

2. ТРАНЗИСТОРИ

Транзистором (від *TRANSfer resISTOR* – такий, що перетворює опір) називається електроперетворювальний НП прилад, який має один або декілька *p-n* переходів, три або більше виводів і здатний посилювати потужність електричного сигналу.

Транзистори прийнято поділяти на групи за діапазонами використовуваних частот (f_{zp}) і потужностей (P_{max}):

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

2.1. Біполярні транзистори

2.1.1. Будова та принцип дії транзистора

Біполярним транзистором називають електроперетворювальний прилад, який складається із трьох областей напівпровідників з різними типами електропровідності і використовують для підсилення потужності електричного сигналу.

Термін "біполярний" підкреслює, що процеси в цих транзисторах пов'язані з взаємодією носіїв заряду двох типів: електронів і дірок. Для виготовлення транзисторів використовують германій і частіше кремній. Два $p-n$ переходи створюють за допомогою тришарової структури з чередуванням шарів, що мають електронну та діркову електропровідності.

У відповідності до чередування шарів з різними типами електропровідності біполярні транзистори поділяються на два класи: $n-p-n$ і $p-n-p$ типу, як показано на рис. 2.1.

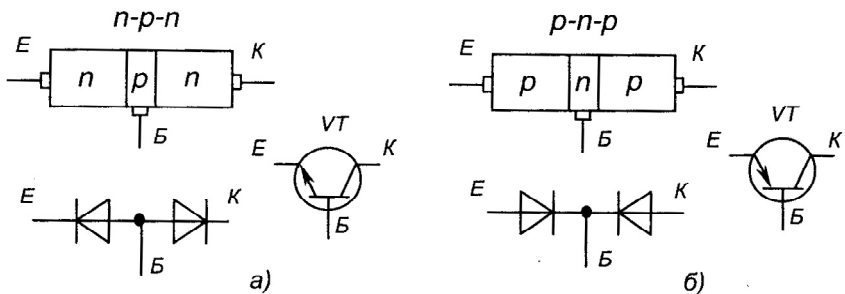


Рис. 2.1 – Схематична побудова та умовне позначення транзисторів $n-p-n$ (а) та $p-n-p$ (б) типів

Центральний шар біполярних транзисторів має назву "база". Зовнішній лівий, що є джерелом носіїв заряду (електронів чи дірок) і,

головним чином, створює струм приладу, називається "емітером". Правий зовнішній шар, що приймає носії заряду від емітера, називається "колектором".

На перехід емітер-база напруга подається у прямому напрямі, тому, навіть при незначній напрузі через перехід проходить великий струм. На перехід колектор-база напруга подається у зворотному напрямі. Зазвичай її величина на декілька порядків перевищує напругу на переході емітер-база.

На рис. 2.1 наведено також еквівалентні схеми транзисторів у вигляді двох діодів ($p-n$ переходів) увімкнених зустрічно. З рисунка видно, що така конструкція не те що не може забезпечувати підсилення електричного сигналу, а взагалі непрацездатна – струм від колектора до емітера протікати не може!

Підсилюючі властивості біполярного транзистора забезпечуються тим, що $p-n$ переходи в ньому є не незалежні, а взаємодіють один з одним, що, в свою чергу, забезпечується технологічними особливостями виконання тришарової структури, а саме:

- 1) емітер виконано з великою кількістю домішки – він має велику кількість вільних носіїв заряду;
- 2) база виконана тонкої і має малу кількість основних носіїв заряду;
- 3) колектор – масивний і має меншу кількість носіїв, ніж емітер.

Розглянемо роботу транзистора типу $n-p-n$.

Для початку припустимо, що увімкнено лише перехід колектор–база: до нього прикладено напругу джерела колекторного живлення E_K як показано на рис. 2.2.

Емітерний струм I_E дорівнює нулю, у транзисторі протікає тільки зворотний струм через колекторний перехід, бо через нього рухаються лише неосновні носії заряду, що обумовлюють початковий струм I_{K0} (незначний за величиною).

