

ЛЕКЦІЯ 12

ТРАНЗИСТОРИ

Біполярні транзистори

План заняття:

1. Структура і принцип роботи біполярних транзисторів
2. Класифікація біполярних транзисторів
3. Основні параметри біполярних транзисторів
4. Режими роботи транзистора
5. Три схеми включення транзистора
6. Транзистор як активний чотириполюсник

Транзистором називається напівпровідниковий прилад, який використовується для посилення потужності.

Принцип роботи транзистора засновано на зміні свого опору під впливом слабкого сигналу (від англ. transistor – transfer resistor – перетворення резистора). Залежно від принципу дії і конструктивних особливостей транзистори поділяються на два великі класи: біполярні і польові.

Структура і принцип роботи біполярних транзисторів

Біполярними транзисторами називають напівпровідникові прилади з двома або більше взаємодіючими електричними $p-n$ переходами і трьома або більше виводами. Підсилювальні властивості біполярних транзисторів обумовлені явищами інжекції і екстракції неосновних носіїв заряду обох полярностей (тому транзистор називається *біполярним*).

Залежно від порядку чергування електропровідності областей розрізняють транзистори $p-n-p$ і $n-p-n$ типу. Умовні позначення біполярних транзисторів показані на (рис.12.1).

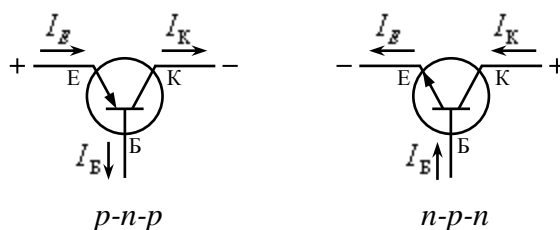


Рис.12.1. Схематичне зображення транзистора

При підключенні напруги до транзистора один $p-n$ перехід включають в пряму зміщенні, інший – в зворотному. Перехід, зміщений в пряму напрямку, називають емітерним, а відповідний зовнішній шар напівпровідника і вивід з нього – *емітером*.

Перехід, зміщений у зворотному напрямку, називають колекторним, а відповідний зовнішній шар напівпровідника і вивід з нього – *колектором*.

Середній шар напівпровідника називають *базою*.

Інжекція – нагнітання носіїв заряду через p - n перехід, зміщений в прямому напрямку, в область, де вони є неосновними.

Екстракція – вилучення неосновних носіїв заряду через p - n перехід при його зворотному зміщенні.

Для розгляду принципу роботи біполярного транзистора скористаємося схемою на рис.12.2.

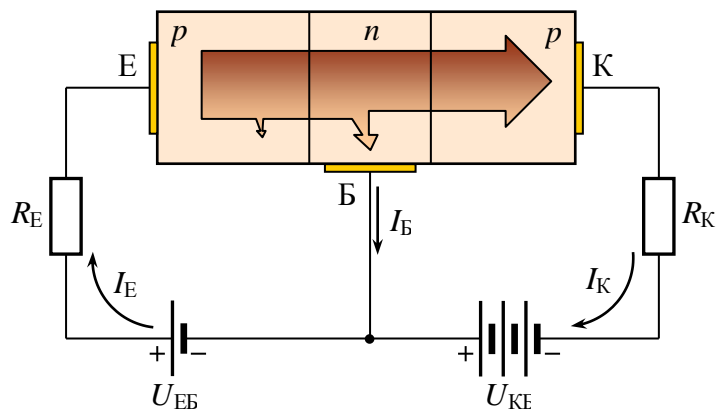


Рис.12.2. Функціональна схема біполярного транзистора

При підключенні до транзистора напруг U_{EB} і U_{KB} , причому, як правило $U_{EB} \ll U_{KB}$, через емітерний перехід буде здійснюватися інжекція дірок з емітера в область бази. Одночасно електрони бази будуть проходити в область емітера. В емітерному колі потече струм I_E по шляху $+ U_{EB} \rightarrow R_E \rightarrow E \rightarrow B \rightarrow - U_{EB}$. Цей струм дорівнює сумі дірочної і електронної складових

$$I_E = I_{Ep} + I_{En}.$$

В транзисторах концентрація носіїв заряду в базі значно менша, ніж в емітері. Це призводить до того, що число дірок інжектованих з емітера в базу, у багато разів перевищує число електронів, що рухаються в протилежному напрямку, тому струм через емітерний перехід в основному обумовлений дірками.

Ефективність емітера оцінюється коефіцієнтом інжекції γ , який для транзисторів типу p - n - p дорівнює відношенню дірочної складової емітерного струму до загального струму емітера

$$\gamma = \frac{I_{Ep}}{I_E} = \frac{I_{Ep}}{I_{Ep} + I_{En}} = \frac{1}{1 + \frac{I_{En}}{I_{Ep}}}.$$

В сучасних транзисторах коефіцієнт γ мало відрізняється від одиниці ($\gamma \approx 0,999$).

Інжектвані через емітерний перехід дірки проникають всередину бази,

деякі дірки рекомбінують з електронами, однак, через невелику концентрацію вільних електронів в базі і невелику ширину бази абсолютна більшість дірок досягає колекторного $p-n$ переходу.

