

### Лекція 3. Схеми включення біполярних транзисторів

Біполярним транзистором називають напівпровідниковий прилад, який має два р-п переходи і три виводи та здатний підсилювати потужність сигналу. Біполярні транзистори дозволяють підсилювати, генерувати та перетворювати електричні коливання в широкому діапазоні частот і потужностей. Відповідно до цього їх можна розділити на низькочастотні (до 3 МГц), середньочастотні (3-30 МГц), високочастотні (30-300 МГц), надвисокочастотні (більше 300 МГц). За потужністю їх можна розділити на малопотужні (не більше 0,3 Вт), середньої потужності (0,3-1,5 Вт) і великої потужності (більше 1,5 Вт).

Основним елементом біполярного транзистора є кристал напівпровідника (германію чи кремнію), у якому створено три області з різною провідністю. Дві крайні області завжди мають провідність однакового типу, яка протилежна провідності в середній області. Схематична будова площинного біполярного транзистора наведена на рисунку 3.1.

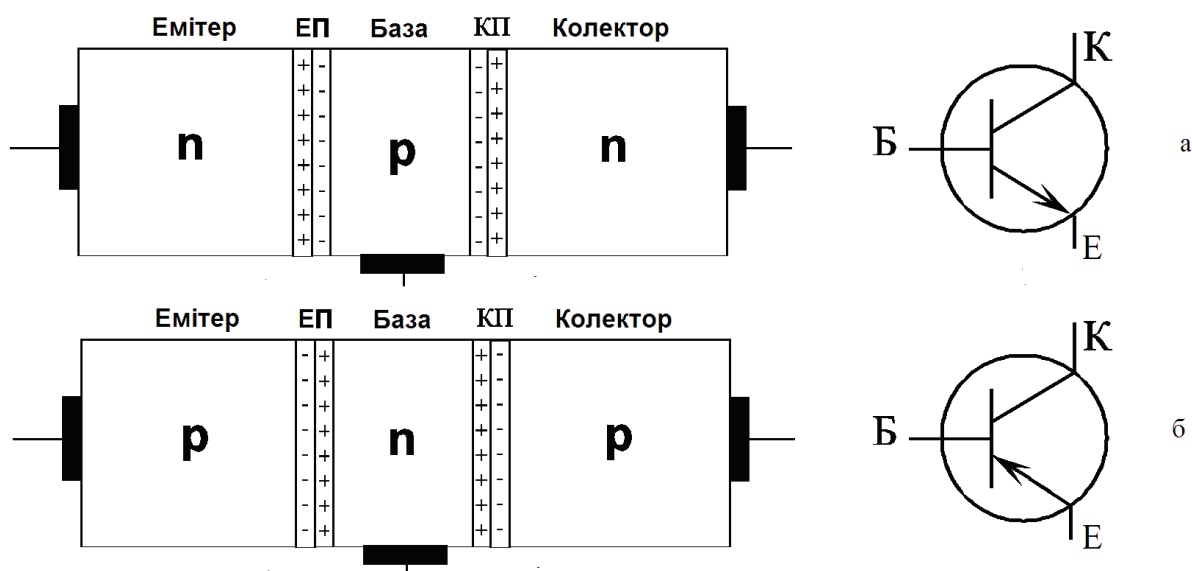


Рисунок 3.1 – Схематичне зображення біполярного транзистора: а - транзистор типу n-p-n, б - транзистор типу p-n-p

Внутрішня область монокристала транзистора, яка розташована між р-п переходами називається базою. Зовнішня область, яка призначена для ін-

жектування носіїв у базу, називається емітером. Інша область яка витягує носії з бази (екстракція носіїв), називається колектором. Перехід між емітером і базою називається емітерним переходом, а перехід між базою і колектором - колекторним. Існує два типи біполярних транзисторів: n-p-n (рис. 3.1а) та p-n-p (рис. 3.1б).

Залежно від того, який з виводів є спільним для вхідного і вихідного електричних кіл, розрізняють три схеми включення біполярного транзистора: з спільною базою (СБ) (рис. 3.2), з спільним емітером (СЕ) (рис. 3.3), з спільним колектором (СК) (рис. 3.4). При будь-якій схемі включення транзистора (при роботі в активному режимі) полярність включення джерел живлення повинна бути вибрана такою, щоб емітерний перехід був зміщений в прямому напрямку, а колекторний - в зворотному.

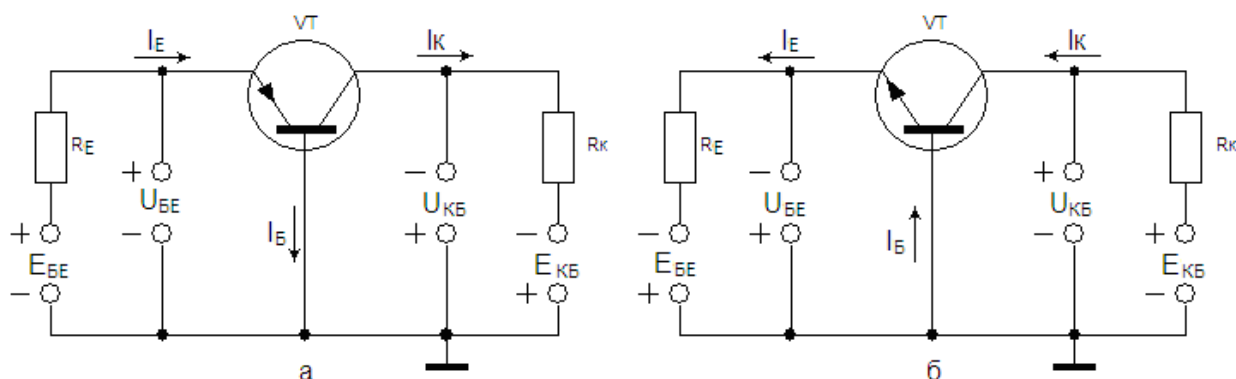


Рисунок 3.2 – Схеми включення біполярних транзисторів p-n-p (а) і n-p-n (б) з спільною базою