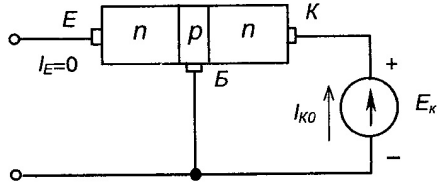


Рис. 2.2 - Спрощена схема вмикання транзистора

Якщо підімкнути емітерне джерело живлення E_E , як показано на рис. 2.3, емітерний перехід зміщується у прямому напрямку, через нього тече струм I_E певної величини.

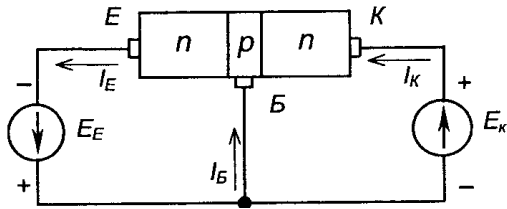


Рис. 2.3 - Схема вмикання транзистора

Оскільки зовнішню напругу прикладено до емітерного переходу у прямому напрямку, електрони долають перехід і потрапляють у зону бази, де частково рекомбінують з її дірками, утворюючи струм бази I_B . Більшість електронів, що є неосновними носіями для бази, завдяки дрейфу досягають зони колектора, де вони є основними носіями, і, потрапляючи під дію поля E_K утворюють колекторний струм I_K . Струм I_K практично дорівнює I_E .

Рівняння для струмів транзистора в усталеному режимі має вид:

$$I_E = I_B + I_K. \quad (2.1)$$

Зв'язок між струмом емітера і струмом колектора характеризується коефіцієнтом передачі струму, що вказує, яка частка повного струму через емітерний перехід досягає колектора (передається до нього з емітера):

$$\alpha = \frac{I_K}{I_E}. \quad (2.2)$$

Для сучасних транзисторів $\alpha = 0,9 \div 0,995$.

Транзистор *p-n-p* типу працює аналогічно, тільки струм через прилад зумовлений, головним чином, дірками, а полярність підключення джерел живлення протилежна.

2.1.2. Основні схеми вмикання і статичні характеристики біполярного транзистора

Як елемент електричного кола транзистор зазвичай використовується так, що один із його електродів є вхідним, другий вихідним, а третій – спільний відносно входу та виходу. У коло вхідного електроду вмикається джерело вхідного змінного сигналу, що його треба підсилити за потужністю, а у коло вихідного – навантаження, на якому виділяється підсилена потужність. Залежно від того, який електрод є спільним для вхідного і вихідного кіл, як це показано на рис. 2.4, розрізняють три схеми вмикання транзисторів:

- зі спільною базою – з СБ;
- зі спільним емітером – з СЕ;
- зі спільним колектором – з СК.

Слід зазначити, що основні схеми вмикання розглядаються для сигналу напруги змінного струму.

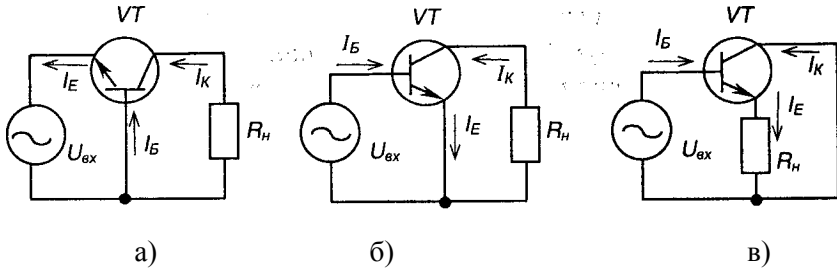


Рис. 2.4 - Схеми вмикання транзистора: а) з СБ; б) з СЕ; в) з СК

У схемі з СБ: I_E – вхідний струм, I_K – вихідний, передатність струму:

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

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

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

- статична –
$$\beta = \frac{I_K}{I_B} = \frac{I_K : I_E}{(I_E - I_K)} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}; \quad (2.5)$$

- динамічна –
$$\beta = \frac{dI_K}{dI_B} \Big|_{U_{Кб}} = const. \quad (2.6)$$

У схемі з СК: I_B – вхідний струм, I_K – вихідний, передатність струму:
$$\frac{I_E}{I_B} = \frac{1}{1 - \alpha} = 1 + \beta. \quad (2.7)$$

Для електричних схем на біполярних транзисторах існує чотири сім'ї статичних вольт-амперних характеристик ("статичних" у тому розумінні, що для транзистора задаються фіксовані значення напруги між деякими його електродами або струму в одному з кіл, і

знаходяться відповідні їм значення струму у другому колі або напруги між іншими електродами - у статичному режимі):

- сім'я вхідних характеристик $i_{ex} = f(U_{ex})$, за $U_{eux} = const$

(сім'я – тому, що для кожного конкретного значення U_{eux} маємо свою залежність $i_{ex} = f(U_{ex})$);

- сім'я вихідних характеристик $i_{eux} = f(U_{eux})$, за $I_{ex} = const$;

• сім'я характеристик керування (характеристик прямої передачі) $i_{eux} = f(i_{ex})$, за $U_{eux} = const$;

• сім'я перехідних характеристик (характеристик зворотного зв'язку) $U_{ex} = f(U_{eux})$, за $I_{ex} = const$.

Для кожної схеми вмикання з чотирьох сімей статичних ВАХ незалежними є лише дві. Для аналізу роботи транзистора та визначення його параметрів використовують частіше перші дві.

Для схеми з СБ статичні ВАХ, наведені на рис. 2.5, описуються залежностями:

• вхідні – $I_E = f(U_{BE})$ (за $U_{KE} = 0$ маємо ВАХ прямо зміщеного базо-емітерного $p-n$ переходу);

- вихідні – $I_K = f(U_{KB})$.

Із рисунка 2.5 видно, що вихідні характеристики майже паралельні осі напруги. Наявність невеликого нахилу (деяке збільшення I_K з ростом U_{KB}) пояснюється тим, що колекторна напруга має вплив, хоча і слабкий, на рух носіїв до колекторного переходу (в основному через звуження бази з ростом U_{KB} за рахунок розширення колекторно-базового $p-n$ переходу).

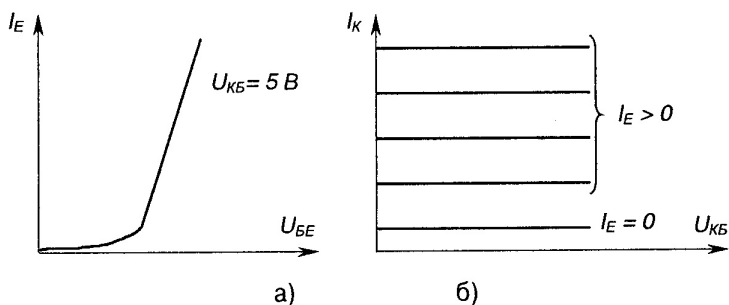


Рис. 2.5 - ВАХ транзистора, увімкненого за схемою з СБ:

а) вхідні; б) вихідні

Вихідна характеристика описується досить точним співвідношенням

$$I_K = \alpha I_E + I_{K0} + \frac{U_{KB}}{r_K}, \quad (2.8)$$

де I_{K0} – зворотний струм колектора (тепловий), r_K – нелінійний опір колекторного переходу.

Складова $\frac{U_{KB}}{r_K}$ надто мала і стає відчутною лише у зоні, що передусе пробою через зменшення r_K . Тому можна вважати, що $I_K = \alpha \cdot I_E + I_{K0}$. За невисоких температур величиною I_{K0} також можна знехтувати і тоді $I_K \approx \alpha I_E$.

