

1. Транзистор як активний чотириполюсник

Будь-який транзистор незалежно від схеми ввімкнення володіє рядом параметрів, які можна розбити на дві групи:

- граничні параметри, якими є всі максимальні значення;
- параметри транзистора в режимі малого сигналу.

Дані параметри об'єднуються в декілька систем параметрів, які можна визначити, представивши транзистор у вигляді активного чотириполюсника.

Чотириполюсником називається будь-який електричний пристрій, який має 2 вхідних і 2 вихідних затискача.

Активним чотириполюсником називається чотириполюсник, який здатний підсилювати потужність. Представимо транзистор у вигляді чотириполюсника (рис. 8.1).

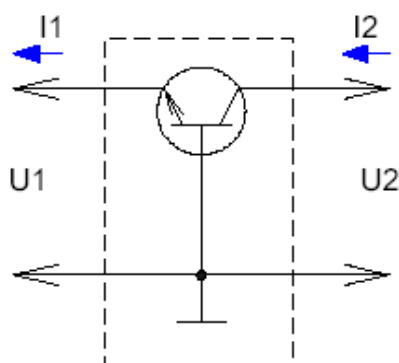


Рис. 8.1. Транзистор у вигляді чотириполюсника.

Присвоїмо вхідному струму і напрузі індекс “1”, а вихідному струму і напрузі – індекс “2”. Для транзисторів достатньо знати дві будь-які змінні з чотирьох – U_1 , U_2 , I_1 , I_2 . Решта дві визначаються із статичних характеристик транзистора. Змінні, які відомі або якими задаються, називаються незалежними змінними. Дві інші змінні, які можна

визначити, називаються залежними змінними. У залежності від того, які із змінних будуть вибиратися в якості незалежних, можна отримати різні системи параметрів в режимі малого сигналу (табл. 8.1).

Таблиця 8.1

Системи параметрів транзистора

Незалежна змінна	$I_1 I_2$	$U_1 U_2$	$I_1 U_2$
Залежна змінна	$U_1 U_2$	$I_1 I_2$	$I_2 U_1$
Система	z	y	h

2. h -параметри та їх фізичний зміст

У системі h -параметрів у вигляді незалежних змінних приймають вхідний струм I_1 та вихідну напругу U_2 . У даному випадку залежні змінні U_1 та I_2 будуть функціями незалежних змінних:

$$U_1 = f(I_1, U_2), \quad I_2 = f(I_1, U_2).$$

Повний диференціал функцій U_1 і I_2 рівний

$$\begin{cases} dU_1 = \frac{\partial U_1}{\partial I_1} \cdot dI_1 + \frac{\partial U_1}{\partial U_2} \cdot dU_2, \\ dI_2 = \frac{\partial I_2}{\partial I_1} \cdot dI_1 + \frac{\partial I_2}{\partial U_2} \cdot dU_2. \end{cases}$$

Введемо наступні позначення: $\frac{\partial U_1}{\partial I_1} = h_{11}$, $\frac{\partial U_1}{\partial U_2} = h_{12}$, $\frac{\partial I_2}{\partial I_1} = h_{21}$, $\frac{\partial I_2}{\partial U_2} = h_{22}$.

Тоді отримана система рівнянь набуде наступного вигляду:

$$\begin{cases} dU_1 = h_{11} \cdot dI_1 + h_{12} \cdot dU_2, \\ dI_2 = h_{21} \cdot dI_1 + h_{22} \cdot dU_2. \end{cases}$$

Перейдемо від нескінченно малих приростів dU_1 , dI_1 , dU_2 , dI_2 до скінченних приростів. У результаті цього отримаємо:

$$\begin{cases} \Delta U_1 = h_{11} \cdot \Delta I_1 + h_{12} \cdot \Delta U_2, \\ \Delta I_2 = h_{21} \cdot \Delta I_1 + h_{22} \cdot \Delta U_2. \end{cases}$$

У режимі малого сигналу прирости постійних складових ΔU_1 , ΔI_1 , ΔU_2 , ΔI_2 можна замінити амплітудними значеннями змінних складових цих же струмів і напруг. Як результат, отримаємо:

$$\begin{cases} U_{m1} = h_{11} \cdot I_{m1} + h_{12} \cdot U_{m2}, \\ I_{m2} = h_{21} \cdot I_{m1} + h_{22} \cdot U_{m2}. \end{cases} \quad (8.1)$$

У першому рівнянні системи (8.1) прирівняємо U_{m2} до нуля. Отримаємо:

$$U_{m1} = h_{11} \cdot I_{m1} \Rightarrow h_{11} = \frac{U_{m1}}{I_{m1}}.$$

Величина h_{11} – це вхідний опір транзистора при $U_{m2} = 0$, тобто при короткому замиканні у вихідному колі по змінному струму (конденсатором).

