



**Некоммерческое  
акционерное  
общество**

**АЛМАТИНСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ  
ЭНЕРГЕТИКИ И  
СВЯЗИ**

Кафедра электроники

## **ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА**

Методические указания и задания  
по выполнению расчетно-графических работ  
для студентов специальности 5В071800 – Электроэнергетика

Алматы 2016

СОСТАВИТЕЛИ: С.Б. Абдрешова, Г.Н. Абдрешова. Промышленная электроника. Методические указания и задания по выполнению расчетно-графических работ для студентов специальности 5В071800 – Электроэнергетика. – Алматы: АУЭС, 2016. – 19 с.

В методических указаниях рассматриваются задания на работу по курсу Промышленная электроника.

Методические указания содержат задания к расчетно-графическим работам и примеры решения задач на темы: проводимость полупроводников, полупроводниковые диоды, графо-аналитический расчет транзисторного усилителя.

Методические указания содержат индивидуальные задания на расчетно-графическую, рекомендации по их выполнению, требования к содержанию и оформлению, образец выполнения и список литературы.

Методические указания предназначены для студентов всех форм обучения специальности 5В071800 – Электроэнергетика.

Ил.5, табл. 2, библиогр. – 24 назв.

Рецензент: доцент кафедры ИКТ Ю.М. Гармашова

Печатается по плану издания некоммерческого акционерного общества «Алматинский университет энергетики и связи» на 2016 г.

© НАО «Алматинский университет энергетики и связи», 2016 г.

## 1 Общие методические указания к выполнению РГР

Дисциплина «Промышленная электроника» изучается студентами всех форм обучения специальности 5В071800 – Электроэнергетика.

По курсу читаются лекции, выполняются расчетно-графические и лабораторные работы. Расчетно-графические работы (РГР) являются одним из основных компонентов при изучении курса.

Целью дисциплины «Промышленная электроника» является изучение элементной базы, принципов работы и методов проектирования и расчёта электронных и микроэлектронных устройств.

В результате изучения дисциплины студенты должны знать основные характеристики и параметры диодов и транзисторов, интегральных микросхем. Освоить принципы функционирования основных аналоговых устройств, комбинационных и последовательностных логических схем. Выполнение РГР позволяет студентам применить теоретические знания при выборе элементной базы и выполнении расчетов электронных схем.

Дисциплина базируется на курсах физики, высшей математики, теории электрических цепей.

Данные методические указания содержат задания к трем расчетно-графическим работам и примеры решения задач на темы: проводимость полупроводников, полупроводниковые диоды, графо-аналитический расчет транзисторного усилителя, синтез комбинационных логических схем.

При выполнении РГР необходимо:

выбрать свой вариант в соответствии с двумя последними цифрами номера зачетной книжки;

номер варианта, группа, фамилия и инициалы студента должны быть указаны на титульном листе;

текст задания должен быть переписан без сокращений в пояснительную записку РГР;

в пояснительной записке необходимо приводить не только расчетные формулы, соответствующие единицы измерения и конечные результаты, но и пояснения и необходимые промежуточные вычисления;

все текстовые и графические материалы должны соответствовать фирменному стандарту [1], содержать титульный лист, задание, основную часть – решение задач и литературу.

## 2 Задания к расчетно-графическим работам

### 2.1 Задание к РГР №1

#### Задача №1

Концентрация донорной примеси составляет  $N_d$  атом/см<sup>3</sup>, акцепторной примеси –  $N_a$  атом/см<sup>3</sup> (таблица 2.1), собственная концентрация носителей в полупроводнике -  $n_i$ . Найти контактную разность потенциалов для  $p$ - $n$  перехода при заданной температуре  $T$  (таблица 2.2).

Т а б л и ц а 2.1

Последняя цифра номера зачетной книжки										
Вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$N_d$	$2 \cdot 10^1$	$3 \cdot 10^1$	$6 \cdot 10^1$	$4 \cdot 10^1$	$5 \cdot 10^1$	$7 \cdot 10^1$	$5 \cdot 10^1$	$3 \cdot 10^1$	$3 \cdot 10^1$	$4 \cdot 10^{16}$
$N_a$	$2 \cdot 10^1$	$2 \cdot 10^1$	$2 \cdot 10^1$	$2 \cdot 10^1$	$3 \cdot 10^1$	$8 \cdot 10^1$	$6 \cdot 10^1$	$2 \cdot 10^1$	$5 \cdot 10^1$	$2 \cdot 10^1$

Т а б л и ц а 2.2

Предпоследняя цифра номера зачетной книжки										
Вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$T, ^\circ C$	20	25	27	18	21	19	30	28	22	25
$n_i$	$2 \cdot 10^{14}$	$2 \cdot 10^{13}$	$3 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{13}$	$4 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{14}$	$4 \cdot 10^{13}$	$5 \cdot 10^{15}$	$3 \cdot 10^{13}$	$4 \cdot 10^{13}$

#### Задача №2

Обратный ток диода при  $T=300$  К равен  $I_0$ . (таблица 2.3). Определить сопротивление полупроводникового диода постоянному току и его дифференциальное сопротивление при прямом напряжении  $U_{np}$  (таблица 2.4).