Вхідні характеристики утворюють щільний пучок, що пояснюється слабким впливом колекторної напруги на струм емітера. Тому під час практичних розрахунків достатньо мати не сім'ю, а одну вхідну характеристику для колекторної напруги, зазвичай, величиною 5В (рис. 2.5, а).

Для схеми з СЕ статичні характеристики, що наведено на рис.216, є залежностями:

- вхідні – $I_B = f(U_{BE})$, за $U_{KE} = const$ (за $U_{KE} = 0$ маємо ВАХ прямо зміщеного базо-емітерного $p-n$ переходу);

- вихідні – $I_K = f(U_{KE})$, за $I_B = const$ (за $U_B = 0$ фактично маємо ВАХ зворотно зміщеного базо-колекторного $p-n$ переходу).

Вихідні ВАХ схеми з СЕ досить точно можна описати виразом:

$$I_K = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B + \frac{I_{K0}}{1-\alpha} + \frac{U_K}{(1-\alpha)}, \quad (2.9)$$

або
$$I_K = \beta I_B + I_{K0}^* + \frac{U_K}{r_k^*}, \quad (2.10)$$

де
$$I_{K0}^* = I_{K0}(\beta + 1); r_k^* = \frac{r_k}{(\beta + 1)}. \quad (2.11)$$

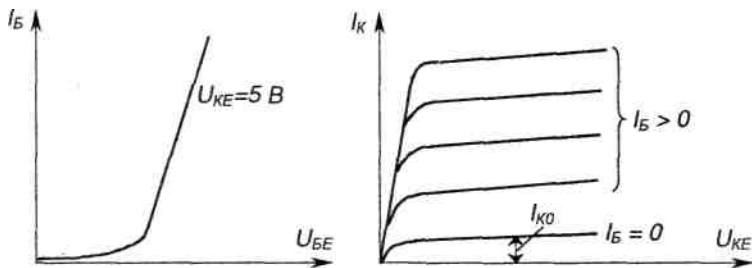


Рис. 2.6 - ВАХ транзистора, увімкненого за схемою з СЕ:

а) вхідні; б) вихідні

Вихідні характеристики схеми з СЕ мають більший нахил, ніж у схемі з СБ (це пояснюється сильнішим впливом колекторної напруги на передатність струму – на коефіцієнт β), вхідні характеристики більш лінійні.

ВАХ схеми з СК подібні з характеристиками схеми зі СЕ, тому що в обох схемах вхідним є струм бази, а вихідні струми (I_E або I_K) відрізняються незначно. Тому за практичних розрахунків вихідні ВАХ

схеми з СЕ можна використовувати як вихідні ВАХ схеми з СК, якщо замінити струм колектора на струм емітера.

Вирази для статичних характеристик схеми з СК мають вигляд:

- вхідна – $I_B = f(U_{BE})$, за $U_{KE} = const$;
- вихідна – $I_E = f(U_{KE})$, за $I_B = const$.

2.1.3. Біполярний транзистор як активний чотириполіусник

Статичні ВАХ використовуються під час розрахунків електронних схем із великими рівнями вхідних сигналів. Якщо рівень вхідного сигналу малий і транзистор працює на лінійній ділянці ВАХ (робота у режимі малого сигналу), то його можна подати як активний лінійний елемент (чотириполіусник), зображений на рис. 2.7.

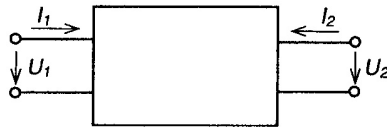


Рис. 2.7 - Активний лінійний чотириполіусник

Величини U_1 , I_1 є вхідними, а U_2 , I_2 , вихідними. Під час аналізу роботи чотириполіусника два параметри вибираються як незалежні змінні, а два інші є їх лінійними функціями. У зв'язку з цим роботу чотириполіусника можна охарактеризувати шістьма системами лінійних рівнянь, кожна з яких складається з двох рівнянь.

