

**Змістовий модуль 14. Напівпровідникові прилади.  
Лекція № 16. Тема № 14.2. Біполярний транзистор.**

**План лекції**

- 1. Принцип роботи біполярного транзистора*
- 2. Схеми включення транзисторів*
- 3. Характеристики транзисторів*

**1. Принцип роботи біполярного транзистора**

У 1948 р. Джон Бардін, Уолтер Браттейн і Вільям Шоклі в лабораторіях фірми Bell виготовили перший працюючий транзистор.

Напевно, жодне з відкриттів сучасної фізики не вплинуло настільки безпосередньо на життя людей, як транзистор. Завдяки своїм перевагам перед електронною лампою транзистор (мал. 1) зробив революцію в області електронних засобів зв'язку й забезпечив створення й широке використання швидкодіючих ЕОМ з великим обсягом пам'яті.

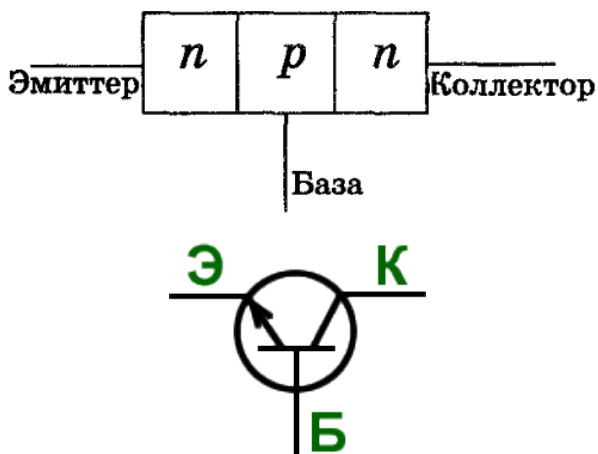


Мал. 1. Біполярні транзистори

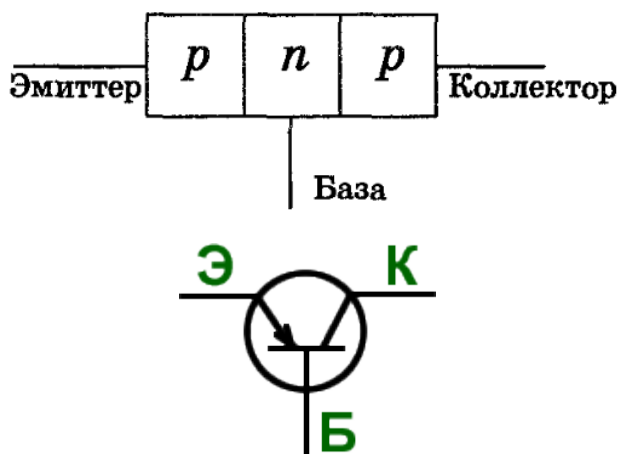
**Транзистором** називається напівпровідниковий прилад с двома р-п-переходами, призначений для посилення й генерування електричних коливань, що представляє собою пластину кремнію або германія, яка складається із трьох областей. Дві крайні області завжди мають однаковий тип провідності, а середня – з протилежною провідністю.

Транзистори, у яких крайні області мають електронну провідність, а середня - діркову провідність, називаються транзисторами n-p-n - типу (мал. 2);

транзистори, у яких крайні області мають діркову, а середня - електронну проводимість - транзисторами р-п-р - типу (мал. 3).



Мал. 2. Транзистор  $n - p - n$



Мал. 3. Транзистор  $p - n - p$

Фізичні процеси, що відбуваються в транзисторах двох типів, аналогічні й відмінність між ними полягає в тому, що полярності включення джерел живлення їх протилежні, а також у тому, що якщо в транзисторі п-р-п- типу електричний струм створюється в основному електронами, то в транзисторі р-п-р - типу - дірками.

Суміжні області, відділені друг від друга р-п-переходами, називаються емітером Е, базою Б і колектором К.

Емітер є областю, що випускає (емітує) носії зарядів (електронів у транзисторі р-п-типу й дірок у транзисторі п-р-типу), колектор - область, що збирає носії зарядів, база - середня область, основа.

