

Лекція 2. ТРАНЗИСТОРИ

2.1. Біполярні транзистори

2.1.1. Будова та принцип дії транзистора

2.1.2. Основні схеми вмикання і статичні характеристики біполярного транзистора

2.1.3. Біполярний транзистор як активний чотириполюсник (h -параметри)

2.1.4. Основні режими роботи біполярного транзистора

2.1.5. Складені транзистори

2.1.6. Одноперехідний транзистор

2.2. Уніполярні (польові) транзистори

2.2.1. Загальні відомості

2.2.2. Польові транзистори з керуючим p - n переходом

2.2.3. Польові транзистори з ізольованим затвором

(МДН-транзистори)

2.2.4. СІТ-транзистори

2.5. Біполярні транзистори з ізольованим затвором (БТІЗ)

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.

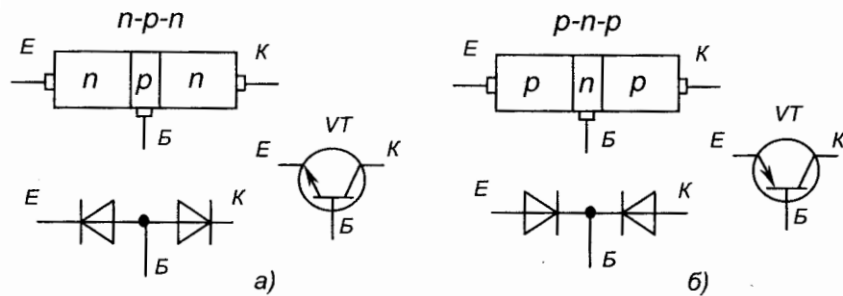


Рис. 2.1 – Схематична побудова та умовне позначення транзисторів $n-p-n$ (а) та $p-n-p$ (б) типів

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).

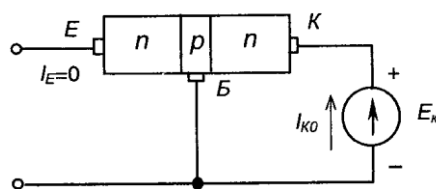


Рис. 2.2 - Спрощена схема вмикання транзистора

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.

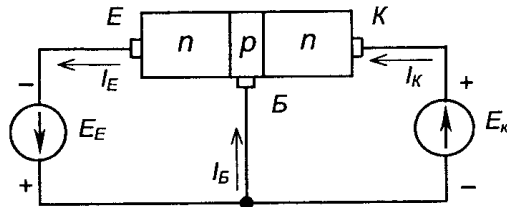


Рис. 2.3 - Схема вмикання транзистора

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.

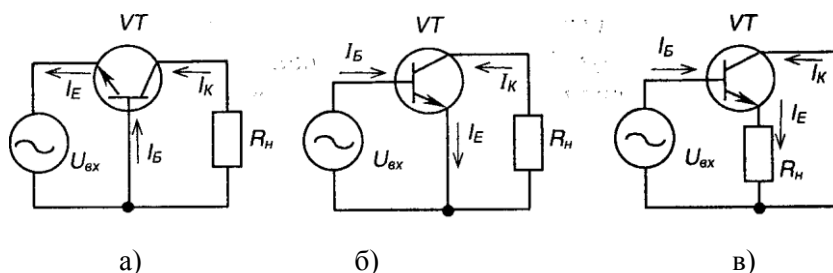


Рис. 2.4 - Схеми вмикання транзистора: а) з СБ; б) з СЕ; в) з СК

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

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

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

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

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

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

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 $U_{вix} = \text{const}$

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

- сім'я вихідних характеристик $i_{вix} = f(U_{вix})$, за $I_{ex} = \text{const}$;
- сім'я характеристик керування (характеристик прямої передачі) $i_{вix} = f(i_{ex})$, за $U_{вix} = \text{const}$;
- сім'я перехідних характеристик (характеристик зворотного зв'язку) $U_{ex} = f(U_{вix})$, за $I_{ex} = \text{const}$.

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 $U_{KB} = 0$ 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).