Найчастіше використовується система рівнянь, у якій незалежними змінними величинами є вхідний струм I_1 та вихідна напруга U_2 :

$$\begin{cases} u_1 = f(i_1, u_2) \\ i_2 = f(i_1, u_2) \end{cases} \quad (2.12)$$

Із системи рівнянь (2.12) можна знайти повні диференціали функцій u_1 , та i_2 :

$$\begin{cases} du_1 = \frac{\partial u_1}{\partial i_1} di_1 + \frac{\partial u_1}{\partial u_2} \\ di_2 = \frac{\partial i_2}{\partial i_1} di_1 + \frac{\partial i_2}{\partial u_2} \end{cases} \quad (2.13)$$

Якщо замінити диференціали функцій незначними приростами амплітудних значень струмів ($du = \Delta I$) та напруг ($du = \Delta U$) і ввести нові позначення для частинних похідних, то система рівнянь (2.13) матиме вигляд:

$$\begin{cases} \Delta U_1 = h_{11} \Delta I_1 + h_{12} \Delta U_2 \\ \Delta I_2 = h_{21} \Delta I_1 + h_{22} \Delta U_2 \end{cases} \quad (2.14)$$

Значення коефіцієнтів h знаходять під час створення режимів неробочого ходу (Н.Х.) на вході чотириполюсника 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:

$$h_{12} = \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2}, \text{ за } I_1 = 0 \text{ – коефіцієнт зворотного зв'язку за напругою;}$$

$$h_{22} = \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2}, \text{ за } I_1 = 0 \text{ – вихідна провідність транзистора.}$$

Із режиму К.З. на виході, коли $U_2 = 0$, можна визначити:

$$h_{11} = \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1}, \text{ за } U_2 = 0 \text{ – вхідний опір транзистора;}$$

$$h_{21} = \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1}, \text{ за } U_2 = 0 \text{ – коефіцієнт передачі за струмом.}$$

Система рівнянь (2.14) називається системою h -параметрів. 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. 2.8.

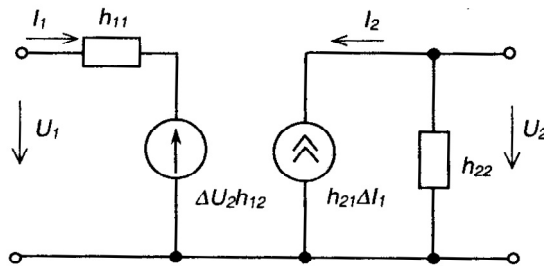


Рис. 2.8 - Схема заміщення транзистора за h -параметрами

Під час розрахунків також використовується фізична Т-подібна модель транзистора.

На рис. 2.9 зображена така модель для схеми з СЕ, для якої прийняті наступні позначення:

r_B – опір бази транзистора;

r_E – прямий опір емітерного переходу;

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

β – коефіцієнт передачі за струмом.

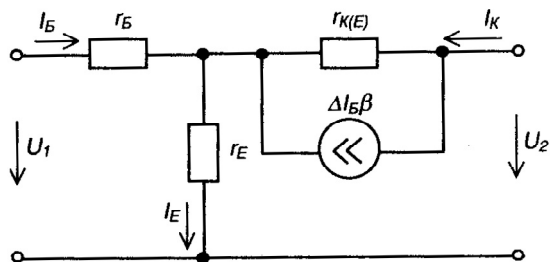


Рис. 2.9 – Т-подібна схема заміщення транзистора

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

$$h_{12E} = \frac{r_E}{r_{K(E)}} (\beta + 1), \quad (2.15)$$

$$h_{22E} = \frac{1}{r_{K(E)}} (\beta + 1), \quad (2.16)$$

$$h_{11E} = r_B + r_E (\beta + 1), \quad (2.17)$$

$$h_{21E} \approx \beta. \quad (2.18)$$

При розрахунках пристроїв на біполярних транзисторах h -параметри використовуються як основні.