Т а б л и ц а 2.3

Последняя цифра номера зачетной книжки										
Вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$I_0, \mu A$	1,5	1	2	1,5	1,5	3,5	2,5	2,5	3	1,8

Т а б л и ц а 2.4

Предпоследняя цифра номера зачетной книжки										
Вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$U_{np}, mB$	150	180	200	150	100	250	150	200	140	150

#### Задача №3

Полупроводниковый диод имеет прямой ток  $I_{np}$  при прямом напряжении  $U_{np}$  и температуре  $T$ . Определить обратный ток  $I_0$ , дифференциальное сопротивление  $r_{diff}$  при напряжении  $U = U_1$  и при  $U = 0$  (таблица 2.5, 2.6).

Т а б л и ц а 2.5

Последняя цифра номера зачетной книжки										
Вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$I_{np}, A$	0,07	0,08	0,5	0,8	0,8	0,09	0,6	0,7	0,09	0,4
$U_{np}, B$	0,4	0,4	0,2	0,3	0,3	0,2	0,4	0,2	0,3	0,2

Т а б л и ц а 2.6

Предпоследняя цифра номера зачетной книжки										
Вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$T, ^\circ C$	30	25	40	35	32	40	35	40	30	32
$U_l, B$	0,2	0,2	0,1	0,4	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,4

## Задача №4

В схеме параметрического стабилизатора напряжения сопротивление нагрузки  $R_n$ . Данные стабилитрона:  $U_{ст}$  - напряжение стабилизации,  $I_{ст.макс.}$  - максимальный ток стабилизации,  $I_{ст.мин.}$  - минимальный ток стабилизации (таблица 2.7). Входное напряжение изменяется от  $U_{вх.мин.}$  до  $U_{вх.макс.}$  (таблица 2.8). Привести схему стабилизатора, вольтамперную характеристику стабилитрона и линию нагрузки на ней. Найти балластное сопротивление  $R_b$ . Определить будет ли обеспечена стабилизация во всем диапазоне изменения  $U_{вх.}$ .

Т а б л и ц а 2.7

Последняя цифра номера зачетной книжки										
Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$R_n, k\Omega$	0,6	1	1	0,8	1,5	1,5	2	2	3	2,5
$U_{ст}, B$	8	5	6	6,5	7	8	6,8	9	10	5
$I_{ст.мин.}, mA$	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,5	0,5	0,6	0,8	0,5
$I_{ст.макс.}, mA$	2,5	1,5	3	3,2	3,1	2,5	3	2,8	2,9	3,2

Т а б л и ц а 2.8

Предпоследняя цифра номера зачетной книжки										
Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$U_{вх.мин.}, B$	9	7	8	10	10	10	10	12	12	8
$U_{вх.макс.}, B$	20	17	18	20	22	22	20	24	23	15

## Задача №5

Температурный коэффициент напряжения стабилизации стабилитрона  $\alpha_n$ , %/  $^\circ C$ , напряжение стабилизации при  $20^\circ C$  -  $U_{ст}, B$  (таблица 2.9). Определить каким будет его напряжение стабилизации при температуре  $T, ^\circ C$  (таблица 2.10).

Т а б л и ц а 2.9

Последняя цифра номера зачетной книжки										
вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$\alpha_n, \%/^{\circ}\text{C}$	0,02	0,03	0,01	0,05	0,04	0,04	0,05	0,03	0,02	0,03
$U_{cm}, \text{B}$	10	9	8	8	6,2	5,6	10	15	12	5,6

Т а б л и ц а 2.10

Предпоследняя цифра номера зачетной книжки										
Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$T, ^{\circ}\text{C}$	40	50	60	70	50	70	60	60	60	70

## 2.2 Задание к РГР №2

### Задача №1

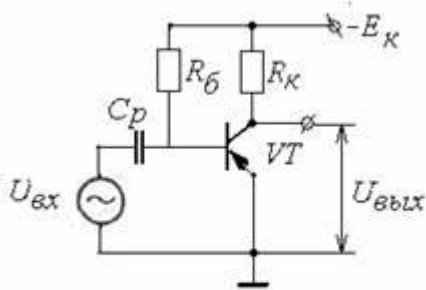


Рисунок 2.1

Транзистор  $VT$  включен в усилительный каскад по схеме с  $ОЭ$  (рисунок 2.1) со смещением током базы покоя. Для подачи смещения в цепь базы используется резистор  $R_{б}$ . Каскад питается от одного источника с напряжением минус  $E_{к}$ . Заданы постоянная составляющая тока базы  $I_{б0}$ , амплитуда переменной составляющей тока базы  $I_{mb}$ , сопротивление резистора нагрузки  $R_{к}$ ,

максимально допустимая мощность, рассеиваемая коллектором,  $P_{Kmax}$  (таблица 2.11). Диапазон частот усиливаемых колебаний  $f_n, f_v$  (таблица 2.12).

Произвести графоаналитический расчет усилителя.

