

ЛЕКЦІЯ 2. ТРАНЗИСТОРИ.

- Класи транзисторів.
- Устрій та принцип дії біполярного транзистора.
- Режим роботи біполярного транзистора.
- Способи включення та характеристики схем включення.
- Статичні і динамічні характеристики схем включення.
- Хрест-характеристика транзистора.

Класи транзисторів.

Транзисторами називаються напівпровідникові прилади, які підсилюють сигнали за потужністю. По принципу дії їх ділять на два основних класи: біполярні та уніполярні.

В основі роботи біполярних транзисторів лежить інжекція неосновних носіїв заряду. Тому невід'ємною складовою частиною біполярного транзистора є ***p-n*** перехід. Назва «біполярний» підкреслює роль обох типів носіїв заряду (електронів та дірок) в роботі цього класу транзисторів: інжекція неосновних носіїв супроводжується компенсацією їх зарядів основними носіями.

Робота уніполярного транзистора основана на використанні тільки одного типу носіїв – основних (або електронів, або дірок). Основним способом руху носіїв служить дрейф в електричному полі.

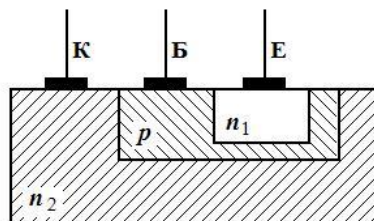
Для управління струмом у напівпровіднику при постійному електричному полі необхідно міняти або питому провідність напівпровідникової смуги, або його площу. На практиці використовують обидва способи, в основі яких лежить ефект поля. Тому уніполярні транзистори іменують також **польовими транзисторами**. Смуга, по якій протікає струм, називають **каналом**. Тому їх друга назва – **каналні транзистори**.

Устрій та принцип дії біполярного транзистора.

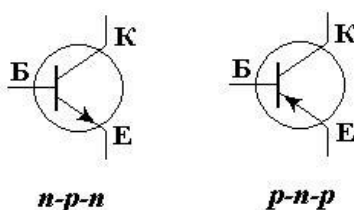
*Біполярний транзистор – це напівпровідниковий прилад, який має два зустрічно включених взаємодіючих ***p-n*** переходи.*

Транзистор є асиметричним приладом.

Асиметрія транзистора зберігається в назві крайніх шарів: сильно легований шар з меншою площею (n_1) називають **емітером**, а шар з більшою площею (n_2) називають **колектором**. Відповідно розрізняють **емітерний** та **колекторний переходи** (n_1-p , n_2-p). Середній шар транзистора називають **базою**.

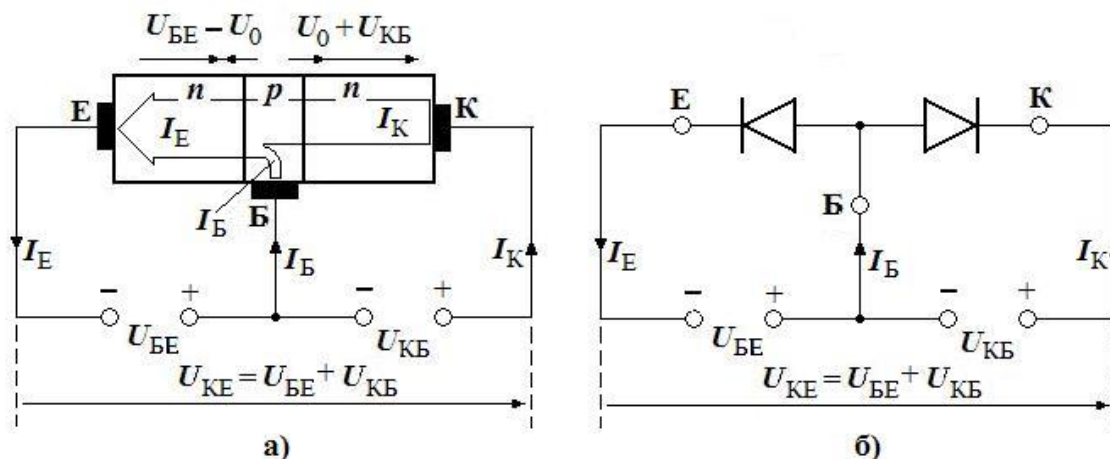


Умовні позначення в схемах $n-p-n$ і $p-n-p$ транзисторів.



