

The background of the slide is a complex, glowing blue digital circuit. A central microchip is prominent, with a grid of fine lines on its surface. Numerous fiber optic cables or data lines radiate from the center, creating a sense of depth and connectivity. The overall aesthetic is high-tech and futuristic.

**Тема : Біполярні  
транзистори**

## План

1. Класифікація і маркування
2. Будова та основні види біполярних транзисторів
2. Принцип дії біполярного транзистора (БТ).
3. Основні схеми включення БТ.
  - 3.1 Схема з загальною базою.
  - 3.2 Схема з загальним емітером.
  - 3.3 Схема з загальним колектором.
4. Режим роботи БТ за постійним струмом.
5. Співвідношення між струмами в БТ.
6. Вхідна та вихідна вольт-амперні характеристики БТ.
7. Підсилення сигналів.
8. Емітерний повторювач.

# 1 .Класифікація і маркувння

**Транзі́стор** (англ. *transfer* — «переносити» і англ. *resistor* — «опір») — напівпровідниковий елемент електронної техніки, який дозволяє керувати струмом, що протікає через нього, за допомогою зміни вхідної напруги або струму, поданих на додатковий електрод. Невелика зміна вхідних величин може приводити до суттєво більшої зміни вихідної напруги та струму.

Транзистори є основними елементами сучасної електроніки. Зазвичай вони застосовуються в підсилювачах і логічних електронних схемах. У мікросхемах в єдиний функціональний блок об'єднані тисячі й мільйони окремих транзисторів.

Тип приладу				Умовне графічне Позначення (УГП)
Біполярні	Біполярний p-n-p типу			
	Біполярний n-p-n типу			
Польові	З керуючим p-n-переходом	З каналом p-типу		
		З каналом n-типу		
	З ізолюваним засувом МОН транзистори	З вбудованим каналом	Вбудований канал p-типу	
			Вбудований канал n-типу	
		З індукованим каналом	Індукований канал p-типу	

Класифікація транзисторів здійснюється за наступними ознаками:

- за матеріалом напівпровідника: германієві або кремнієві та сполуки галію. У позначенні транзисторів це фіксується літерами К, Г, А або відповідно цифрами 1,2,3.
- за типом провідності областей (тільки біполярні транзистори): із прямою провідністю (р-п-р структура) або зі зворотною провідністю (п-р-п структура);
- технологією виготовлення;
- особливостями роботи;
- призначенням;
- за потужністю: малопотужні МП (  $20,3 \text{ Вт}$ ), середньої потужності СрП ( $0,3 \div 3 \text{ Вт}$ ), потужні П ( $< 3 \text{ Вт}$ );
- діапазоном робочих частот: низької частоти НЧ ( $< 3 \text{ мГц}$ ), середньої частоти СрЧ ( $3 \div 30 \text{ МГц}$ ), високої частоти ВЧ ( $> 30 \text{ мГц}$ ).

Позначення транзисторів складається із чотирьох елементів: перший (цифра або букви) вказує на матеріал напівпровідника; другий (буква) – тип транзистора за принципом дії; третій (цифри) – тип транзистора за електричними параметрами; четвертий (буква) – різновидність даного типу.

Приклад:

К	Т	201	В
К	П	103	Л
I	II	III	IV

I – матеріал напівпровідника: Г-германій, К-кремній

II – тип транзистора за принципом дії. Т-біполярні, П – польові

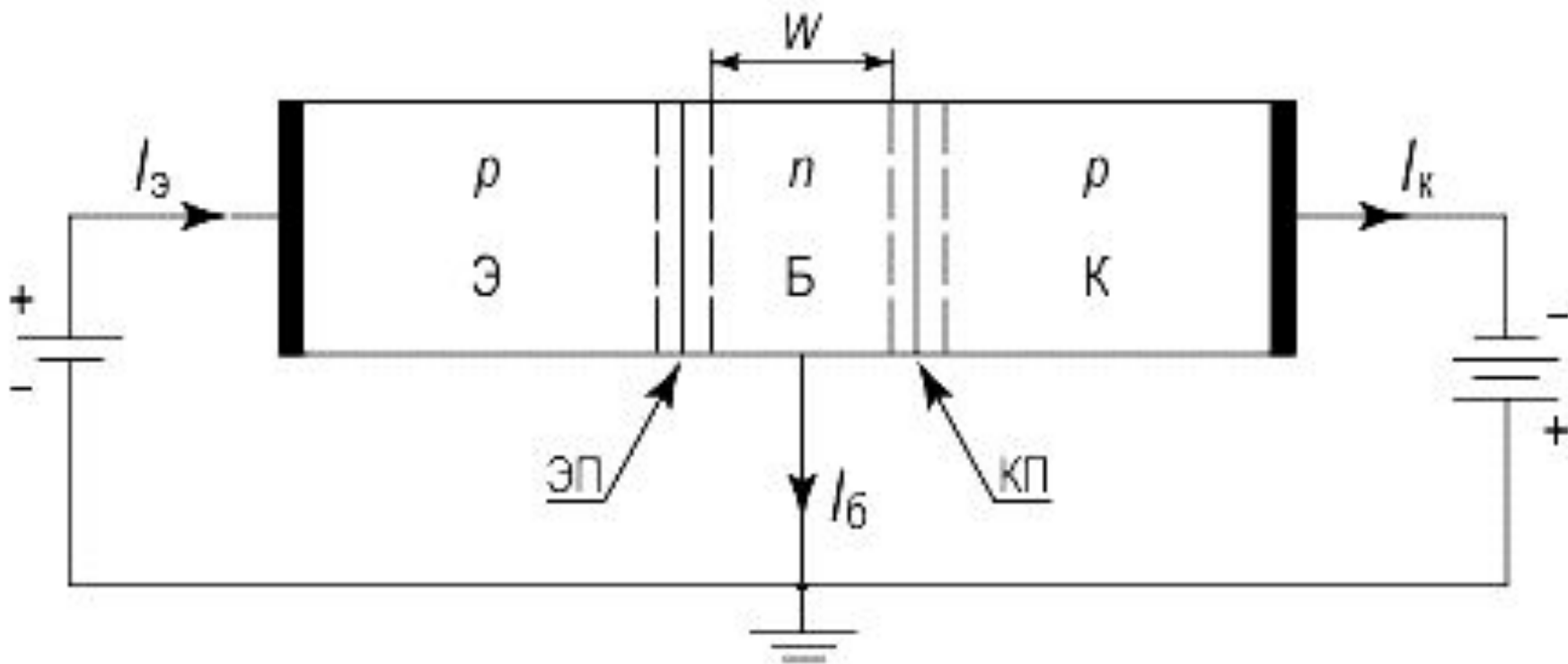
III – три або чотири цифри – група транзисторів за електричними параметрами.