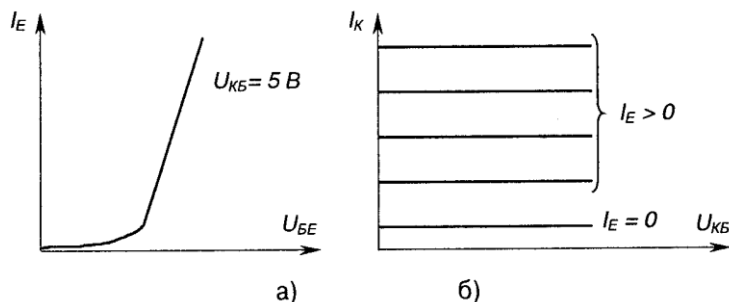


Рис. 2.5 - ВАХ транзистора, увімкненого за схемою з СБ: а) вхідні; б) вихідні

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 передує пробою через зменшення r_K .

Тому можна вважати, що $I_K = \alpha I_E + I_{K0}$. 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:

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

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

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

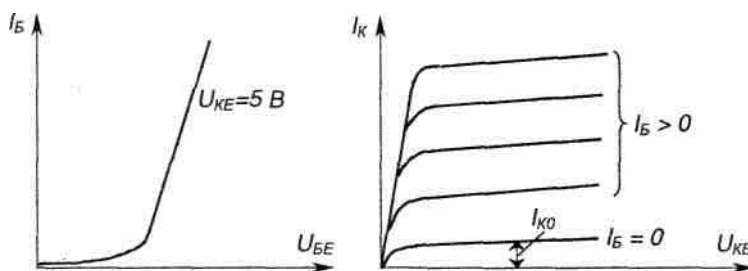


Рис. 2.6 - ВАХ транзистора, увімкненого за схемою з СЕ: а) вхідні; б) вихідні

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.

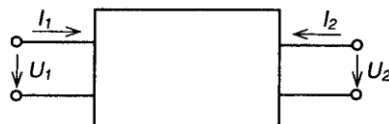


Рис. 2.7 - Активний лінійний чотириполіусник

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 :

$$\begin{cases} du_1 = \frac{\partial u_1}{\partial i_1} di_1 + \frac{\partial u_1}{\partial u_2} du_2 \\ di_2 = \frac{\partial i_2}{\partial i_1} di_1 + \frac{\partial i_2}{\partial u_2} du_2 \end{cases} \quad (2.13)$$

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 чотириполіусника 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.

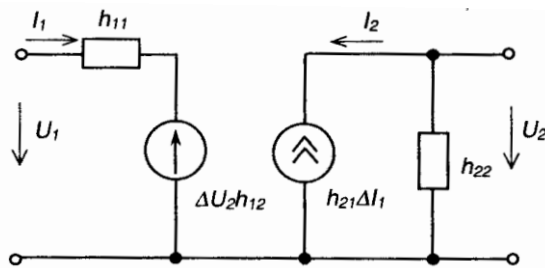


Рис. 2.8 - Схема заміщення транзистора за h -параметрами

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.

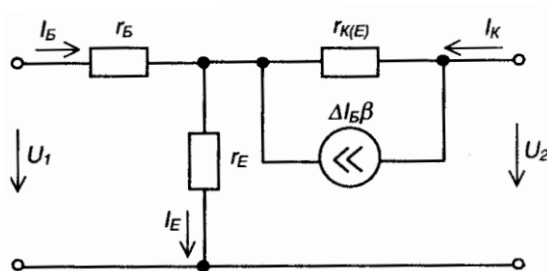


Рис. 2.9 – Т-подібна схема заміщення транзистора

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.

На сім'ї вихідних статичних характеристик побудуємо лінію навантаження, як показано на рис. 2.11. Для цього розглянемо режими неробочого ходу (Н.Х.) та короткого 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, $I_B = I_{OB}$, то цьому відповідає точка P , для якої $U_{вих} = U_{OK}$, $I_{вих} = I_{OK}$.