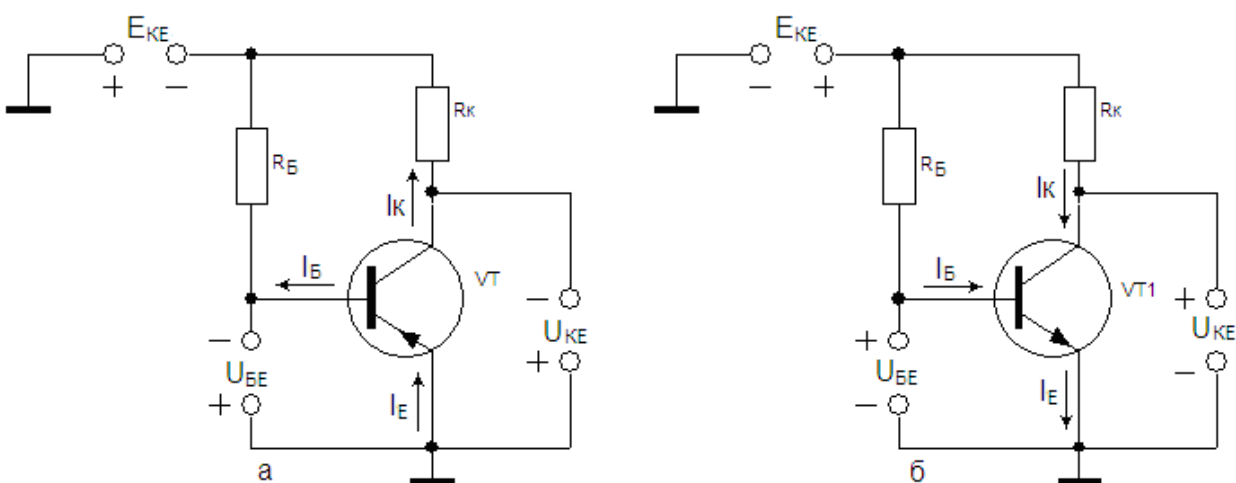


Рисунок 3.3 – Схеми включення біполярних транзисторів n-p-n (а) і p-n-p (б) з спільним емітером

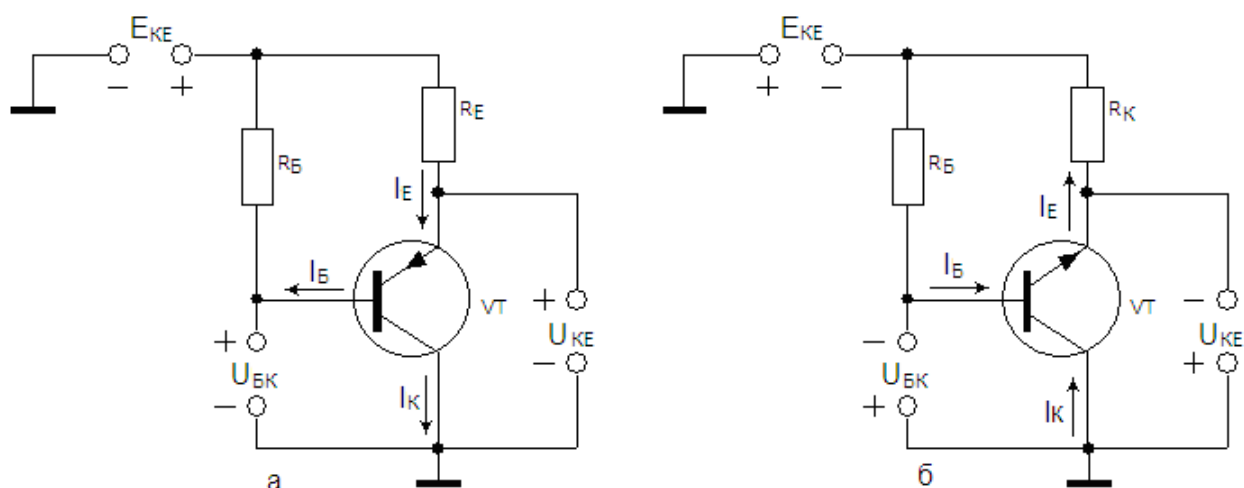


Рисунок 3.4 – Схеми включення біполярних транзисторів p-n-p (а) і n-p-n (б) з спільним колектором

VT – біполярний транзистор;

$E_{EB}$  – напруга джерела живлення емітерного кола;

$U_{EB}$  – напруга між емітером та базою;

$E_{KB}$  - напруга джерела живлення колекторного кола;

$U_{KB}$  - напруга між колектором та базою;

$I_E, I_K, I_B$  - струми відповідно емітера, колектора та бази;

$R_K$  - опір навантаження в колекторному колі;

$R_E$  - резистор в колі емітера.

В схемах з СЕ СК на відміну від схеми з СБ, використовується тільки одне джерело живлення  $E_{KE}$ , яке живить і колекторне, і базове кола. Напруга живлення базового кола  $U_{BE}$  створюється подільником з резистора  $R_B$  та вхідного опору транзистора. Резистори  $R_E$  в схемі з СБ та  $R_B$  в схемі з СЕ мають бути обов'язково, щоб транзистор не вийшов із ладу під прямою напругою.

Схему із спільною базою використовують для підсилення по напрузі, з спільним емітером - по струму і по напрузі, з спільним колектором (емітерний повторювач) - для підсилення по струму.

Вхідний опір  $R_{вх}$  транзистора змінному струмові визначається виразом:

$$R_{ex} = \frac{\Delta U_{ex}}{\Delta I_{ex}}, \quad (3.1)$$

де  $\Delta U_{\text{вх}}$  - зміна вхідної напруги;  $\Delta I_{\text{вх}}$  - зміна вхідного струму.

Коефіцієнт підсилення транзистора по струмові в схемі із спільною базою:

$$\alpha = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_E}. \quad (3.2)$$

Коефіцієнт підсилення транзистора по струмові в схемі із спільним емітером:

$$\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B}, \quad (3.3)$$

де  $\Delta I_K$ ,  $\Delta I_E$ ,  $\Delta I_B$  - зміни струмів відповідно колектора, емітера і бази.

Оскільки

$$\Delta I_B = \Delta I_E - \Delta I_K = \Delta I_E - \alpha \Delta I_E = \Delta I_E (1 - \alpha) \quad (3.4)$$

Тоді

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

Потужність втрат на колекторі:

$$P_K = U_K I_K, \quad (3.6)$$

де  $U_K$  - напруга на колекторі;  $I_K$  - струм колектора.

До основних параметрів біполярних транзисторів відносять:  $U_{\text{ЕК}}$  - напругу між емітером і колектором, величина якої може призвести до пробію колекторного р-п переходу;  $I_K$  - величину струму колектора, яка визначає нагрівання емітерного р-п переходу;  $P_K$  - потужність розсіювання колекторного р-п переходу, яка впливає на його нагрівання. Тому, під час вибору транзисторів, ці розрахункові величини порівнюють з допустимими значеннями, поданими в паспортних даних для кожного з типів транзисторів:

$$U_{\text{ЕК}} \leq U_{\text{ЕКдон}}; \quad I_K \leq I_{\text{Кдон}}; \quad P_K \leq P_{\text{Кдон}}$$

До параметрів транзисторів відносять також граничну частоту  $f_{\text{гр}}$ , на якій передатний коефіцієнт за струмом  $h_{21e}$  дорівнює одиниці.