Принцип роботи транзистора заснований на управлінні струмами електродів в залежності від підведених до його $p-n$ переходів напруг.

Рисунок, що ілюструє роботу $n-p-n$ транзистора (а) і еквівалентну схему його заміщення (б).



Звичайно $|U_{BE}| \ll |U_{KB}|$.

Чим менше товщина бази, тим менше I_B і тим ближче величина I_K до величини I_E . Однак в будь якому випадку $I_E = I_B + I_K$, або $I_B = I_E - I_K$, або $I_K = I_E - I_B$.

Отже, в $n-p-n$ транзисторі при підключенні до бази додатної відносно емітера напруги з'являється колекторний струм I_K , якщо до колектору прикладена відносно бази додатна напруга. Змінюючи значення напруги U_{BE} і, отже, величину струму I_B , можна змінювати значення I_K , що протікає в колекторному колі.

Для оцінки впливу струму I_E на струм I_K введено поняття «**коефіцієнт передачі за струмом в схемі зі спільною базою** – α ». Ця схема показана на рисунку (а), де обидві напруги (емітерна – U_{BE} і колекторна – U_{KB}) подаються на емітер і колектор відносно бази. Величина α визначається при такій схемі включення за формулою

$$\alpha = \Delta I_K / \Delta I_E$$

і завжди менша 1, оскільки колекторний струм є частиною емітерного. Чим «тонша» база, тим коефіцієнт передачі за струмом α ближчий до 1.

Якщо управляти базовим струмом I_B , змінюючи додатну напругу U_{BE} відносно емітера, забезпечуючи при цьому постійну додатну напругу U_{KE} (така схема включення називається «схемою із спільним емітером»), то в цьому випадку можна записати:

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

Ввівши позначення $\beta = \Delta I_K / \Delta I_B$ і поділивши обидві частини попереднього рівняння на I_K , отримуємо: $1 / \beta = (1 - \alpha) / \alpha$, звідки

$$\beta = \alpha / (1 - \alpha).$$

Величина

$$\beta = \Delta I_K / \Delta I_B$$

називається «коефіцієнт підсилення за струмом в схемі зі спільним емітером». При $\alpha < 1$ завжди $\beta > 1$ і чим ближче α до 1, тим вище значення β . В реальних конструкціях біполярних транзисторів $\alpha = 0,95 \dots 0,995$, що забезпечує $\beta = 20 \dots 1000$.

Режими роботи біполярного транзистора.

В залежності від полярності напруг, що прикладені до емітерного і колекторного переходів транзистора, розрізняють такі режими його роботи:

Активний режим. На емітерний перехід подана пряма напруга, а на колекторний – зворотна. Цей режим є основним режимом роботи транзистора. Внаслідок того, що напруга в колі колектора значно перевищує напругу, підведену до емітерного переходу, а струми в колах емітера і колектора практично рівні, потужність сигналу в колекторному (вихідному) колі може значно перевищувати потужність у емітерному (вхідному) колі. Ця обставина визначає підсилювальні властивості транзистора.

Режим відсікання. До обох переходів підведені зворотні напруги. Тому через них проходить лише незначний струм, зумовлений рухом неосновних носіїв заряду (дрейфовий струм). Практично транзистор в режимі відсікання виявляється закритим.

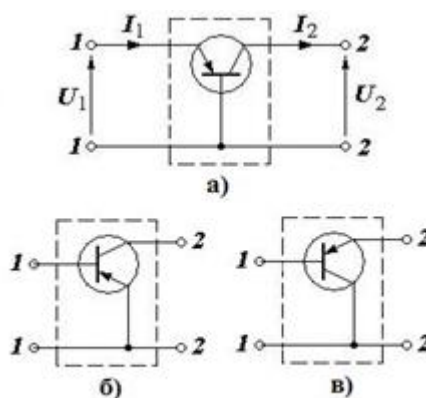
Режим насичення. Особливе місце в роботі транзистора займає режим **подвійної інжекції**, або, не зовсім точно, **режим насичення**. Режим подвійної інжекції характерний тим, що на обох переходах – емітерному та колекторному – діють прямі напруги. При цьому і емітер і колектор інжектують носії в базу назустріч один одному та одночасно кожен із них збирає носії, що дійшли від іншого. Струм у вихідному колі транзистора максимальний і практично не регулюється струмом вхідного кола. В цьому режимі транзистор повністю відкритий.