В умовах роботи транзистора до лівого р-п-переходу прикладається напруга емітер - база  $U_E$  в прямому напрямку, а до правого р-п-переходу - напруга база - колектор  $U_K$  - у зворотному.

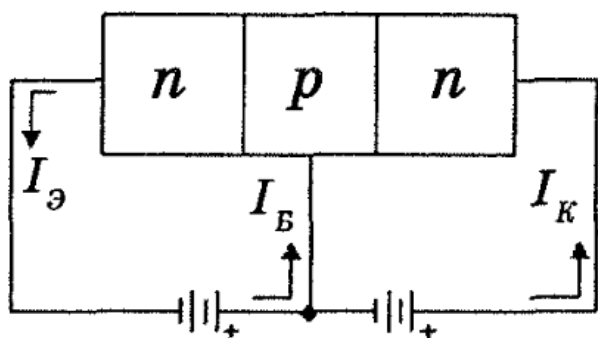


Рис. 4. Схема включення транзистора структури  $n - p - n$

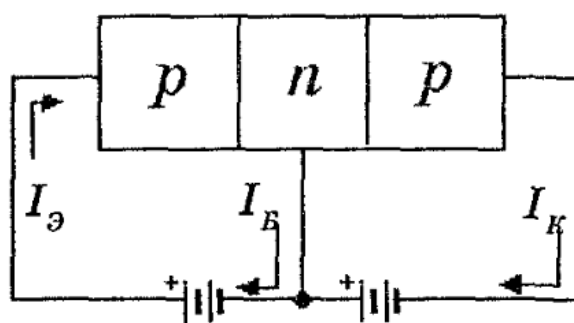


Рис. 5. Схема включення транзистора структури  $p - n - p$

Під дією електричного поля більша частина носіїв зарядів з лівої області (емітера), долаючи р-п-перехід, переходить у дуже вузьку середню область (базу). Далі велика частина носіїв зарядів продовжує рухатися до другого переходу й, наближаючись до нього, попадає в електричне поле, створене зовнішнім джерелом  $U_K$ .

Під впливом цього поля носії зарядів втягуються в праву область (колектор), збільшуючи струм у ланцюзі батареї  $U_K$ .

Якщо збільшити напругу  $U_E$ , то зросте кількість носіїв зарядів, перешедших з емітера в базу, тобто збільшиться струм емітера на деяку величину  $\Delta I_E$ . При цьому також збільшиться струм колектора на величину  $\Delta I_K$ .

У базі незначна частина носіїв зарядів, перешедших з емітера, рекомбінує з вільними носіями зарядів протилежної полярності, зменшення яких поповнюється новими носіями зарядів із зовнішнього ланцюга, що утворюють струм бази  $I_B$ .

*Таким чином, струм колектора  $I_K = I_E - I_B$  виявиться менше струму емітера, незначно відрізняючись від останнього. Відношення  $\alpha = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_E}$  при  $U_K = \text{const}$  називається коефіцієнтом підсилення по струму й звичайно має значення  $\alpha = 0,9 \dots 0,995$ .*

Через те, що лівий (емітерний) р-п-перехід перебуває під прямою напругою, то він має малий опір. На правий же (колекторний) р-п-перехід впливає зворотна напруга й він має великий опір. Тому напруга, що прикладається до емітера, досить мала (десяті частки вольта), а напруга, що подається на колектор, може бути досить великою (до декількох десятків вольтів).