Перша цифра показує частотні властивості та потужність відповідно до табл.2.2.

IV – модифікація транзисторів в 3-й групі.

Наприклад, КТ201В є кремнієвим БТ широкого вжитку малої потужності, середньої частоти; номер розробки-01, різновид-В.

# Схематичне зображення транзистора типу р-п-р:



- Область транзистора, розташована між переходами називається **базою** (Б). Примикають до бази області найчастіше роблять неоднаковими. Одну з них виготовляють так, щоб з неї найбільш ефективно відбувалася інжекція в базу, а іншу - так, щоб відповідний перехід найкращим чином здійснював екстракцію інжектованих носіїв з бази.
- Область транзистора, основним призначенням якої є інжекція носіїв в базу, називають **емітером** (Е), а відповідний перехід емітерним.
- Область, основним призначенням якої є екстракція носіїв з бази - **колектор** (К), а перехід колекторним.



Якщо на емітерний перехід напруга пряме, а на колекторному переході - зворотне, то включення транзистора вважають нормальним, при протилежної полярності - інверсним. За характером руху носіїв струму в базі розрізняють **дифузійні і дрейфові біполярні** транзистори.

Основні характеристики транзистора визначаються в першу чергу процесами, що відбуваються в базі. Залежно від розподілу домішок в базі може бути присутнім або відсутнім електричне поле. Якщо при відсутності струмів в базі існує електричне поле, яке сприяє руху неосновних носіїв заряду від емітера до колектора, то транзистор називають **дрейфовим**, якщо ж поле в базі відсутня - **бездрейфовим** (дифузійним).

# 1. Принцип дії біполярного транзистора

При роботі транзистора як підсилювача емітерний перехід відкритий, а колекторний – закритий. Це досягається відповідним ввімкненням джерел живлення (рис. 2.4). Оскільки емітерний перехід відкритий, то через нього протікатиме струм емітера  $I_e$ , який викликаний переходом електронів з емітера у базу і переходом дірок з бази у емітер. Отже, струм емітера матиме дві складові – електронну та діркову.

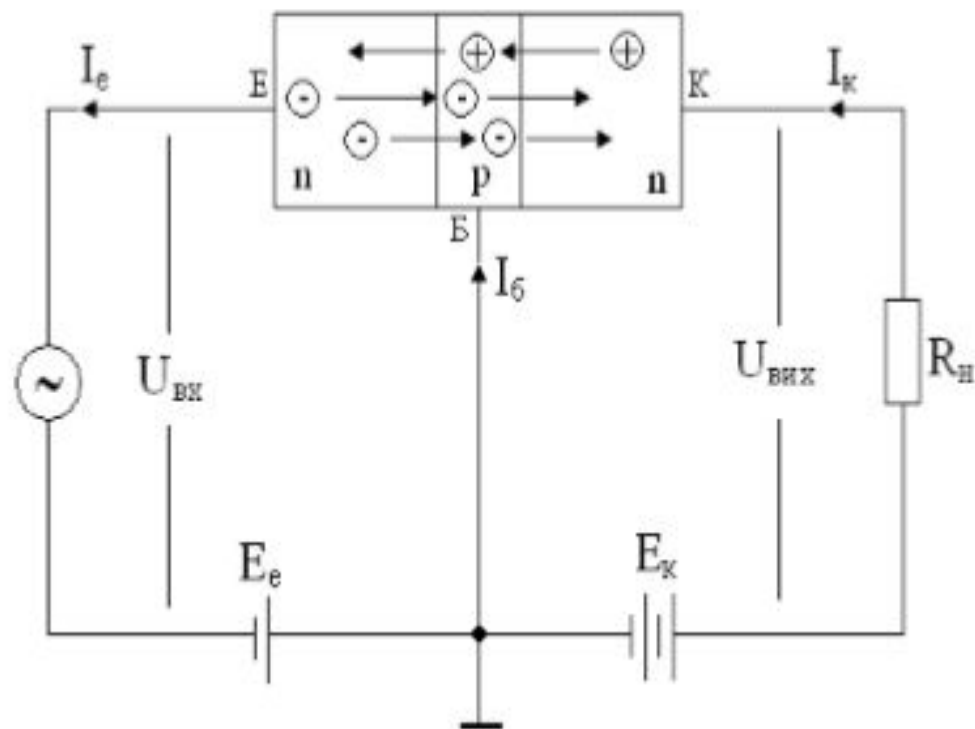


Рисунок 2.4 – Робота біполярного транзистора як підсилювача сигналу

У залежності від полярності напруг, які прикладені до емітерного і колекторного переходів транзистора розрізняють 4 режими його роботи.