Поблизу колектора дірки починають взаємодіяти з електричним полем колекторного переходу. Це поле для дірок є пришвидшувачем, тому вони в результаті екстракції швидко втягуються в колектор і беруть участь в створенні струму колектора

Коло струму колектора $+U_{КБ} \rightarrow -U_{ЕБ} \rightarrow +U_{ЕБ} \rightarrow R_E \rightarrow E \rightarrow B \rightarrow K \rightarrow R_K \rightarrow -U_{КБ}$. Ті дірки, які все ж рекомбінують з електронами в області бази, беруть участь у створенні струму бази, що проходить по колу $+U_{ЕБ} \rightarrow R_E \rightarrow E \rightarrow B \rightarrow -U_{ЕБ}$. Таким чином

$$I_E = I_B + I_K.$$

Для оцінки впливу рекомбінації носіїв заряду в базі на підсилювальні властивості транзистора використовується *коефіцієнт перенесення носіїв в базі* δ , який показує, яка частина інжекттованих емітером дірок досягає колекторного переходу

$$\delta = \frac{I_{Kp}}{I_{Ep}}.$$

Одним з основних параметрів транзистора є *коефіцієнт передачі струму емітера*, що дорівнює відношенню приросту струму колектора до приросту струму емітера при незмінній напрузі на колекторному переході

$$\alpha = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_E} \quad (\text{звичайно } \alpha=0,95\dots 0,99).$$

Цей коефіцієнт може бути також виражений через величини γ і δ

$$\alpha = \gamma \cdot \delta.$$

Оскільки в колі колектора крім струму, обумовленого екстракцією дірок з бази в колектор, протікає власний зворотний струм колекторного переходу $I_{КБ0}$, то повний струм колектора

$$I_K = \alpha I_E + I_{КБ0} \approx \alpha I_E.$$

Таким чином струм колектора I_K і напруга емітер-база $U_{ЕБ}$ при певному значенні струму емітера I_E не залежить від напруги прикладеної до колекторного переходу $U_{КБ}$. Насправді зміна напруги $U_{КБ}$ змінює ширину бази через зміну розмірів колекторного переходу і відповідно змінює градієнт концентрації неосновних носіїв заряду. Так при підвищенні напруги $U_{КБ}$

ширина бази звужується, а градієнт концентрації дірок в базі і відповідно струм I_E збільшується. Крім цього, ймовірність рекомбінації дірок зменшується і коефіцієнт α збільшується.

Класифікація біполярних транзисторів

За типом використовуваного матеріалу:

- германій або його сполуки (Г або 1);
- кремній або його сполуки (К або 2);
- з'єднання галію (А або 3);
- з'єднання індію (І або 4).

За максимально допустимою потужністю, що розсіюється:

- малопотужні ($P_{\max} \leq 0,3$ Вт);
- середньої потужності ($0,3 < P_{\max} \leq 1,5$ Вт);
- великої потужності ($P_{\max} > 1,5$ Вт).

За граничною частотою:

- низькочастотні ($f_{\text{гр}} \leq 3$ МГц);
- середньої частоти ($3 < f_{\text{гр}} \leq 30$ МГц);
- високочастотні ($30 < f_{\text{гр}} \leq 300$ МГц);
- надвисокочастотні (НВЧ) ($f_{\text{гр}} > 300$ МГц).

За функціональним призначенням:

- підсилювальні;
- ті, що перемикаються;
- генераторні;
- імпульсні;
- універсальні.

Основні параметри біполярних транзисторів

$P_{\text{к max}}$ – максимально допустима постійна потужність колектора, що розсіюється без тепловідводу;

$I_{\text{к max}}$ – максимально допустимий постійний струм колектора;

$U_{\text{ке max}}$ – максимально допустима напруга колектор-емітер;

$U_{\text{кб max}}$ – максимально допустима напруга колектор-база;

h_{21e} – статичний коефіцієнт передачі струму біполярного транзистора в схемі із загальним емітером;

$I_{\text{кб0}}$ – зворотний струм колектора;

$f_{\text{гр}}$ – гранична частота коефіцієнта передачі струму в схемі з загальним емітером;

$U_{\text{кен}}$ – напруга насичення колектор-емітер

Маркування біполярних транзисторів передбачає шість символів.

Перший символ – буква (для приладів загального застосування) або цифра для приладів спеціального призначення, яка вказує вихідний

напівпровідниковий матеріал, з якого виготовлено транзистор: Г (1) – германій, К (2) – кремній, А (3) – арсенід галію.

Другий символ – буква Г, що означає біполярний транзистор.

Третій символ – цифра, яка вказує потужність і частотні властивості транзистора (таблиця 12.1).

Таблиця 12.1

Позначення транзисторів по потужності і частотному діапазону

Потужність	Частота		
	НЧ	СЧ	ВЧ
Малопотужні	КТ1...	КТ2...	КТ3...
Середньої потужності	КТ4...	КТ5...	КТ6...
Потужні	КТ7...	КТ8...	КТ9...

Четвертий і п'ятий символи – двозначне число, яке вказує порядковий номер розробки.

Шостий символ – буква, що позначає параметричну групу приладу.

Режими роботи транзистора

Залежно від полярності напруг, прикладених до емітерного і колекторного переходів транзистора, розрізняють чотири режими його роботи.

Активний режим. На емітерний перехід подана пряма напруга, а на колекторний – зворотна. Це режим є основним режимом роботи транзистора.

Оскільки напруга в колі колектора значно перевищує напругу, підведену до емітерного переходу, а струми в колах емітера і колектора практично рівні, слід очікувати, що потужність корисного сигналу на виході схеми (в колекторному колі) може виявитися набагато більшою, ніж у вхідному (емітерній) колі транзистора.

Режим відсічення. До обох переходів підводиться зворотна напруга. У них протікає лише незначний струм, обумовлений рухом неосновних носіїв заряду.