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

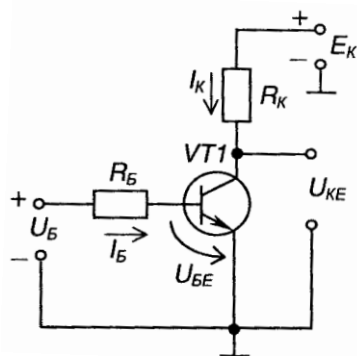


Рис. 2.10 - Схема вмикання транзистора з СЕ

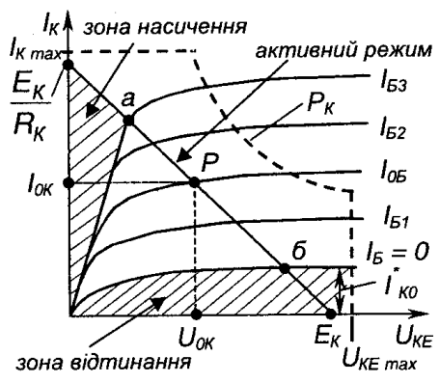


Рис. 2.11 - Вихідна динамічна характеристика транзистора

Якщо робочу точку намагатися задати нижче точки \bar{b} , транзистор переходить до режиму відтинання, якому відповідає власне точка \bar{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÷100)А;

- 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 одно-го 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

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

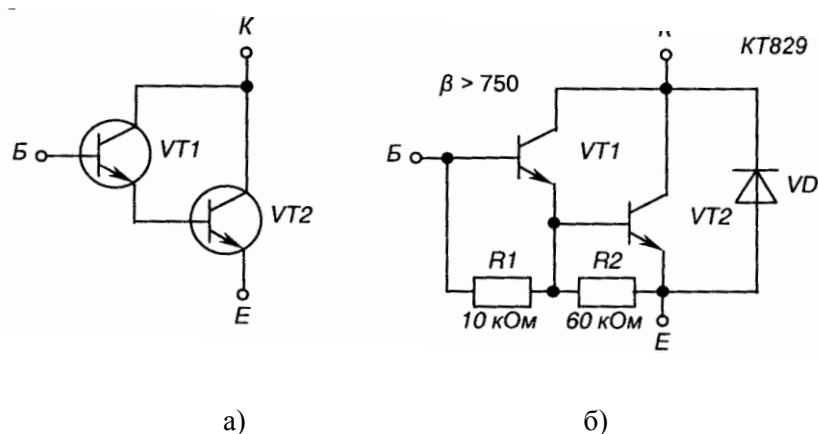


Рис. 2.12 - Складений транзистор за схемою Дарлінгтона

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.

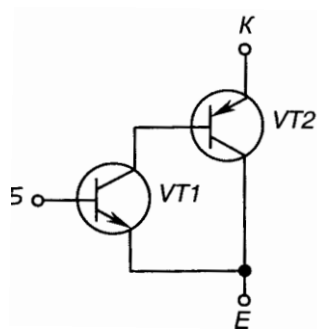


Рис. 2.13 - Складений транзистор за схемою Шиклаї

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 VT_2 $p-n-p$ 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.

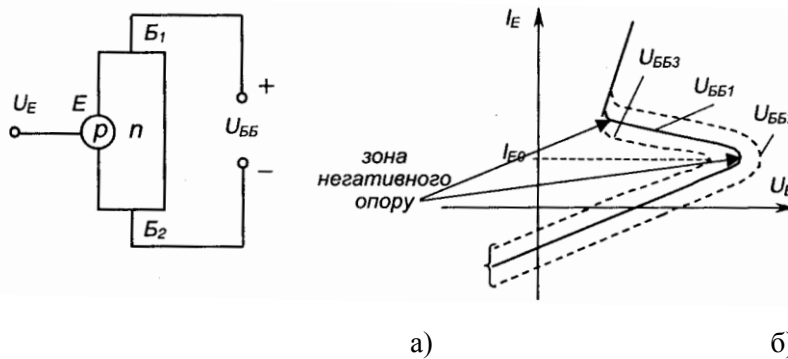


Рис. 2.14 - Одноперехідний транзистор: а) конструкція; б) вхідна ВАХ

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.

2.2. Уніполярні (польові) транзистори

2.2.1. Загальні відомості

До класу уніполярних належать транзистори, принцип дії яких ґрунтується на використанні носіїв заряду лише одного знаку (електронів або дірок). Керування струмом в силовому колі уніполярних транзисторів здійснюється зміною під впливом електричного поля провідності каналу, через який протікає струм. Тому уніполярні транзистори ще називаються польовими (ПТ).