**Активний режим.** На емітерний перехід подається пряма напруга, а на колекторний – зворотня. Внаслідок того, що напруга в ланці колектора значно перевищує напругу, що прикладена до емітерного переходу, а струми у областях колектора та емітера майже однакові, потужність корисного сигналу на виході схеми (у колекторній ланці) буде набагато більшою за потужність сигналу на вході транзистора (у емітерній ланці). Цей режим є основним режимом роботи транзистора.

**Режим відсікання.** До обох переходів, у цьому випадку, підводяться зворотні напруги. Тому через них проходитьиме лиш незначний струм, що зумовлений рухом неосновних носіїв зарядів. Практично ж транзистор у режимі відсікання буде закритим.

**Режим насичення.** На обидва переходи подається пряма напруга. Струм у вихідній ланці транзистора буде максимальним і таким, що практично не керується вхідним струмом. У цьому режимі транзистор буде повністю відкритим.

**Інверсний режим.** До емітерного переходу підводиться зворотня напруга, а до колекторного – пряма. Емітер і колектор міняють свої функції на протилежні – емітер виконує функції колектора і навпаки. Цей режим, як правило, не відповідає нормальним умовам експлуатації транзистора. Оскільки біполярний транзистор має три виводи, то для визначення основних параметрів він представляється у виді чотириполюсника (рис. 2.5), де I<sub>вх</sub> – вхідні струми, I<sub>вих</sub> – вихідні струми.

## 2. Основні схеми включення БТ.

Залежно від того, який електрод є спільним для вхідного і вихідного кіл, розрізняють три схеми ввімкнення транзисторів:

- Зі спільною базою -СБ
- Зі спільним емітером -СЕ
- Зі спільним колектором -СК

Слід зазначити, що основні схеми ввімкнення розглядаються для змінного сигналу.

## 2.1 Схема з загальною базою.

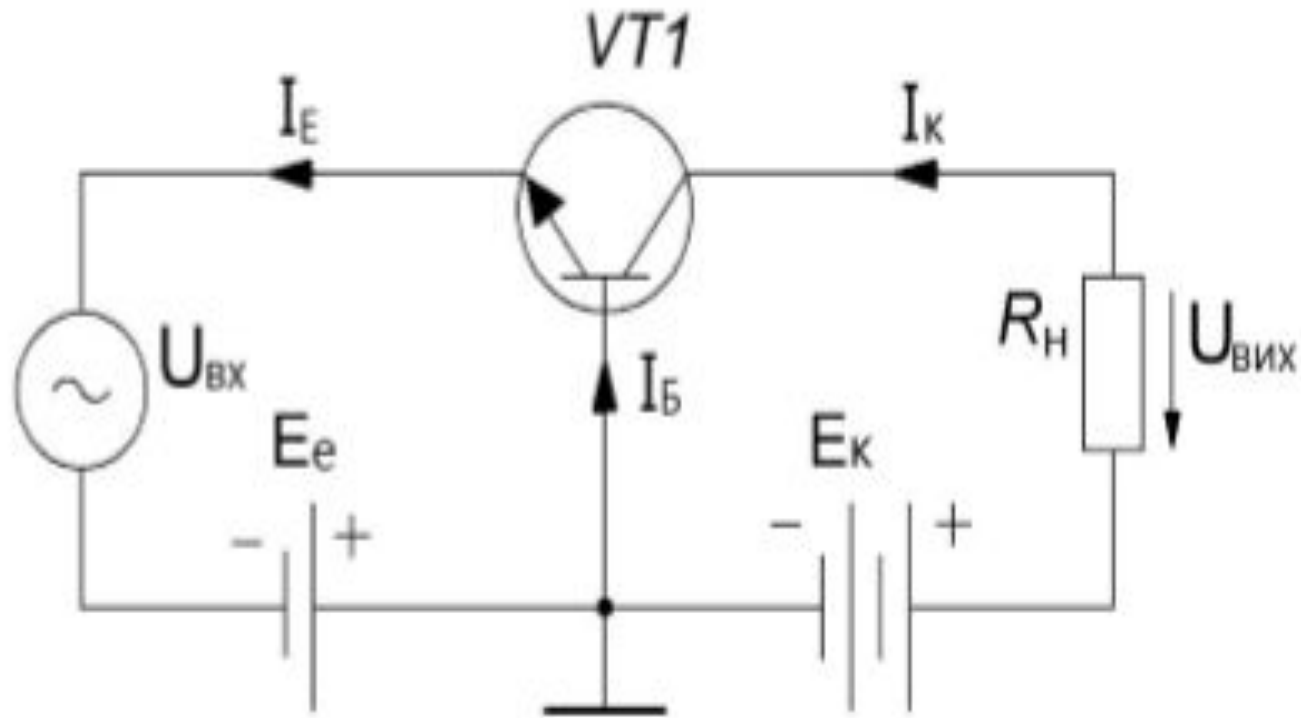


Рис.2.46. Схема ввімкнення транзистора зі СБ

Струм, що проходить через джерело вхідного сигналу, називають вхідним струмом. Значить:

$$I_{\text{ВХ}} = I_{\text{Е}} - \text{вхідний струм}$$
$$I_{\text{ВИХ}} = I_{\text{К}} - \text{вихідний струм}$$

Напруга в транзисторах схемах позначають двома індексами в залежності від того, між якими виводами транзистора ці напруги вимірюються

$$U_{\text{ВХ}} = U_{\text{БЕ}} - \text{вхідна напруга}$$
$$U_{\text{ВИХ}} = U_{\text{БК}} - \text{вихідна напруга}$$