2.1.4. Основні режими роботи біполярного транзистора

Незалежно від схеми вмикання біполярного транзистора він може працювати у трьох основних режимах, що визначаються полярністю напруги на емітерному U_E та колекторному U_K переходах:

- режим відтинання ($U_E < 0, U_K < 0$);
- активний режим ($U_K > 0, U_E < 0$);
- режим насичення ($U_E > 0, U_K > 0$).

У режимі насичення, який настає за великого відпірного вхідного сигналу, колекторний та емітерний переходи зміщені у прямому напрямку, транзистор повністю увімкнений і його струм $I_{mp} = U_3 / R_H$, тобто залежить тільки від опору навантаження R_H та зовнішньої напруги U_3 (вихідний опір транзистора знижується до дуже малої величини).

У режимі відтинання, що настає з поданням до вхідного кола транзистора сигналу, який забезпечує повне закривання приладу, обидва переходи зміщені у зворотному напрямку (закритий стан транзистора). При цьому у вихідному колі протікає струм, що є зворотним струмом емітерного та колекторного переходів, а опір транзистора великий.

Активний режим є проміжним. У цьому режимі емітерний перехід зміщений у прямому напрямку, а колекторний – у зворотному. Транзистор у цьому режимі працює як підсилювач сигналу: пропорційним змінам вхідного сигналу тут відповідають пропорційні зміни вихідного.

Режим роботи, у якому транзистор тривалий час знаходиться в режимах відтинання або насичення, називається ключовим режимом.

Розглянемо наведені вище режими роботи транзистора на прикладі його вмикання за схемою з СЕ, зображеною на рис. 2.10.

Тут

$$I_B = \frac{U_B - U_{BE}}{R_B}, \quad (2.19)$$

$$I_K = \beta I_B, \quad (2.20)$$

$$U_{вих} = U_{KE} = E_K - I_K R_K, \quad (2.21)$$

де R_B , R_K – базове та колекторне навантаження, U_{KE} – напруга між колектором та емітером, E_K – напруга джерела живлення.

Рівняння (2.21) характеризує зв'язок вихідної напруги з вхідним струмом і називається динамічною вихідною характеристикою транзистора або лінією навантаження.

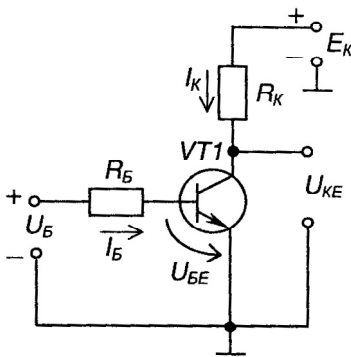


Рис. 2.10 - Схема вмикання транзистора з СЕ

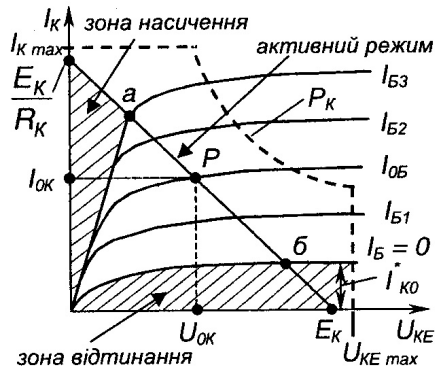


Рис. 2.11 - Вихідна динамічна характеристика транзистора

На сім'ї вихідних статичних характеристик побудуємо лінію навантаження, як показано на рис. 2.11. Для цього розглянемо режими неробочого ходу (Н.Х.) та корот-кого замикання (К.З.).

Для режиму Н.Х.: якщо $I_K = 0$, то $U_{KE} = E_K$.

Для режиму К.З.: якщо $U_{KE} = 0$, то $I_K = E_K / R_K$.

Точки перетину лінії навантаження з будь-якою ВАХ називаються робочими точками і відповідають певним значенням вихідного струму та вихідної напруги. Якщо, наприклад, $I_B = I_{0B}$, то цьому відповідає точка P , для якої $U_{вих} = U_{0K}$, $I_{вих} = I_{0K}$.