З рисунків 3.2 – 3.4 видно, що застосування транзисторів типів р-п-р

або n-p-n відрізняється лише полярністю джерел живлення  $E_B$  та  $E_K$ , а в іншому ці транзистори діють однаково. Тому немає значення, на якому типі, p-n-p або n-p-n, вивчати роботу транзистора. Проте зручніше за все вивчати принцип дії транзистора p-n-p у схемі зі спільною базою (рис. 3.2) в активному режимі (режимом називається сукупність напруг та струмів електродів).

Активним є такий режим, за якого емітерний перехід перебуває під прямою напругою, а колекторний - під зворотною (рис. 3.5).

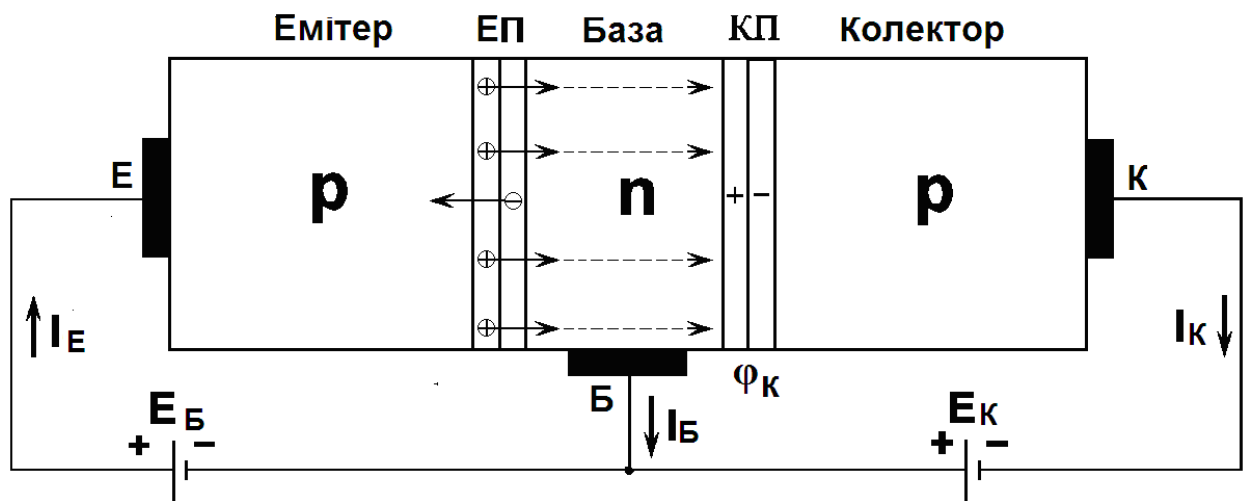


Рисунок 3.5 – Транзистор зі спільною базою в активному режимі

У схемі зі спільною базою входним є коло емітера, а вихідним - коло колектора. Щоб з'ясувати принцип дії транзистора, необхідно показати його можливість підсилення потужності. Для цього покажемо, що витрати потужності у вихідному колі (колектора) більші, ніж у входному колі (емітера). Саме цим буде показана можливість підсилення потужності.

Під прямою напругою  $U_{EB}$  виникає інжекція дірок (+) з емітера в базу і електронів (-) з бази в емітер. Так виникає прямий струм емітера  $I_E$ .

Концентрація домішок в емітері на кілька порядків більша за базу і колектор, тобто дірок більше, ніж електронів. Тому через базу тече в основному дірковий струм.

Дірки потрапляють до колекторного переходу, де зустрічають прискорювальне поле, яке зумовлене контактною різницею потенціалів  $\phi_K$  і зовнішньою напругою  $U_{KB}$ . Це поле в колекторному переході захоплює дірки і пере-

носить їх в колектор, створюючи саме тим вихідний колекторний струм  $I_K$ .

Вихідний струм  $I_K$  відносно колекторного переходу є зворотним і тому не залежить від напруги  $U_{KB}$  на КП. Він визначається тільки кількістю дірок, які потрапили до колекторного переходу, а ця кількість залежить тільки від струму емітера  $I_E$ , який однозначно визначається лише напругою емітера  $U_{EB}$ . Чим вище напруга  $U_{EB}$  на емітерному переході, тим більше вихідний струм колектора  $I_K$ .

Витрати потужності в колах емітера та колектора.

Потужність у колі емітера:

$$P_E = I_E U_{EB}. \quad (3.7)$$

Потужність у колі колектора:

$$P_K = I_K U_{KB}. \quad (3.8)$$

Струми колектора  $I_K$  та емітера  $I_E$  є близькими

$$I_K \approx I_E. \quad (3.9)$$

Напруга емітера  $U_{BE}$ , будучи прямою, обмежена величиною 0,7 В:

$$U_{BE} < 0,7 \text{ В}. \quad (3.10)$$

Напруга колектора  $U_{KB}$ , то вона є зворотною і тому може бути великою:

$$|U_{KB}| \gg |U_{EB}|. \quad (3.11)$$

Підставляючи співвідношення (3.9) та (3.11) у формули (3.7) та (3.8), маємо

$$P_K \gg P_E, \quad (3.12)$$

тобто, потужність, яка витрачається в колі колектора, більша за потужність у колі емітера. Тоді малою вхідною потужністю  $P_E$  можна керувати великими витратами вихідної потужності  $P_K$ . Саме це і є підсиленням потужності.

### 3.1 Струми в біполярному транзисторі

Розглядаючи транзистор як вузол (рис. 3.5), за законом Кірхгофа маємо:

$$I_E = I_K + I_B. \quad (3.13)$$

Для наочності силу струму будемо імітувати перетином стрілки  $\Pi$  (рис. 3.6).

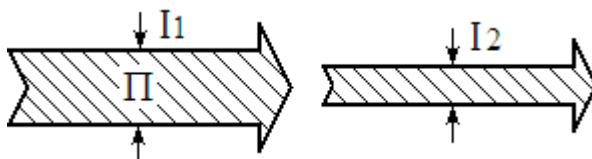


Рисунок 3.6 – Імітація сили струму ( $I_1 > I_2$ )

Струм емітера  $I_E$  є прямим відносно емітерного переходу (рис. 3.7). Він зумовлений інжекцією дірок з емітера в базу і електронів - з бази в емітер.

