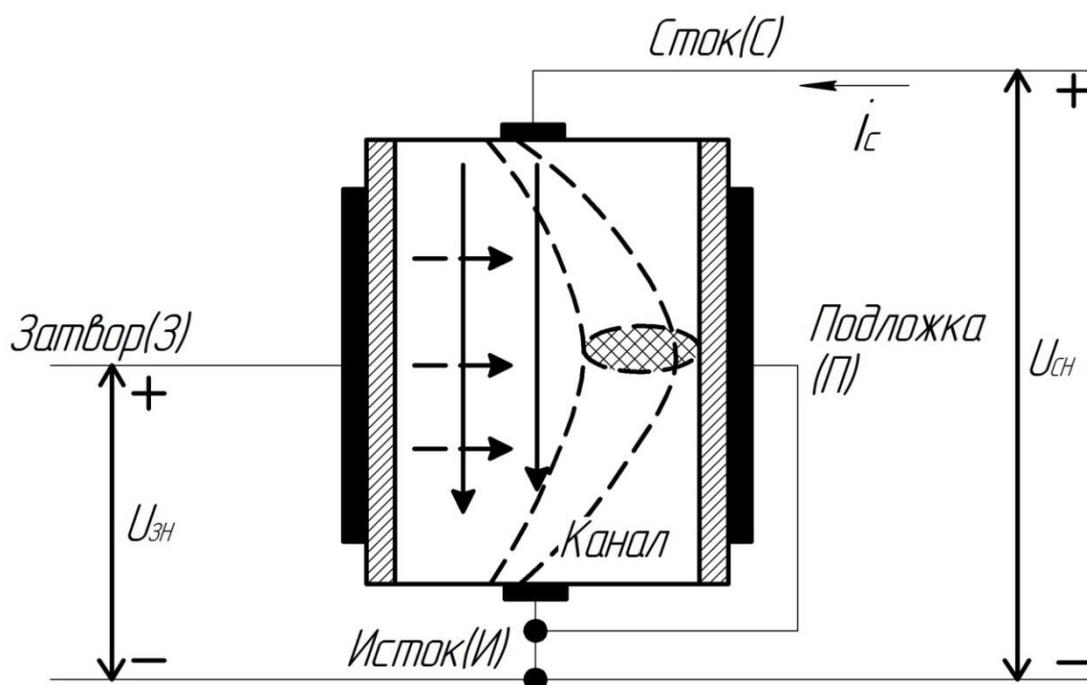


Рисунок 4.1 Структура полевого транзистора

Удельное сопротивление слоя  $n$  (затвора) намного меньше удельного сопротивления слоя  $p$  (канала), поэтому область  $p$ - $n$ -перехода, обедненная подвижными носителями заряда и имеющая очень большое удельное сопротивление, расположена главным образом в слое  $p$ .

Если типы проводимости слоев полупроводника в рассмотренном транзисторе изменить на противоположные, то получим полевой транзистор с управляющим  $p$ - $n$ -переходом и каналом  $n$ -типа. Его условное графическое обозначение представлено на рисунке 4.2, б.

При отсутствии напряжения на затворе ( $U_{зп}=0$ ), ток между стоком и истоком протекает под воздействием «продольного» электрического поля, созданного напряжением  $U_{си}$ . При этом траектория движения электронов прямолинейна – канал имеет одинаковое сечение по всей длине. При подаче на затвор

напряжения отличного от нуля в кристалле возникает «поперечное» электрическое поле, которое, складываясь с «продольным» изгибает силовые линии в ту или иную сторону, соответственно изменяя сечение канала. Изменение сечения канала приводит к изменению его сопротивления – т.е. сопротивлению между истоком и стоком. В случае сужения канала его сопротивление растет, и при достаточной напряженности «поперечного» поля канал полностью «разрывается» (сопротивление становится бесконечным).