Коли робоча точка лежить у межах відрізка ab , транзистор працює у активному (підсилювальному) режимі, де змінам вхідного сигналу відповідають пропорційні зміни вихідного.

Якщо робочу точку намагатися задати нижче точки b , транзистор переходить до режиму відтинання, якому відповідає власне точка b (транзистор тут відтинає протікання струму у силовому колі).

Якщо ж робочу точку задавати вище точки a – транзистор знаходиться в режимі насичення, якому і відповідає точка a .

Взагалі режимом насичення називають такий режим, коли подальшому збільшенню вхідної дії не відповідає збільшення вихідної реакції, що досягла деякого значення.

У режимі насичення через транзистор протікає струм:

$$I_{KH} = \frac{E_K}{R_K} . \quad (2.22)$$

Для того, щоб транзистор увійшов до режиму насичення, необхідно забезпечити струм бази не менший за $I_{BH} = I_{KH} / \beta$.

Ступінь насичення характеризується коефіцієнтом насичення:

$$S = \frac{I_B}{I_{BH}} . \quad (2.23)$$

До основних параметрів біполярних транзисторів належать:

- максимально допустимий струм колектора I_{Kmax} , що в основному визначається перерізом виводів від кристалу НП, становить $(0,01 \div 100)A$;

- допустима робоча напруга U_{KEmax} , що визначається напругою лавинного пробою колекторного переходу, становить $(20 \div 1000)V$;

- допустима потужність на колекторі $P_K = I_K \cdot U_{KE}$, за її перевищення кристал розплавиться;

- коефіцієнт передачі струму $\beta = 20 \div 50$.

2.1.5. Складені транзистори

Для значного підвищення коефіцієнта підсилення за струмом застосовують комбінації з двох і більше транзисторів, з'єднаних так, що у цілому конструкція, як і одиночний транзистор, має три зовнішніх виводи і називається складеним транзистором.

Схема складеного транзистора, виконаного на транзисторах одного типу провідності, наведена на рис. 2.12, а. Її ще називають схемою Дарлінгтона. У наведеній схемі вхідний струм є струмом бази першого транзистора. Після підсилення останнім у β_1 разів він подається на базу другого транзистора, яким підсилюється ще в β_2 разів. У результаті загальний коефіцієнт підсилення за струмом становить

$$\beta = \beta_1 \cdot \beta_2.$$

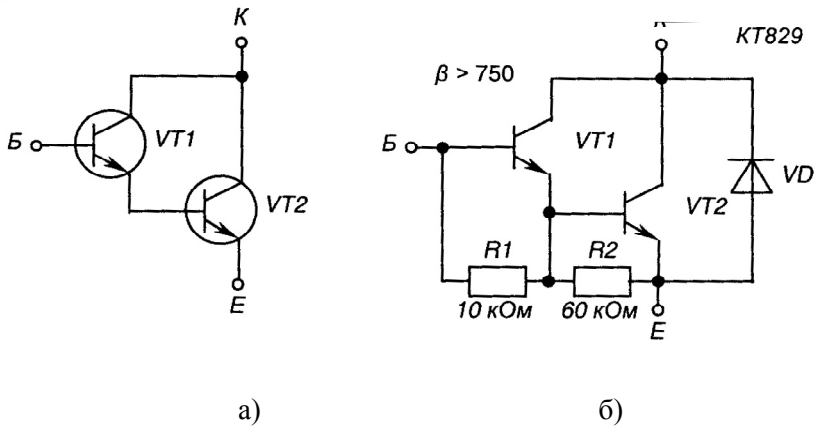


Рис. 2.12 - Складений транзистор за схемою Дарлінгтона

Таку схему широко застосовують як у дискретному виконанні, так і в інтегральному. На рис. 2.12, б, наприклад, наведено еквівалентну схему потужного транзистора КТ829, що має $\beta \geq 750$. Тут резистори R_1 і R_2 забезпечують відведення від бази зворотного струму колекторних переходів, а діод VD захищає структуру від дії зворотної напруги.