Якщо під дією  $U_{\text{ВХ}}$  струм емітера зростає на деяку величину  $\Delta I_{\text{Е}}$ , то відповідно зростають і решта струмів транзистора

$$I_{\text{Е}} + \Delta I_{\text{Е}} = I_{\text{К}} + \Delta I_{\text{К}} + I_{\text{Б}} + \Delta I_{\text{Б}}$$

Незалежно від схеми ввімкнення транзистори характеризуються **диференціальним коефіцієнтом передачі струму**:

$$\alpha = \frac{\Delta I_{\text{ВИХ}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}} = \frac{\Delta I_{\text{К}}}{\Delta I_{\text{Е}}} \text{ при } E_{\text{К}} = \text{const} \quad (2.35)$$

$$\alpha < 1$$

$$\alpha < \beta$$

Вхідний опір схеми з СБ :

$$R_{\text{ХВВ}} = \frac{\Delta U_{\text{ВХ}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}} = \frac{\Delta U_{\text{ВЕ}}}{\Delta I_{\text{Е}}} \approx r_e, \quad (2.36)$$

$r_e$ -опір емітерного переходу, ввімкненого в прямому напрямі.  
Вхідний опір схеми з СБ малий ( одиниці - десятки Ом), тому що вхідне коло схеми являє собою відкритий емітерний перехід.

Недоліки схеми з СБ:

Схема не підсилює струм ;

Малий вхідний опір;

Два різних джерела напруги живлення.

Перевага схеми з СБ: висока температурна стабільність.



## 2.2 Схема з загальним емітером.

У схемі з СЕ:

$I_{\text{вх}} = I_{\text{Б}}$  – вхідний струм

$I_{\text{вих}} = I_{\text{К}}$  – вихідний струм

$U_{\text{вх}} = U_{\text{БЕ}}$  – вхідна напруга

$U_{\text{вих}} = U_{\text{БК}}$  – вихідна напруга

$R_{\text{вх.Е}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}} = U_{\text{БЕ}}/I_{\text{Б}}$  – вхідний опір

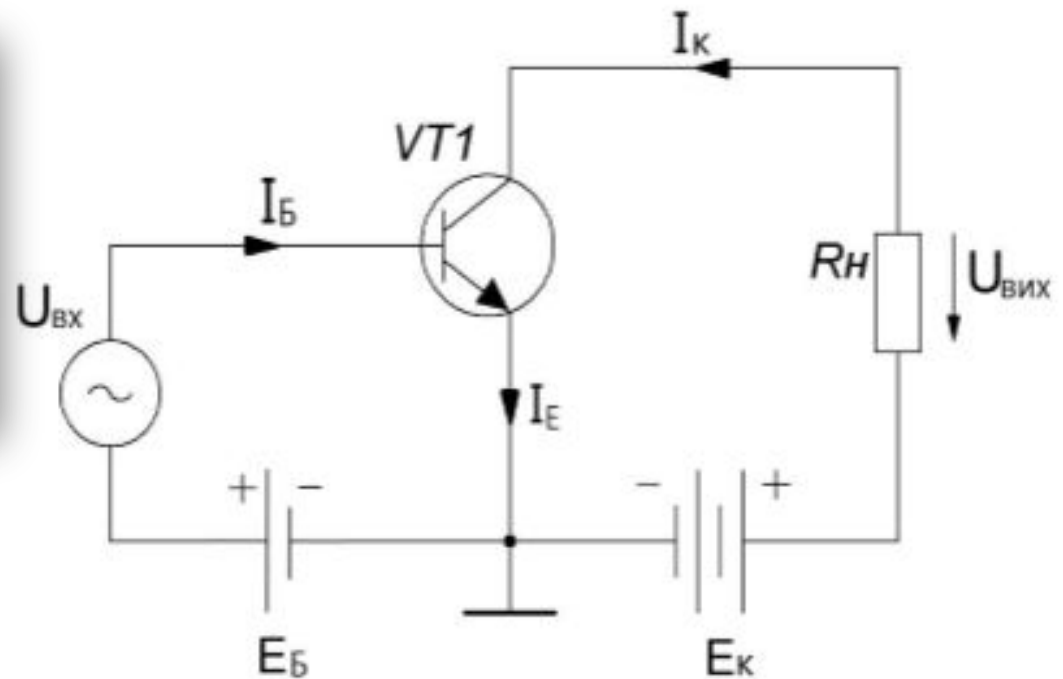


Рис.2.47. Схема ввімкнення транзистора СЕ

Вхідний опір транзистора в схемі СЕ значно більший, ніж в схемі з СБ. Це видно із очевидної нерівності.

$$\frac{\Delta U_{ВХ}}{\Delta I_{Б}} \gg \frac{\Delta U_{ВХ}}{\Delta I_{Е}}$$

Коефіцієнт прямої передачі струму для схеми з СЕ:

$$\beta = \frac{\Delta U_{ВИХ}}{\Delta I_{ВХ}} = \frac{\Delta I_{К}}{\Delta I_{Б}}, \quad (2.37)$$

Перевага схеми з СЕ:

- Великий вхідний опір ( $R_{ВХ.Е} \gg R_{ВХ.Б}$ )
- Можливість живлення від одного джерела напруги, так як на базу і на колектор подаються напруги живлення одного знаку.
- Недоліки схеми з СЕ: Низька температурна стабільність схеми (гірша ніж в схемі з СБ)

## 2.3 Схема з загальним колектором.

У схемі з СК колектор є спільною точкою входу й виходу, оскільки джерела живлення завжди шунтуються конденсаторами великої ємності і для змінного струму можуть вважатися коротко замкненими.