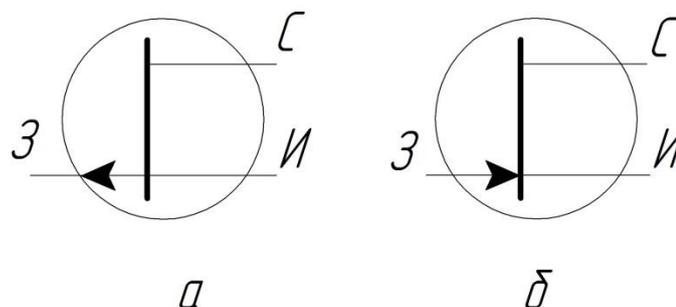


Рисунок 4.2 Графическое изображение полевого транзистора:  
*a* - с каналом *p*-типа; *б* - с каналом *n*-типа

Таким образом, изменяя напряжение  $U_{зи}$  можно управлять сопротивлением исток-сток, а значит и величиной тока  $I_c$ . Основное свойство транзистора – способность к усилению сигнала базируется именно на этой зависимости, которая приблизительно описывается формулой [1]:

$$I_c = S \cdot U_{зи}, \quad (4.1)$$

где  $S$  – крутизна стокзатворной характеристики ПТ.

Она показывает, насколько изменится ток  $I_c$  стока при увеличении  $U_{зи}$  на 1 В. Размерность данного коэффициента [А/В].

Таким образом, если изменять величину  $U_{зи}$  во времени, то ток  $I_c$  будет изменяться пропорционально, повторяя форму временной диаграммы  $U_{зи}(t)$ . При этом, поскольку  $I_з = 0$  (ток не течет через диэлектрик) мощность, затрачиваемая на управление так же будет нулевой. В то же время, ток  $I_c$  совершает в выходной цепи полезную работу. В этом и заключается эффект усиления полевого транзистора – выходной ток  $I_c$  и мощность, рассеиваемая на нагрузке управляется входным напряжением  $U_{зи}$  без затрат мощности на управление.

**Характеристики полевого транзистора.** Выходной характеристикой называют зависимость вида [2]

$$i_c = f(u_{си}) \text{ при } u_{зи} = \text{const},$$

где  $f$  – некоторая функция.

Полевой транзистор характеризуется следующими предельными параметрами:

- максимальным напряжением в цепи сток-исток  $U_{си.макс}$ ;

- максимальным напряжением в цепи затвор-сток  $U_{зс.макс}$ ;
- максимальной мощностью потребления  $P_{макс}$ .

Для транзистора КП103Л эти параметры при  $t=85^{\circ}\text{C}$  принимают следующие значения  $U_{си.макс}=10\text{ В}$ ,  $U_{зс.макс}=15\text{ В}$ ,  $P_{макс}=120\text{ мВт}$ .

Стокзатворной характеристикой называют зависимость вида

$$i_c = f(u_{зи}) \text{ при } u_{си} = \text{const},$$

где  $f$  – некоторая функция.

Типовая переходная ВАХ полевого транзистора, включенного по схеме общим истоком, приведена на рисунке 4.3.

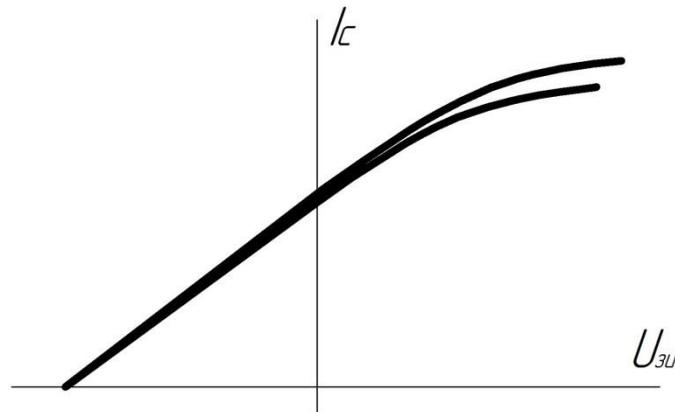


Рисунок 4.3 Типовая переходная ВАХ полевого транзистора, включенного по схеме общим истоком

Такие характеристики не дают принципиально новой информации по сравнению с выходными, но иногда более удобны для использования. Для некоторых транзисторов задается максимальное (по модулю) допустимое отрицательное напряжение  $u_{зи}$ , например, для транзистора 2П103Д это напряжение не должно быть по модулю больше чем  $0,5\text{ В}$ .