Розрізняють ПТ з керуючим $p-n$ переходом (із затвором у вигляді $p-n$ переходу) та з ізольованим затвором. Останні, в свою чергу, поділяються на ПТ із вбудованим каналом та з індукованим каналом. ПТ з ізольованим затвором належать до різновиду МДН-транзисторів: конструкція «метал – діелектрик – НП». Якщо як діелектрик використовують оксид кремнію: конструкція «метал – оксид – НП», ПТ називають відповідно МОН-транзистором.

Характерною рисою ПТ є великий вхідний опір ($10^8 \div 10^{14}$ Ом).

Широкого розповсюдження ПТ набули завдяки високій технологічності у виробництві, стабільності характеристик і невеликій вартості за масового виробництва.

2.2.2. Польові транзистори з керуючим $p-n$ переходом

Конструкція та принцип дії ПТ з керуючим $p-n$ переходом пояснюється на моделі, наведеній на рис. 2.15.

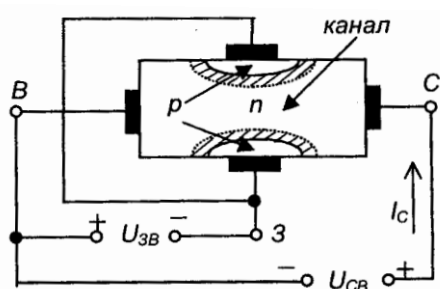


Рис. 2.15 - ПТ з керуючим $p-n$ переходом

У такого ПТ канал протікання струму являє собою шар НП, наприклад, n -типу, розміщений між двома $p-n$ переходами. Канал має контакти із зовнішніми електродами. Електрод, від якого починають рух носії заряду (у даному разі – електрони), називається витоком B , а електрод, до якого вони рухаються – стоком C .

НП шари p -типу, що створюють із n -шаром два $p-n$ переходи, виконані з більш високою концентрацією основних носіїв, ніж n -шар. Обидва p -шари електрично з'єднані і мають зовнішній електрод, що називається затвором $З$.

Вихідна напруга підключається між стоком і витоком (U_{CB}), а вхідна напруга (керуюча) – між витоком та затвором ($U_{ЗВ}$), причому на затвор подається зворотна відносно витоку напруга.

Принцип дії такого ПТ полягає у тому, що зі змінами вхідної напруги $U_{ЗВ}$ змінюється ширина $p-n$ переходів, що являють собою ділянки НП, збіднені носіями зарядів (запірний шар). Оскільки p -шар має більшу концентрацію до n -шару. При цьому змінюється переріз струмопровідного каналу, а отже і його провідність і відповідно вихідний струм I_C приладу.

Особливість польового транзистора полягає у тому, що на провідність каналу впливає як керуюча напруга $U_{ЗВ}$, так і напруга $U_{СВ}$. Вплив напруг на провідність каналу ілюструє рис. 2.26, на якому заради спрощення не показані ділянки n -шару, розміщені поза $p-n$ переходами.

На рис. 2.16, а зовнішню напругу прикладено лише у вхідному колі транзистора. Збільшення зворотної напруги на $p-n$ переході призводить до зменшення провідності каналу за рахунок зменшення його перерізу (вздовж усього каналу). Та оскільки $U_{СВ} = 0$, вихідний струм $I_C = 0$.

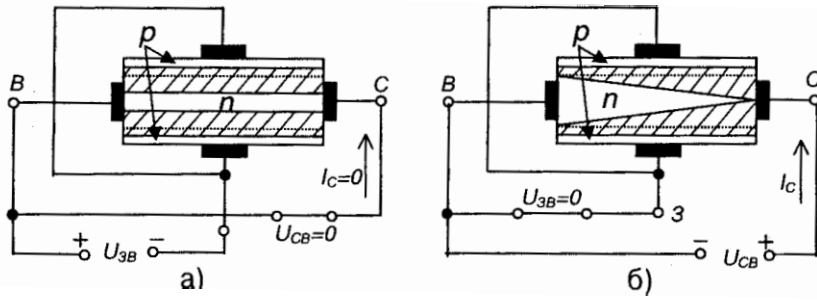


Рис. 2.16 - Вплив напруг на провідність каналу ПТ з керуючим $p-n$ переходом: а) за $U_{CB} = 0$; б) за $U_{зв} = 0$

Рис. 2.16, б ілюструє зміну перерізу каналу під впливом лише напруги U_{CB} ($U_{зв} = 0$). Коли $U_{CB} > 0$, через канал протікає струм, внаслідок якого виникає розподілений по каналу спад напруги, що зростає у напрямку стоку. Сумарний спад напруги ділянки стік-витік дорівнює U_{CB} . Відповідно, потенціали точок каналу вздовж нього неоднакові: зростають у напрямку стоку від нуля до U_{CB} .

