

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №3

Тема. Розрахунок параметрів транзисторів та їх вибір

Мета роботи: ознайомлення з елементами параметрів транзисторів і методикою розрахунку та вибору цих елементів.

Теоретичні відомості

Транзистором називається електроперетворювальний НП прилад, який має один або декілька $p-n$ переходів, три або більше виводів і здатний посилювати потужність електричного сигналу. Загальні теоретичні відомості про транзистори наведені в [8, с.29-59].

Транзистори прийнято поділяти на групи за діапазонами використовуваних частот (f_{zp}) і потужностей (P_{max}):

f_{zp}	P_{max}
Низькочастотні: $f_{zp} \leq 3\text{МГц}$	Малої потужності: $P_{max} \leq 0,3\text{Вт}$
Середньочастотні: $3\text{МГц} < f_{zp} \leq 30\text{МГц}$	Середньої потужності: $0,3 < P_{max} \leq 1,5\text{Вт}$
Високочастотні: $f_{zp} > 30\text{МГц}$	Великої потужності: $P_{max} > 1,5\text{Вт}$

Залежно від того, який електрод є спільним для вхідного і вихідного кіл, як це показано на рис. 2.1, розрізняють три схеми вмикання транзисторів:

- зі спільною базою - з СБ;
- зі спільним емітером - з СЕ;
- зі спільним колектором - з СК.

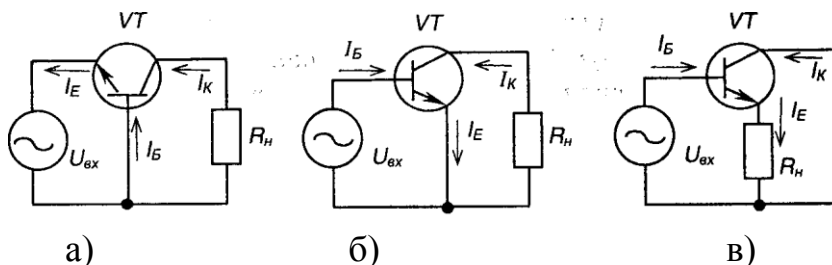


Рис. 3.1 - Схеми вмикання транзистора: а) з СБ; б) з СЕ; в) з СК

Слід зазначити, що основні схеми вмикання розглядаються для сигналу напруги змінного струму.

У схемі з СБ: I_E - вхідний струм, I_K - вихідний, передатність струму:

$$\text{- статична - } \alpha = \frac{I_K}{I_E}; \tag{3.1}$$

$$\text{- динамічна - } \alpha_{дин} = \frac{dI_K}{dI_E} \Big|_{U_{KB} = const}. \tag{3.2}$$

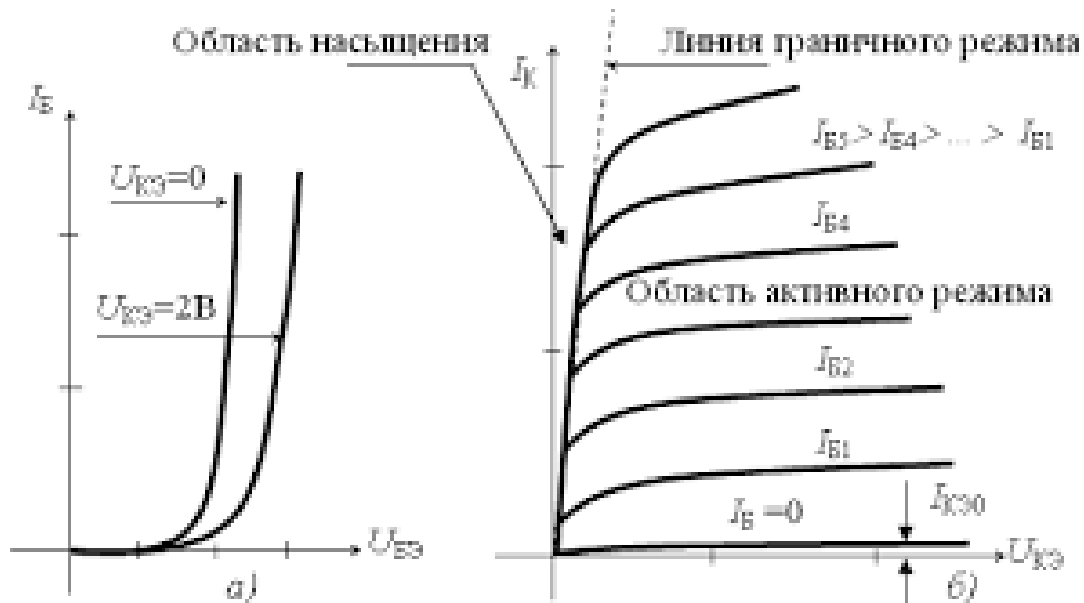
У схемі з СЕ: I_B - вхідний струм, I_K - вихідний, передатність струму:

- статична –
$$\beta = \frac{I_K}{I_B} = \frac{I_K : I_E}{(I_E - I_K)} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}; \quad (3.3)$$

- динамічна –
$$\beta = \frac{dI_K}{dI_B} \Big|_{U_{КБ} = const}. \quad (3.4)$$

У схемі з СК: I_B - вхідний струм, I_K - вихідний, передатність струму:

$$\frac{I_E}{I_B} = \frac{1}{1 - \alpha} = 1 + \beta. \quad (3.5)$$



Якщо рівень вхідного сигналу малий і транзистор працює на лінійній ділянці ВАХ (робота у режимі малого сигналу), то для розрахунку транзистора його можна подати як активний лінійний елемент (чотириполусник), зображений на рис. 2.2.

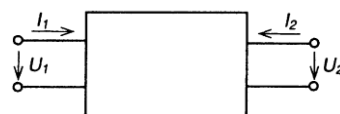


Рис. 3.2 – Активний лінійний чотириполусник

Величини U_1, I_1 є вхідними, а U_2, I_2 - вихідними.

При аналізі роботи чотириполусника два параметри вибираються як незалежні змінні, а два інші є їх лінійними функціями.

Для розрахунку параметрів транзистора використовують h -параметри. Система рівнянь (2.6) називається системою h -параметрів.

$$\begin{cases} \Delta U_1 = h_{11} \Delta I_1 + h_{12} \Delta U_2 \\ \Delta I_2 = h_{21} \Delta I_1 + h_{22} \Delta U_2 \end{cases} \quad (3.6)$$

Значення коефіцієнтів h знаходять при створенні режимів неробочого ходу (Н.Х.) на вході чотириполосника і короткого замикання (К.З.) на виході за змінною складовою струму.

Із режиму Н.Х. на вході, коли $I_1 = 0$, $\Delta I_1 = 0$, можуть бути визначені:

$$h_{12} = \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2}, \text{ при } I_1 = 0 - \text{коефіцієнт зворотного зв'язку за напругою};$$

$$h_{22} = \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2}, \text{ при } I_1 = 0 - \text{вихідна провідність транзистора}.$$

Із режиму К.З. на виході, коли $U_2 = 0$, можна визначити:

$$h_{11} = \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1}, \text{ при } U_2 = 0 - \text{вхідний опір транзистора};$$

$$h_{21} = \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1}, \text{ при } U_2 = 0 - \text{коефіцієнт передачі за струмом}.$$

Значення h -параметрів наводяться у довідникових матеріалах на транзистори. Залежно від схеми вмикання транзистора h -параметри мають різні значення. Тому вони позначаються відповідною літерою в індексі (наприклад, для схеми з СЕ – h_{11E} , з СБ – h_{11B} , СК – h_{11K} і т.п.). Перевагою системи h -параметрів є простота безпосереднього вимірювання значень коефіцієнтів h (для отримання їх експериментальних значень). Так, режим Н.Х. на вході транзистора (за змінним струмом) здійснюється вмиканням у вхідне коло транзистора дроселя з великою індуктивністю ($\omega L \rightarrow \infty$), а режим К.З. - шляхом вмикання паралельно вихідному колу транзистора конденсатора великої ємності ($1/\omega C \rightarrow 0$). Схема заміщення транзистора за h -параметрами зображена на рис. 3.3.

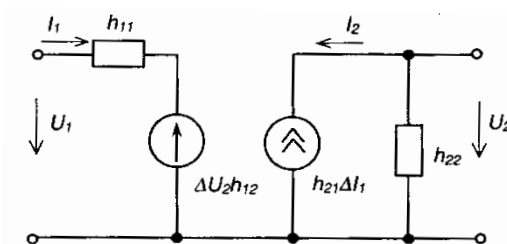


Рис. 3.3 - Схема заміщення транзистора за h -параметрами

Для схеми рис. 3.3 прийняті наступні позначення:

r_B - опір бази транзистора;

r_E - прямий опір емітерного переходу;

$r_{K(E)}$ - зворотний опір колекторного переходу;

β - коефіцієнт передачі за струмом.