Режим насичення. Обидва переходи знаходяться під прямою напругою. Струм у вихідному колі транзистора максимальний і практично не регулюється струмом вхідного кола.

Інверсний режим. До емітерного переходу підводиться зворотна напруга, а до колекторного – пряма. Емітер і колектор міняються своїми ролями. Цей режим, як правило, не відповідає нормальним умовам експлуатації транзистора.

Три схеми включення транзистора

Залежно від того, який електрод транзистора є загальним для вхідного і вихідного сигналу, розрізняють три схеми включення транзистора: із загальною базою (ЗБ); із загальним емітером (ЗЕ) і з загальним колектором (ЗК).

У цих схемах джерела постійної напруги E_1 , E_2 і резистор R_H забезпечують режими роботи транзистора по постійному струму. Вхідні сигнали змінного струму $U_{вх}$ змінюють струм транзистора, а відповідно, і струм колектора. Приріст струму колектора (або струму емітера для схеми ЗК) створює збільшення напруг на навантажувальних резисторах. Ці напруги і є вихідними сигналами.

Для схеми із **загальною базою** (рис.12.3) вхідні характеристика – $I_E = f(U_{ЕБ})$ при $U_{КБ} = \text{const}$ (рис.12.4, а) вона являє собою ВАХ емітерного переходу в прямому зміщенні

$$I_E = I_{ЕБ0} \left(e^{\frac{qU_{ЕБ}}{kT}} - 1 \right).$$

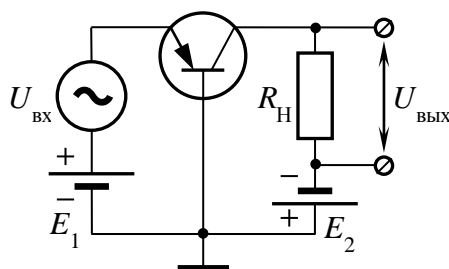


Рис.12.3. Схема включення транзистора з ЗБ

Збільшення зворотної напруги $U_{КБ}$, прикладеної до колекторного переходу, викликає зменшення ширини бази, що призводить до зростання струму емітера при незмінній напрузі $U_{ЕБ}$. Оскільки збільшується градієнт концентрації неосновних носіїв в базі і знижується ймовірність їх рекомбінації.

Вихідна характеристика для схеми з ЗБ – $I_K = f(U_{КБ})$ при $I_E = \text{const}$ (рис.12.4,б)

$$I_K = \alpha I_E - I_{КБ0} \left(e^{\frac{qU_{КБ}}{kT}} - 1 \right).$$

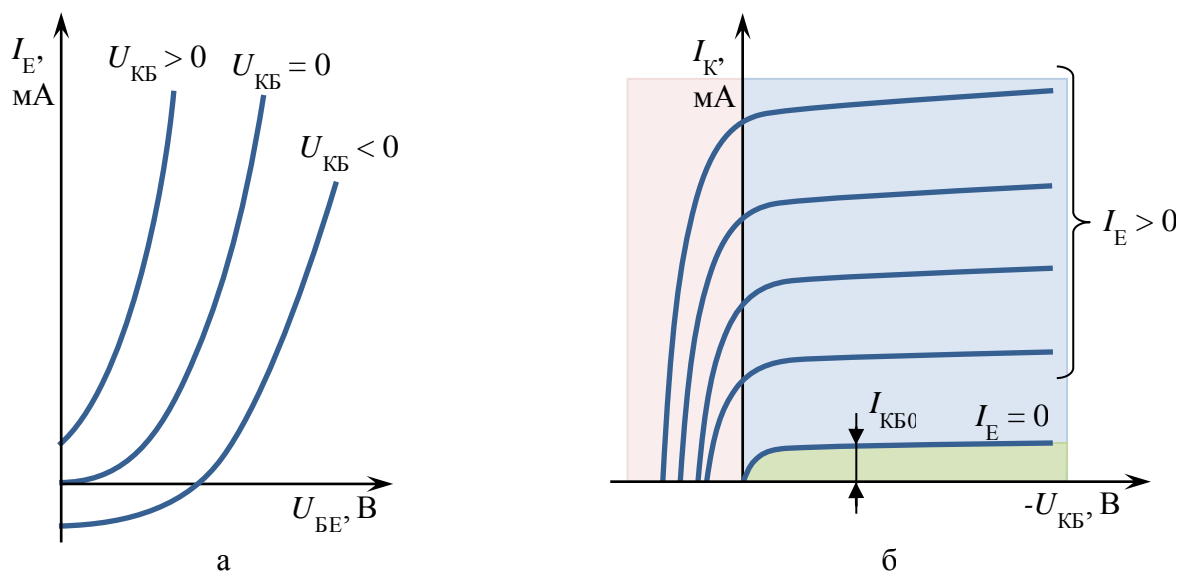


Рис.12.4. Сімейство ВАХ для схеми включення з ЗБ:
а – вхідні; б – вихідні

В активному режимі роботи транзистора (коли колекторний перехід зміщено у зворотному напрямку), вольтамперні характеристики являють собою майже прямі лінії, що йдуть з дуже невеликим нахилом. Це пояснюється тим, що колекторний струм створюється за рахунок дифузії носіїв зарядів, що проникають з емітера через базу в колектор і незначно залежить від напруги, прикладеної до колекторного переходу. Навіть при $U_{KB} = 0$, в колекторному колі протікає струм $I_K = \alpha I_E$, тобто контактної різниці потенціалів колекторного переходу достатньо для екстракції носіїв з бази в колектор.