У першому рівнянні системи (8.1) прирівнюємо I_{m1} до нуля. Отримаємо:

$$U_{m1} = h_{12} \cdot U_{m2} \Rightarrow h_{12} = \frac{U_{m1}}{U_{m2}}.$$

Величина h_{12} являє собою коефіцієнт зворотного зв'язку на холостому ході у вхідному колі по змінному струму. Коефіцієнт зворотного зв'язку показує ступінь впливу вихідної напруги на вхідну (котушкою індуктивності).

У другому рівнянні системи (8.1) прирівнюємо U_{m2} до нуля. Отримаємо:

$$I_{m2} = h_{21} \cdot I_{m1} \Rightarrow h_{21} = \frac{I_{m2}}{I_{m1}}.$$

Величина h_{21} – це коефіцієнт підсилення за струмом транзистора або коефіцієнт передачі струму при короткому замиканні вихідного кола по змінному струму.

Прирівнюємо у другому рівнянні системи (8.1) I_{m1} до нуля. Отримаємо:

$$I_{m2} = h_{22} \cdot U_{m2} \Rightarrow h_{22} = \frac{I_{m2}}{U_{m2}}.$$

Величина h_{22} являє собою вихідну провідність на холостому ході у вхідному колі.

3. Визначення h -параметрів за статичними характеристиками

Так як статичні характеристики транзисторів вимірюються тільки на постійному струмі, то при визначенні амплітудних параметрів струмів і напруг представимо їх у вигляді приростів постійних складових.

$$h_{11} = \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} \text{ при } U_2 = \text{const}, \quad h_{12} = \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} \text{ при } I_1 = \text{const},$$

$$h_{21} = \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1} \text{ при } U_2 = \text{const}, \quad h_{22} = \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2} \text{ при } I_1 = \text{const}.$$

Розглянемо графологічне визначення h -параметрів на прикладі схеми із загальним емітером. Внаслідок того, що транзистор завжди працює з вхідним струмом, то необхідно користуватися вхідними і вихідними характеристиками.

Величини h_{11} і h_{12} визначаються за вхідними характеристиками транзистора (рис. 8.2 і 8.3).

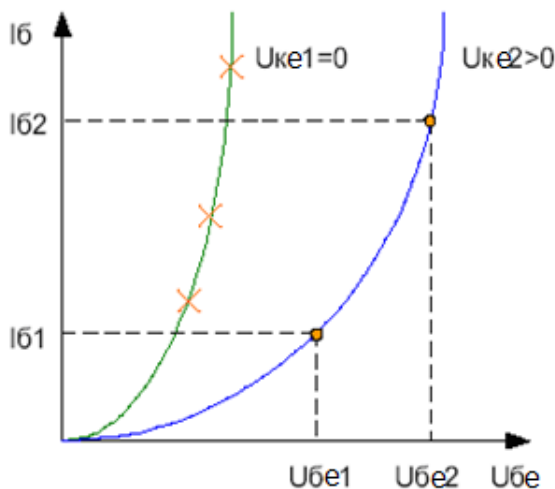


Рис. 8.2. До визначення параметра h_{11} .

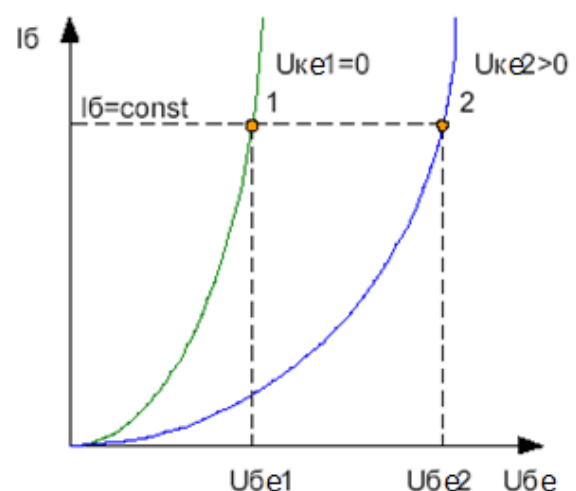


Рис. 8.3. До визначення параметра h_{12} .