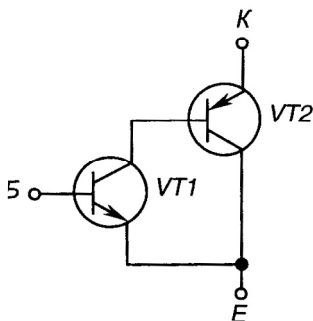


Рис. 2.13 - Складений транзистор за схемою Шиклаї

Схема складеного транзистора, виконаного на транзисторах різного типу провідності – схема Шиклаї, наведена на рис. 2.13. Її особливістю є те, що тип провідності конструкції в цілому визначається типом провідності першого транзистора. Так, у даному разі ми маємо еквівалент транзистора $n-p-n$ типу (незважаючи на те, що на виході встановлено транзистор $VT2$ $p-n-p$ типу – його емітер є колектором, а колектор – емітером складеного транзистора).

2.1.6. Одноперехідний транзистор

Одноперехідний транзистор або двобазовий діод – це НП прилад з одним $p-n$ переходом. Його схематична конструкція і ВАХ наведені на рис. 2.14.

Шар p -типу має назву емітера, а зони монокристала по обидва боки емітера, що мають електронну провідність, називаються базами. Зазвичай, довжина нижньої бази B_2 набагато менша, ніж довжина верхньої бази B_1 . Якщо до контактів базових зон підімкнути зовнішню напругу із зазначеною на рис. 2.14 полярністю, то через обидві бази протікатиме невеликий струм – так званий струм зміщення.

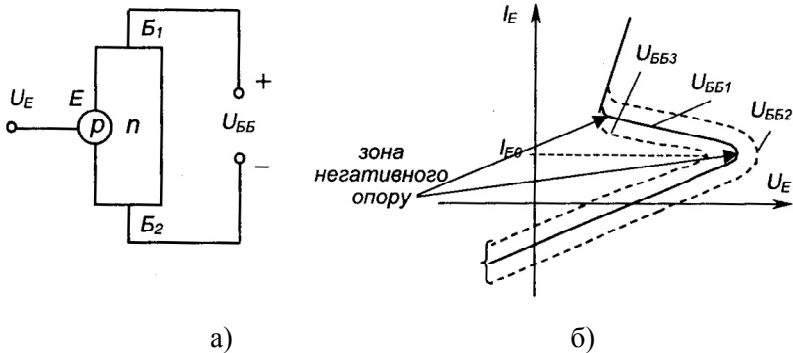


Рис. 2.14 - Одноперехідний транзистор:

а) конструкція; б) вхідна ВАХ

Оскільки ділянка між базовими електродами має лінійний опір, то спад напруги на базових зонах пропорційний їх довжині. Напруга на емітерному переході зумовлюється різницею потенціалів емітера та базової зони B_2 . Якщо потенціал емітера не перевищує потенціалу бази B_2 , то емітерний перехід зміщений у зворотному напрямку і через нього протікає невеликий зворотний струм. Під час зміщення емітерного переходу у прямому напрямку емітерний струм зростає, і

за певного його значення I_{E0} починається лавиноподібне зменшення опору бази B_2 за рахунок проникнення носіїв заряду через $p-n$ перехід. Наслідком цього є зниження напруги емітера за одночасного зростання емітерного струму – ділянка негативного опору на вхідній ВАХ (тут негативним змінам напруги відповідають позитивні зміни струму). Під час змін зовнішньої міжбазової напруги U_{BB} ВАХ зсувається, не змінюючи форми, як показано на рис. 2.14, б.

Наявність ділянки з негативним опором дозволяє використовувати одноперехідний транзистор у електронних ключах, генераторах, релейних схемах і т. ін. Донедавна вони широко використовувались у пристроях генерування імпульсів керування тиристорами, які ми розглянемо нижче.