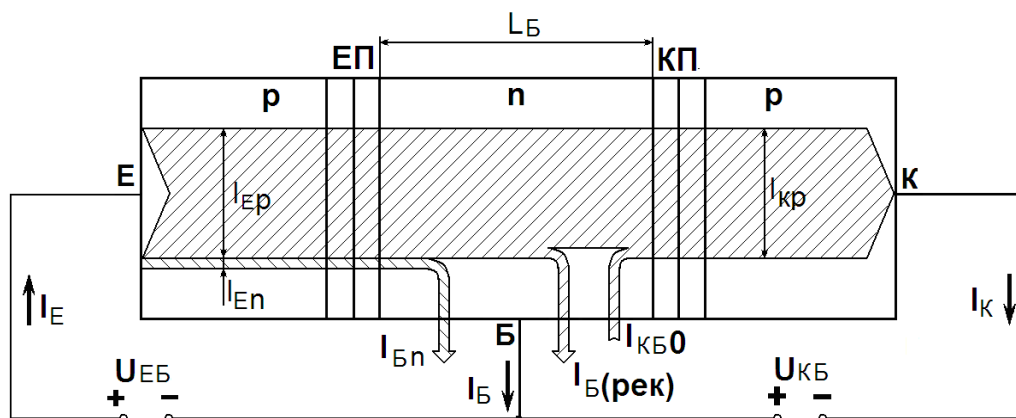


Рисунок 3.7 – Струми в транзисторі

Оскільки концентрація домішок в емітері набагато більша за базу, то корисний для підсилення (в р-п-р транзисторі) дірковий струм  $I_{Ep}$  набагато більший за електронний  $I_{En}$  ( $I_{Ep} \gg I_{En}$ ).

Співвідношення діркового та електронного струмів оцінюється коефіцієнтом інжекції

$$\gamma = \frac{I_{Ep}}{I_E} \quad (3.14)$$

Завжди  $\gamma < 1$ , бо  $I_E = I_{Ep} + I_{En}$ .

Електронний струм  $I_{En}$  для р-п-р транзистора є безкорисним і чим він менше, тим вище підсилювальні властивості транзистора. (Для транзисторів п-р-п навпаки: корисним є електронний струм, а безкорисним - дірковий).

Струм бази  $I_B$  зумовлений трьома складовими: інжекційним електрон-

ним струмом  $I_{Бп}$ , струмом  $I_{Б(рек)}$ , який зумовлений рекомбінацією в базі електронів та дірок, і власним зворотним струмом  $I_{КБ0}$  колекторного переходу. Усі ці струми бази є безкорисними для підсилення. Тому розробники транзисторів завжди намагаються, щоб струм бази  $I_B$  був якомога меншим.

Струм колектора створюється дірками, які досягли колекторного переходу.

Втрата дірок на рекомбінацію в базі оцінюється коефіцієнтом переносу

$$\psi = \frac{I_K}{I_{Ep}} \quad (3.15)$$

Оскільки  $I_{Ep} > I_K$ , то завжди  $\psi < 1$ .

Перемножуючи співвідношення (3.14) і (3.15), одержуємо

$$\gamma \cdot \psi = \frac{I_K}{I_E} = \alpha \quad (3.16)$$

Оскільки струм  $I_E$  є вхідним, а  $I_K$  - вихідним, то вираз (3.16) є *коефіцієнтом передавання струму в схемі зі спільною базою*.

$$\alpha = \frac{I_K}{I_E} \quad (3.17)$$

Коефіцієнт передавання струму в схемі зі спільною базою  $\alpha$  менше одиниці ( $\alpha < 1$ ), але чим ближче до неї, тим вищі підсилювальні властивості транзистора.

### 3.2 Статичні вольт-амперні характеристики біполярних транзисторів

Для розрахунку електричних кіл, які містять транзистори, необхідно знати залежності між струмами і напругами на їх входах та виходах.

Ці залежності є вольт-амперними характеристиками (ВАХ) транзистора. Вони можуть бути статичними і динамічними. Статичні характеристики визначаються при постійних напругах на електродах і за відсутності опору навантаження. Динамічні - при змінних напругах і за наявності опору навантаження.



ВАХ містять інформацію про властивості транзистора у всіх режимах роботи при великих і малих сигналах, у тому числі про зв'язки між параметрами. З вольт-амперних характеристик можна визначити ряд параметрів, які не наводяться в довідковій літературі, а також розрахувати кола зміщення, стабілізації режиму, оцінити роботу транзистора в широкому діапазоні імпульсних і постійних струмів, потужностей і напруг. В основному використовуються два сімейства статичних вольт-амперних характеристик: вхідні та вихідні.

Вхідна статична характеристика - це залежність вхідного струму від вхідної напруги  $I_{вх} = f(U_{вх})$ , вихідна - залежність вихідного струму від вихідної напруги  $I_{вих} = f(U_{вих})$ .

Вхідними ВАХ транзистора в схемі зі **спільною базою** (рис. 3.8) є залежність емітерного струму  $I_E$  від напруги на емітерному переході  $U_{ЕБ}$  при заданій колекторній напрузі  $U_{КБ} = \text{const}$ , тобто

$$I_E = f(U_{ЕБ}) \Big|_{U_{КБ}=\text{const}}. \quad (3.18)$$

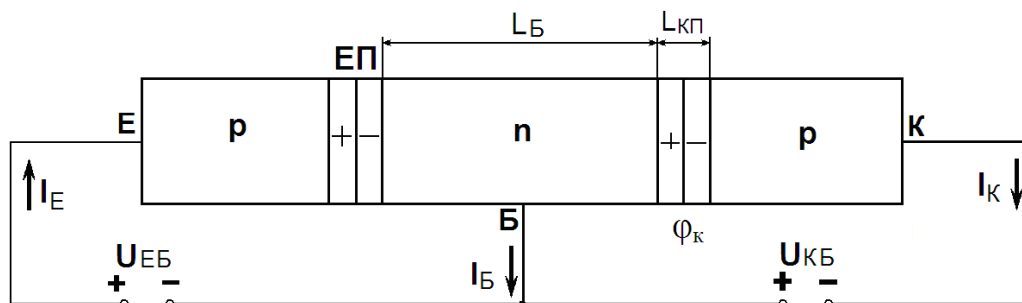


Рисунок 3.8 – Напруги та струми транзистора в схемі зі спільною базою в активному режимі

З рисунка 3.8 видно, що  $U_{ЕБ}$  є прямою напругою ЕП і тому вхідні характеристики (3.18) є близькими до прямої гілки ВАХ p-n переходу, тобто до експоненти. При  $U_{КБ} = 0$  вхідна характеристика проходить через початок координат (рис. 3.9).