Необхідний h -параметр розраховується за допомогою наведених нижче формул. З рисунків видно, що дані, які підставляються у формулу, знаходяться шляхом проекції точок на осі координат.

$$h_{11e} = \frac{\Delta U_{\delta}}{\Delta I_{\delta}} \text{ при } U_{\kappa e} = \text{const}, \quad h_{11e} = \frac{U_{\delta e2} - U_{\delta e1}}{I_{\delta 2} - I_{\delta 1}}.$$

$$h_{12} = \frac{\Delta U_{\delta e}}{\Delta U_{\kappa e}} \text{ при } I_{\delta} = \text{const}, h_{12e} = \frac{U_{\delta e2} - U_{\delta e1}}{U_{\kappa e2} - U_{\kappa e1}} \frac{U_{\delta e2} - U_{\delta e1}}{U_{\kappa e2}}, \text{ оскільки } U_{\kappa e1} = 0.$$

Параметри h_{21} і h_{22} визначаються за вихідними характеристиками (рис. 8.4 і 8.5).

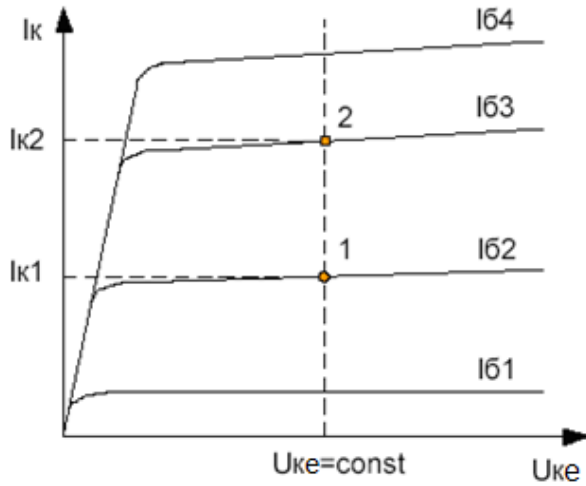


Рис. 8.4. До визначення параметра h_{21} .

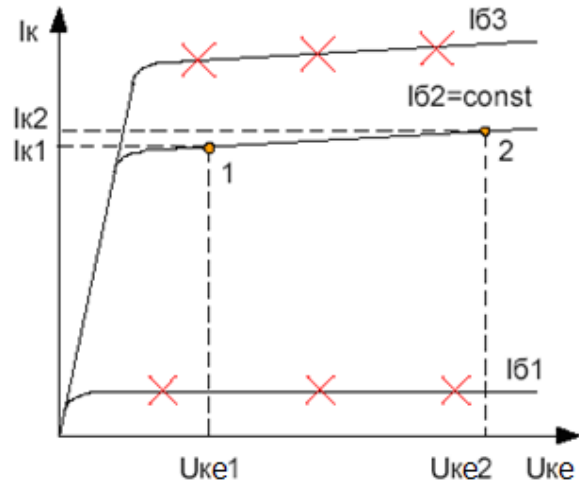


Рис. 8.5. До визначення параметра h_{22} .

$$h_{21e} = \frac{\Delta I_{\kappa}}{\Delta I_{\delta}} \text{ при } U_{\kappa e} = \text{const}, h_{21e} = \frac{I_{\kappa 2} - I_{\kappa 1}}{I_{\delta 3} - I_{\delta 2}};$$

$$h_{22e} = \frac{\Delta I_{\kappa}}{\Delta U_{\kappa e}} \text{ при } I_{\delta} = \text{const}, h_{22e} = \frac{I_{\kappa 2} - I_{\kappa 1}}{U_{\kappa e2} - U_{\kappa e1}}.$$