**Параметры транзистора.** Крутизна стокзатворной характеристики  $S$  (крутизна характеристики полевого транзистора) [2]:

$$S = \left| \frac{di_c}{du_{зи}} \right|, \tag{4.2}$$

при  $u_{си} = \text{const}$  и заданном значении  $u_{зи}$ .

Обычно задается  $u_{зи}=0$ . При этом для транзисторов рассматривается крутизна максимальная. Для КП103Л  $S=1,8...3,8\text{ мА/В}$  при  $u_{ис}=0$ ,  $t=20^{\circ}\text{C}$ .

**Внутреннее дифференциальное сопротивление  $R_{ис.диф}$**  (внутреннее сопротивление) определяется выражением [1]:

$$R_{си.диф} = \frac{du_{си}}{di_c}, \tag{4.3}$$

при  $u_{зи} = const$  и заданном значении  $u_{си}$ .

## 4.2 Пример решения типовой задачи

**Задача 4.2.1** Полевой транзистор с  $p-n$  переходом имеет вольтамперные характеристики, показанные на рисунке 4.4. Определить тип канала и основные характеристики этого транзистора.

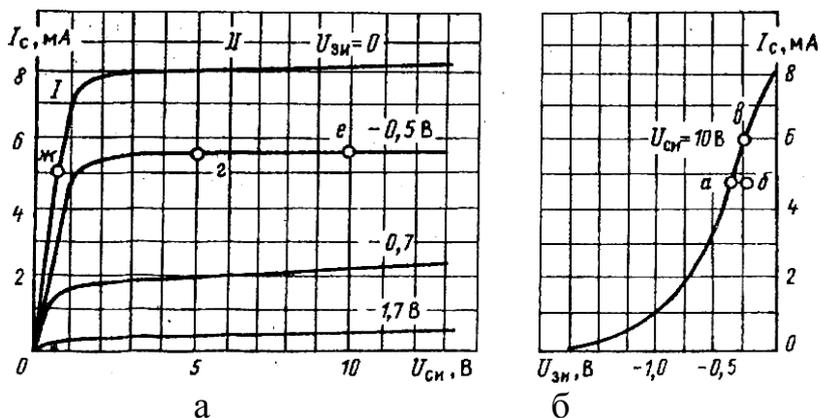


Рисунок 4.4 ВАХ полевого транзистора: а – переходная; б – выходная

Решение: 1. Полевой транзистор с управляющим  $p-n$  переходом имеет канал  $n$ -типа, так как ток стока управляется отрицательным напряжением  $U_{зи}$ , приложенным к затвору (минус - к области затвора  $p$ -типа, плюс-к каналу  $n$ -типа). Канал перекрывается полностью ( $I_c=0$ ) при напряжении  $U_{зи} = -1,75$  В. Это напряжение отсечки  $U_{отс}$ . При  $U_{зи} = 0$  и  $U_{си} > 1,75$  В (участок насыщения II) в транзисторе течет максимальный ток стока  $I_{Cнас} = 8,2$  мА.