При $I_E = 0$ вихідна характеристика являє собою характеристику зворотно зміщеного колекторного переходу. В області, що розташована нижче цієї характеристики транзистор працює в режимі відсічення.

При прямому зміщенні колекторного переходу з'являється прямий струм колектора, який спрямовано зустрічно струму αI_E , зумовленого контактною різницею потенціалів колекторного переходу. Результуючий струм в колі колектора зменшується і при певному значенні напруги U_{KB} , коли шар, що запирає зникне зовсім, змінить свій знак на протилежний.

Особливості схеми включення з ЗБ:

1. Низький вхідний опір (одиниці...десятки Ом)

Оскільки струм емітера – найбільший з усіх струмів транзистора, то схема з ЗБ, де він є вхідним, має малий вхідний опір для змінної складової струму сигналу

$$R_{\text{вх ЗБ}} = \frac{E_1 + U_{\text{вх}}}{I_E}.$$

Фактично цей опір дорівнює опорі емітерного переходу r_E включеного в прямому напрямку. Цей опір чинить шунтуючу дію на попередні каскади і

різко знижує їх посилення по напрузі і потужності.

2. Температурна стабілізація вища, ніж в схемі з ЗЕ.

Початковий колекторний струм в схемі з ЗЕ

$$I_{KE0} = \frac{I_{KB0}}{1 - \alpha}$$

при $\alpha = 0,95 \dots 0,99$ в десятки разів більше теплового струму I_{KB0} . Хоча α з підвищенням температури змінюється незначно але $1/(1-\alpha)$ це має істотний вплив.

3. Низький коефіцієнт передачі струму

$$K_{IЗБ} = \alpha = \frac{I_E}{I_K} \approx 0,95 \dots 0,99$$

схема з ЗБ не дозволяє отримати коефіцієнт збільшення за струмом більше 1.

4. Коефіцієнт передачі по напрузі може бути досить великим (десятки – сотні одиниць), так як визначається, в основному, співвідношенням між опором навантаження і вхідним опором

$$K_{UЗБ} = \frac{U_{вих}}{U_{вх}} = \frac{I_K R_H}{E_1} = \frac{I_K R_H}{I_E R_{вх ЗБ}} = \alpha \frac{R_H}{R_{вх ЗБ}}.$$

5. Коефіцієнт передачі за потужністю

$$K_{PЗБ} = K_{UЗБ} K_{IЗБ} = \alpha^2 \frac{R_H}{R_{вх ЗБ}}.$$

Для реальних схем коефіцієнт передачі за потужністю дорівнює десяткам – сотням одиниць.

Для схеми із загальним емітером (рис.12.5) вхідною характеристикою є залежність $I_B = f(U_{BE})$ при $U_{KE} = \text{const}$ (рис.12.6, а), а вихідний – $I_K = f(U_{KE})$ при $I_B = \text{const}$ (рис.12.6, б).

При напрузі $U_{KE} = 0$ вхідна характеристика являє собою ВАХ двох паралельно включених переходів в прямому зміщенні. При підвищенні напруги U_{KE} ймовірність рекомбінації носіїв заряду в базі зменшується, отже, зменшується і струм бази (майже всі носії втягуються в колектор), що видно з вхідних характеристик.

