

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВНУТРІШНІХ СПРАВ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

навчальної дисципліни
«Основи електрики та електроніки, електричні вимірювання та їх
стандартизація»
обов'язкових компонент
освітньо-професійної програми
освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

***272 Авіаційний транспорт
(Оператор безпілотних літальних апаратів)***

за темою № 17 - Біполярні транзистори

Кременчук 2023

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 30.08.2023 № 7

СХВАЛЕНО

Методичною радою
Кременчуцького льотного коледжу
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 28.08.2023 № 1

ПОГОДЖЕНО

Секцією Науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 29.08.2023 № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 28.08.2023р № 1

Розробник: викладач циклової комісії Авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., доцент, спеціаліст вищої категорії, Юрко О.О.

Рецензенти:

1. К.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання Шмельов Ю.М.
2. Заступник директора з ОЛР, командир авіаційного загону ТОВ «ЕЙР ТАУРУС» Гетьман Ю.Ю.

План лекції:

1. Побудова та принцип дії транзистора
2. Основні схеми вмикання і статичні характеристики біполярного транзистора
3. Основні режими роботи біполярного транзистора
4. Складені транзистори

Рекомендована література (основна, допоміжна), інформаційні ресурси в Інтернеті

Основна:

1. Болюх В. Ф., Данько В. Г., Гончаров Є. В. Основи електротехніки, електроніки та мікропроцесорної техніки. Харків: Планета-Прінт, 2019. 248 с.
2. Васильєва Л. Д., Медведенко Б. І., Якименко Ю. І. Напівпровідникові прилади: Підручник. Київ: ІВЦ Видавництво "Політехніка", 2003. 338 с.
3. Кармазін В.В., Семенець В.В. Курс загальної фізики. Навчальний посібник для вищих навчальних закладів. Київ: Кондор, 2016. 786 с.
4. Коваль Ю. О., Гринченко Л. В., Милютченко І. О., Рибін О. І. Основи теорії кіл. Ч. 1. Харків: Компанія СМІТ, 2008. 432 с.
5. Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: Теорія і практикум: навч. посіб. Київ: Каравела, 2004. 432 с.
6. Лавренова Д. Л., Хлистов В. М. Основи метрології та електричних вимірювань: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 133 с.

Допоміжна:

1. Андріяшик М. В., Вербицький Б. І., Король А.М. Курс фізики. Київ: Фламенко, 2008. 530 с.
2. Готра З. Ю., Лопатинський І. Є., Лукіянець Б. А., Микитюк З. М., Петрович І. В. Фізичні основи електронної техніки: Підручник. Львів: Видавництво "Бескид Бит", 2004. 880 с.
3. Гумен Б. М., Гуржій А. М., Співак В. М. Основи теорії електричних кіл: у 3 кн. Київ: Вища шк., 2003.
4. Дмитрієва В. Ф. Фізика: Навч. посіб, Київ: Техніка, 2008. 648 с.

Інформаційні ресурси в Інтернеті

1. <https://www.youtube.com/channel/UCWfhBu4fAt126ZbxREz3IBw>

Текст лекції

1. Побудова та принцип дії транзистора

Транзистором називається електроперетворювальний НП прилад, який має один або декілька $p-n$ переходів, три або більше виводів і здатний посилювати потужність електричного сигналу.

Широко розповсюджені транзистори з двома $p-n$ переходами, що мають назву біполярних. Термін “біполярний” підкреслює, що процеси в цих транзисторах пов’язані з взаємодією носіїв заряду двох типів: електронів і дірок.

Біполярні транзистори поділяються на два класи: $n-p-n$ і $p-n-p$ типу, як показано на рис. 1.

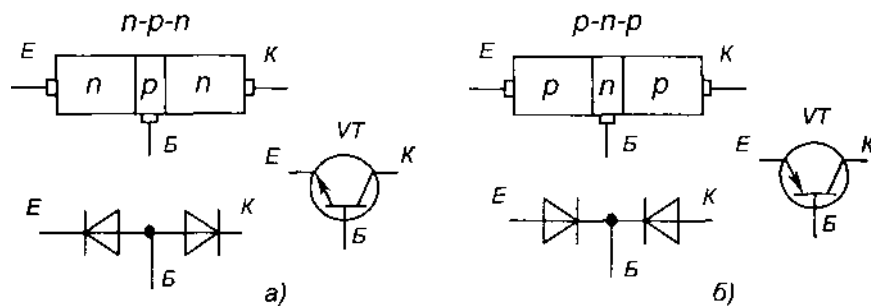


Рисунок 1 – Схематична побудова та умовне позначення транзисторів $n-p-n$ (а) та $p-n-p$ (б) типів

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 заряди від емітера, називається “колектором”.

На рис. 1 наведені також еквівалентні схеми транзисторів у вигляді двох діодів ($p-n$ переходів) увімкнених зустрічно.

Підсилюючі властивості біполярного транзистора забезпечуються тим, що $p-n$ переходи в ньому 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 тонкою і має малу кількість основних носіїв заряду;
- 3) колектор - масивний і має кількість носіїв, меншу, 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.

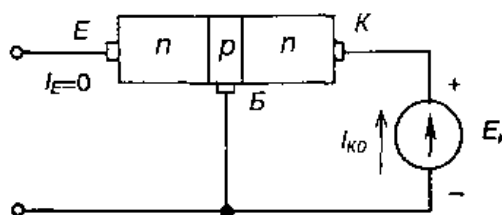


Рисунок 2 – Спрощена схема вмикання транзистора

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 $I_{кп}$ (незначний за величиною).