2. По эквивалентной схеме для переменного тока, представленной на рисунке 4.5, и стокзатворной характеристики полевого транзистора определим крутизну  $S$ :

$$S = \Delta I_c / \Delta U_{зи} |_{U_{си} = const} = 1,2 \cdot 10^{-3} / 0,12 = 10 \text{ мА/В.}$$

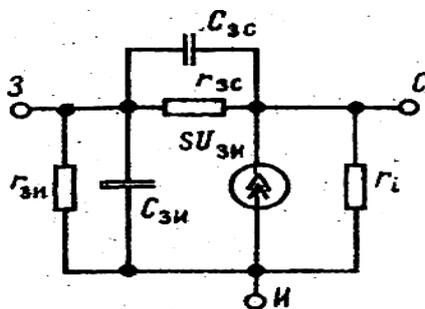


Рисунок 4.5 Эквивалентная схема полевого транзистора

3. Дифференциальное сопротивление канала на участке насыщения равно:

$$r_c = \Delta U_{си} / \Delta I_c |_{U_{зи} = const} = 5 / (0,1 \cdot 10^{-3}) = 50 \text{ кОм.}$$

4. На участке I (участок открытого канала) выходной вольтамперной характеристики можно найти сопротивление открытого канала  $R_0$  при  $U_{зи}=0$  (точка ж на выходной ВАХ):

$$R_0 = U_{си}/I_c = 0,5/(5 \cdot 10^{-3}) = 100 \text{ Ом.}$$

### 4.3 Типовые задачи для самостоятельного решения

4.3.1 При каком напряжении затвора сопротивление сток-исток полевого транзистора, рассмотренного в предыдущей задаче, увеличивается вдвое?

4.3.2 Чему равна крутизна транзистора, рассмотренного в задаче 4.3.1, при  $U_{зи} = -1$  В?

4.3.3 Полевой транзистор с управляющим  $p-n$  переходом имеет  $I_{Смакс} = 5$  мА и  $U_{омс} = -2$  В. Определить ток стока  $I_c$  и крутизну  $S$  транзистора при напряжениях затвора, равной  $-2$  В.

4.3.4 Чему равна крутизна транзистора, рассмотренного в задаче 4.3.1, при  $U_{зи} = -1,5$  В?

4.3.5 Полевой транзистор с управляющим  $p-n$  переходом имеет  $I_{Смакс} = 5$  мА и  $U_{омс} = -2$  В. Определить ток стока  $I_c$  и крутизну  $S$  транзистора при напряжениях затвора  $U_{зи} = 0$  В.

4.3.6 Полевой транзистор с управляющим  $p-n$  переходом имеет  $I_{Смакс} = 5$  мА и  $U_{омс} = -2$  В. Определить ток стока  $I_c$  и крутизну  $S$  транзистора при напряжениях затвора, равной  $-1$  В.

### 4.4 Вопросы для самоконтроля

- 1) Дать определение транзистору.
- 2) Какой электрод полевого транзистора называется затвором, какой – стоком, а какой – истоком?
- 3) Что называется переходной характеристикой полевого транзистора?
- 4) В чем отличие полевого транзистора от полевого?
- 5) Какая характеристика называется стокзатворной характеристикой полевого транзистора?

## 5 ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 5

### РАСЧЕТ РЕЖИМОВ ТРАНЗИСТОРНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ КЛЮЧЕЙ

Цель занятия: получить практические навыки расчета режимов транзисторных электронных ключей.

Задание:

- 3) Решить примеры по расчету времени задержки входного сигнала транзисторного ключа;
- 4) Решить примеры по расчету параметров выходного импульса ключа.

## 5.1 Краткие теоретические сведения

Электронные ключи представляют собой устройства для формирования, преобразования и управления импульсами [1]. Основное назначение ключей состоит в коммутации (замыкании и размыкании) различных цепей под воздействием управляющих сигналов. Ключ имеет два устойчивых состояния: замкнутое и разомкнутое. В замкнутом состоянии ключ замыкает какую-либо электрическую цепь, в разомкнутом — сопротивление ключа велико, цепь выключена. Скорость перехода из замкнутого в разомкнутое состояние характеризует быстродействие ключа. Электронные ключи используются для построения логических элементов, в импульсной силовой электронике.