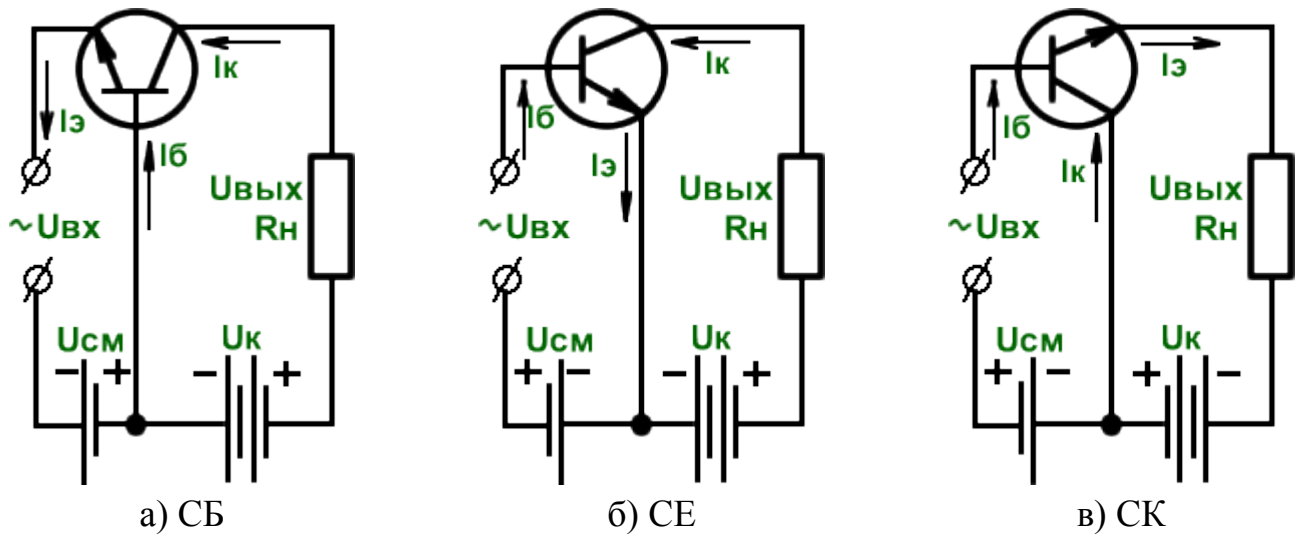
Зміна струму в ланцюзі емітера, викликана малою напругою  $U_E$ , створює приблизно таку ж зміну струму в ланцюзі колектора, де діє значно більша напруга  $U_K$ , у результаті чого транзистор здійснює посилення потужності.

## 2. Схеми включення транзисторів.

При роботі транзистора як підсилювача електричних коливань вхідну змінну напругу  $U_{ВХ}$  (сигнал, що підлягає посиленню) подають послідовно із джерелом постійної напруги зсуву  $U_{см}$  між емітером і базою, а вихідна напруга  $U_{ВІХ}$  (посилений сигнал) знімається з навантажувального резистора  $R_H$ .

Можливі три схеми включення транзисторів, розглянемо їх на прикладі транзистора структури  $n - p - n$  (мал. 6): із спільною базою СБ (а), із спільним емітером СЕ (б) і із спільним колектором СК (в). Назва схеми показує, який

електрод транзистора є спільним для вхідного і вихідного ланцюгів. Схеми включення транзисторів відрізняються своїми властивостями, але принцип посилення коливань залишається однаковим.



Мал. 6. Схеми включення транзистора структури  $n - p - n$ .

### *Схема із спільною базою (СБ)*

У схемі із спільною базою позитивне збільшення напруги на вході  $\Delta U_{ВХ}$  викликає збільшення струму емітера  $I_E$ , що приводить до збільшення як струму колектора  $I_k$ , так і напруги виходу  $\Delta U_{ВИХ}$ , причому  $\Delta U_{ВИХ} \gg \Delta U_{ВХ}$ .

У схемі із СБ джерело вхідної напруги включене у ланцюг емітер - база, а навантаження й джерело живлення - у ланцюг колектор - база.

Вхідний опір схеми із СБ малий (декілька ом або десятків ом), тому що емітерний перехід включений у прямому напрямку. Вихідний опір схеми, навпаки, великий (сотні кілоом), тому що колекторний перехід включений у зворотному напрямку.

Малий вхідний опір схеми із СБ є істотним її недоліком, що обмежує застосування її в підсилювачах. Через джерело вхідного сигналу в цій схемі проходить увесь струм емітера, і посилення по струму не відбувається (коефіцієнт підсилення по струму  $\alpha < 1$ ). Посилення по напрузі й по потужності в цій схемі може досягати декількох сотень.

### *Схема із спільним емітером (СЕ)*

У схемі із спільним емітером СЕ джерело вхідної напруги включене у ланцюг емітер - база, а опір навантаження  $R_H$  і джерело живлення - у ланцюг

емітер - колектор, тому емітер є спільним електродом для вхідного і вихідного ланцюгів.