4. y -параметри транзисторів

У системі y -параметрів у вигляді незалежних змінних приймають вхідну U_1 та вихідну U_2 напруги. У даному випадку залежні змінні I_1 та I_2 будуть функціями незалежних змінних:

$$I_1 = f(U_1, U_2), \quad I_2 = f(U_1, U_2).$$

Повний диференціал функцій I_1 та I_2 рівний

$$\begin{cases} dI_1 = \frac{\partial I_1}{\partial U_1} \cdot dU_1 + \frac{\partial I_1}{\partial U_2} \cdot dU_2, \\ dI_2 = \frac{\partial I_2}{\partial U_1} \cdot dU_1 + \frac{\partial I_2}{\partial U_2} \cdot dU_2. \end{cases}$$

Введемо наступні позначення: $\frac{\partial I_1}{\partial U_1} = y_{11}$, $\frac{\partial I_1}{\partial U_2} = y_{12}$, $\frac{\partial I_2}{\partial U_1} = y_{21}$, $\frac{\partial I_2}{\partial U_2} = y_{22}$.

Тоді отримана система рівнянь набуде наступного вигляду:

$$\begin{cases} dI_1 = y_{11} \cdot dU_1 + y_{12} \cdot dU_2, \\ dI_2 = y_{21} \cdot dU_1 + y_{22} \cdot dU_2. \end{cases}$$

Перейдемо від нескінченно малих приростів dU_1 , dI_1 , dU_2 , dI_2 до скінченних приростів. У результаті цього отримаємо:

$$\begin{cases} \Delta I_1 = y_{11} \cdot \Delta U_1 + y_{12} \cdot \Delta U_2, \\ \Delta I_2 = y_{21} \cdot \Delta U_1 + y_{22} \cdot \Delta U_2. \end{cases}$$

У режимі малого сигналу прирости постійних складових ΔU_1 , ΔI_1 , ΔU_2 , ΔI_2 можна замінити амплітудними значеннями змінних складових цих же струмів і напруг. Як результат, отримаємо:

$$\begin{cases} I_{m1} = y_{11} \cdot U_{m1} + y_{12} \cdot U_{m2}, \\ I_{m2} = y_{21} \cdot U_{m1} + y_{22} \cdot U_{m2}. \end{cases} \quad (8.2)$$

У першому рівнянні системи (8.2) прирівняємо U_{m2} до нуля. Отримаємо:

$$I_{m1} = y_{11} \cdot U_{m1} \Rightarrow y_{11} = \frac{I_{m1}}{U_{m1}}.$$

Величина y_{11} – це вхідна провідність транзистора при $U_{m2} = 0$ (коротке замикання на виході).

У першому рівнянні системи (8.2) прирівнюємо U_{m1} до нуля. Отримаємо:

$$I_{m1} = y_{12} \cdot U_{m2} \Rightarrow y_{12} = \frac{I_{m1}}{U_{m2}}.$$

Величина y_{12} являє собою провідність зворотного зв'язку при $U_{m1} = 0$ (коротке замикання на вході). Параметр y_{12} показує, яка зміна струму I_1 отримується за рахунок зворотного зв'язку при зміні вихідної напруги U_2 на 1 В.

У другому рівнянні системи (8.2) прирівнюємо U_{m2} до нуля. Отримаємо:

$$I_{m2} = y_{21} \cdot U_{m1} \Rightarrow y_{21} = \frac{I_{m2}}{U_{m1}}.$$

Величина y_{21} – це провідність керування (крутизна) при $U_{m2} = 0$ (коротке замикання на виході). Величина y_{21} характеризує керуючу дію вхідної напруги U_1 на вихідний струм I_2 і показує зміну I_2 при зміні U_1 на 1 В.

Прирівнюємо у другому рівнянні системи (8.2) U_{m1} до нуля. Отримаємо:

$$I_{m2} = y_{22} \cdot U_{m2} \Rightarrow y_{22} = \frac{I_{m2}}{U_{m2}}.$$

Величина y_{22} являє собою вихідну провідність при $U_{m1} = 0$ (коротке замикання на вході).

У систему y -параметрів іноді додають ще статичний коефіцієнт підсилення за напругою: $\mu = -\frac{U_{m2}}{U_{m1}}$ при $I_{m2} = 0$. При цьому $\mu = \frac{y_{21}}{y_{22}}$.