При построении транзисторных ключей (на основе биполярного транзистора) наибольшее распространение получила схема включения с общим эмиттером. На рисунке 5.1 а, б приведены последовательная схема электронного ключа на биполярном транзисторе структуры n-p-n и семейство выходных характеристик [1].

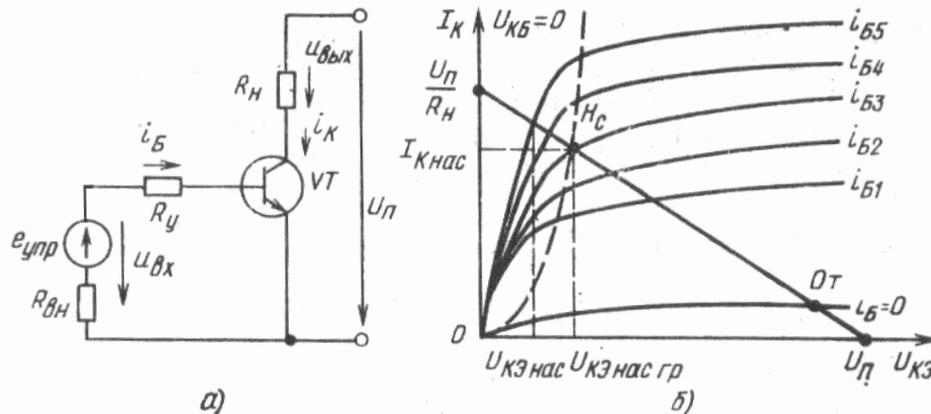


Рисунок 5.1 Последовательная схема транзисторного ключа (а) и выходные ВАХ транзистора для схемы включения с общим эмиттером (б)

Для работы в ключевом режиме рабочая точка транзисторного каскада (рисунок 5.1 б) должна находиться либо левее точки  $H_c$  (режим насыщения), либо правее точки  $Oт$  (режим отсечки). Нахождение между точками  $H_c$  и  $Oт$  допускается только при переключении транзистора из насыщенного состояния в состояние отсечки или наоборот. Длительность нахождения транзистора в этой области для реального ЭК зависит от собственных частотных свойств транзистора. Поэтому именно эти свойства в большей степени и определяют предельное быстродействие реальной схемы коммутации и, следовательно, возможность использования методов современной микроэлектроники при ее изготовлении. Последнее зависит от мощности, выделяющейся в схеме коммутации, которая прямо пропорциональна времени нахождения рабочей точки транзистора в интервале  $H_c - Oт$ .

Предположим, что биполярный транзистор (рисунок 5.2) первоначально при  $t < t_0$  находился в состоянии глубокой отсечки ( $U_{бэ} = U_{у зан}$ ) и в момент  $t = t_0$  на управляющем входе ключа сформирован положительный перепад

напряжения амплитудой  $U_y = U_{y\text{зап}} + U_{y\text{нас}}$  и нулевой длительности фронта. Тогда переходной процесс при включении транзистора можно разбить на три интервала (рисунок 5.2): интервал задержки ( $t_{\text{зад}}$ ); интервал формирования фронта коллекторного тока ( $t_{\text{ф}}$ ); интервал накопления избыточного заряда в базе ( $t_{\text{нак}}$ ).