Вхідний опір схеми з СЕ більше, чим у схеми із СБ, тому що вхідним струмом у ній є струм бази, який набагато менше струму емітера й струму колектора. Цей опір становить сотні ом. Вихідний опір схеми з СЕ великий й може становити до ста кілоом.

Коефіцієнт підсилення по струму  $\beta$  у цій схемі визначається як відношення збільшення струму колектора  $I_K$  до збільшення струму бази  $I_B$  при постійній напрузі на колекторі, тобто  $\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B}$  при  $U_K = \text{const}$  і може мати значення  $\beta = 10 \div 200$  для різних транзисторів.

Враховуючи рівності  $I_E = I_K + I_B$  і  $\alpha = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_E}$ , одержимо

$$\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_E - \Delta I_K} = \frac{\frac{\Delta I_K}{\Delta I_E}}{1 - \frac{\Delta I_K}{\Delta I_E}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}.$$

Коефіцієнт підсилення по напрузі  $K_U$  для схеми з СЕ того ж порядку, що й для схеми із СБ. Коефіцієнт підсилення по потужності  $K_P = K_U K_I$  у багато разів більше, чим у схемі із СБ.

У схемі із спільним емітером СЕ при посиленні вхідної напруги відбувається поворот фази вихідної напруги на половину періоду, тобто на  $180^\circ$ , як це видно зі схеми: позитивні збільшення вхідної напруги викликають негативне збільшення вихідної й навпаки.

### ***Схема із спільним колектором (СК)***

У схемі із спільним колектором СК джерело вхідної напруги включається в ланцюг бази, а джерело живлення й опір навантаження - у ланцюг емітера. Вхідним струмом є струм бази, а вихідним - струм емітера.

Коефіцієнт підсилення по струму для цієї схеми

$$K_I = \frac{\Delta I_E}{\Delta I_B} = \frac{\Delta I_E}{\Delta I_E - \Delta I_K} = \frac{1}{1 - \alpha}.$$

Вхідний опір схеми з СК великий (десятки кілоом), а вихідний опір малий (до  $1 \div 2$  кОм).

Коефіцієнт підсилення по напрузі схеми із спільним колектором ОК -  $K_U = 0,9 \div 0,95$ , тобто близький до одиниці, і цю схему часто називають емітерним повторювачем.

Схема із спільним колектором СК використовується для узгодження окремих каскадів посилення, джерела сигналу або навантаження з підсилювачем.

Зведемо параметри схем включення транзисторів у таблицю 1.

Таблиця 1. Параметри схем включення транзисторів

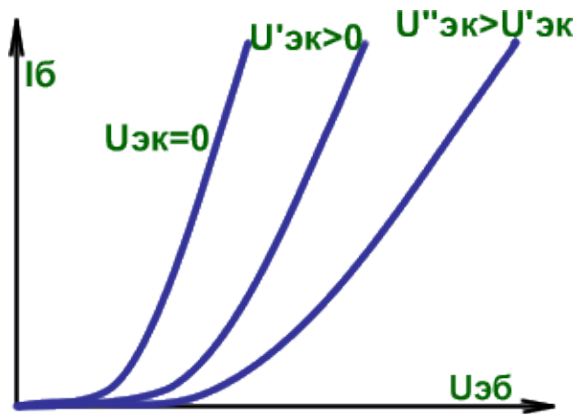
	Схема із СБ	Схема з СЕ	Схема з СК
Коефіцієнт підсилення по струму $K_I$	$\alpha < 1$	$\beta = 10 \dots 200$	десятки раз
Коефіцієнт підсилення по напрузі $K_U$	до декількох сотень	до декількох сотень	0,9...0,95
Коефіцієнт підсилення по потужності $K_P = K_U \cdot K_I$	до декількох сотень	до декількох тисяч	десятки раз
Вхідний опір $R_{BX} = \frac{\Delta U_{BX}}{\Delta I_{BX}}$	одиниці-десятки Ом	сотні Ом	десятки кОм
Вихідний опір $R_{BЫX} = \frac{\Delta U_{BЫX}}{\Delta I_{BЫX}}$	сотні кОм	десятки кОм	до 1...2 кОм