Якщо включити зворотну напругу колектора  $U_{КБ} < 0$ , то струм емітера дещо зростає, хоча на перший погляд, кола емітера та колектора здаються не-

залежними. Збільшення  $I_E$  під зворотною напругою  $U_{KB} < 0$  пояснюється *ефектом Ерлі*: під зворотною напругою  $U_{KB} < 0$  ширина колекторного переходу  $L_{KP}$  (рис. 3.8) зростає. Тоді ширина бази  $L_B$  скорочується.

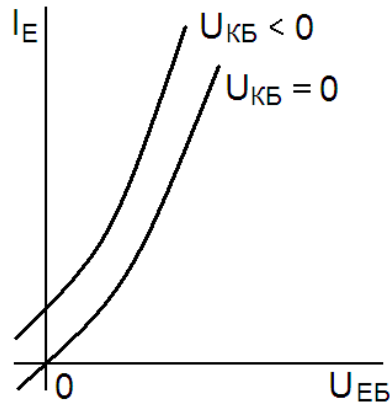


Рисунок 3.9 – Вхідні ВАХ транзистора в схемі зі спільною базою

При цьому зменшується інтенсивність рекомбінації електронів та дірок у базі, через що зростають електронна складова емітерного струму  $I_{En}$  (рис. 3.7) і струм бази  $I_B$  в цілому.

Вихідними характеристиками транзистора у схемі з СБ є залежність вихідного струму, тобто струму колектора  $I_K$ , від вихідної напруги  $U_{KB}$ :

$$I_K = \alpha I_E - I_{K0} \left( e^{\frac{U_{KB}}{\phi_T}} - 1 \right), \quad (3.18)$$

де  $\phi_T = 25$  мВ - температурний потенціал;  $I_{K0}$  - власний струм колекторного переходу при будь-якому  $U_{KB}$ .

При  $U_{KB} \gg \phi_T$ , що завжди виконується, з (3.18) одержуємо

$$I_K = \alpha I_E + I_{KB0} \quad (3.19)$$

Вираз (3.19) є рівнянням ВАХ транзистора в схемі зі спільною базою. Відсутність у цьому виразі напруги  $U_{KB}$  свідчить про те, що колекторний струм  $I_K$  в активному режимі не залежить від напруги колектора (бо є зворотним), а однозначно визначається струмом емітера  $I_E$ , який у свою чергу залежить тільки від напруги  $U_{EB}$ . Щоб змінити струм колектора  $I_K$ , необхідно змінити напругу  $U_{EB}$  емітерного переходу. Надаючи значення струму  $I_E$ , будемо вихідні ВАХ для схеми з СБ (рис. 3.10).

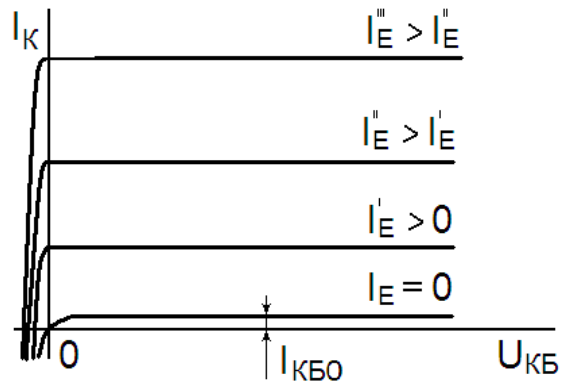


Рисунок 3.10 - Вихідні ВАХ транзистора в схемі з СБ

Особливості вихідних характеристик:

- струм колектора в активному режимі не залежить від колекторної напруги  $U_{КБ}$ , бо є зворотним і через це схема з СБ, крім підсилювача, може використовуватись за джерело струму;

- незважаючи на  $U_{КБ} = 0$ , струм колектора є  $I_K > 0$ ; це пояснюється дією контактної різниці потенціалів  $\phi_K$  (рис. 3.8), яка прискорює дірки в колекторному переході, передаючи їх в колектор і саме тим створюючи колекторний струм.

Включення транзистора зі **спільним емітером** наведено на рисунку 3.11. Тут транзистор n-p-n перебуває під напругами й струмами, які діють у схемі на рисунку 3.3 б. Вхідним є коло бази, а вихідним - коло колектора.

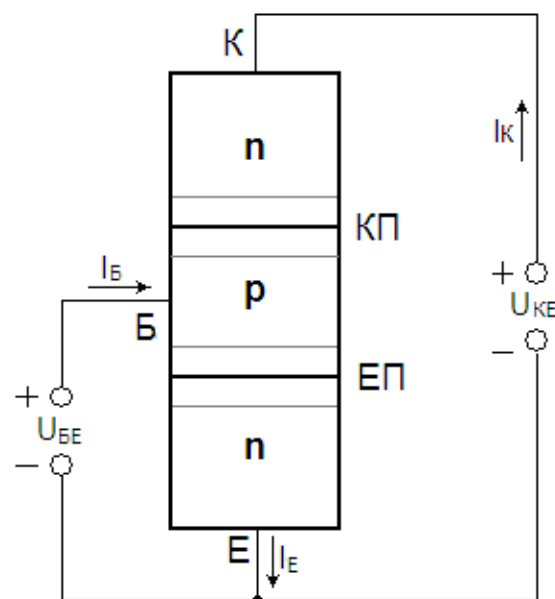


Рисунок 3.11 - Напруги та струми транзистора в схемі зі спільним емітером

Вхідними ВАХ є залежність струму бази  $I_B$  від напруги на емітерному переході  $U_{BE}$  при заданій колекторній напрузі  $U_{KE}$ , тобто

$$I_B = f(U_{BE}) \Big|_{U_{KE} = \text{const}} \quad (3.20)$$

З рисунка 3.11 видно, що  $U_{BE}$  є прямою напругою емітерного переходу.

Тому вхідна характеристика є близькою до прямої гілки ВАХ p-n переходу, тобто до експоненти, яка при  $U_{KE} = 0$  проходить через початок координат (рис. 3.12).