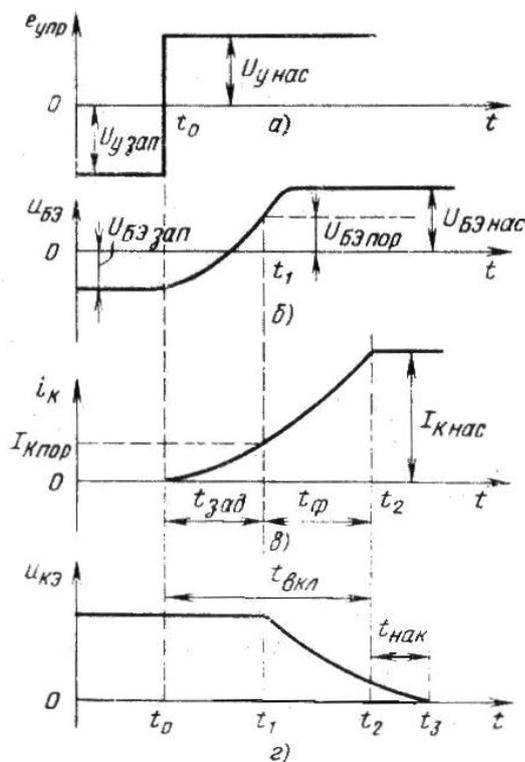


Рисунок 9.2 Временные диаграммы включения биполярного транзистора: а – управляющее напряжение; б – напряжение на эмиттерном переходе; в – коллекторный ток; г – напряжение коллектор-эмиттер

Интервал задержки включения можно определить по формуле [2]:

$$t_{\text{зад}} = \tau_c \ln \left[ \frac{U_{y\text{нас}} - U_{\text{БЭзап}}}{U_{y\text{нас}} - U_{\text{БЭпор}}} \right],$$

где  $\tau_c = (C_{\text{э}} + C_{\text{к}}) \cdot R_y$  – постоянная времени входной цепи для интервала задержки.

Длительность формирования коллекторного тока:

$$t_{\text{ф}} = \tau_{\text{Б}} \cdot \ln \frac{I_{\text{Бнас}}}{I_{\text{Бнас}} - I_{\text{Кнас}} / h_{21Э}},$$

где  $\tau_{\text{Б}} = h_{21Э} / 2 \cdot \pi \cdot f_{\alpha} + h_{21Э} \cdot C_{\text{к}}$  – время жизни неосновных носителей в области базы.

Тогда время включения биполярного транзистора

$$t_{\text{вкл}} = t_{\text{ф}} + t_{\text{зад}}.$$

Для расчета времени выключения биполярного транзистора предположим, что транзистор первоначально находился в состоянии насыщения и в момент  $t = t_0$  на управляющем входе ключа сформировано нулевое напряжение с

нулевой длительностью среза. Тогда переходной процесс при выключении транзистора можно разбить на три интервала (рисунок 5.3):

- интервал рассасывания избыточного базового заряда ( $t_{рас}$ );
- интервал формирования спада коллекторного тока ( $t_{сп}$ );
- интервал установления стационарного запертого состояния ( $t_{уст}$ ).

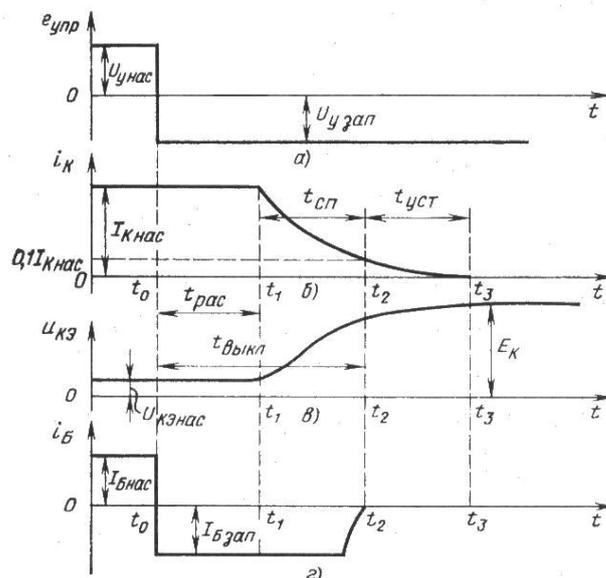


Рисунок 5.3 Временные диаграммы выключения биполярного транзистора: а – управляющее напряжение; б – ток коллектора; в – напряжение коллектор-эмиттер; г – ток базы

Очевидно, что  $t_{выкл} = t_{рас} + t_{сп}$ .