### 3. Характеристики транзисторів.

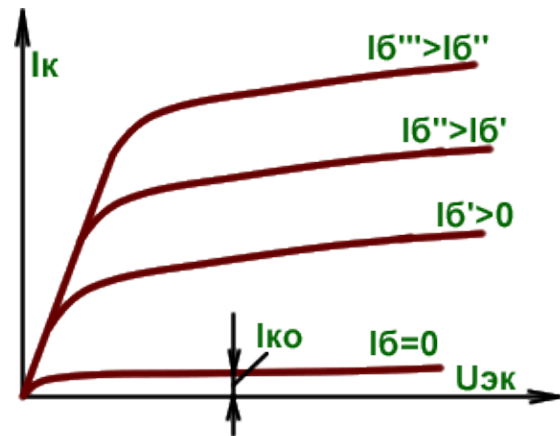
Характеристиками транзистора називаються залежності між струмами й напругами у вхідному і вихідному ланцюгах. При різних схемах включення транзистора вхідні й вихідні ланцюги різні, отже, і характеристики являють собою залежності різних величин для кожної схеми включення.

Так, для схеми із спільним емітером СЕ вхідним ланцюгом є ланцюг бази й вхідна характеристика (мал. 7) відбиває залежність струму бази від напруги емітер - база при постійній напрузі між емітером і колектором, тобто  $I_B = f(U_{BE})$  при  $U_{KE} = \text{const}$ .

Вихідним ланцюгом для цієї схеми є ланцюг колектора й вихідною характеристикою (мал. 8) - залежність струму колектора від напруги емітер - колектор при незмінному струмі бази, тобто  $I_K = f(U_{EK})$  при  $I_B = \text{const}$ .



Мал. 7. Вхідні характеристики.



Мал. 8. Вихідні характеристики.

При малих значеннях напруги між емітером і базою ( $U_{ЕБ}$ ) струм бази росте повільно через великий опір р-п-переходу, який зі збільшенням струму зменшується.

Зі збільшенням колекторної напруги  $U_{ЕК}$  вхідні характеристики зміщаються вправо, тобто зі збільшенням  $U_{ЕК}$  необхідно підвищити напругу  $U_{ЕБ}$ , для того щоб струм бази залишився незмінним. Вихідні характеристики показують, що в робочій області напруга  $U_{ЕК}$  незначно впливає на колекторний струм  $I_К$ , тому що в основному він залежить від кількості електронів, інжектованих у базу, тобто від струму емітера.

Транзистори в порівнянні з електронними лампами мають наступні переваги: більшу механічну міцність і довговічність, постійну готовність до роботи, малі габарити й масу, низьку напругу живлення й високий к.к.д.; крім того, відсутній ланцюг розжарення й, отже, спрощена схема й немає споживання потужності для розігріву катода.

До недоліків транзисторів належать залежність режиму роботи його від температури навколишнього середовища, невелика вихідна потужність, чутливість до перевантажень, розкид параметрів, внаслідок якого окремі транзистори одного типу значно відрізняються один від одного по своїх параметрах, велика відмінність між вхідними й вихідними опорами.

### Питання для самоконтролю

1. Як улаштований транзистор?
2. Які два типи біполярних транзисторів існують?
3. Як називаються електроди біполярного транзистора?
4. Намалюйте схематичні позначення  $n - p - n$  та  $p - n - p$  транзисторів.
5. Для чого використовують транзистори?

## Список літератури

1. Данилов И.А., Иванов П.М. Общая электротехника с основами электроники: Учеб. пособие для неэлектротехн. спец. техникумов. – М.: Высш. шк., 2005. – § 16.7 (с. 489 – 498).
2. Синдеев Ю.Г. Электротехника с основами электроники: учеб. пособие. – 15-е изд., стереотипное – Ростов н/Д: Феникс, 2013. – §11.5 (с. 285 – 289).
3. Славинский А.К., Туревский И.С. Электротехника с основами электроники: учебное пособие. – М.: ИД «ФОРУМ»: ИНФРА-М, 2009. – глава 12, § 12.7 (с. 336 – 343).