Інверсний режим. До емітерного переходу підводиться зворотна напруга, а до колекторного – пряма. Отже емітер виконує функції колектора, а колектор – емітера. Цей режим, як правило, не відповідає нормальним умовам експлуатації транзистора.

Транзистор в режимі ключа. Важливими елементами сучасних схем автоматики і обчислювальної техніки є пристрої, які мають можливість знаходитись в одному з двох стійких станів (режимів) і під дією вхідного сигналу стрімко змінювати свій стан (режим). Це дозволяє здійснювати перемикання (комутацію) різних електричних кіл схеми.

Режим роботи транзистора в перемикаючій схемі називають **ключовим режимом**. В цьому режимі транзистор в процесі роботи схеми періодично переходить з відкритого стану (режиму насичення) в закритий (режим відсікання) і навпаки, що відповідає двом стійким станам перемикаючого пристрою.

Способи включення та характеристики схем включення.



Транзистор-чотирихполюсник: а) в схемі із спільною базою; б) в схемі із спільним емітером; в) в схемі із спільним колектором.

В практичних схемах транзистор використовують як чотириполюсник, тобто прилад з двома входними і двома вихідними клемми і, оскільки транзистор має тільки три виводи (емітер, база, колектор), один з виводів транзистора приєднують спільно для входного і вихідного кола. Розрізняють схеми включення зі **спільною базою** (а), **спільним емітером** (б) і **спільним колектором** (в).

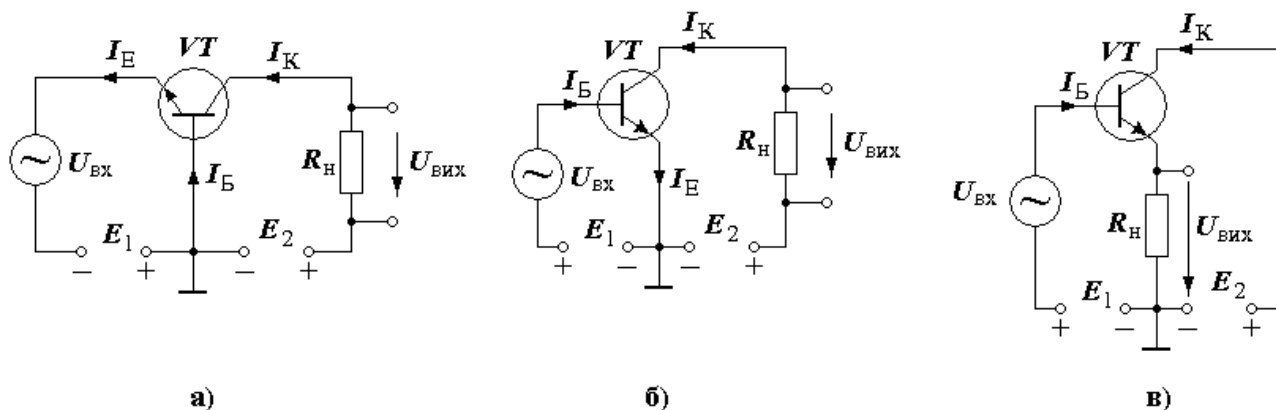


Схема із спільною базою (СБ), Через джерело входного сигналу проходить струм емітера I_E , який називають **вхідним струмом**. Отже для схеми із спільною базою $I_{вх} = I_E$. **Вихідний струм** в цій схемі є струм колектора ($I_{вих} = I_K$).

Якщо під дією $U_{вх}$ струм емітера збільшиться на деяку величину ΔI_E , то відповідно збільшується і інші струми транзистора:

$$I_E + \Delta I_E = I_K + \Delta I_K + I_B + \Delta I_B$$

Незалежно від схеми включення транзистори характеризуються **диференціальним коефіцієнтом прямої передачі струму**, який уявляє собою відношення зміни вихідного струму до приросту вхідного струму, що цю зміну викликав при постійній напрузі у вихідному колі. Для схеми із спільною базою таким коефіцієнтом може слугувати коефіцієнт передачі струму емітера:

$$\alpha = \Delta I_{\text{вих}} / \Delta I_{\text{вх}} = \Delta I_{\text{К}} / \Delta I_{\text{Е}} \text{ при } E_2 = \text{const.}$$

Оскільки струм емітера – найбільший із всіх струмів транзистора, то схема зі спільною базою має малий вхідний опір для змінної складової вхідного сигналу. Фактично цей опір дорівнює опорі емітерного переходу $r_{\text{Е}}$, включеного в прямому напрямку, тобто

$$R_{\text{вх}} = \Delta U_{\text{вх}} / \Delta I_{\text{вх}} = \Delta U_{\text{вх}} / \Delta I_{\text{Е}} \approx r_{\text{Е}}.$$

Низький вхідний опір схеми із спільною базою (кілька ом) є її суттєвим недоліком, оскільки шунтує вихідне коло попередньої схеми.