Для этого требуется:

- а) построить линию  $P_{Kmax}$ ;
- б) по выходным характеристикам найти:
  - 1) постоянную составляющую тока коллектора  $I_{к0}$ ;
  - 2) постоянную составляющую напряжения коллектор-эмиттер  $U_{кэ0}$ ;
  - 3) амплитуду переменной составляющей тока коллектора  $I_{mk}$ ;
  - 4) выходную мощность  $P_{вых}$ ;
  - 5) амплитуду выходного напряжения  $U_{mR} = U_{mkэ}$ ;
  - 6) коэффициент усиления по току  $K_i$ ;
  - 7) полную потребляемую мощность в коллекторной цепи  $P_0$ ;
  - 8)  $кнд$  коллекторной цепи  $\eta$ .

Проверить, не превышает ли мощность  $P_{к0}$ , выделяемая на коллекторе в режиме покоя, максимально допустимую мощность  $P_{Kmax}$ ;

в) с помощью входных характеристик определить:

- 1) напряжение смещения  $U_{бэ0}$ ;
- 2) амплитуду входного сигнала  $U_{mbэ}$ ;
- 3) входную мощность  $P_{вх}$ ;

- 4) коэффициент усиления по напряжению  $K_U$  и по мощности  $K_P$ ,
- 5) входное сопротивление каскада  $R_{вх}$ ;
- 6) сопротивление резистора  $R_6$ ;
- 7) емкость разделительного конденсатора  $C_P$ ;
- г) для рабочей точки усилителя найти параметры  $h_{21э}$ ,  $h_{22э}$ ,  $R_{вх} = 1/h_{22э}$ ,  $h_{11э}$ , и аналитически рассчитать величины  $K_L$ ,  $K_U$ ,  $K_P$ ,  $R_{вх}$ .

Т а б л и ц а 2.11

Последняя цифра номера зачетной книжки					
№ вар.	1	2	3	4	5
$VT$	$KT317A$	$KT313A$	$KT361B$	$KT120A$	$ГТ402Д$
$E_{к}, В$	4	7	25	1	6
$I_{60}, mA$	0,006	0,5	0,2	0,4	6
$I_{m6}, mA$	0,002	0,2	0,1	0,2	2
$R_{к}, кОм$	10	0,1	0,5	0,05	0,02
$P_{kmax}, Вт$	0.01	0.3	0,9	0,012	2,5

Продолжение таблицы 2.11

Последняя цифра номера зачетной книжки					
№ вар.	6	7	8	9	0
$VT$	$KT501A$	$KT601A$	$KT803A$	$ГТ703A$	$KT902A$
$E_{к}, В$	30	60	50	15	30
$I_{60}, mA$	0,05	0,15	80	400	24
$I_{m6}, mA$	0,075	0,075	20	100	8
$R_{к}, кОм$	2,5	1,5	0,0125	0,002	0,012
$P_{kmax}, Вт$	0,42	3,5	150	100	60

Т а б л и ц а 2.12

Предпоследняя цифра номера зачетной книжки					
№ вар.	1	2	3	4	5
$f_{н}, Гц$	100	150	80	95	120
$f_{в}, кГц$	6	8	5	6	9

Продолжение таблицы 2.12

Предпоследняя цифра номера зачетной книжки					
№ вар.	6	7	8	9	0
$f_{н}, Гц$	100	120	150	100	150
$f_{в}, кГц$	12	10	18	9	7

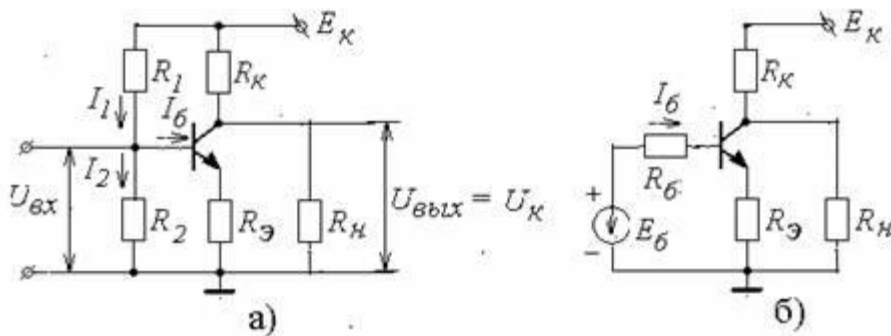


Рисунок 2.2

Задача №2

В схеме, показанной на рисунке 2.2,а, используется делитель в цепи базы транзистора, имеющего коэффициент передачи по току  $\beta$  (таблица 2.13). Найти напряжение  $U_K$ , если даны  $R_1, R_2, R_K, R_E, E_K$  (таблица 2.14).