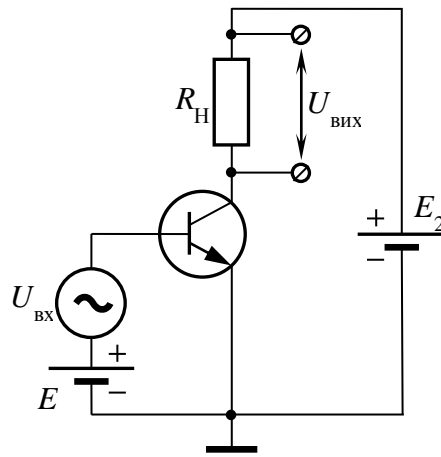


Рис.12.5. Схема включення транзистора з ЗЕ

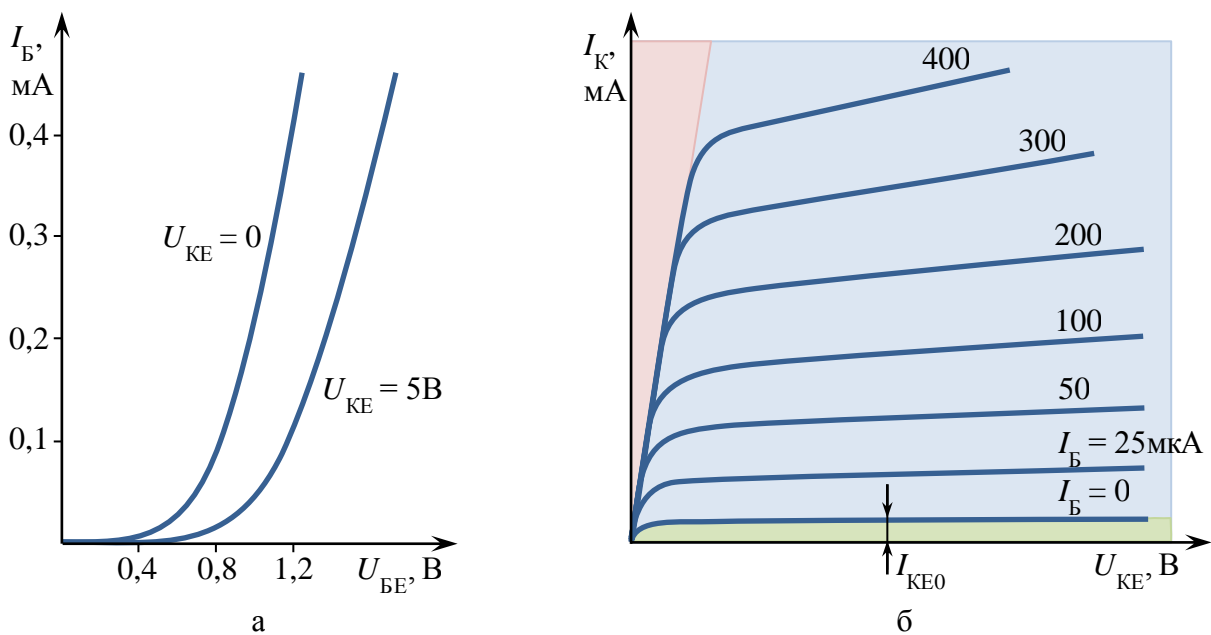


Рис.12.6. Сімейство ВАХ для схеми включення з ЗЕ:
а – вхідні; б – вихідні

В схемі з ЗЕ напруга прикладена до колекторного переходу, дорівнює $U_{KE} - U_{BE}$, оскільки ці напруги виявляються включеними зустрічно між точками колектор-база. Тому при напрузі $|U_{KE}| < |U_{BE}|$ колекторний перехід виявляється включеним в прямому напрямку, при цьому крутизна вихідних характеристик велика (транзистор працює в режимі насичення). На ділянці де $|U_{KE}| > |U_{BE}|$ крутизна характеристик мала і вони будуть проходити майже паралельно осі абсцис (активний режим роботи транзистора). Невелике зростання струму на пологих ділянках характеристик обумовлено збільшенням напруги U_{BE} , необхідним для підтримки струму бази на заданому рівні, оскільки при збільшенні напруги U_{KE} ширина бази зменшується, і струм бази знижується. А також внаслідок ударної іонізації зворотного зміщеного колекторного переходу.

Особливості схеми включення з ЗЕ

1. Вхідний опір транзистора в схемі з ЗЕ значно більший, ніж в схемі з ЗБ.

Оскільки вхідним струмом для схеми з ЗЕ є не струм емітера, а малий за величиною струм бази

$$R_{\text{вхЗЕ}} = \frac{E_1 + U_{\text{вх}}}{I_{\text{Б}}} = \frac{E_1 + U_{\text{вх}}}{I_{\text{Е}} - I_{\text{К}}} \left| \times \frac{1}{I_{\text{Е}}} = \frac{\frac{E_1 + U_{\text{вх}}}{I_{\text{Е}}}}{\frac{I_{\text{Е}} - I_{\text{К}}}{I_{\text{Е}}}} = \frac{R_{\text{вхЗБ}}}{1 - \alpha} \right.$$

Для схеми із загальним емітером вхідний опір лежить в діапазоні сотні Ом – одиниці кОм.

2. Можливість отримання коефіцієнта посилення за струмом порядку декількох десятків і навіть сотень одиниць

$$K_{I\text{ЗЕ}} = \beta = \frac{I_{\text{К}}}{I_{\text{Б}}} = \frac{I_{\text{К}}}{I_{\text{Е}} - I_{\text{К}}} \left| \times \frac{1}{I_{\text{Е}}} = \frac{\frac{I_{\text{К}}}{I_{\text{Е}}}}{\frac{I_{\text{Е}} - I_{\text{К}}}{I_{\text{Е}}}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \right.$$

3. Коефіцієнт передачі по напрузі

$$K_{U\text{ЗЕ}} = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{I_{\text{К}} R_{\text{Н}}}{E_1} = \frac{I_{\text{К}} R_{\text{Н}}}{I_{\text{Б}} R_{\text{вхЗЕ}}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{вхЗЕ}}},$$

підставивши значення $R_{\text{вхЗЕ}} = \frac{R_{\text{вхЗБ}}}{1 - \alpha}$, отримаємо $K_{U\text{ЗЕ}} = \alpha \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{вхЗБ}}}$, тобто

коефіцієнт передачі по напрузі в схемі з ЗЕ точно такий же, як і в схемі з ЗБ – і становить десятки – сотні одиниць.

4. Коефіцієнт передачі за проектною потужністю

$$K_{P\text{ЗЕ}} = K_{U\text{ЗЕ}} K_{I\text{ЗЕ}} = \frac{\alpha^2}{1 - \alpha} \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{вхЗБ}}},$$

що значно більше, ніж в схемі із загальною базою (сотні – десятки тисяч одиниць).

5. Можливість живлення схеми від одного джерела напруги, оскільки на базу і колектор подається напруга живлення одного знаку.

6. Недоліком схеми з ЗЕ є менша температурна стабілізація в порівнянні зі схемою з ЗБ.

В схемі з загальним колектором (рис.12.7) опір навантаження $R_{\text{Н}}$ включено до вхідного кола, вхідним струмом є струм бази $I_{\text{Б}}$, а вихідним струмом є струм емітера $I_{\text{Е}}$.

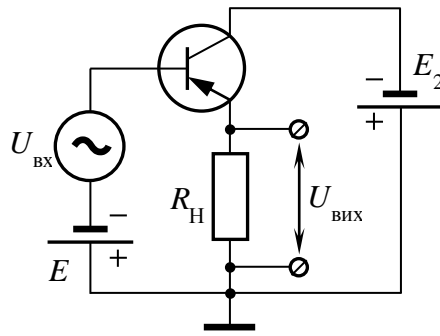


Рис.12.7. Схема включення транзистора з ЗК

Схему з ЗК часто називають *емітерним повторювачем*, тому що, по-перше, навантаження включено тут в коло емітера, а по-друге, вихідна напруга в точності повторює вхідний і за величиною ($K_{U_{OK}} \approx 1$) і за фазою.