Коефіцієнт підсилення транзистора в схемі зі спільною базою **за струмом** для активного навантаження приблизно збігається з коефіцієнтом передачі струму

$$K_{\text{І}} \approx \Delta I_{\text{К}} / \Delta I_{\text{Е}} \approx \alpha = 0,95 \div 0,99 (U_{\text{КБ}} = \text{const}).$$

Коефіцієнт підсилення за напругою визначається за формулою

$$K_{\text{U}} = \Delta U_{\text{вих}} / \Delta U_{\text{вх}} \approx (\Delta I_{\text{К}} \cdot R_{\text{н}}) / (\Delta I_{\text{Е}} \cdot R_{\text{вх}}) = (\alpha \Delta I_{\text{Е}} / \Delta I_{\text{Е}}) \cdot (R_{\text{н}} / r_{\text{Е}}) = \alpha \cdot R_{\text{н}} / r_{\text{Е}}$$

Наприклад, якщо $r_{\text{Е}} = 100 \text{ Ом}$, $R_{\text{н}} = 10^3 \text{ Ом}$, $\alpha = 0,95$, то $K_{\text{U}} = 0,95 \cdot 10^3 / 100 = 9,5$.

Коефіцієнт підсилення за потужністю:

$$K_{\text{П}} = P_{\text{вих}} / P_{\text{вх}} = (\Delta I_{\text{К}}^2 R_{\text{н}}) / (\Delta I_{\text{Е}}^2 R_{\text{вх}}) = K_{\text{І}} K_{\text{U}} = \alpha^2 \cdot R_{\text{н}} / r_{\text{Е}} \approx 0,9 \cdot 10 \approx 9.$$

Схема СБ дозволяє добре розкрити фізику транзистора та має інші особливості. Але вона не забезпечує підсилення струму та має малий вхідний опір (опір емітерного переходу) робить її не оптимальною для більшості використань. Тому головну роль у транзисторній техніці виконує інше включення – зі **спільним емітером**, яке позначається СЕ (рис б).

Для схеми зі спільним емітером характерна задана величина струму бази. Вхідний сигнал прикладається до емітера і бази. Джерело живлення колектору E_2 включене між емітером і колектором. Емітер є спільним для вхідного і вихідного кіл.

Особливістю схеми із спільним емітером є те, що **вхідним струмом є незначний по відношенню до інших струм бази. Вихідним струмом в цій схемі, як і в схемі із спільною базою, є струм колектору**. Коефіцієнт прямої передачі струму для схеми із спільним емітером – $\beta = \Delta I_{\text{вих}} / \Delta I_{\text{вх}} = \Delta I_{\text{К}} / \Delta I_{\text{Б}}$, тобто в схемі із спільним емітером можна отримати коефіцієнт прямої передачі струму в кілька десятків.

Вхідний опір транзистора в схемі із спільним емітером значно більший, ніж в схемі із спільною базою, оскільки:

$$R_{\text{вх}} = \Delta U_{\text{вх}} / \Delta I_{\text{вх}} = \Delta U_{\text{вх}} / \Delta I_{\text{Б}} \gg \Delta U_{\text{вх}} / \Delta I_{\text{Е}}.$$

Коефіцієнту підсилення транзистора із спільним емітером **за струмом** для активного навантаження відповідає коефіцієнт передачі струму бази:

$$K_{\text{І}} \approx \Delta I_{\text{К}} / \Delta I_{\text{Б}} = \Delta I_{\text{К}} / (\Delta I_{\text{Е}} - \Delta I_{\text{Б}}) \approx \alpha / (1 - \alpha) \approx \beta \gg 1$$

і на відміну від схеми зі спільною базою транзистор в схемі зі спільним емітером забезпечує підсилення за струмом.