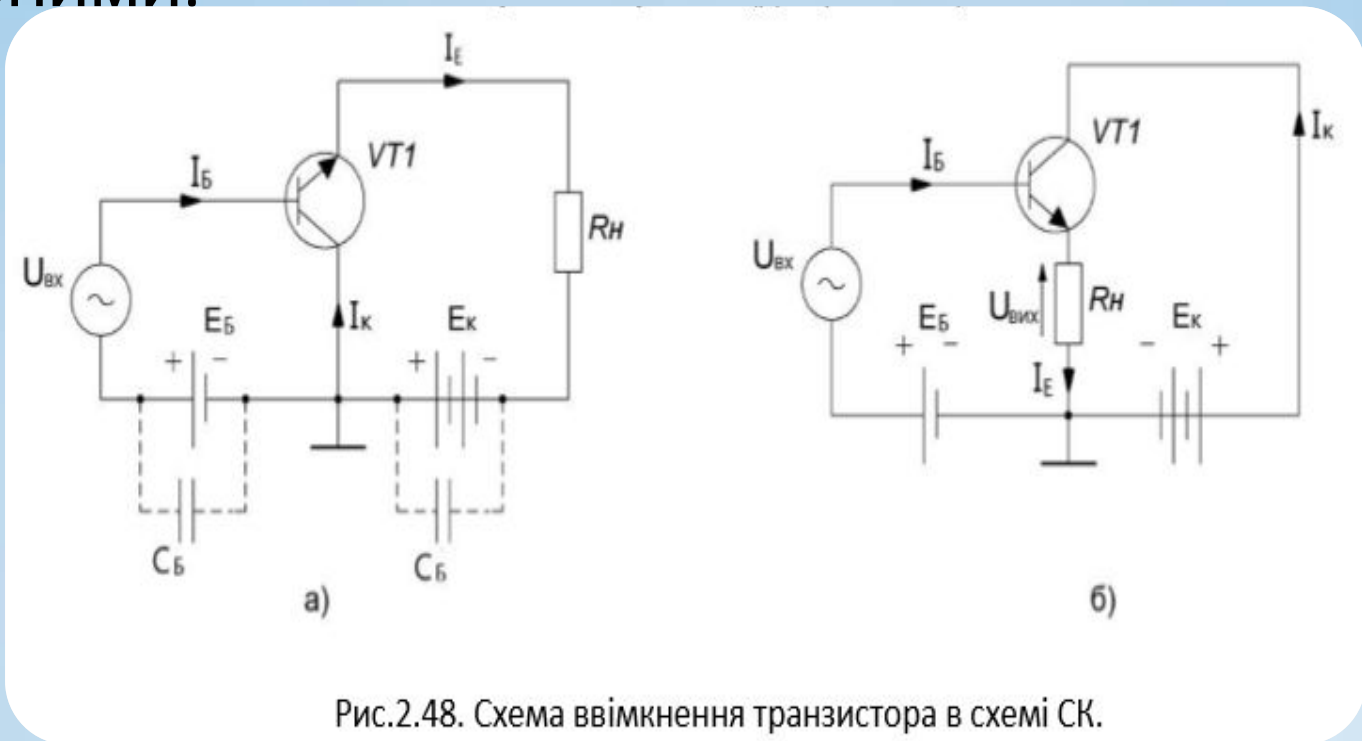


Рис.2.48. Схема ввімкнення транзистора в схемі СК.

Рис.2.48. Схема ввімкнення транзистора в схемі СК.

### 3. Режим роботи БТ за постійним струмом.



Рисунок 2.5 – Транзистор у виді чотириполюсника

**Зворотній струм колектора  $I_{к.о}$**  – струм через перехід база-колектор при відключеному емітері та заданій зворотній напрузі на колекторі. Струм  $I_{к.о}$  характеризує якість колекторного переходу транзистора і є основною причиною температурної нестабільності режиму транзистора у схемі. Чим менше значення має  $I_{к.о}$ , тим транзистор має кращі температурні характеристики.

## 4. Співвідношення між струмами в БТ.

Згідно рис.3.3, струм емітера  $I_E$  має дві складові - електронну  $I_{en}$  і діркову  $I_{ep}$ :

$$I_E = I_{en} + I_{ep}. \quad (3.5)$$

Зворотний струм колектора в ланцюзі бази протилежний току рекомбінації

$$I_B = I_{брек} - I_{кбо}; \quad I_B = (1 - h_{21б})I_E - I_{кбо}. \quad (3.6)$$

Струм колектора має дві складові – керований струм і зворотний струм  $I_{кбо}$  :

$$I_K = h_{21б}I_E + I_{кбо}. \quad (3.7)$$

З урахуванням рівнянь (3.5) - (3.7) отримуємо

$$I_E = I_B + I_K. \quad (3.8)$$

Диференціальний опір колекторного переходу дуже великий (перехід включений у зворотному напрямку.)

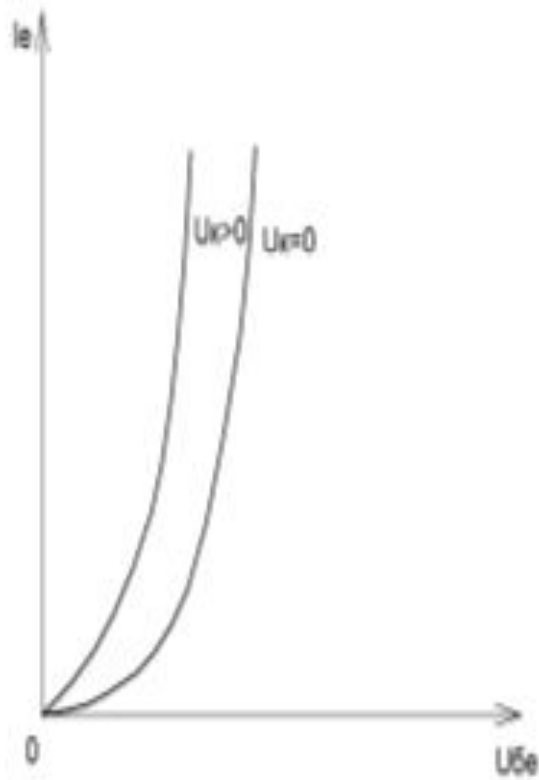
У ланцюг колектора можна включати навантаження з досить великим опором  $R_H$ , практично не змінюючи струм колектора. Диференціальний опір прямозміщеного ем  $r_{\text{э}} \ll r_{\text{к}}$  переходу дуже малий.