Особливості схеми включення з ОК

1. Коефіцієнт прямої передачі струму для цієї схеми досить високий, оскільки вхідним струмом схеми з ЗК є струм бази, а вихідним струм емітера

$$K_{I_{ЗК}} = \frac{I_E}{I_B} = \frac{I_K + I_B}{I_B} = \beta + 1.$$

2. Порівняно велике значення вхідного опору.

3. Особливістю схеми з ЗК (і її головним недоліком) є те, що вона не дозволяє отримати підсилення по напрузі більше одиниці

$$K_{U_{ЗК}} = \frac{U_{вих}}{U_{вх}} = \frac{I_E R_H}{I_B R_{вхЗК}},$$

враховуючи що $\frac{I_E}{I_B} = \beta + 1 = \frac{1}{1 - \alpha}$, отримаємо $K_{U_{ЗК}} = \frac{R_H}{1 - \alpha R_{вхЗК}} = \frac{R_H}{R_{вхЗБ} + R_H}$.

Оскільки $R_{вхЗБ}$ представляє собою дуже малу величину, то можна вважати, що $K_{U_{OK}} \approx 1$, тобто посилення по напрузі в цій схемі немає.

4. Коефіцієнт передачі за проектною потужністю

$$K_{P_{ЗК}} = K_{U_{ЗК}} K_{I_{ЗК}} = \frac{1}{1 - \alpha} \frac{R_H}{R_{вхЗБ} + R_H},$$

що на практиці він становить десятки – сотні одиниць.

Схема з ЗК застосовується головним чином для узгодження опорів між окремими каскадами багатокаскадного підсилювача або між виходом підсилювача і низькоомним навантаженням.

Транзистор, як активний лінійний чотирьополіусник

Активними чотирьополіусниками називають пристрої, які мають два вхідних і два вихідних затискача і мають здатність підсилювати потужність електричних сигналів, що підводяться до них.

Для великого класу електронних схем, званих лінійними, струми і напруги складаються з порівняно великих постійних складових (I, U) і малих змінних складових ($\Delta I = i, \Delta U = u$). Змінні складові в цих схемах представляють основний інтерес. Прикладом таких схем є підсилювачі. У межах малих змін напруги і струмів статичні характеристики транзистора приблизно є лінійними, тому функціональні залежності змінних складових також будуть лінійними. Для лінійних схем характерна робота транзистора в активному режимі.

Коли транзистор працює в лінійному режимі, для розрахунків зручніше користуватися не характеристиками, а параметрами. Параметри широко застосовуються на практиці також для контролю якості транзисторів.

Характеристичні параметри – величини, що визначають зв'язок між малими змінами струмів і напруг в транзисторі. При введенні параметрів транзистор розглядають як чотирьополіусник, на вході якого діє напруга U_1 і струм I_1 , а на виході – напруга U_2 і струм I_2 .

Якщо прийняти в якості незалежних змінних величини I_1 і U_2 , а в якості залежних I_2 і U_1 , то можна записати:

$$\begin{cases} U_1 = f(I_1, U_2); \\ I_2 = g(I_1, U_2). \end{cases}$$

Диференціюючи вираження для I_2 і U_1 , по змінним I_1 і U_2 , отримаємо:

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

Будемо розглядати збільшення струмів і напруг dI_1, dI_2, dU_1 і dU_2 , що входять в останній вираз, як амплітуди (або діючі значення) змінних складових сигналів i_1, i_2, u_1, u_2 . Введемо позначення:

$$h_{11} = \frac{\partial U_1}{\partial I_1}; \quad h_{12} = \frac{\partial U_1}{\partial U_2}; \quad h_{21} = \frac{\partial I_2}{\partial I_1}; \quad h_{22} = \frac{\partial I_2}{\partial U_2}.$$

В цьому випадку можна записати:

$$\begin{cases} u_1 = h_{11} \cdot i_1 + h_{12} \cdot u_2; \\ i_2 = h_{21} \cdot i_1 + h_{22} \cdot u_2. \end{cases}$$

Коефіцієнти h_{11} , h_{12} , h_{21} и h_{22} , що входять в ці рівняння, називаються h -параметрами транзистора. Кожен з цих параметрів має певний фізичний зміст:

h_{11} – вхідний опір транзистора при короткому замиканні на виході для змінної складової струму (тобто при $U_2 = \text{const}$);

h_{12} – коефіцієнт зворотного зв'язку по напрузі при розімкнутому вході для змінної складової струму (тобто при $I_1 = \text{const}$);

h_{21} – коефіцієнт передачі струму при короткому замиканні виходу за змінним струмом (тобто при $U_2 = \text{const}$);

h_{22} – вихідна провідність при розімкнутому вході для змінної складової струму (тобто при $I_1 = \text{const}$).

Наведені вище рівняння дозволяють уявити транзистор у вигляді еквівалентної схеми (рис.12.8). Таку схему називають двогенераторною або формальною.