Існує зв'язок між фізичними параметрами та h -параметрами. Так, для схеми з СЕ і СБ матимемо

$$h_{11E} = r_B + r_E (\beta + 1), \quad h_{11B} = r_E + r_B (1 - \alpha) \approx r_E \quad (3.7)$$

$$h_{12E} = \frac{r_E}{r_{K(E)}}(\beta + 1), \quad h_{12B} = \frac{r_B}{r_K} \quad (3.8)$$

$$h_{21E} \approx \beta, \quad h_{21B} \approx -\alpha \quad (3.9)$$

$$h_{22E} = \frac{1}{r_{K(E)}}(\beta + 1), \quad h_{22B} = \frac{1}{r_K} \quad (3.10)$$

При розрахунках пристроїв на біполярних транзисторах h -параметри використовуються як основні.

Умовні позначення транзисторів

Транзисторам, присвоюються такі позначення:

- перший елемент – буква або цифра, що вказує вихідний матеріал (1, або Г – германій; 2, або К – кремній; 3, або А – поєднання галію);
- другий елемент – буква, що вказує підклас приладу (Г- біполярний, П- польовий);
- третій елемент – число, перша цифра якого позначає класифікаційний номер, а наступні дві (від 1 до 99) – порядковий номер розробки.

Для першої цифри третього елемента прийняті такі класифікаційні позначення:

- малої потужності (потужність розсіювання до 0,3Вт):
 - низької частоти (до 3МГц) 1
 - середньої частоти (від 3 до 30МГц) 2
 - високої частоти (більше 30МГц) 3
- середньої потужності (потужність розсіювання від 0,3 до 1,5Вт):
 - низької частоти (до 3МГц) 4
 - середньої частоти (від 3 до 30МГц) 5
 - високої частоти (більше 30МГц) 6
- великої потужності (потужність розсіювання більше 1,5Вт):
 - низької частоти (до 3МГц) 7
 - середньої частоти (від 3 до 30МГц) 8
 - високої частоти (більше 30МГц) 9

- четвертий елемент – буква, що вказує різновид приладу даного типу.

Наприклад: ГТ605А – германієвий біполярний транзистор, середньої потужності, високочастотний, номер розробки 0,5 різновид А.

Основні формули та рівняння

Таблиця 3.1 – Формули для розрахунку параметрів транзисторних схем

Пара- метри	Схема ввімкнення транзистора		
	СБ	СЕ	СК
K_I	$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$	$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$	$\frac{1}{1 - \alpha} = 1 + \beta$

K_U	$\alpha \frac{R_H}{R_{\text{exB}}}$	$\frac{R_H}{R_{\text{exE}}} \alpha \approx \frac{\beta R_H}{R_{\text{exE}}}$	1
$K_P = K_U K_I$	$\alpha^2 \frac{R_H}{R_{\text{exB}}}$	$\frac{\alpha^2 R_H}{1 - \alpha R_{\text{exE}}} \approx \frac{\beta^2 R_H}{R_{\text{exE}}}$	$\frac{1}{1 - \alpha} = 1 + \beta$
h_{11}, OM	$\frac{h_{11E}}{1 + h_{21E}}$	$\frac{h_{11B}}{1 + h_{21B}}$	$\frac{h_{11B}}{1 + h_{21B}} = h_{11E}$
h_{12}	$\frac{h_{11E} h_{22E} - h_{12E}}{1 + h_{21E}}$	$\frac{h_{11B} h_{22B} - h_{12B}}{1 + h_{21B}}$	1
h_{21}	$-\frac{h_{21E}}{1 + h_{21E}}$	$-\frac{h_{21B}}{1 + h_{21B}} = \beta$	$-\frac{1}{1 + h_{21B}} = -(h_{21E} + 1)$
h_{22}, OM^{-1}	$\frac{h_{22E}}{1 + h_{21E}}$	$\frac{h_{22B}}{1 + h_{21B}}$	$\frac{h_{22B}}{1 + h_{21B}} = h_{22E}$