Коефіцієнт підсилення за напругою:

$$K_U = \Delta U_{\text{вих}} / \Delta U_{\text{вх}} = \Delta U_{\text{КЕ}} / |\Delta U_{\text{ЕБ}}| \approx \beta \cdot R_{\text{н}} / r_{\text{Е}},$$

тобто як і в схемі зі спільною базою, транзистор в схемі зі спільним емітером підсилює сигнал і за напругою.

Коефіцієнт підсилення за потужністю дорівнює добутку коефіцієнтів:

$$K_{\text{П}} = K_{\text{І}} K_U = \beta^2 \cdot R_{\text{н}} / r_{\text{Е}}.$$

Вхідний опір визначається формулою

$$R_{\text{вх}} = \Delta U_{\text{ЕБ}} / \Delta I_{\text{Б}} = \Delta I_{\text{Е}} \cdot r_{\text{Е}} / \Delta I_{\text{Б}} \approx \beta \cdot r_{\text{Е}}.$$

Схема із спільним колектором (СК) (рис. в) ще називається **емітерний повторювач**. Вхідним є коло база–колектор, вихідним – коло колектор–емітер; спільним електродом є колектор, безпосередньо до нього приєднаний позитивна клемма джерела E_2 . Навантаження приєднано до емітера. По колектору проходить струм $I_{\text{К}} = I_{\text{Е}} - I_{\text{Б}}$.

Коефіцієнт прямої передачі струму майже такий як і в схемі із спільним емітером:

$$K_{\text{І}} \approx \Delta I_{\text{Е}} / \Delta I_{\text{Б}} = \Delta I_{\text{Е}} / (\Delta I_{\text{Е}} - \Delta I_{\text{К}}) = \Delta I_{\text{Е}} / (\Delta I_{\text{Е}} - \alpha \Delta I_{\text{Е}}) = \alpha / (1 - \alpha) = \beta + 1 \approx \beta.$$

Особливість схеми з СК полягає в тому, що **коефіцієнт підсилення за напругою** K_U завжди менший одиниці, оскільки вихідна напруга $U_{\text{вих}}$ в цій схемі практично складає частину вхідної.

Інша особливість полягає в тому, що вихідний сигнал співпадає за фазою з вхідним (звідси назва схеми – емітерний повторювач). На відміну від схеми СК в схемі СЕ вихідний сигнал протилежний за фазою із вхідним сигналом (є його дзеркальною пропорційною копією).

Транзистор в схемі з СК зручно застосовувати як узгоджуючий елемент, що включається в пристроях між високоомним попереднім колом і низькоомним навантаженням.

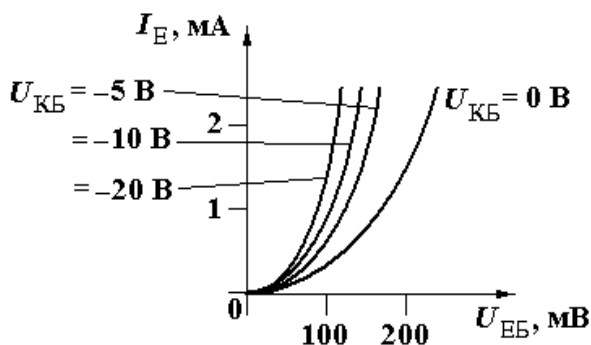
Відмінними властивостями схеми з СК вважається високий вхідний опір (до 100 кОм) і невеликий вихідний опір (менше 100 Ом), а також однакова фаза вихідного сигналу по відношенню до вхідного.

Статичні і динамічні характеристики схем включення.

Вольт-амперні характеристики транзисторів розділяють на статичні і динамічні.

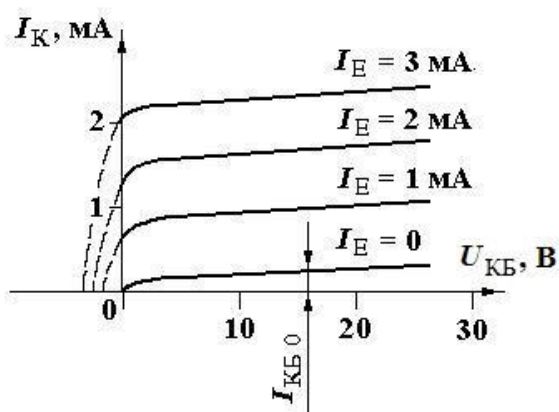
Статичні характеристики є графічним відображенням залежностей між струмами і напругами на вході і виході транзистора.