Т а б л и ц а 2.13

Последняя цифра номера зачетной книжки										
вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$\beta$	49	30	29	35	45	20	38	25	29	35
$E_K, В$	15	10	12	10	15	10	12	15	10	12

Т а б л и ц а 2.14

Предпоследняя цифра номера зачетной книжки											
вариант	0	1	2	3	4	5	6	7			
$R_1, кОм$	100	33	75	150	33	150	33	75	5	50	00
$R_2, кОм$	51	15	33	51	10	51	10	33	3	1	3
$R_K, кОм$	2	1,5	1	2	2	2	1	2			
$R_E, кОм$	0.51	0,2	0,33	0,1	0,2	0,1	0,33	0,2	,1	,33	,33

3 Примеры решения задач расчетно-графических работ

**3.1 Контактная разность потенциалов  $p-n$  перехода**

Найти контактную разность потенциалов  $\varphi_K$  для  $p-n$  перехода при температуре  $T = 300 K$ , если концентрация донорной примеси составляет  $N_D = 2,5 \cdot 10^{15}$  атом/см<sup>3</sup>, акцепторной примеси –  $N_A = 2 \cdot 10^{17}$  атом/см<sup>3</sup>, собственная концентрация носителей в полупроводнике –  $n_i = 3 \cdot 10^{14}$ .



Решение задачи.

Заряд электрона  $q=1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл., постоянная Больцмана  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К.

$$\varphi_K = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln \frac{N_a \cdot N_d}{n_i^2} ;$$

$$\varphi_K = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19}} \ln \frac{2 \cdot 10^{17} \cdot 2,5 \cdot 10^{15}}{(3 \cdot 10^{14})^2} = 0,223 \text{ В.}$$

### 3.2 Характеристические сопротивления диода

Определить сопротивление полупроводникового диода постоянному току  $R_0$  и его дифференциальное сопротивление при прямом напряжении  $U_{np} = 0,2 \text{ В}$ .

Обратный ток диода при  $T=300 \text{ К}$  равен  $I_0 = 2 \text{ мкА}$ .

Решение задачи.

Найдем ток диода при прямом напряжении  $U=0,2 \text{ В}$  по формуле

$$I = I_0 \left( e^{\frac{U}{kT}} - 1 \right) = 2 \cdot 10^{-6} \left( e^{\frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,2}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}} - 1 \right) = 4,547 \text{ мА}$$

Сопротивление диода постоянному току

$$R_0 = \frac{U}{I} = \frac{0,2}{4,547 \cdot 10^{-3}} = 43,987 \text{ Ом.}$$

Определим дифференциальное сопротивление  $r_{\text{диф}}$

$$(r_{\text{диф}})^{-1} = \frac{dI}{dU} = I_0 \left( \frac{q}{kT} \right) e^{\frac{qU}{kT}} = 0,176 \text{ См}; r_{\text{диф}} = \frac{1}{0,176} = 5,688 \text{ Ом.}$$

Так как  $I \gg I_0$ , то можно использовать  $(r_{\text{диф}})^{-1} = \frac{dI}{dU} = \left( \frac{q}{kT} \right) \cdot (I + I_0) \approx \frac{q}{kT} I$ , следовательно

$$r_{\text{диф}} = \frac{kT}{qI} = 5,691 \text{ Ом.}$$

### 3.3 Параметры выпрямительного диода

Полупроводниковый диод имеет прямой ток  $I_{np} = 0,5 \text{ А}$  при прямом напряжении  $U_{np} = 0,2 \text{ В}$  и температуре  $T = 313 \text{ К}$ .

Определить обратный ток  $I_0$ , дифференциальное сопротивление  $r_{\text{диф}}$  при напряжении  $U_I = 0,1 \text{ В}$  и при  $U = 0$ .

Решение задачи:

$$\text{а) } \varphi_T = \frac{kT}{q}; \varphi_T = 27 \text{ мВ.}$$

Из формулы вольтамперной характеристики  $I = I_0 \left( e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1 \right)$  получаем

$$I_0 = \frac{I}{\left( e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1 \right)} = 7,473 \cdot 10^{-6} \text{ A}$$

б) для определения  $r_{\text{диф}}$  при  $0,1 \text{ В}$  сигнала найдем ток  $I$  через переход

$$I = 7,473 \cdot 10^{-6} \left( e^{\frac{100}{27}} - 1 \right) \approx 29,59 \text{ мА};$$

$$r_{\text{диф}} = \frac{\varphi_T}{I} \approx \frac{0,027}{29,59 \cdot 10^{-3}} \approx 0,912 \text{ Ом};$$

в) дифференциальное сопротивление  $r_{\text{диф}}$  при  $U=0$  сигнала

$$r_{\text{диф}} = \frac{\varphi_T}{I_0} \approx \frac{0,027}{7,473 \cdot 10^{-3}} \approx 3,613 \text{ кОм}.$$

### 3.4 Параметрический стабилизатор напряжения

В схеме параметрического стабилизатора напряжения сопротивление нагрузки  $R_n = 1 \text{ кОм}$ . Данные стабилитрона: напряжение стабилизации  $U_{\text{ст}} = 6 \text{ В}$ ; максимальный ток стабилизации  $I_{\text{ст макс}} = 3 \text{ мА}$ ; минимальный ток стабилизации  $I_{\text{ст мин}} = 0,6 \text{ мА}$ .

