

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №2

**Тема.** Розрахунок і вибір багатошарових напівпровідникових структур транзисторів.

**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 ( $f_{cp}$ ) і потужностей ( $P_{max}$ ):

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

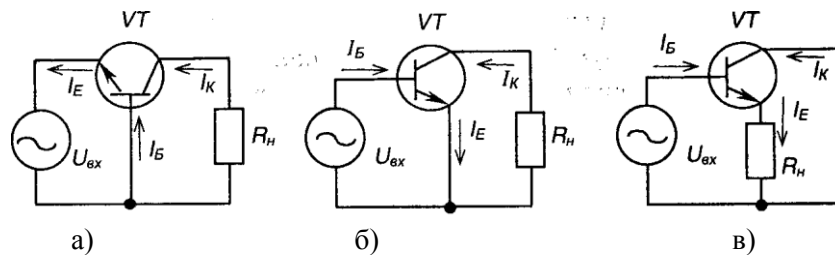


Рис. 2.1 - Схеми вмикання транзистора: а) з СБ; б) з СЕ; в) з СК

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:

- статична – 
$$\alpha = \frac{I_K}{I_E}; \quad (2.1)$$

- динамічна – 
$$\alpha_{дин} = \frac{dI_K}{dI_E} \Big|_{U_{KB} = const}. \quad (2.2)$$

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

- статична – 
$$\beta = \frac{I_K}{I_B} = \frac{I_K : I_E}{(I_E - I_K)} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}; \quad (2.3)$$

- динамічна – 
$$\beta = \frac{dI_K}{dI_B} \Big|_{U_{KB} = const}. \quad (2.4)$$

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

$$\frac{I_E}{I_B} = \frac{1}{1 - \alpha} = 1 + \beta. \quad (2.5)$$

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 (чотириполюсник), зображений на рис. 2.2.



Рис. 2.2 – Активний лінійний чотириполіусник

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

При аналізі роботи чотириполіусника 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.

$$\begin{cases} \Delta U_1 = h_{11}\Delta I_1 + h_{12}\Delta U_2 \\ \Delta I_2 = h_{21}\Delta I_1 + h_{22}\Delta U_2 \end{cases} \quad (2.6)$$

Значення коефіцієнтів  $h$  знаходять при створенні режимів неробочого ходу (Н.Х.) на вході чотириполіусника 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. 2.3.

Для розрахунків також використовується фізична Т-подібна модель транзистора. На рис. 2.4 зображена така модель для схеми з СЕ.

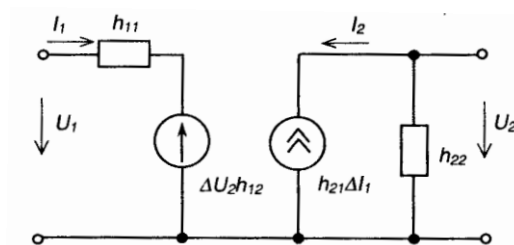


Рис. 2.3 - Схема заміщення транзистора за  $h$ -параметрами

Для схеми рис. 2.3 прийняті наступні позначення:

$r_B$  - опір бази транзистора;

$r_E$  - прямиий опір емітерного переходу;

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

$\beta$  - коефіцієнт передачі за струмом.

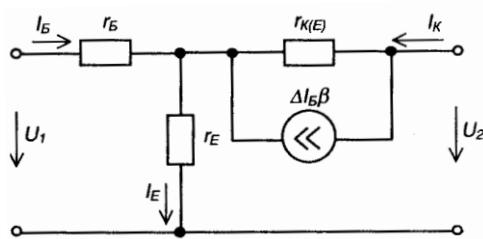


Рис. 2.4 - Т-подібна схема заміщення транзистора

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

$$h_{11E} = r_B + r_E (\beta + 1), \quad h_{11B} = r_E + r_B (1 - \alpha) \approx r_E \quad (2.7)$$

$$h_{12E} = \frac{r_E}{r_{K(E)}} (\beta + 1), \quad h_{12B} = \frac{r_B}{r_K} \quad (2.8)$$

$$h_{21E} \approx \beta, \quad h_{21B} \approx -\alpha \quad (2.9)$$

$$h_{22E} = \frac{1}{r_{K(E)}} (\beta + 1), \quad h_{22B} = \frac{1}{r_K} \quad (2.10)$$

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 (Т- 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 елементу 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

Вхідний опір транзистора по змінному струму:

$$R_{ex} = \frac{\Delta U_{ex}}{\Delta I_{ex}} \quad (2.11)$$

Потужність втрат на колекторі:

$$P_K = I_K U_K \quad (2.12)$$

Коефіцієнт підсилення струму бази у схемі з СЕ:

$$h_{21E} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \quad (2.13)$$

Коефіцієнт передачі струму емітера у схемі з СБ:

$$h_{21B} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_E} \quad (2.14)$$

Рівняння для побудови лінії навантаження транзистора:

$$U_{KE} = E_K - U_H = E_K - I_K R_K, \quad (2.15)$$

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  $U_{KE} = 0$ .