Время рассасывания избыточного базового заряда можно определить по формуле [1]:

$$t_{рас} = \tau_{нак} \cdot \ln \frac{\Delta I_B}{I_{Кнас} / h_{21Э} - I_{Бзап}},$$

где  $\Delta I_B = I_{Бнас} - I_{Бзап}$  – перепад базового тока;

$I_{Бзап} = (U_{упрзап} - U_{БО}) / (R_y + r_b)$  – запирающий ток биполярного транзистора;  
 $r_b$  – сопротивление базы транзистора

## 5.2 Пример решения задачи

Задача 5.2.1 Определить время задержки входного сигнала транзисторного ключа (рисунок 5.5) при скачкообразном изменении базового напряжения от значения  $E_{Г2} = -2$  В до  $E_{Г1} = 1$  В. Принять  $C_Э = C_К = 60$  пФ,  $R_Г = 5$  кОм,  $U_{пор} = 0,6$  В.

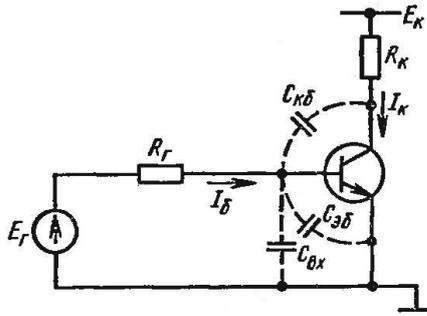


Рисунок 5.5 К задаче 5.2.1

Определяем постоянную времени входной цепи для интервала задержки

$$\tau_c = (C_э + C_к) \cdot R_г \approx (60 + 60) \cdot 5 \cdot 10^{-12} = 6 \cdot 10^{-10} \text{ с.}$$

Тогда интервал задержки включения:

$$t_{\text{зад}} \approx \tau_c \ln \left[ \frac{U_{\text{у нас}} - U_{\text{БЭ зап}}}{U_{\text{у нас}} - U_{\text{БЭ пор}}} \right] \approx 6 \cdot 10^{-10} \cdot \ln \frac{1+2}{1-0.6} = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

### 5.3 Задачи для самостоятельного решения

Задача 5.3.1 Оценить, как влияет эффект Миллера (рассчитать  $C_{\text{вх}}$ ) для ключевого MOSFET транзистора (рисунок 5.6), если  $C_{\text{зи}} = 50 \text{ пФ}$ ,  $C_{\text{зс}} = 30 \text{ пФ}$  и  $S_0 = 250 \text{ мА/В}$ .

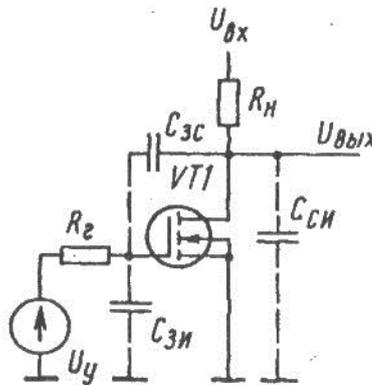


Рисунок 5.6 Схема ключа на MOSFET транзисторе

Задача 5.3.2 Для схемы электронного ключа (рисунок 5.6) определить время включения MOSFET транзистора, если внутреннее сопротивление генератора  $R_г = 1 \text{ кОм}$ ,  $U_г = 15 \text{ В}$ , паразитные параметры транзистора –  $C_{\text{зи}} = 50 \text{ пФ}$ ,  $C_{\text{зс}} = 30 \text{ пФ}$ , крутизна  $S_0 = 250 \text{ мА/В}$ ,  $U_{\text{вх}} = 50 \text{ В}$ ,  $R_н = 8 \text{ Ом}$ .

Задача 5.3.3 Какой тип транзистора ( $p-n-p$  или  $n-p-n$ ) следует использовать, если транзисторный ключ управляется однополярными отрицательными импульсами?