Входное напряжение изменяется от  $U_{\text{вх мин}} = 8 \text{ В}$  до  $U_{\text{вх макс}} = 18 \text{ В}$ . Привести схему стабилизатора, вольтамперную характеристику стабилитрона и линию нагрузки на ней. Найти балластное сопротивление  $R_6$ . Определить, будет ли обеспечена стабилизация во всем диапазоне изменения  $U_{\text{вх}}$ .

Решение задачи.

$$R_6 = \frac{(U_{\text{вх ср}} - U_{\text{ст}})}{(I_{\text{ст ср}} + I_n)}$$

где  $U_{\text{вх ср}} = 0,5 \cdot (U_{\text{вх мин}} + U_{\text{вх макс}}) = 0,5 \cdot (8 + 18) = 13 \text{ В}$ .

Средний ток через стабилитрон

$$I_{\text{ст ср}} = 0,5 (I_{\text{ст мин}} + I_{\text{ст макс}}) = 0,5 (0,6 + 3) = 1,8 \text{ мА}.$$

$$\text{Ток через нагрузку } I_n = \frac{U_{\text{ст}}}{R_n} = \frac{6}{1000} = 6 \text{ мА}.$$

$$\text{Балластное сопротивление } R_6 = \frac{13 - 6}{7,8 \cdot 10^{-3}} \approx 894 \text{ Ом}.$$

Стабилизация будет обеспечена для изменения  $U_{\text{вх}}$  в пределах от

$$U_{\text{вх мин}} = U_{\text{ст}} + (I_{\text{ст мин}} + I_n) R_6 = 9,2 \text{ В} \text{ до } U_{\text{вх макс}} = U_{\text{ст}} + (I_{\text{ст макс}} + I_n) R_6 = 14 \text{ В}.$$

Таким образом, стабилизация получается во всем диапазоне изменения напряжения источника питания.

### 3.5 Влияние температуры на напряжение стабилизации стабилитрона

Температурный коэффициент напряжения стабилизации стабилитрона  $\alpha_n = 0,01\% / ^\circ\text{C}$ , напряжение стабилизации при  $20^\circ \text{C}$  –  $U_{\text{ст}} = 8 \text{ В}$ .

Определить каким будет напряжение стабилизации при температуре  $T_0 = 60^\circ \text{C}$ .

Решение задачи.

$$\alpha_n = \frac{\Delta U_{ст}}{U_{ст} \cdot \Delta T} \cdot 100\%;$$

$\Delta U_{ст} = U_{ст1} - U_{ст}$  при температуре  $T_0$ ;

$$\Delta T = 60 - 20 = 40^\circ C;$$

$$\Delta U_{ст} = \frac{\alpha_n \cdot U_{ст} \cdot \Delta T}{100} = \frac{0,01 \cdot 8 \cdot 40}{100} = 0,032 \text{ В.}$$

$$\text{При } T = 60^\circ C \quad U_{ст1} = 8 + 0,032 = 8,032 \text{ В.}$$

### 3.6 Графо-аналитический расчет усилителя

Транзистор  $VT$  включен в усилительный каскад по схеме с  $OЭ$  (рисунок 2.1). Каскад питается от одного источника с напряжением  $E_k = -10 \text{ В}$ . Для подачи смещения в цепь базы используется резистор  $R_b$ . Имеет место смещение током базы покоя.

Постоянная составляющая тока базы  $I_{b0} = 0,3 \text{ мА}$ , амплитуда переменной составляющей тока базы  $I_{mb} = 0,2 \text{ мА}$ , сопротивление нагрузки  $R_k = 0,5 \text{ кОм}$ , а максимально допустимая мощность, рассеиваемая коллектором,  $P_{kmax} = 150 \text{ мВт}$ . Диапазон частот усиливаемых колебаний  $f_n = 80 \text{ Гц}$ ,  $f_s = 5 \text{ кГц}$ .

Требуется:

- выполнить графоаналитический расчет усилителя;
- проверить, не превышает ли мощность  $P_{KO}$ , выделяемая на коллекторе в режиме покоя, максимально допустимую мощность  $P_{Kmax}$ ;
- для рабочей точки усилителя найти параметры  $h_{21э}$ ,  $h_{22э}$ ,  $R_{вых} = 1/h_{22э}$ ,  $h_{11э}$ , и аналитически рассчитать величины  $K_I$ ,  $K_U$ ,  $K_P$ ,  $R_{ex}$ .

Решение.