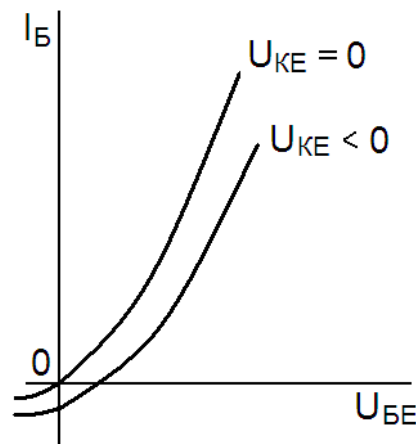


Рисунок 3.12 - Вхідні ВАХ транзистора в схемі зі спільним емітером

Якщо включити зворотну напругу колектора  $U_{KE} < 0$ , то струм бази дещо зменшується. Це пояснюється **ефектом Ерлі**: Під зворотною напругою  $U_{KE} < 0$  розширюється колекторний перехід  $L_{KP}$ , внаслідок чого скорочується база  $L_B$ . Через це зменшується інтенсивність рекомбінацій електронів та дірок і тому зменшуються складова струму бази  $I_{B(\text{рек})}$  (рис. 3.7) і струм бази в цілому.

Вихідними ВАХ транзистора в схемі зі спільним емітером є залежність вихідного струму  $I_K$  від вихідної напруги  $U_{KB}$ , яку можна одержати підстановкою (3.13) у (3.19) і розв'язанням знайденого співвідношення відносно  $I_K$ :

$$I_K = \beta I_B + (\beta + 1) I_{KB0} \quad (3.21)$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (3.22)$$

коефіцієнт передавання струму в схемі зі спільним емітером.

Оскільки  $\alpha$  близько до одиниці і  $\alpha < 1$ , то  $\beta \gg 1$ . Наприклад,  $\alpha = 0,99$ . Тоді  $\beta = 99$ . Це є основною перевагою схеми з СЕ, тобто вона підсилює струм:  $I_K \gg I_B$ .

З (3.22) одержуємо

$$\alpha = \frac{\beta}{1 - \beta}, \quad (3.23)$$

тобто завжди  $\alpha < 1$ , але чим ближче до 1, тим вищі підсилювальні властивості транзистора. Надаючи значення струму  $I_B$ , будемо за формулою (3.21) сімейство вихідних характеристик (рис. 3.13).

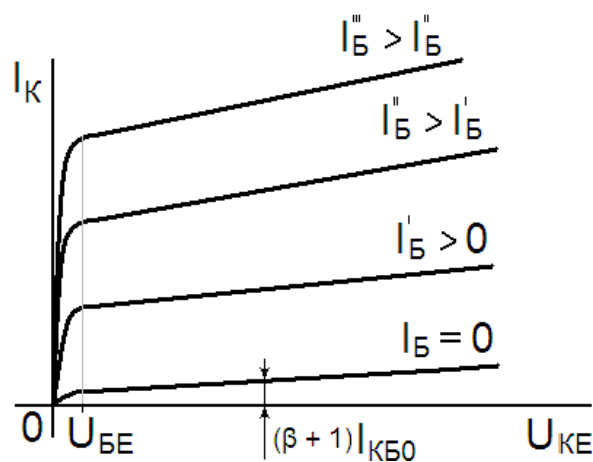


Рисунок 3.13 – Вихідні ВАХ транзистора в схемі з СЕ

Особливості характеристик:

- треба мати на увазі, що активний режим спостерігається тільки „праворуч” від лінії  $U_{BE}$ , тобто при  $|U_{KE}| > |U_{BE}|$ ;

- власний струм  $(\beta + 1)I_{KB0}$  колекторного переходу в  $(\beta + 1)$  більший, ніж у схемі з СБ.

- на відміну від схеми з СБ, у схемі з СЕ спостерігається деяка залежність колекторного струму  $I_K$  від  $U_{KE}$ . Це пояснюється тим, що колекторний та емітерний переходи з'єднані послідовно і тому  $U_{KE}$  прикладається не тільки до колекторного переходу, а й частково до емітерного переходу, причому, в прямому напрямі. Тому при підвищенні напруги колектора  $U_{KE}$  дещо збільшується пряма напруга на емітерному переході, внаслідок чого й зростає  $I_K$ .

### 3.3 Параметри біполярних транзисторів

Величини, які зв'язують малі прирости напруг та струмів, називаються диференціальними параметрами транзистора.

Транзистор зображують у вигляді пристрою, на вході якого діють вхідні напруга  $U_1$  та струм  $I_1$ , а на виході - вихідні напруга  $U_2$  та струм  $I_2$  (рис. 3.14).

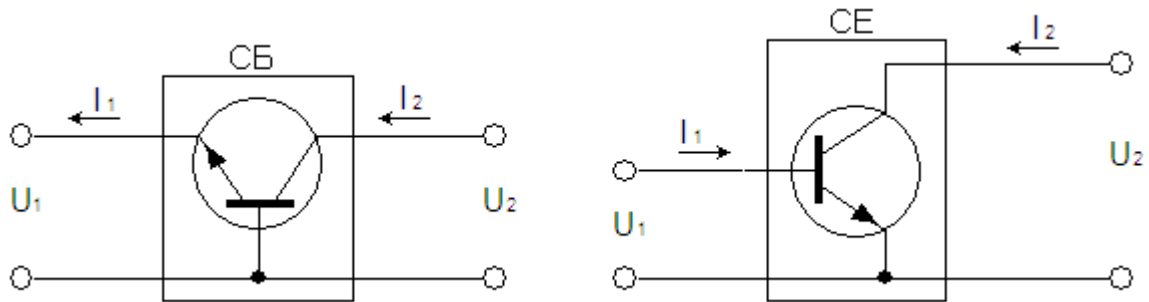


Рисунок 3.14 – Транзистор у вигляді чотирьохполюсника

Таку модель називають чотирьохполюсником.

Чотирьохполюсник описується системою характеристичних рівнянь у певних диференціальних параметрах. З численних диференціальних параметрів найбільшого поширення набули три їхні системи:  $h$ -параметри,  $Y$ -параметри та  $Z$ -параметри.

Для транзистора найбільш раціональною є система  $h$ -параметрів. Характеристичні рівняння чотирьохполюсника в  $h$ -параметрах мають вигляд:

$$dU_1 = h_{11}dI_1 + h_{12}dU_2 \quad (3.24)$$

$$dI_2 = h_{21}dI_1 + h_{22}dU_2 \quad (3.25)$$

Визначимо фізичний смисл  $h$ -параметрів, кожний з яких можна знайти за формулами (3.24) та (3.25), лише обертаючи одну із складових у нуль, тому що кожне рівняння містить два невідомих.