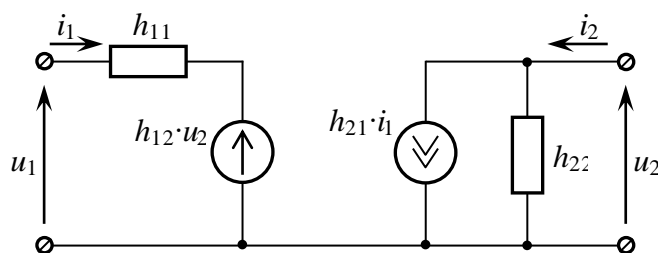


Рис.12.8. Формальна еквівалентна схема транзистора

Значення h -параметрів залежать від схеми включення транзистора (ЗБ, ЗЕ або ЗК), від режиму роботи по постійному струму (задається вхідним струмом і вихідною напругою), від температури і від частоти напруги, що підводиться.

Визначення параметра h_{11E} здійснюється по вхідній характеристиці транзистора для схеми ЗЕ: $I_B = f(U_{BE}) \mid U_{KE} = \text{const}$ (рис.12.9).

В заданій по постійному струму робочій точці $A (I_B^A, U_{BE}^A)$ при постійній колекторній напрузі U_{KE} задаємо негативне і позитивне збільшення струму бази. При цьому отримуємо точки B і C на вхідній характеристиці. Вхідний опір транзистора визначається з виразу:

$$h_{11E} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{U_{BE}^B - U_{BE}^A}{I_{BE}^B - I_{BE}^A} + \frac{U_{BE}^A - U_{BE}^C}{I_{BE}^A - I_{BE}^C} \right), \text{ при } U_{KE} = \text{const}.$$

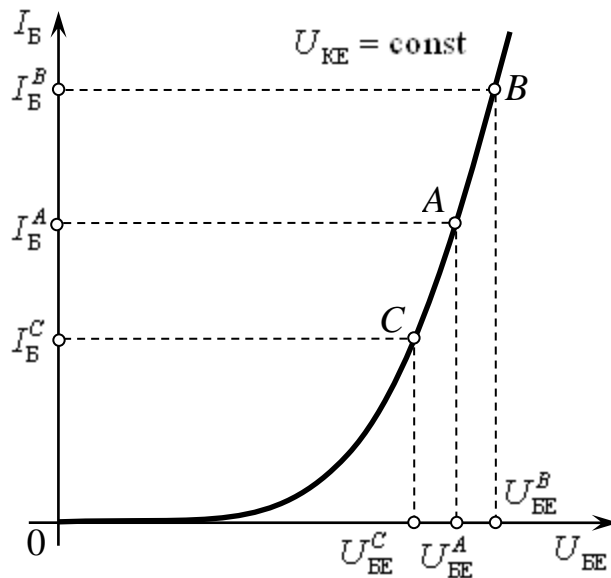


Рис.12.9. Визначення h_{11E} - параметра за вхідними характеристикам транзистора

Для визначення коефіцієнта зворотного зв'язку по напрузі h_{12E} необхідно мати кілька вхідних характеристик (рис.12.10). В заданій по постійному струму робочій точці $A (I_B^A, U_{BE}^A)$ при постійному струмі бази I_B^A задаємо збільшення напруги колектора $\Delta U_{KE} = U_{KE}^B - U_{KE}^A$ (переходимо на сусідню вхідну характеристику, відповідну U_{KE}^B).

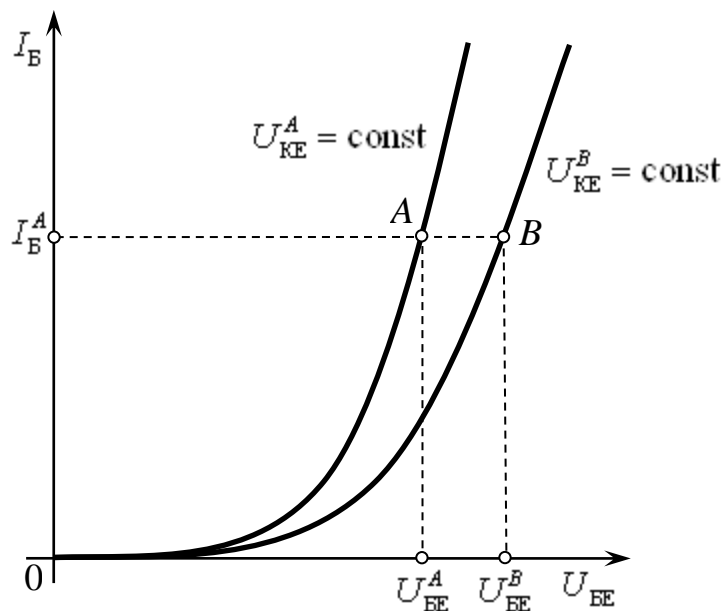


Рис.12.10. Визначення h_{12E} -параметра за вхідними характеристиками транзистора

При цьому коефіцієнт зворотного зв'язку може бути отриманий з виразу:

$$h_{12E} = \frac{U_{BE}^B - U_{BE}^A}{U_{KE}^B - U_{KE}^A}, \text{ при } I_B = \text{const.}$$

Коефіцієнт h_{12E} в режимі холостого ходу на виході по змінному струму показує, яка частка вихідної напруги за рахунок зворотного зв'язку надходить на вхід транзистора.

Для визначення h_{21E} і h_{22E} скористаємося вихідними характеристиками транзистора $I_K = f U_{KE} \mid I_B = \text{const}$ (рис.12.11).