При зміні вхідного (емітерного) струму на  $\Delta I_{\text{е}}$  практично на таку ж величину зростає колекторний струм. Однак зміна споживаної потужності в ланц  $\Delta P_{\text{ВЫХ}} = \Delta I_{\text{к}}^2 R_H \approx \Delta I_{\text{э}}^2 R_H$  менше зміни потужності у вихідному ланцюзі

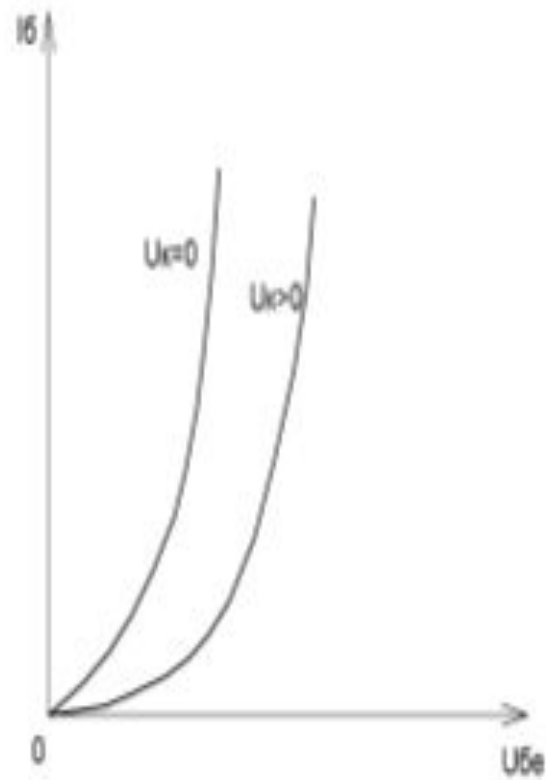
, тобто транзистор здатний управляти великою потужністю в ланцюзі колектора при невеликих затратах потужності в емітері.

## 5. Вхідна та вихідна вольт-амперні характеристики БТ.

**Вхідні характеристики** – це залежність вхідного струму (струму бази у схемі з СЕ та струму емітера у схемі з СБ) від напруги між базою та емітером при фіксованих значеннях напруги на колекторі. Ці характеристики мало залежать від  $U_K$  при  $U_K > 0$ . Вхідні характеристики мало залежать від розкиду параметрів транзисторів одного типу, але сильно залежать від температури. Підвищення температури призводить до зсуву вхідних характеристик у область нижчих напруг.



а



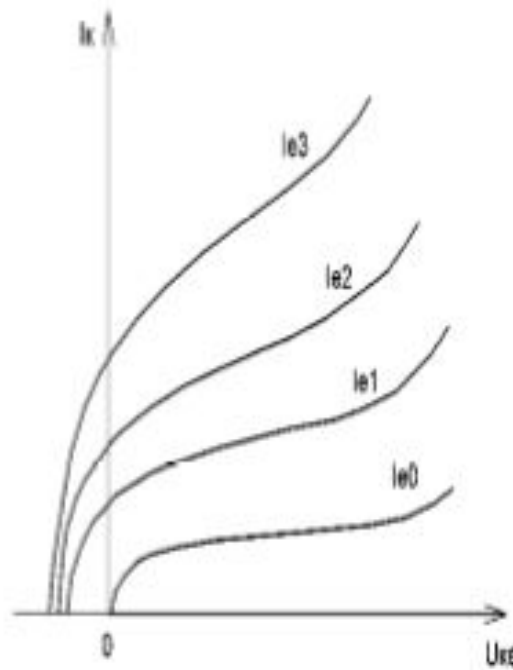
б

а – для схеми з СБ, б – для схеми з СЕ

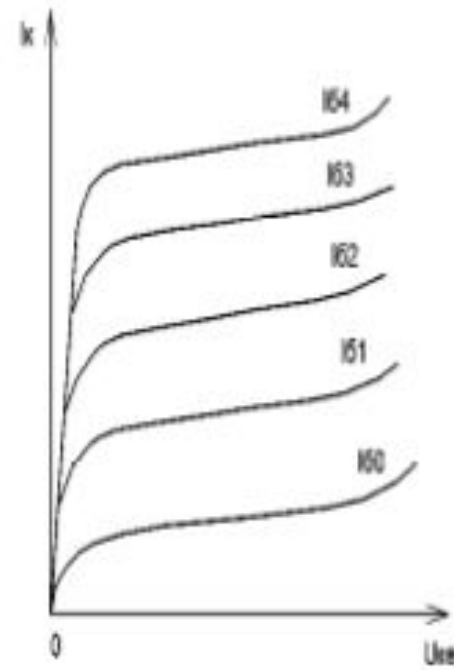
Рисунок 2.7 – Вхідні статичні характеристики транзистора



***Вихідні характеристики*** – це залежність струму колектора від напруги на колекторі при фіксованих значеннях струму бази в схемі з ЗЕ або струму емітера в схемі з ЗБ . При підвищенні температури вихідні характеристики зміщуються в сторону значних струмів і нахил їх збільшується. По вхідних та вихідних характеристиках можна визначити більшість  $h$  – параметрів схем з СЕ та СБ. Максимально допустимі параметри транзисторів обмежують область допустимих режимів роботи транзистора.