Таблиця 2.1 – Формули для розрахунку параметрів транзисторних схем

Пара-метри	Схема ввімкнення транзистора		
	СБ	СЕ	СК
$K_I$	$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$	$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$	$\frac{1}{1 - \alpha} = 1 + \beta$
$K_U$	$\alpha \frac{R_H}{R_{exB}}$	$\frac{R_H}{R_{exE}} \alpha \approx \frac{\beta R_H}{R_{exE}}$	1
$K_P = K_U K_I$	$\alpha^2 \frac{R_H}{R_{exB}}$	$\frac{\alpha^2 R_H}{1 - \alpha R_{exE}} \approx \frac{\beta^2 R_H}{R_{exE}}$	$\frac{1}{1 - \alpha} = 1 + \beta$
$h_{11}, \text{ Ом}$	$\frac{h_{11E}}{1 + h_{21E}}$	$\frac{h_{11B}}{1 + h_{21B}}$	$\frac{h_{11B}}{1 + h_{21B}} = h_{11E}$
$h_{12}$	$\frac{h_{11E} h_{22E} - h_{12E}}{1 + h_{21E}}$	$\frac{h_{11B} h_{22B} - h_{12B}}{1 + h_{21B}}$	1
$h_{21}$	$-\frac{h_{21E}}{1 + h_{21E}}$	$-\frac{h_{21B}}{1 + h_{21B}} = \beta$	$-\frac{1}{1 + h_{21B}} = -(h_{21E} + 1)$
$h_{22}, \text{ Ом}^{-1}$	$\frac{h_{22E}}{1 + h_{21E}}$	$\frac{h_{22B}}{1 + h_{21B}}$	$\frac{h_{22B}}{1 + h_{21B}} = h_{22E}$

### Практичне завдання

Здійснити аналітичний розрахунок параметрів і вибір біполярного транзистора.

Вихідними даними для розрахунку є (табл.2.2):

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

$R_H, \text{ Ом}$  - опір навантаження;

$f_B, \text{ Гц}$  - верхня межа діапазону частот сигналу, що підсилюється;

$M$  - допустиме значення коефіцієнта частотних викривлень.

*Примітка.* Вибір варіанту задачі здійснюється за двома останніми цифрами залікової книжки студента.

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										
	$P_{вих}, \text{ Вт}$	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
	$R_H, \text{ Ом}$	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
	$f_B, \text{ кГц}$	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550

Приклад вибору варіанта для номера залікової книжки 132:  
 з колонки 3 маємо:  $M = 1,9$ ;  $f_6 = 250\text{кГц}$ ;  
 з колонки 2 маємо:  $P_{вих} = 1,5\text{Вт}$ ;  $R_H = 20,0\text{Ом}$ .

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

#### Розрахунок

Відомо, що транзистори вибирають за виконання умов

$$\begin{aligned} E_K &\leq U_{KE\max}, \\ P_K &\leq P_{K\max}, \\ I_{Km} &\leq I_{K\max}, \\ f_{h21E\Gamma} &\leq f_{h21E}. \end{aligned} \quad (2.16)$$

Визначаємо напругу джерела живлення за формулою:

$$E_K \geq 2\sqrt{2P_K R_H} + |U_{KE\text{нас}}|, \quad (2.17)$$

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

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

Приймаємо  $E_K = 30\text{В}$ .

Максимальну потужність, що розсіюється на колекторі знаходять за формулою:

$$P_K = \frac{E_K^2}{4\pi^2 R_H}, \quad (2.18)$$

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

Максимальний струм колектора визначають за формулою:

$$I_{Km} = \sqrt{\frac{2P_H}{R_H}}, \quad (2.19)$$

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

Визначаємо граничну частоту роботи транзистора:

$$f_{h21E\Gamma} \geq \frac{F_B}{\sqrt{M^2 - 1}}, \quad (2.20)$$

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

За отриманими значеннями:  $P_K$ ,  $I_{Km}$ ,  $E_K$ ,  $f_{h21E\Gamma}$  за табл. Д11 вибираємо транзистор КТ 814А 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.