Характеристики транзистора берутся из справочника, например, для заданного показаны на рисунках 3.1 и 3.2:

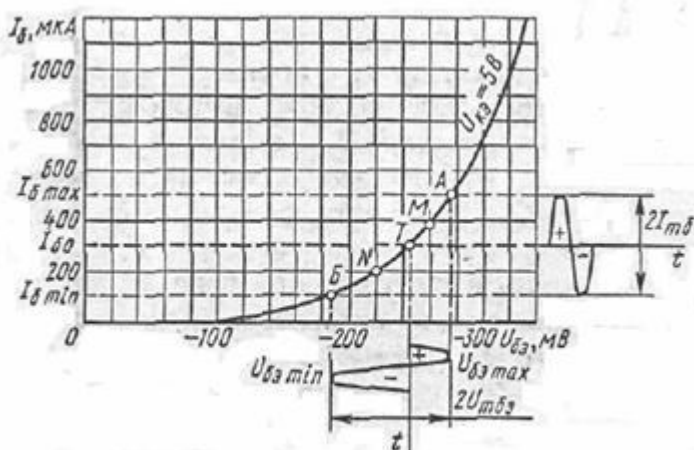


Рисунок 3.1

- на семействе выходных характеристик (рисунок 3.2) строим линию максимально допустимой мощности, используя уравнение:

$$I_{Kmax} = P_{Kmax} / U_{KЭ} \quad I_{Kmax} = 150 \times 10^{-3} / U_{KЭ}.$$

Подставим значения  $U_{KЭ}$ , равные, например, -7,5; -10; -15; -20 В, получаем значения  $I_{Kmax}$ , равные 20; 15; 10; 7,5 мА соответственно (таблица 3.1)

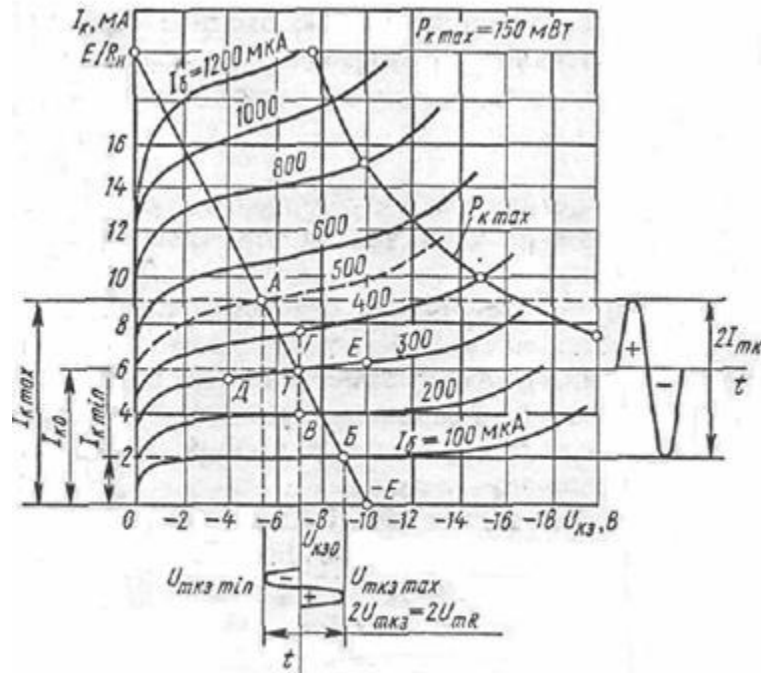


Рисунок 3.2

Т а б л и ц а 3.1

$U_{KЭ} (В)$	-7,5	-10	-15	-20
$I_{Kmax} (мА)$	20	15	10	7,5

Построим по этим точкам линию  $P_{Kmax}$  на рисунке 3.2;

б) используя уравнение линии нагрузки  $I_k = (E - U_{кэ}) / R_k$ , на семействе выходных характеристик строим линию нагрузки при  $I_k = 0$ ,  $U_{кэ} = E = -10$  В - первая точка линии нагрузки, при  $U_{кэ} = 0$ ,  $I_k = E / R_k = 10 / 500 = 20$  мА - вторая точка. Соединяем их.

Точка пересечения линии нагрузки с характеристикой, соответствующей постоянной составляющей тока базы  $I_{б0} = 300$  мкА, определит рабочую точку. Ей будут соответствовать

$$I_{к0} = 6 \text{ мА}, \quad U_{кэ0} = -7 \text{ В}.$$

Амплитуду переменной составляющей тока коллектора определим как среднее значение

$$I_{тк} = \frac{I_{кmax} - I_{кmin}}{2}, \quad I_{тк} = (9 \times 10^{-3} - 2 \times 10^{-3}) / 2 = 3,5 \text{ мА}.$$

Амплитуда переменного напряжения на нагрузке

$$U_{mR} = U_{mk\varepsilon} = I_{mk} R_K, U_{mR} = U_{mk\varepsilon} = 3,5 \times 10^{-3} \times 0,5 \times 10^3 = 1,75 \text{ В.}$$

Коэффициент усиления по току

$$K_I = I_{mk} / I_{mб}, K_I = 3,5 \times 10^{-3} / 0,2 \times 10^{-3} = 17,5.$$

Выходная мощность  $P_{вых} = 0,5 I_{mk} U_{mR}$ ,

$$P_{вых} = 0,5 \times 3,5 \times 10^{-3} \times 1,75 = 3 \times 10^{-3} = 3 \text{ мВт.}$$

Полная потребляемая мощность в коллекторной цепи

$$P_0 = E_K I_{K0}, P_0 = 10 \times 6 \times 10^{-3} = 60 \text{ мВт.}$$

Кнд коллекторной цепи

$$h = P_{вых} / P_0, h = 3 \times 10^{-3} / 60 \times 10^{-3} = 0,05 = 5 \text{ \%}.$$