Вхідний опір транзистора по змінному струму:

$$R_{\text{ex}} = \frac{\Delta U_{\text{ex}}}{\Delta I_{\text{ex}}} \quad (3.11)$$

Потужність втрат на колекторі:

$$P_K = I_K U_K \quad (3.12)$$

Коефіцієнт підсилення струму бази у схемі з СЕ:

$$h_{21E} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \quad (3.13)$$

Коефіцієнт передачі струму емітера у схемі з СБ:

$$h_{21B} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_E} \quad (3.14)$$

Рівняння для побудови лінії навантаження транзистора:

$$U_{KE} = E_K - U_H = E_K - I_K R_K, \quad (3.15)$$

Лінія навантаження будується за двома точками, що відповідають:

- режиму неробочого ходу транзистора – $U_{KE} = E_K$, за $I_K = 0$,
- режиму короткого замикання транзистора – $I_K = E_K / R_K$, за $U_{KE} = 0$.

Практичне завдання

Здійснити аналітичний розрахунок параметрів і вибір біполярного транзистора р-п-р типу для студентів, які непарні у списку і п-р-п типу для студентів, які парні у списку в журналі групи .

Вихідними даними для розрахунку є (табл.2.2):

$P_{вих}$, Вт - потужність на виході (на навантаженні) каскаду;

R_H , Ом - опір навантаження;

f_B , Гц - верхня межа діапазону частот сигналу, що підсилюється;

M - допустиме значення коефіцієнта частотних викривлень.

Примітка. Вибір варіанту задачі здійснюється за номером студента у списку групи для ЕТ-21 і за номером студента у списку групи + 30 для ЕТ-22.

Таблиця 2.2- Вихідні дані для розрахунку задачі 1

Цифри номера залікової книжки		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
десятки	одиниці										
	$P_{вих}$, Вт	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5
	R_H , Ом	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0
M		2,2	2,1	2,0	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3
f_B , кГц		100	150	200	250	300	350	400	450	500	550

Приклад вибору варіанта для номера залікової книжки 132:
 з колонки 3 маємо: $M = 1,9$; $f_B = 250$ кГц;
 з колонки 2 маємо: $P_{вих} = 0,755$ Вт; $R_H = 20,0$ Ом.

Приклад. Дано: $P_{вих} = 3,5$ В; $R_H = 30$ Ом; $f_B = 20$ кГц; $M = 2,0$.

Розрахунок

Відомо, що транзистори вибирають за виконання умов

$$\begin{aligned}
 E_K &\leq U_{KE\max}, \\
 P_K &\leq P_{K\max}, \\
 I_{Km} &\leq I_{K\max}, \\
 f_{h21E\Gamma} &\leq f_{h21E}.
 \end{aligned}
 \tag{3.16}$$

Визначаємо напругу джерела живлення за формулою:

$$E_K \geq 2\sqrt{2P_K R_H} + |U_{KE\text{нас}}|,
 \tag{3.17}$$

де $|U_{KE\text{нас}}|$ - напруга насичення транзистора, приймаємо $|U_{KE\text{нас}}| = 0,5$ В.

$$E_K \geq 2\sqrt{2 \cdot 3,5 \cdot 30} + |0,5| = 29,48\text{В}, \text{ приймаємо } E_K = 30\text{В}.$$

Максимальну потужність, що розсіюється на колекторі знаходять за формулою:

$$P_K = \frac{E_K^2}{4\pi^2 R_H}, \quad (3.18)$$

$$P_K = \frac{30^2}{4\pi^2 \cdot 30} = 0,801 \text{ Вт.}$$

Максимальний струм колектора визначають за формулою:

$$I_{Km} = \sqrt{\frac{2P_H}{R_H}}, \quad (3.19)$$

$$I_{Km} = \sqrt{\frac{2 \cdot 3,5}{30}} = 0,483 \text{ А}$$

Визначаємо граничну частоту роботи транзистора:

$$f_{h21E\Gamma} \geq \frac{f_B}{\sqrt{M^2 - 1}}, \quad (3.20)$$

$$f_{h21E\Gamma} \geq \frac{20000}{\sqrt{2^2 - 1}} = 11547 \text{ Гц}$$

За отриманими значеннями: $P_K, I_{Km}, E_K, f_{h21E\Gamma}$ за табл. Д11 вибираємо транзистор КТ 814Б *p-n-p* типу з параметрами:

$$0,801 \text{ Вт} \leq 1 \text{ Вт},$$

$$483 \text{ мА} \leq 1500 \text{ мА},$$

$$30 \text{ В} \leq 40 \text{ В},$$

$$11,55 \text{ кГц} \leq 3 \text{ МГц}.$$

Всі умови перевірки виконуються.