а



б

а – для схеми з СБ, б – для схеми з СЕ  
 Рисунок 2.8 – Вихідні статичні характеристики транзистора

# 6. Підсилення сигналів.

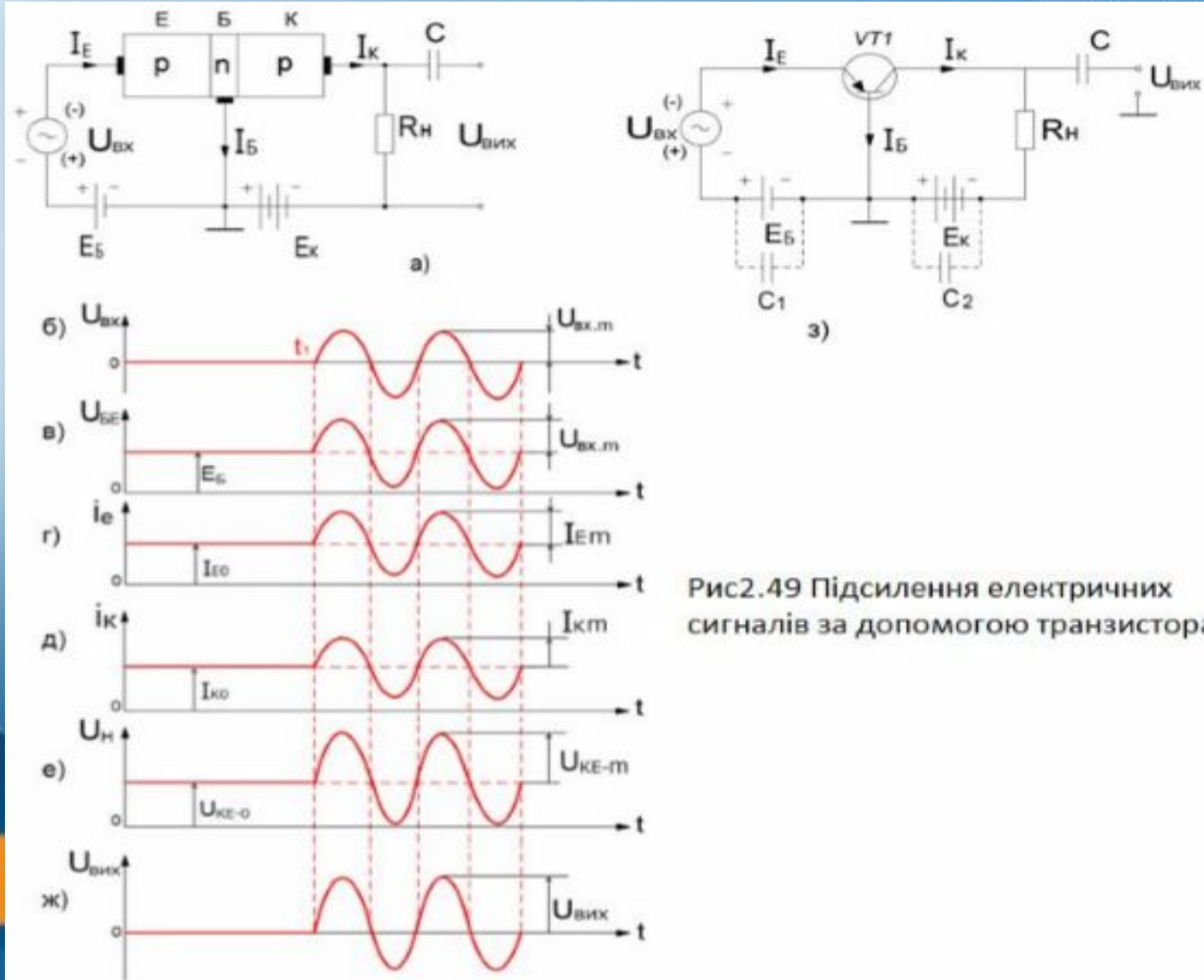


Рис2.49 Підсилення електричних сигналів за допомогою транзистора

Змінна складова пульсуючої напруги  $U_H$  відокремлюється з допомогою конденсатора  $C$  від постійної складової і подається на вихід підсилувача у вигляді змінної напруги  $U_{\text{ВИХ.}}$

Доведемо, що транзистор підсилює потужність вхідного сигналу. За законом Ома напруга  $U_{\text{ВИХ}}$  і  $U_{\text{ВХ}}$  можна подати так:

$$U_{\text{ВИХ}} = I_{\text{ВИХ}} \cdot R_H \quad (2.40)$$

$$U_{\text{ВХ}} = I_{\text{ВХ}} \cdot R_{\text{ВХ}}, \quad (2.41)$$

де  $R_{\text{ВХ}}$  - опір вхідного кола транзистора.

Число, що показує, у скільки разів змінна напруга на виході підсилувача перевищує напругу сигналу на вході, називають коефіцієнтом підсилення за напругою і позначають  $K_U$

$$K_U = \frac{U_{\text{ВИХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{I_{\text{ВИХ}} \cdot R_H}{I_{\text{ВХ}} \cdot R_{\text{ВХ}}} \quad (2.42)$$

Для розглянутої схеми ввімкнення транзистора

$$I_{\text{ВИХ}} = I_K;$$

$$I_{\text{ВХ}} = I_E.$$

Опір вхідного кола транзистора можна приблизно вважати рівним опору ділянки емітер-база (емітерного переходу)  $r_E$ . Значення  $r_E$  у малопотужних резисторів досягає десятків Ом.