Задача 5.3.4 Резистор в базовой цепи транзистора  $R_г$  зашунтирован конденсатором (рисунок 5.7). Как при этом изменится амплитуда базового тока при действии однополярного положительного прямоугольного импульса  $e_{\text{упр}} =$

2 В? Изменятся ли: а) время фронта выходного импульса ключа, б) время рас-  
сасывания носителей заряда в базе транзистора? Сопротивление  $R_{вн} = 1 \text{ кОм}$ ,  $R_y = 2 \text{ кОм}$ .  
Падение напряжения на открытом эмиттером переходе  $U_{бэ} = 0,8 \text{ В}$ . Омическим сопротивлением базы транзистора  $r_b$  можно пренебречь.

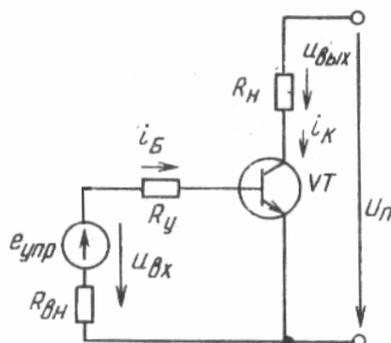


Рисунок 5.7 К задаче 5.3.4

## 6 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ СРО В СООТВЕТСТВИИ С РАБОЧЕЙ ПРОГРАММОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Внеаудиторными видами СРО являются:

- подготовка к практическим и лабораторным занятиям;
- подготовка к промежуточной аттестации.

Подготовка к практическим занятиям и лабораторным работам производится согласно методическим указаниям по соответствующей теме работы.

Для самостоятельного изучения теоретического материала по дисциплине «Электротехника и электроника» в соответствии с рабочей программой предусмотрены следующие темы (таблица 6.1).

Таблица 6.1 Содержание СРО, темы СИТМ и рекомендуемая литература

№ п/п	№ темы	Название (содержание) работы	Рекомендуемая литература	Объем, часы
1	1.1... 1.7	Подготовка к ПЗ и ЛР, подготовка к контролю знаний на ПЗ согласно КОС	Рабочая программа дисциплины с КОС	8

Контроль за ходом СРО осуществляется преподавателем, в том числе при проведении занятий (лекционных, практических и лабораторных), а также на групповых и индивидуальных консультациях.

Контроль результатов СРО осуществляется при сдаче дифференцированного зачета по дисциплине

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Арестов, К. А. Основы электроники и микропроцессорной техники : учеб. для студ. сред. спец. учеб. заведений по спец. 3107 "Электрификация и автоматизация с.х." / К. А. Арестов. - Москва : Колос, 2001. - 216 с.

2. Синдеев, Ю. Г. Электротехника с основами электроники : учебное пособие для проф. училищ, лицеев и колледжей : соответствует государственному стандарту, утв. М-вом образования и науки РФ / Ю. Г. Синдеев. - 11-е изд., доп. и перераб. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2009. - 407 с. - (Начальное профессиональное образование). - ISBN 978-5-222-14181-6 : 184 р.

3. Славинский, А. К. Электротехника с основами электроники : учебное пособие / А. К. Славинский, И. С. Туревский. — Москва : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2021. — 448 с. — (Среднее профессиональное образование). - ISBN 978-5-8199-0747-4. - Текст : электронный. - URL: <https://znanium.com/catalog/product/1150305> (дата обращения: 24.01.2022). – Режим доступа: по подписке.

4. Электроника и электротехника : учеб. для студ. образоват. учреждений среднего профес. образования / [Б. И. Петренко, Ю. М. Иньков, А. В. Крашенинников и др.] ; под ред. Б. И. Петренко. - Москва : Академия, 2003. - 320 с. - (Среднее профессиональное образование). - Библиогр.: с. 316. - ISBN 5-7695-1114-1 : 138 р.