Перевага y -параметрів – їх подібність з параметрами електронних ламп. Недолік – досить важко виміряти y_{12} і y_{22} , так як необхідно забезпечити режим короткого замикання для змінного струму на вході, а вимірювальний мікроамперметр має опір, порівняний із вхідним опором самого транзистора. Тому замість достатньо часто використовують змішані (чи гібридні) h -параметри, які зручно вимірювати і які наводять в усіх довідниках.

5. z -параметри транзисторів

У системі z -параметрів у вигляді незалежних змінних приймають вхідний I_1 та вихідний I_2 струми. У даному випадку залежні змінні U_1 та U_2 будуть функціями незалежних змінних:

$$U_1 = f(I_1, I_2), U_2 = f(I_1, I_2).$$

Повний диференціал функцій U_1 та U_2 рівний

$$\begin{cases} dU_1 = \frac{\partial U_1}{\partial I_1} \cdot dI_1 + \frac{\partial U_1}{\partial I_2} \cdot dI_2, \\ dU_2 = \frac{\partial U_2}{\partial I_1} \cdot dI_1 + \frac{\partial U_2}{\partial I_2} \cdot dI_2. \end{cases}$$

Введемо наступні позначення: $\frac{\partial U_1}{\partial I_1} = z_{11}$, $\frac{\partial U_1}{\partial I_2} = z_{12}$, $\frac{\partial U_2}{\partial I_1} = z_{21}$, $\frac{\partial U_2}{\partial I_2} = z_{22}$.

Тоді отримана система рівнянь набуде наступного вигляду:

$$\begin{cases} dU_1 = z_{11} \cdot dI_1 + z_{12} \cdot dI_2, \\ dU_2 = z_{21} \cdot dI_1 + z_{22} \cdot dI_2. \end{cases}$$

Перейдемо від нескінченно малих приростів dU_1 , dI_1 , dU_2 , dI_2 до скінченних приростів. У результаті цього отримаємо:

$$\begin{cases} \Delta U_1 = z_{11} \cdot \Delta I_1 + z_{12} \cdot \Delta I_2, \\ \Delta U_2 = z_{21} \cdot \Delta I_1 + z_{22} \cdot \Delta I_2. \end{cases}$$

У режимі малого сигналу прирости постійних складових ΔU_1 , ΔI_1 , ΔU_2 , ΔI_2 можна замінити амплітудними значеннями змінних складових цих же струмів і напруг. Як результат, отримаємо:

$$\begin{cases} U_{m1} = z_{11} \cdot I_{m1} + z_{12} \cdot I_{m2}, \\ U_{m2} = z_{21} \cdot I_{m1} + z_{22} \cdot I_{m2}. \end{cases} \quad (8.3)$$

У першому рівнянні системи (8.3) прирівняємо I_{m2} до нуля. Отримаємо:

$$U_{m1} = z_{11} \cdot I_{m1} \Rightarrow z_{11} = \frac{U_{m1}}{I_{m1}}.$$

Величина z_{11} – це вхідний опір транзистора при $I_{m2} = 0$ (холостий хід на виході).

У першому рівнянні системи (8.3) прирівнюємо I_{m1} до нуля. Отримаємо:

$$U_{m1} = z_{12} \cdot I_{m2} \Rightarrow z_{12} = \frac{U_{m1}}{I_{m2}}.$$

Величина z_{12} являє собою зворотний перехідний опір при $I_{m1} = 0$ (холостий хід на вході).

У другому рівнянні системи (8.3) прирівнюємо I_{m2} до нуля. Отримаємо:

$$U_{m2} = z_{21} \cdot I_{m1} \Rightarrow z_{21} = \frac{U_{m2}}{I_{m1}}.$$

Величина z_{21} – це прямий перехідний опір при $I_{m2} = 0$ (холостий хід на виході).

Прирівнюємо у другому рівнянні системи (8.3) I_{m1} до нуля. Отримаємо:

$$U_{m2} = z_{22} \cdot I_{m2} \Rightarrow z_{22} = \frac{U_{m2}}{I_{m2}}.$$

Величина z_{22} являє собою вихідний опір при $I_{m1} = 0$ (холостий хід на вході).