Для **схем із спільною базою** **вхідні статичні характеристики** – це залежність струму емітера $I_{\text{Е}}$ від напруги між емітером і базою $U_{\text{ЕБ}}$ при незмінній напрузі між колектором і базою $U_{\text{КБ}}$: $I_{\text{Е}} = f(U_{\text{ЕБ}})$ при $U_{\text{КБ}} = \text{const}$. Робота транзистора, при якій і на емітерний, і на колекторний переходи подані зворотні напруги відповідає **режиму відсікання**.



Типова статична вхідна характеристика транзистора для схеми із спільною базою

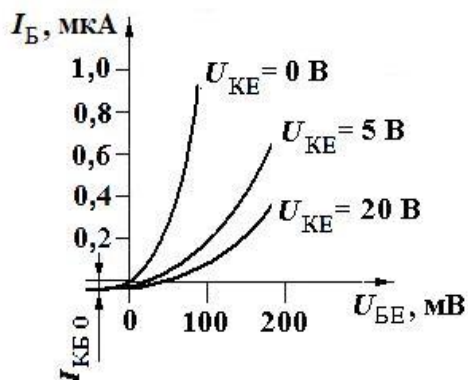
Вихідні статичні характеристики транзистора для схеми із спільною базою складаються із залежностей струму колектора I_K від напруги між колектором і базою U_{KB} при незмінних значення емітерного струму I_E : $I_K = \varphi(U_{KB})$ при $I_E = \text{const}$.



Типова статична вихідна характеристика транзистора для схеми із спільною базою.

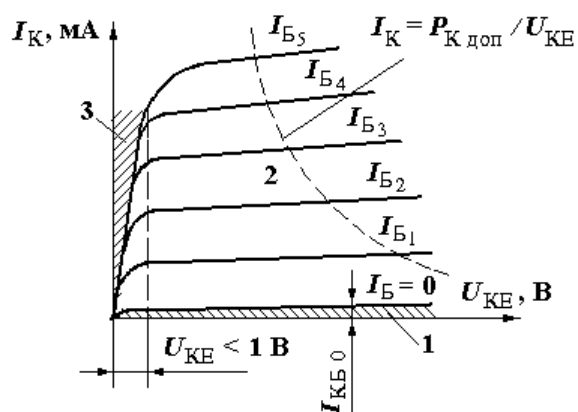
Робота транзистора, при якому емітерний перехід включений в прямому напрямку ($U_{EB} < 0$), а колекторний – в зворотному ($U_{KB} > 0$), відповідає *активному (підсилюючому) режиму*, а коли обидва переходи виявляються прямо включеними ($U_{EB} < 0$, $U_{KB} < 0$) – *режиму насичення*.

Вхідні статичні характеристики для схеми із спільним емітером є графіками залежності струму бази I_B від напруги U_{BE} при незмінному значенні U_{KE} : $I_B = f(U_{BE})$ при $U_{KE} = \text{const}$.



Типова статична вхідна характеристика транзистора для схеми із спільним емітером.

Вихідні статичні характеристики транзистора для схеми із спільним емітером складаються із залежностей струму колектора I_K від напруги між колектором і емітером при фіксованому струмі бази: $I_K = f(U_{KE})$ при $I_B = \text{const}$.



Типова статична вихідна характеристика транзистора для схеми із спільним емітером.

Положення кожної з вихідних характеристик залежить, головним чином, від струму бази ($I_{B1} < I_{B2} < \dots < I_{B5}$).

На сімействі вихідних характеристик виділені три області, властиві трьом режимам роботи транзистора: режим відсічки (1), активний режим (підсилення) (2) і режим насичення (3). Графік, відповідний струму бази I_{KB0} , проходить через початок координат і при $U_{KE} > 1$ В визначає зону відсічки. Активна зона розташована між зонами відсічки, насичення і лінією, яка визначає I_K через допустиму потужність, що розсіюється колектором (наводиться в довідниках).