Коефіцієнт підсилення за потужністю ( $K_P$ ) можна підрахувати за формулою:

$$K_P = \frac{P_{\text{ВИХ}}}{P_{\text{ВХ}}} = \frac{I_{\text{ВИХ}}^2 \cdot R_H}{I_{\text{ВХ}}^2 \cdot R_{\text{ВХ}}} \approx \frac{I_E^2 \cdot R_H}{I_K^2 \cdot R_{\text{ВХ}}} \approx \frac{R_H}{r_E} \gg 1 \quad (2.44)$$

Основними показниками транзисторного підсилювача при будь-якій схемі ввімкнення транзистора являється:

***Коефіцієнт підсилення за струмом***

$$K_I = \frac{\Delta I_{\text{ВИХ}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}} \quad (2.45)$$

***Коефіцієнт підсилення за напругою***

$$K_U = \frac{\Delta U_{\text{ВИХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ}}} \quad (2.46)$$

***Коефіцієнт підсилення за потужністю***

$$K_p = \frac{\Delta P_{\text{ВИХ}}}{\Delta P_{\text{ВХ}}}, \text{ або } K_p = K_U \cdot K_I \quad (2.47)$$

***Вхідний опір***

$$R_{\text{ВХ}} = \frac{\Delta U_{\text{ВХ}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}} \quad (2.48)$$

Для розглянутих на рис. 2.1; 2.2; 2.3 схем ввімкнення транзистора коефіцієнт підсилення за струмом, напругою і потужністю визначається наступними виразами.

Схема з спільною базою (СБ):

$$K_{IB} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_E} = \alpha; \quad (2.49)$$

$$K_{UB} = \frac{\Delta I_K R_H}{\Delta I_E R_{вхБ}} = \alpha \frac{R_H}{R_{вхБ}}; \quad (2.50)$$

$$K_{PB} = \alpha^2 \frac{R_H}{R_{вхБ}}; \quad (2.51)$$

Схема з спільним емітером (СЕ):

$$K_{IE} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} = \beta; \quad (2.52)$$

$$K_{UE} = \frac{\Delta I_K R_H}{\Delta I_B R_{вхЕ}} = \beta \frac{R_H}{R_{вхЕ}}; \quad (2.53)$$

$$K_{PE} = \beta^2 \frac{R_H}{R_{вхЕ}}; \quad (2.54)$$

Схема зі спільним колектором (СК):

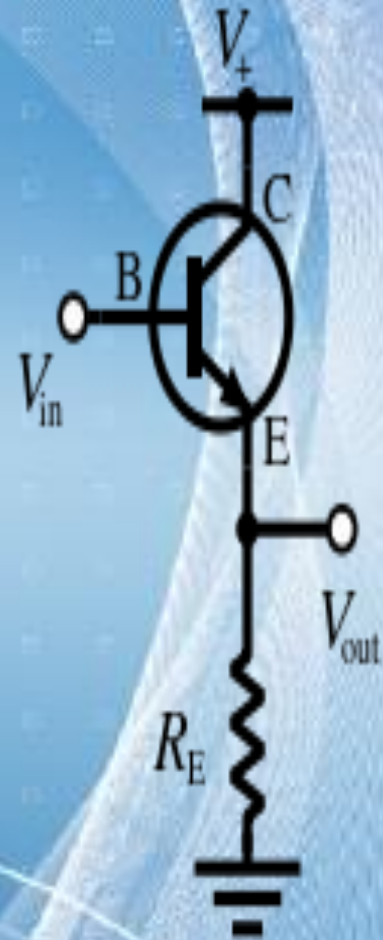
$$K_{IB} = \frac{\Delta I_E}{\Delta I_B} = \beta + 1; \quad (2.55)$$

$$K_{UK} = \frac{\Delta I_E R_H}{\Delta I_B R_{вхК}} = (\beta + 1) \frac{R_H}{R_{вхК}}; \quad (2.56)$$

$$K_{PK} = (\beta + 1)^2 \frac{R_H}{R_{вхК}}. \quad (2.57)$$

## 7. Емітерний повторювач

**Емітерний повторювач** - окремий випадок повторювачів напруги на основі біполярного транзистора. Характеризується високим підсиленням по струму і коефіцієнтом передачі по напрузі, близьким до одиниці. При цьому вхідний опір відносно великий (проте він менший, ніж вхідний опір стокового повторювача), а вихідний — малий.



У емітерному повторювачі використовується схема підключення транзистора зі спільним колектором (СК). Тобто напруга живлення подається на колектор, а вихідний сигнал знімається з емітера. Внаслідок чого утворюється 100 % від'ємний зворотній зв'язок по напрузі, що дозволяє значно зменшити нелінійні спотворення, що виникають при роботі. Слід також відзначити, що фази вхідного і вихідного сигналу збігаються. Така схема включення використовується для побудови вхідних підсилювачів, у випадку якщо вихідний опір джерела великий, а також як вихідні каскади підсилювачів потужності.



Коефіцієнт підсилення по струму:

$$I_{\text{вих}}/I_{\text{вх}} = I_e/I_b = I_e/(I_e - I_k) = 1/(1-\alpha) = \beta \quad [\beta \gg 1]$$

Вхідний опір:

$$R_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}/I_{\text{вх}} = (U_{\text{бе}} + U_{\text{ке}})/I_b$$

*Переваги*

- Великий вхідний опір
- Малий вихідний опір

*Недоліки*

- Коефіцієнт підсилення по напрузі менше 1