Потенціал точок p -шару відносно витіку визначається потенціалом затвора відносно витіку і у даному випадку дорівнює нулю. У зв'язку із зазначеним, зворотна напруга, що прикладена до $p-n$ переходів, зростає у напрямку витік-стік і $p-n$ переходи розширюються у напрямку стоку. Це явище призводить до клиновидного зменшення перерізу каналу. Підвищення напруги U_{CB} викликає збільшення спаду напруги у каналі та подальше зменшення його перерізу, а отже, і провідності каналу. За певного значення U_{CB} межі обох $p-n$ переходів змикаються (див. рис. 2.16, б) і опір каналу стає великим.

Очевидно, що за сумарної дії U_{CB} та $U_{зв}$ змикання $p-n$ переходів відбувається швидше. При цьому у приладі діє автоматична система керування, що забезпечує протікання фіксованого значення I_c за подальшого після змикання росту U_{CB} – струм через канал не залежить від U_{CB} .

Аналогічно працюють транзистори з каналом p -типу, лише полярність напруг повинна бути зворотною.

На рис. 2.17 наведені умовні позначення ПТ з керуючим $p-n$ переходом.



Рис. 2.17 - Умовні позначення ПТ з керуючим $p-n$ переходом: а) з каналом n -типу, б) з каналом p -типу

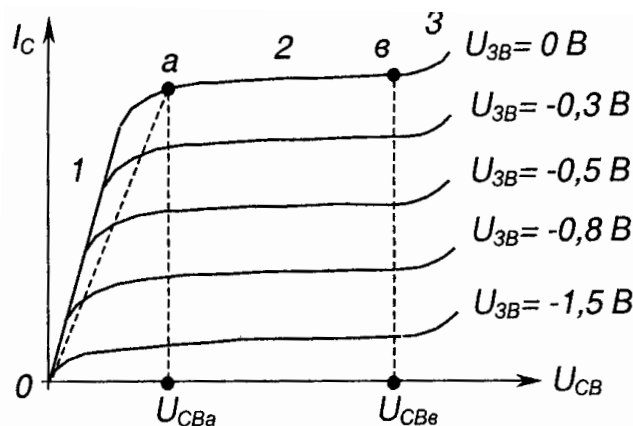


Рис. 2.18 - Стокові ВАХ ПТ з керуючим $p-n$ переходом

На ділянці 1 (*0a*) маємо значну залежність I_C від вихідної напруги U_{CB} . Це неробоча ділянка для випадку використання приладу як підсилюючого елемента. Тут його використовують як керований резистор.

На ділянці 2 (*ав*) залежність вихідного струму від вихідної напруги мала. Це робоча ділянка у режимі підсилення.

Ділянка 3 відповідає пробою приладу.

Точці *a* відповідає змикання *p-n* переходів (напруга U_{CBa}). Причому, чим вища напруга U_{3B} (абсолютна величина), тим швидше змикаються *p-n* переходи.

Напруга на затворі, за якою струм вихідного кола $I_C = 0$, називається напругою запирання або напругою відтинання U_{3B0} . Числове значення U_{3B0} дорівнює U_{CB} у точці *a* ВАХ транзистора.

Стік-затворні (передаточні) ВАХ відображають залежність струму стоку від напруги затвор-витік за фіксованої напруги стік-витік: $I_C = f(U_{3B})$, за $U_{CB} = const$.

Передатна ВАХ зображена на рис. 2.19.