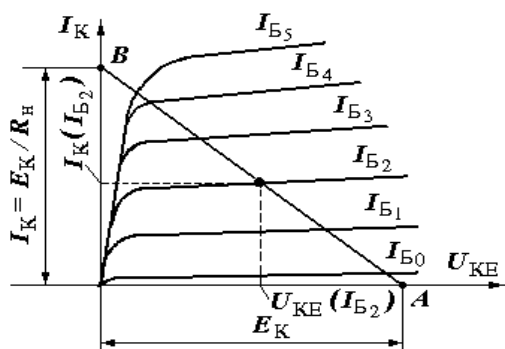
Статичні характеристики транзистора в схемі із спільним колектором подібні характеристикам транзистора в схемі із спільним емітером. Вхідним колом транзистора є базово-колекторний перехід, що має великий внутрішній опір, оскільки виявляється включеним в зворотному напрямку. Керуючим струмом є невеликий струм бази; вихідні струми (I_E або I_K) відрізняються незначно.

Динамічними характеристиками транзистора визначається режим роботи транзистора – *динамічний режим*, коли у вихідному колі є навантаження, а на вхід подається певний сигнал. **Динамічний режим відрізняється від статичного** сильним взаємним впливом параметрів транзистора і елементів схеми. В цьому режимі напруга джерела живлення E_K неперервно перерозподіляється між опором навантаження R_H і вихідними електродами транзистора у відповідності з виразом:

$$U_{KE} = E_K - I_K R_H.$$

Наведений вираз є **рівнянням динамічного режиму для вихідного кола**. Зміна напруги на вході транзистора викликає відповідну зміну струму емітера, бази, а отже, і струму колектора I_K . Це призводить до зміни напруги на R_H , в результаті чого змінюється напруга U_{KE} .

Побудова динамічних характеристик здійснюється з метою вибору оптимального (найкращого) режиму роботи транзистора. Початковими є дані про вхідний сигнал і потужність, що споживається навантаженням, а також статичні вхідні і вихідні характеристики та параметри транзистора, що наводяться в довідниках.



Динамічна характеристика в сімействі статичних вихідних характеристик.

Найчастіше використовуються *вихідні і вхідні динамічні характеристики*.

З рівняння динамічного режиму випливає рівняння:

$$I_K = (E_K - U_{KE}) / R_H = E_K / R_H - U_{KE} / R_H.$$

Пряма лінія, що відповідає останньому рівнянню, називається **навантажувальною прямою** або **лінією навантаження**. Вона уявляє собою **вихідну динамічну характеристику** і будується на сімействі статичних вихідних характеристик за двома точками – A і B . Розташування лінії навантаження на статичних характеристиках однозначно визначається напругою джерела живлення E_K і опором резистора R_H . В точці A $I_K = 0$, а $U_{KE} = E_K$. Це відповідає **закритому стану емітерного переходу транзистора**. При цьому струм в опорі навантаження відсутній і падіння напруги на навантаженні дорівнює нулю. Отже, вся напруга джерела живлення E_K виявляється прикладеною до ділянки колектор – емітер транзистора.

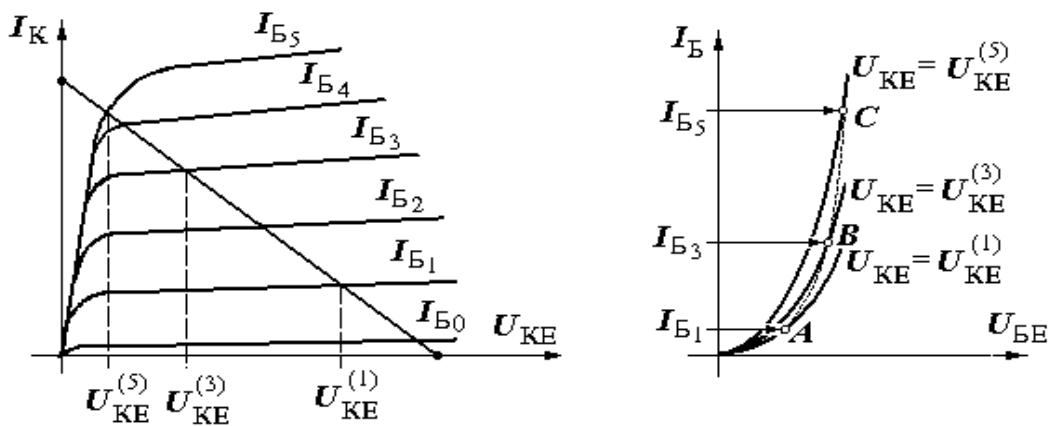
Точка перетину лінії навантаження із віссю струмів B є точка, для якої виконується умова $I_K = E_K / R_H$, оскільки струм колектора у випадку повністю відкритого (або закороченого) транзистора обмежувався би тільки величиною опору R_H .