Контрольні запитання

1. Що називають біполярним транзистором?
2. Будова біполярного транзистора?
3. Наведіть умовне графічне та буквене позначення на електричних схемах біполярного транзистора *p-n-p* типу? Позначте зовнішні виводи.
4. Наведіть умовне графічне та буквене позначення на електричних схемах біполярного транзистора *n-p-n* типу? Позначте зовнішні виводи.
5. За якими номінальними параметрами вибираються біполярні транзистори?
6. Розшифруйте умовне позначення біполярного транзистора, вказане викладачем?
7. Як визначається потужність втрат на колекторі біполярного транзистора, одиниці вимірювання?
8. Як визначається коефіцієнт підсилення струму бази у схемі з СЕ?
9. Як визначається коефіцієнт підсилення струму емітера у схемі з СБ?
10. Наведіть рівняння для побудови лінії навантаження транзистора, та його складові?

11. Що таке лінії навантаження? Як виконується її побудова?

ДОДАТКИ

Таблиця Д11 – Основні параметри деяких транзисторів

Тип транзистора	Структура	P_{Kmax} мВт	h_{21E} (β)	f_{h21E} МГц	Граничний режим		Клас за потужністю
					U_{Kmax} В	I_{Kmax} мА	
КТ 103	<i>p-n-p</i>	150	20-80	1	15	50	Малої потужності
КТ 104	<i>n-p-n</i>	150	20-80	1	15	50	
ГТ 122	<i>n-p-n</i>	150	15-45	1	35	20	
ГТ 123	<i>p-n-p</i>	150	15-45	1	35	20	
ГТ 124	<i>n-p-n</i>	150	28-56	1	30	100	
ГТ 125	<i>p-n-p</i>	150	28-56	1	30	100	
КТ 316Г	<i>p-n-p</i>	150	50-350	1	35	50	
КТ 315Г	<i>n-p-n</i>	150	50-350	1	35	50	
КТ 502А	<i>p-n-p</i>	500	30-90	1	40	300	Середньої потужності
КТ 503А	<i>n-p-n</i>	500	30-90	1	40	300	
КТ 502В	<i>p-n-p</i>	500	40-120	1	60	300	
КТ 503В	<i>n-p-n</i>	500	40-120	1	60	300	
ГТ 402А	<i>p-n-p</i>	600	20-40	1	25	500	
ГТ 403А	<i>n-p-n</i>	600	20-40	1	25	500	
ГТ 402В	<i>p-n-p</i>	600	30-60	1	40	500	
ГТ 403В	<i>n-p-n</i>	600	30-60	1	40	500	
КТ 814А	<i>p-n-p</i>	10000	40	3	25	1500	Великої потужності
КТ 814Б	<i>p-n-p</i>	10000	40	3	40	1500	
КТ 814В	<i>p-n-p</i>	10000	40	3	60	1500	
КТ 814Г	<i>p-n-p</i>	10000	30	3	80	1500	
КТ 815А	<i>n-p-n</i>	10000	40	3	25	1500	
КТ 815Б	<i>n-p-n</i>	10000	40	3	40	1500	
КТ 815В	<i>n-p-n</i>	10000	40	3	60	1500	
КТ 815Г	<i>n-p-n</i>	10000	30	3	80	1500	
КТ 816А	<i>p-n-p</i>	25000	25	3	25	3000	
КТ 816Б	<i>p-n-p</i>	25000	25	3	45	3000	
КТ 816В	<i>p-n-p</i>	25000	25	3	60	3000	
КТ 816Г	<i>p-n-p</i>	25000	25	3	80	3000	
КТ 817А	<i>n-p-n</i>	25000	25	3	25	3000	

КТ 817Б	<i>n-p-n</i>	25000	25	3	45	3000	
КТ 817В	<i>n-p-n</i>	25000	25	3	60	3000	
КТ 817Г	<i>n-p-n</i>	25000	25	3	80	3000	

Робота транзистора <https://www.youtube.com/watch?v=OMGdSCaMVD0>
+ польові транзистори <https://www.youtube.com/watch?v=iRnMrHx8AiA>