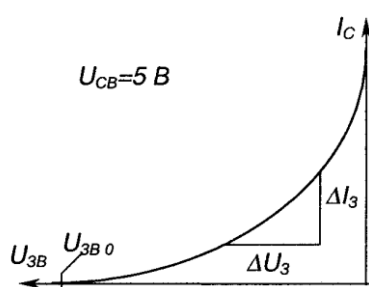


Рис. 2.19 - Передаточна ВАХ ПТ з керуючим *p-n* переходом

Параметри ПТ з керуючим *p-n* переходом:

- максимальне значення струму стоку I_{Cmax} (відповідає його значенню у точці *b* на вихідних ВАХ за $U_{3B} = 0$), сягає від десятків міліампер до одного ампера;

- напруга відтинання U_{3B0} ;

- максимальне значення напруги стік-витік U_{CBmax} (задають у 1,2÷1,5 рази меншим за напругу пробою ділянки стік-витік за $U_{3B} = 0$), становить до 100 В;

- крутизна стік-затворної характеристики $S = \frac{dI_C}{dU_{3B}}$, за

$U_{CB} = const$;

- вхідний опір $r_{ex} = \frac{dU_{3B}}{dI_3}$, становить десятки мегаом.

2.2.3. Польові транзистори з ізолюваним затвором (МДН-транзистори)

На відміну від ПТ з керуючим *p-n* переходом, у яких затвор має безпосередній електричний контакт із суміжною зоною струмо-провідного каналу, у МДН-транзисторів затвор, що являє собою, наприклад, алюмінієву плівку (*Al*), ізолюваний від зазначеної зони шаром діелектрика. Тому МДН-транзистори належать до класу ПТ з ізолюваним затвором. Наявність діелектрика забезпечує високий вхідний опір цих транзисторів ($10^{12} \div 10^{14}$ Ом). Частіше як діелектрик використовують оксид кремнію (SiO_2), і тоді ПТ називають МОН-транзистором (метал-оксид-НП). Такі транзистори бувають із вбудованим та індукованим каналами. Останні більш розповсюджені.

Конструкцію МОН-транзистора з індукованим каналом *n*-типу зображено на рис. 2.20.

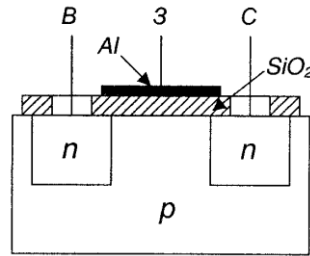


Рис. 2.20. Конструкція МОН-транзистора з індукованим каналом

За $U_{зв} = 0$ або від'ємному, $I_C = 0$ (два $p-n$ переходи увімкнені зустрічно). За позитивної напруги на затворі відносно витоку поверхневий шар на межі НП із діелектриком збагачується електронами, що притягуються з глибини p -шару (де вони є завдяки тепловій генерації вільних носіїв заряду) до затвору: виникає явище інверсії НП у примежовій зоні, коли p -шар стає n -шаром. Таким чином, між зонами n -шарів наводиться (індукується) канал, по якому може протікати струм від стоку до витоку.

За наявності струму стоку, як і у транзистора з керуючим $p-n$ переходом, за рахунок розподілення по довжині каналу падіння напруги від нуля до $U_{св}$, канал ($p-n$ перехід між з'єднаними каналом зонами n та зоною p) звужується у напрямку стоку. За деякого значення напруги $U_{св}$ канал перекривається так, що подальше збільшення струму стоку не відбувається. Тому вихідні ВАХ ПТ з ізольованим затвором подібні до ВАХ ПТ з керуючим $p-n$ переходом, тільки характеристики проходять вище зі збільшенням напруги $U_{зв}$.

Умовні позначення МДН-транзисторів наведені на рис. 2.21.

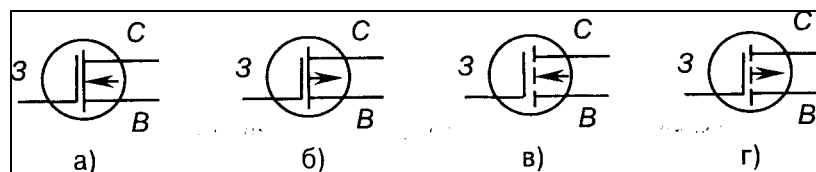


Рис. 2.21 - Умовні позначення МДН-транзисторів з каналами: вбудованим n -типу (а); вбудованим p -типу (б); індукованим n -типу (в); індукованим p -типу (г)

У ПТ з вбудованим каналом зони p -типу з'єднано перетинкою - тонким шаром n -типу. В результаті канал під дією напруги $U_{зв}$ може як розширюватись, так і звужуватись (до повного змикання) залежно від знаку $U_{зв}$. ПТ широко використовують як дискретні компоненти електронних пристроїв, а також у складі інтегральних мікросхем.