Отже, за умови  $dU_2 = 0$ , тобто при  $U_2 = \text{const}$  одержуємо

- вхідний опір:

$$h_{11} = \left. \frac{dU_1}{dI_1} \right|_{U_2 = \text{const}}, \quad (3.26)$$

- коефіцієнт передавання струму:

$$h_{21} = \left. \frac{dI_2}{dI_1} \right|_{U_2 = \text{const}} \quad (3.27)$$

За умови  $dI_1 = 0$ , тобто при  $I_1 = \text{const}$  одержуємо

- коефіцієнт зворотного зв'язку:

$$h_{12} = \left. \frac{dU_1}{dU_2} \right|_{I_1 = \text{const}}, \quad (3.28)$$

- вихідна провідність:

$$h_{22} = \left. \frac{dI_1}{dU_2} \right|_{I_1 = \text{const}} \quad (3.29)$$

Як видно з рисунка 3.14 та формул (3.26) - (3.29), h-параметри суттєво залежать від схеми включення транзистора. У таблицях 3.1 та 3.2 наведено розрахунок h-параметрів відповідно для схем з СБ та СЕ.

Таблиця 3.1 – h-параметри транзистора для схеми з спільною базою

Параметр	Умова сталості	Формула	Фізичне значення (назва параметра)
$h_{11Б}$	$U_{КБ} = \text{const}$	$h_{11Б} = \frac{\Delta U_{ЕБ}}{\Delta I_E}$	Вхідний опір
$h_{12Б}$	$I_E = \text{const}$	$h_{12Б} = \frac{\Delta U_{ЕБ}}{\Delta U_{КБ}}$	Коефіцієнт зворотного зв'язку
$h_{21Б}$	$U_{КБ} = \text{const}$	$h_{21Б} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_E}$	Коефіцієнт передавання струму емітера
$h_{22Б}$	$I_E = \text{const}$	$h_{22Б} = \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{КБ}}$	Вихідна провідність

Таблиця 3.2 – h-параметри транзистора для схеми з спільним емітером

Параметр	Умова сталості	Формула	Фізичне значення (назва параметра)
$h_{11Е}$	$U_{КЕ} = \text{const}$	$h_{11Е} = \frac{\Delta U_{БЕ}}{\Delta I_B}$	Вхідний опір
$h_{12Е}$	$I_B = \text{const}$	$h_{12Е} = \frac{\Delta U_{БЕ}}{\Delta U_{КЕ}}$	Коефіцієнт зворотного зв'язку
$h_{21Е}$	$U_{КЕ} = \text{const}$	$h_{21Е} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B}$	Коефіцієнт передавання струму бази
$h_{22Е}$	$I_B = \text{const}$	$h_{22Е} = \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{КБ}}$	Вихідна провідність

У цих таблицях диференціальні параметри  $d$  за формулами (3.26 – 3.29) замінені скінченими приростами  $\Delta$ . За вхідними характеристиками визначають параметри  $h_{11}$  та  $h_{12}$ , а за вихідними  $h_{21}$  та  $h_{22}$ . Оскільки ВАХ транзистора є нелінійними, то  $h$ -параметри можна визначити не для транзистора взагалі, а тільки для конкретної точки його ВАХ. В інших точках ВАХ параметри будуть іншими.

Вхідний опір знаходимо, виконуючи умову сталості  $U_{KE} = \text{const}$  (рис. 3.15) і відкладаючи  $U'_B$  та  $U''_B$  вільно, але симетрично від робочої точки РТ.

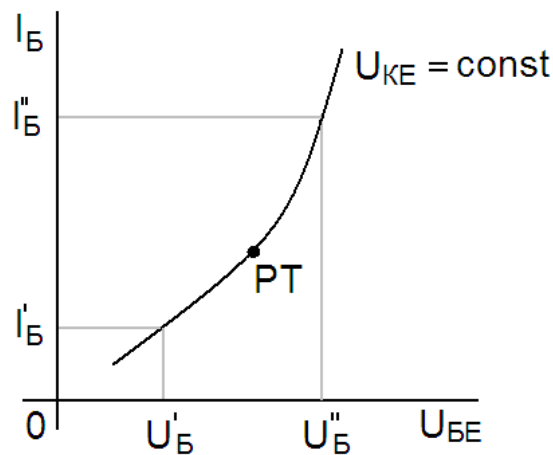


Рисунок 3.15 – Визначення  $h_{11E}$

Тоді

$$h_{11E} = \left. \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \right|_{U_{KE} = \text{const}} = \frac{U''_B - U'_B}{I''_B - I'_B} \quad (3.30)$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку визначаємо за вхідними характеристиками для кількох напруг колектора  $U_{KE}$  за умови сталості  $I_B = \text{const}$  (рис. 3.16). Тоді точки перетину цієї лінії з характеристиками  $U'_{KE}$  та  $U''_{KE}$  визначають зміну  $\Delta U_{BE}$ .

$$h_{12E} = \left. \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{KE}} \right|_{I_B = \text{const}} = \frac{U''_B - U'_B}{U''_{KE} - U'_{KE}} \quad (3.31)$$



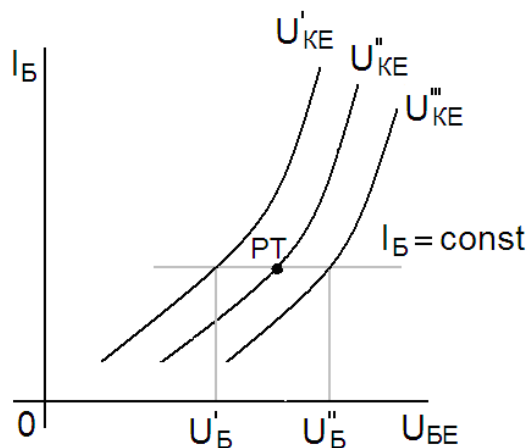


Рисунок 3.16 - Визначення  $h_{12E}$

Коефіцієнт передавання струму бази  $h_{21E}$  визначимо після графічного виконання умови сталості  $U_{KE} = \text{const}$  (рис. 3.17).