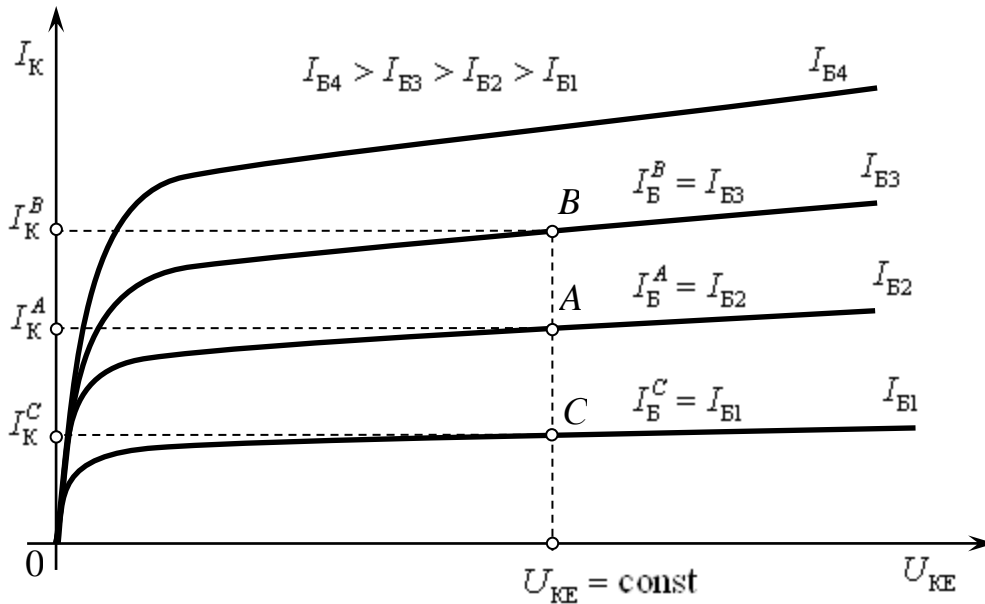


Рис.12.11. Визначення параметра h_{21E} по вихідним характеристикам транзистора

Проведемо через задану по постійному струму робочу точку $A (I_B^A, U_{KE}^A)$ вертикальну пряму до перетину з сусідніми характеристиками (точки B і C). Отримуємо зміни струму колектора $\Delta I_{K1} = I_K^B - I_K^A$ і $\Delta I_{K2} = I_K^A - I_K^C$, що відповідають змінам струму бази $\Delta I_{B1} = I_B^B - I_B^A$ і $\Delta I_{B2} = I_B^A - I_B^C$ при $U_{KE} = \text{const}$. Коефіцієнт передачі струму бази h_{21E} може бути отриманий з виразу:

$$h_{21E} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{I_K^B - I_K^A}{I_B^B - I_B^A} + \frac{I_K^A - I_K^C}{I_B^A - I_B^C} \right), \text{ при } U_{KE} = \text{const.}$$

Для визначення вихідної провідності h_{22E} при постійному струмі бази в схемі з загальним емітером задаємо позитивне і негативне прирощення колекторної напруги $\Delta U_{KE1} = U_{KE}^B - U_{KE}^A$ і $\Delta U_{KE2} = U_{KE}^A - U_{KE}^C$ (рис.12.12) і знаходимо прирощення струму колектора, що виходять при цьому $\Delta I_{K1} = I_K^B - I_K^A$, $\Delta I_{K2} = I_K^A - I_K^C$

$$h_{22E} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{I_K^B - I_K^A}{U_{KE}^B - U_{KE}^A} + \frac{I_K^A - I_K^C}{U_{KE}^A - U_{KE}^C} \right), \text{ при } I_B = \text{const.}$$

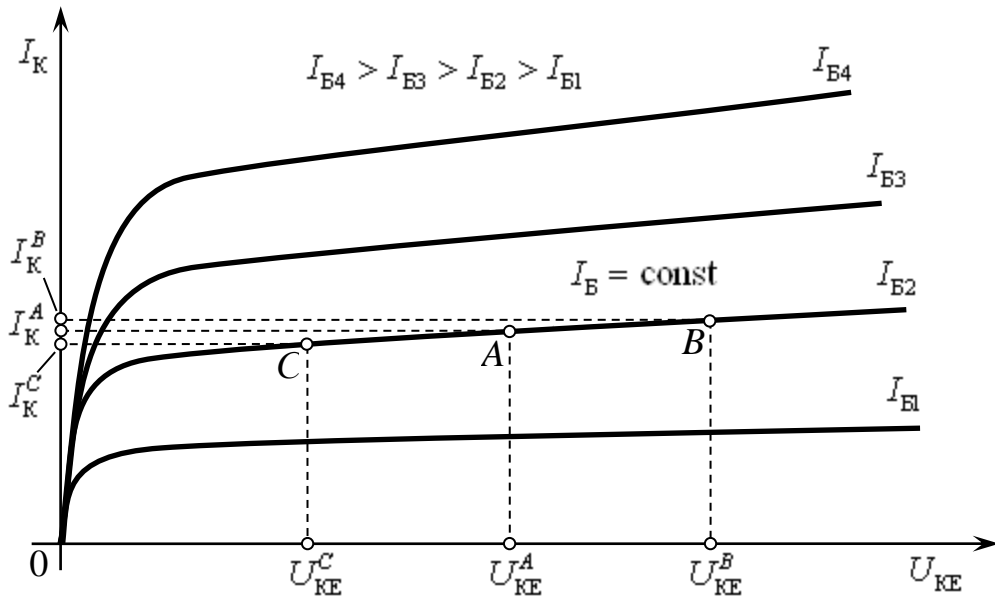


Рис.12.12. Визначення параметра h_{22E} по вихідним характеристикам транзистора

При визначенні h -параметрів робоча точка A задається виходячи з режиму роботи транзистора по постійному струму, характерному для конкретної схеми включення.