Всі проміжні точки лінії навантаження характеризують можливі напруги і струми у відповідних колах транзистора при подачі сигналу з урахуванням опору навантаження. Будь

якому струму бази відповідає певне значення струму колектора і колекторної напруги. Так на рисунку показано, що струму бази I_{B2} відповідає напруга $U_{KE}(I_{B2})$ та струм через навантаження $I_K(I_{B2})$.

Вхідна динамічна характеристика уявляє собою залежність вхідного струму від вхідної напруги в динамічному режимі при незмінних напрузі живлення і опорі навантаження.

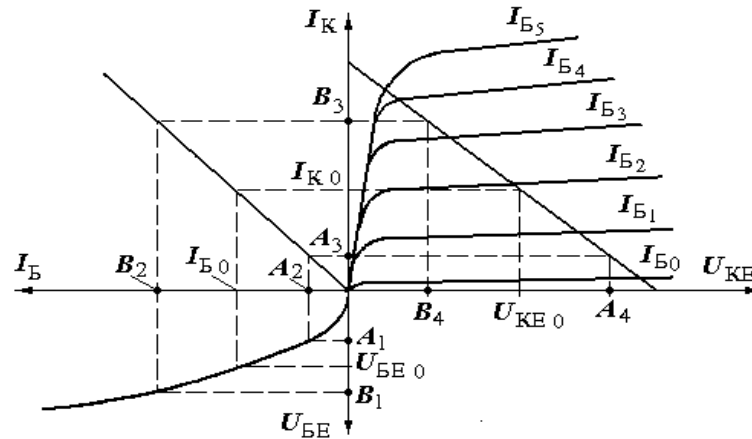
Вхідна динамічна характеристика будується по точкам перетину лінії навантаження із статичними вихідними характеристиками. Для кожної напруги на колекторі за вихідною динамічною характеристикою визначається відповідний струм бази. Потім на вхідних статичних характеристиках відмічаються точки (*A*, *B*, *C*), що відповідають знайденим значенням струмів бази. Лінія *ABC*, яка з'єднує точки, є вхідною динамічною характеристикою транзистора (штрихова лінія на вхідній статичній характеристиці).



Побудова вхідної динамічної характеристики.

Хрест-характеристика транзистора

Для практичного використання вольт-амперних характеристик транзистора в аналізі і розрахунку зручно використовувати суміщену хрест-характеристику, на якій в однаковому масштабі у відповідних квадрантах одночасно показані залежності: $I_K(U_{KE})$ – у квадранті I, $I_K(I_B)$ – у квадранті II, $I_B(U_{BE})$ – у квадранті III та вхідні і вихідні динамічні характеристики.



Суміщена хрест-характеристика транзистора.

Режим роботи транзистора без викривлень забезпечується тим, що напруга вхідного сигналу U_{BE} не виходить за межі певної ділянки A_1B_1 на вхідній динамічній характеристиці (3-й квадрант), де залежність $I_B(U_{BE})$ найбільше наближається до лінійної. Середина такої ділянки, що відповідає напрузі U_{BE0} вибирається за **робочу точку**, відносно якої змінюється вхідний сигнал. Для утворення робочої точки між емітером і базою послідовно з джерелом вхідного сигналу включається джерело **напруги зміщення** (на рисунках схем включення (а, б, в) – це E_1), яка дорівнює U_{BE0} .

Отже зміна вхідної напруги (напруги між базою і емітером) відносно U_{BE0} від $U_{BE(A1)}$ до $U_{BE(B1)}$ викликає зміну струму бази відносно I_{B0} від $I_{B(A2)}$ до $I_{B(B2)}$, що призводить до зміни опору між колектором і емітером, а відповідно і до зміни колекторного струму відносно I_{K0} від $I_{K(A3)}$ до $I_{K(B3)}$. Зміна колекторного струму зумовлює зміну падіння напруги між колектором і емітером від $U_{KE(A4)}$ до $U_{KE(B4)}$ відносно U_{KE0} , тобто утворення вихідного сигналу відповідних параметрів.

Таким чином при динамічному режимі роботи через транзистор і колекторне навантаження протікає струм як при дії вхідного сигналу, так і при його відсутності., тобто є постійна складова струму і напруги у вхідному і вихідному колах.

За динамічними характеристиками уточнюється фактичне значення коефіцієнтів підсилення, ККД і інших параметрів.