2.4. СІТ-транзистори

У середині 70-х рр. минулого століття багаторічні дослідження (Японія, США) завершилися створенням ПТ із статичною індукцією - СІТ-транзистора. Цей транзистор, будучи за суттю ПТ з керуючим $p-n$ переходом, є твердотільним аналогом електронновакуумної лампи (тріода), у якій вихідна характеристика за нульового значення сигналу керування за формою нагадує характеристику $p-n$ переходу. З ростом від'ємного значення напруги керування характеристики зсуваються вправо.

На відміну від площинно-горизонтальної конструкції ПТ з керуючим $p-n$ переходом, СІТ-транзистор має вертикальну конструкцію. Наприклад, p -шари затвору вводяться в n -шар вертикально.

Таке виконання забезпечує приладу роботу за напруг до 2000В й частотах до 500кГц. А розміщення на одному кристалі великого числа елементарних транзисторів із наступним їх пара-лельним з'єднанням забезпечує робочі струми до 500А. Крім роботи в режимі ПТ, цей транзистор може працювати і у режимі біполярного транзистора, коли на затвор подається додатне зміщення. При цьому падіння напруги на приладі у відкритому стані зменшується.

Умовне позначення СІТ-транзистора наведено на рис. 2.22.

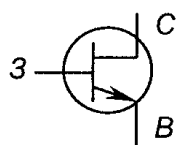


Рис. 2.22 - Умовне позначення СІТ-транзистора

2.5. Біполярні транзистори з ізольованим затвором (БТІЗ)

Біполярні транзистори з ізольованим затвором (БТІЗ, англійською: IGBT- insulated gate bipolar transistor) з'явилися у 80-х роках минулого століття і відтоді інтенсивно використовуються як силові прилади, витісняючи у багатьох застосуваннях тиристори.

Структуру, умовне позначення та еквівалентну схему БТІЗ наведено на рис. 2.23.

Як видно з рисунка, він являє собою складну багатошарову структуру, створення якої стало можливим із розвитком інтегральної технології: це вже, фактично, інтегральна мікросхема. БТІЗ поєднує властивості МОН-транзистора щодо керування з властивостями біполярного транзистора у силовому колі. Таку структуру ще називають схемою псевдо-Дарлінгтона.

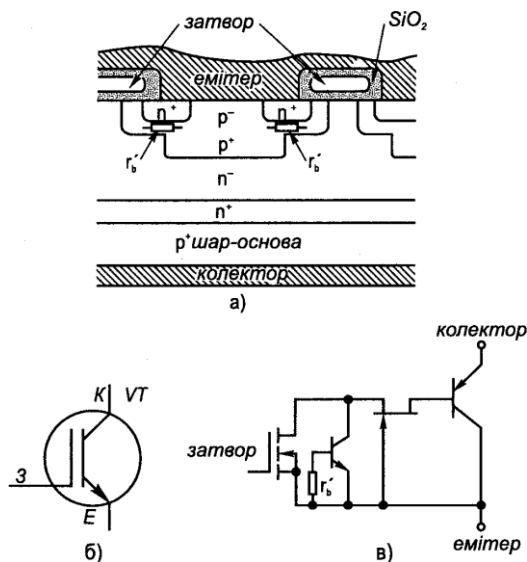


Рис. 2.23 - Структура (а), умовне позначення (б) та еквівалентна схема (в) БТІЗ

БТІЗ виконуються на напруги до 1200В при частотах до 100кГц та силі струму до 2000А, що забезпечується паралельним з'єднанням великої кількості елементарних транзисторів на одному кристалі (як у випадку СІТ-транзистора). Вони також виготовляються у вигляді модулів, в яких міститься від одного до шести транзисторів, що дозволяє зменшити габарити електронних пристроїв.

У поєднанні з широкою номенклатурою керуючих пристроїв у мікровиконанні БТІЗ у наш час широко застосовують у пристроях енергетичної електроніки.