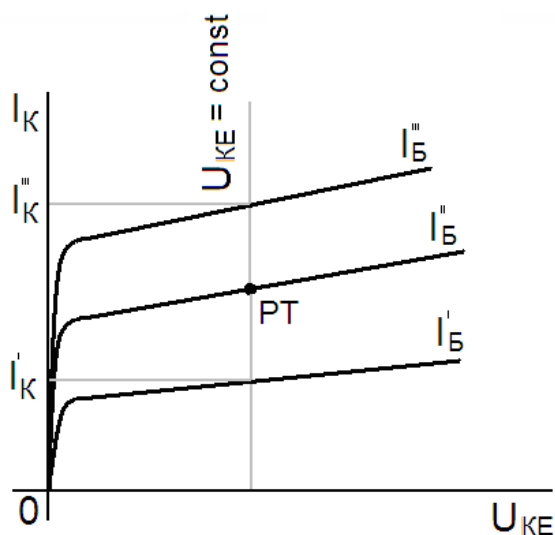
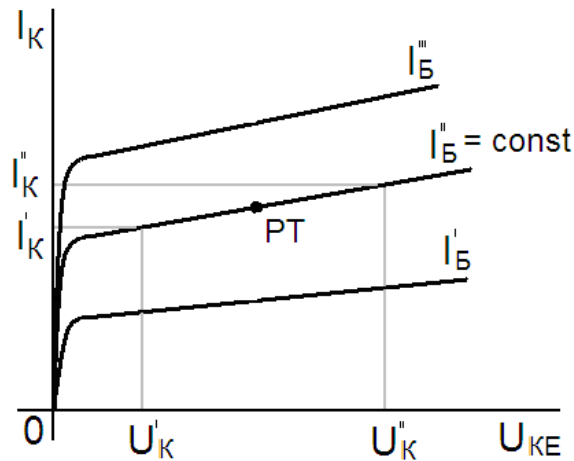


Рисунок 3.17 - Визначення  $h_{21E}$

Змінюючи струм бази  $I_B'$ ,  $I_B''$ ,  $I_B'''$  знаходимо

$$h_{21E} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \right|_{U_{KE} = \text{const}} = \frac{I_K''' - I_K'}{I_B''' - I_B'}. \quad (3.31)$$

Вихідна провідність визначається також за вихідними характеристиками після графічного виконання умови сталості  $I_B = \text{const}$  (рис. 3.18).

Рисунок 3.18 - Визначення  $h_{22E}$ 

Змінюючи напругу колектора від  $U'_K$  до  $U''_K$  симетрично відносно РТ, визначаємо

$$h_{22E} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{KE}} \right|_{I_B = \text{const}} = \frac{I_K'' - I_K'}{U_K'' - U_K'}. \quad (3.32)$$

### 3.4 Режими роботи біполярного транзистора

Транзистор може працювати у наступних режимах (рис. 3.19): активному режимі; режимі насичення; режимі відсікання.

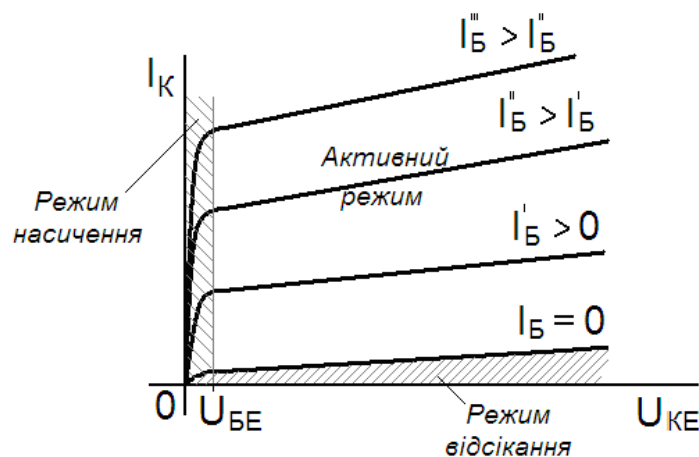


Рисунок 3.19 – Режими роботи транзистора

В активному режимі емітерний перехід знаходиться під прямою напругою, а колекторний - під зворотною. Критеріями активного режиму є  $U_{BE} > 0$  та  $U_{KE} < 0$ . Ці умови, відносно схеми з СЕ, виконуються при  $|U_{KE}| > |U_{BE}|$ .

Особливістю активного режиму є те, що колекторний струм  $I_K$  залежить від струму бази  $I_B$ , тобто  $I_K = \beta I_B$ . Через це досягається підсилення вхідного сигналу. Тому активний режим використовується в підсилювачах.

У режимі насичення і емітерний, і колекторний переходи знаходяться під прямими напругами (рис. 3.20).

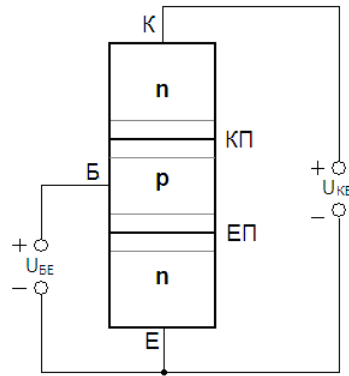


Рисунок 3.20 – Транзистор у режимі насичення

Критеріями режиму насичення є  $U_{BE} > 0$  та  $U_{KE} > 0$ . Ці умови, як видно з рисунків 3.19 - 3.20, відносно схеми з СЕ, виконуються при  $|U_{KE}| < |U_{BE}|$ . Особливістю режиму насичення є те, що транзистор повністю відкритий. Його колекторний струм  $I_K$  максимальний і не залежить від струму бази  $I_B$ .

У режимі відсікання і емітерний, і колекторний переходи перебувають під зворотними напругами (рис 3.21). Критеріями режиму відсікання є  $U_{BE} < 0$ ,  $U_{KE} < 0$ . У схемі з СЕ, в режимі відсікання  $I_B = 0$ . Особливістю режиму відсікання є те, що транзистор повністю закритий, тобто колекторний струм відсутній  $I_K = 0$ .

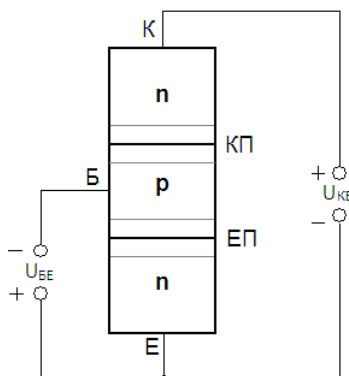


Рисунок 3.21 – Транзистор у режимі відсікання

Обидва режими (насичення та відсікання) об'єднуються поняттям **ключовий режим**. У ключовому режимі транзистор уподібнений електромеханічним контактам: або транзистор відкритий (насичення) і пропускає колекторний струм  $I_K$ , тобто замикає коло колектор-емітер, або транзистор закритий (відсікання) і колекторний струм відсутній  $I_K = 0$ , тобто коло колектор-емітер розімкнене. Тому ключовий режим використовується в цифрових схемах, в яких транзистор може бути тільки в одному з двох станів: або відкритому, або закритому, тобто або в режимі насичення, або в режимі відсікання.