Мощность, рассеиваемая на коллекторе постоянной составляющей коллекторного тока

$$P_{K0} = I_{K0} U_{K\varepsilon 0}, P_{K0} = 6 \times 10^{-3} \times 7 = 42 \text{ мВт}, P_{Kmax} = 150 \text{ мВт},$$

$P_{K0} < P_{Kmax}$  - следовательно, режим работы усилителя является допустимым;

в) далее расчет ведем по семейству входных характеристик (рисунок 3.1). У транзисторов входные характеристики расположены близко друг от друга, поэтому в качестве рабочей входной характеристики можно принять одну из статических входных характеристик, соответствующую активному режиму, например, характеристику, снятую при  $U_{K\varepsilon} = -5 \text{ В}$ . Из графика находим, что  $|U_{б\varepsilon 0}| = 0,25 \text{ В}$ .

Амплитуда входного напряжения

$$U_{mб\varepsilon} = \frac{U_{б\varepsilon max} - U_{б\varepsilon min}}{2}, U_{mб\varepsilon} = (277 \times 10^{-3} - 187 \times 10^{-3}) / 2 = 45 \text{ мВ.}$$

Модуль коэффициента усиления по напряжению

$$|K_U| = U_{mk\varepsilon} / U_{mб\varepsilon}, |K_U| = 1,75 / 45 \times 10^{-3} = 39.$$

Коэффициент усиления по мощности

$$K_P = |K_I K_U|, K_P = 39 \times 17,5 @ 690.$$

Входная мощность

$$P_{вх} = 0,5 I_{mб} U_{mб}, P_{вх} = 0,5 \times 0,2 \times 10^{-3} \times 45 \times 10^{-3} = 4,5 \text{ мкВт.}$$

Входное сопротивление

$$R_{вх} = U_{mб\varepsilon} / I_{mб}, R_{вх} = 45 \times 10^{-3} / 0,2 \times 10^{-3} = 225 \text{ Ом.}$$

Сопротивление резистора

$$R_{б} = \frac{E - |U_{б\varepsilon 0}|}{I_{б0}}, R_{б} = (10 - 0,25) / 0,3 \times 10^{-3} = 32,5 \text{ кОм.}$$

Емкость разделительного конденсатора  $C_p$  определяется из условия

$$\frac{1}{\omega_H \cdot C_p} = \frac{R_{вх}}{10}$$

где  $\omega_H$  - низшая рабочая частота;

$$C_p = \frac{10}{\omega_H \cdot R_{вх}} = \frac{10}{2\pi \cdot f_H \cdot R_{вх}}, C_p = 10 / (6,28 \times 80 \times 225) = 90 \text{ мкФ};$$

г) рассчитаем  $h$ -параметры в рабочей точке при  $U_{K\varepsilon} = -7 \text{ В}$  и  $I_{K0} = 6 \text{ мА}$

$$h_{21э} = b = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta I_6} \right|_{U_{кэ}=const};$$

по точкам *B* и *Г* на рисунке 3.2 определим

$$h_{21э} = \frac{3,7 \cdot 10^{-3}}{0,2 \cdot 10^{-3}} = 18,5.$$

По точкам *D* и *E* определим

$$h_{22э} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{кэ}} \right|_{I_6=const} \quad h_{22э} = \frac{0,7 \cdot 10^{-3}}{6} = 117 \text{ мкСм.}$$

$$R_{вых} = \frac{1}{h_{22э}}, \quad R_{вых} = \frac{1}{0,117 \cdot 10^{-3}} = 8,5 \text{ кОм,}$$

$$\text{параметр } h_{11э} = \left. \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta I_6} \right|_{U_{кэ}=const}.$$

По точкам *M* и *N* на рисунке 3.1 определим

$$h_{11э} = \frac{40 \cdot 10^{-3}}{0,19 \cdot 10^{-3}} = 210 \text{ Ом.}$$

Крутизна характеристики транзистора

$$S = y_{21э} = \frac{h_{21э}}{h_{11э}} = \frac{18,6}{210} = 88 \text{ мА/В.}$$

С помощью найденных параметров определим искомые значения по приближенным формулам. Коэффициент усиления по току  $K_I \gg h_{21э} = 18,5$ ; точнее

$K_I = \frac{h_{21э} \cdot R_{ВЫХ}}{R_K + R_{ВЫХ}} = \frac{18,5 \cdot 8,5 \cdot 10^3}{0,5 \cdot 10^3 + 8,5 \cdot 10^3} = 17,5$ , что сходится с результатом графо-аналитического расчета.

Входное сопротивление  $R_{вх} @ h_{11э} \gg 210 \text{ Ом.}$

Коэффициент усиления по напряжению

$$K_U = \frac{-h_{21э} \cdot R_K}{R_{вх}} = \frac{-18,5 \cdot 500}{210} = -44; \text{ точнее, } K_U = \frac{-17,5 \cdot 500}{210} = -41,5.$$

Коэффициент усиления по мощности

$$K_P = K_I \times K_U = 17,5 \times 41,5 = 725.$$

### 3.7 Расчет напряжения на коллекторе усилителя

В схеме, показанной на рисунке 2.2,а, используется делитель в цепи базы транзистора, имеющего коэффициент передачи по току  $\beta=49$ . Найти напряжение  $U_{кэ}$ , если даны  $R_1=100\text{кОм}$ ,  $R_2=51\text{кОм}$ ,  $R_K=2\text{кОм}$ ,  $R_э=0,51\text{кОм}$ ,  $E_к=15\text{В}$ .

Решение:

а) преобразуем схему (рисунок 2.2, а) к виду, показанному на рисунке 2.2,б. Здесь

$$E_6 = E_к R_2 / (R_1 + R_2),$$

$$R_6 = R_1 // R_2 = R_1 R_2 / (R_1 + R_2);$$

б) находим ток базы

$$I_6 = E_6 / (R_6 + (\beta + 1)R_э),$$

где

$$R_6 = R_1 R_2 / (R_1 + R_2) = 51 \cdot 100 / (51 + 100) \cdot 10^3 = 33,8 \text{ кОм}$$

$$E_6 = E_к R_2 / (R_1 + R_2) = 15 \cdot 100 / [(51 + 100) \cdot 10^3] = 5,066 \text{ В.}$$

Получаем после подстановки

$$I_{\bar{o}} = 5,066 / (33,8 \cdot 10^3 + 50 \cdot 0,51 \cdot 10^3) = 0,085 \text{ мА};$$

в) постоянное напряжение на базе транзистора

$$U_{\bar{o}} = E_{\bar{o}} - I_{\bar{o}} R_{\bar{o}} = 5,066 - 0,085 \cdot 33,8 = 2,193 \text{ В};$$

г) найдем ток коллектора

$$I_{\kappa} = \beta I_{\bar{o}} + I_{\kappa 0} = 49 \cdot 0,085 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 10^{-6} (1 + 49) = 4,665 \text{ мА};$$

5) постоянное напряжение на коллекторе

$$U_{\kappa} = E_{\kappa} - I_{\kappa} R_{\kappa} = 15 - 4,665 \cdot 2 = 5,67 \text{ В}$$

## Литература

1. 1. Работы учебные. Фирменный стандарт ФС РК 10352-1910-У-е-001-2002. Общие требования к построению, изложению, оформлению и содержанию. – Алматы: АИЭС, 2002. – 31 с.
2. Головатенко-Абрамова М.П., Лapidес А.М. Задачи по электронике. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 112 с.
3. Расчет электронных схем. Учебное пособие для вузов. /Г.И.Изьюрова и др. – М.: Высшая школа, 1987.-335 с.
4. Жолшараева Т.М. Микроэлектроника. Полупроводниковые приборы: Учебное пособие. - Алматы: АИЭС, 2006. – 79 с.
5. Жолшараева Т.М. Электроника. Методические указания к выполнению лабораторных работ. - Алматы: АИЭС, 2005. – 45 с.
6. Нефедов А.В. Транзисторы для бытовой, промышленной и специальной аппаратуры: Справочное пособие. – М.: Солон-Пресс, 2006. – 600 с.
7. Транзисторы для аппаратуры широкого применения: Справочник. /Под редакцией Б.Л.Перельмана. – М.: Радио и связь, 1982. – 656 с.
8. Перельман Б.Л. Полупроводниковые приборы. Справочник. – М.: «СОЛОН», «МИКРОТЕХ», 1996. – 176 с.



## Содержание

- [1 Общие методические указания к выполнению РГР](#)
- [2 Задания к расчетно-графическим работам](#)
  - [2.1 Задание к РГР №1](#)
  - [2.2 Задание к РГР №2](#)
- [3 Примеры решения задач расчетно-графических работ](#)
  - [3.1 Контактная разность потенциалов  \$p\$ - \$n\$  перехода](#)
  - [3.2 Характеристические сопротивления диода](#)
  - [3.3 Параметры выпрямительного диода](#)
  - [3.4 Параметрический стабилизатор напряжения](#)
  - [3.5 Влияние температуры на напряжение стабилизации стабилитрона](#)
  - [3.6 Графо-аналитический расчет усилителя](#)
  - [3.7 Расчет напряжения на коллекторе усилителя](#)
- [Литература](#)

Абдрешова Самал Бексултановна  
Абдрешова Гульмира Нурланкызы

## ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Методические указания и задания  
по выполнению расчетно-графических работ  
для студентов специальности 5В071800 – Электроэнергетика

Редактор Л.Т. Сластихина  
Специалист по стандартизации Н.К. Молдабекова

Подписано в печать \_\_\_\_\_  
Тираж 100 экз.  
Объем \_1,06\_\_ уч.- изд. л.

Формат 60x84 1/16  
Бумага типографская №1  
Заказ \_\_\_\_\_ Цена \_530\_\_ тг.

Копировально-множительное бюро  
некоммерческого акционерного общества  
«Алматинский университет энергетики и связи»  
050013 Алматы, Байтурсынова, 126