Якщо підімкнути емітерне джерело живлення E_E , як показано на рис. 3, емітерний перехід зміщується у прямому напрямку, через нього тече струм I_E визначеної величини.

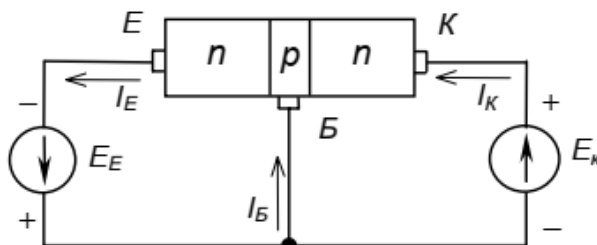


Рисунок 3 – Схема вмикання транзистора

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 вигляд:

$$I_E = I_B + I_K$$

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):

$$\alpha = \frac{I_K}{I_E}.$$

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

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

2. Основні схеми вмикання і статичні характеристики біполярного транзистора

Залежно від того, який електрод є спільним для вхідного і вихідного кіл, як це показано на рис. 4, розрізняють три схеми вмикання транзисторів:

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

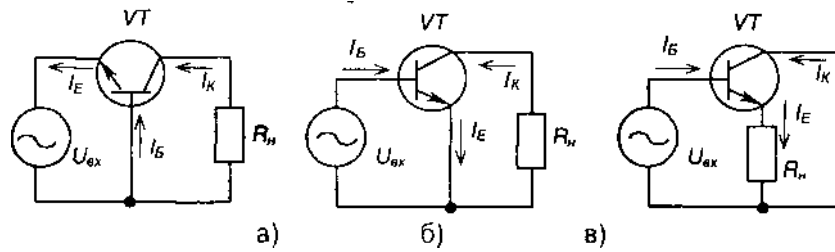


Рисунок 4 – Схеми вмикання транзистора: а) з СБ; б) з СЕ; в) з СК

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

У схемі з СБ: I_B - вхідний струм, I_K - вихідний, передатність струму:

$$\alpha = \frac{I_K}{I_E};$$

статична

$$\alpha_{дин} = \left. \frac{dI_K}{dI_E} \right|_{U_{KB} = const}.$$

динамічна -

У схемі з СЕ: I_B -вхідний струм, I_E - вихідний, передатність струму:

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

– статична -

$$\beta_{дин} = \left. \frac{dI_K}{dI_B} \right|_{U_{KB} = const}.$$

– динамічна

$$\frac{I_E}{I_B} = \frac{1}{1 - \alpha} = 1 + \beta.$$

У схемі з СК: I_B - вхідний струм, I_E - вихідний,

Для електричних схем на біполярних транзисторах існує чотири сім'ї статичних вольт-амперних характеристик:

$$i_{ax} = f(U_{ax}) \Big|_{U_{ax} = const};$$

– сім'я вхідних характеристик

$$i_{ax} = f(U_{ax}) \Big|_{I_{ax} = const};$$

– сім'я вихідних характеристик

– сім'я характеристик керування (характеристик прямої передачі)

$$i_{ax} = f(i_{ax}) \Big|_{U_{ax} = const};$$

– сім'я перехідних характеристик (характеристик зворотного зв'язку)

$$U_{ax} = f(U_{ax}) \Big|_{I_{ax} = const}.$$

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. 5, описуються залежностями:

$$\text{вхідні} - I_E = f(U_{BE}) \Big|_{U_{KB} = const}$$

(при $U_{KB} = 0$ маємо ВАХ прямо зміщеного базо-емітерного р-п переходу);

$$\text{вихідні} - I_K = f(U_{KB}) \Big|_{I_E = const};$$

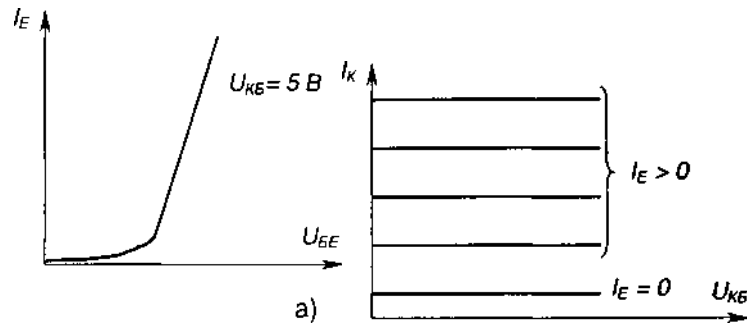


Рисунок 5 – ВАХ транзистора, увімкненого за схемою з СБ: а) вхідні; б) вихідні

Вихідна характеристика описується співвідношенням:

$$I_K = \alpha I_E + I_{K0} + \frac{U_{KE}}{r_K},$$

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

Складова $\frac{U_{KE}}{r_K}$ надто мала і стає відчутною лише у зоні, що передуює пробією через зменшення r_K . Тому можна вважати $I_K = \alpha I_E + I_{K0}$. При невисоких температурах величиною I_{K0} також можна знехтувати і тоді $I_K \approx \alpha I_E$

Для схеми з СЕ статичні характеристики, що наведені на рис. 6, є залежностями:

вхідні - $I_B = f(U_{BE}) \Big|_{U_{KE} = \text{const}}$

(при $U_{KE} = 0$ фактично маємо ВАХ зворотно зміщеного базо-колекторного p - n переходу);

вихідні - $I_K = f(U_{KE}) \Big|_{I_B = \text{const}}$

(при $I_B = 0$ маємо ВАХ прямо зміщеного базо-емітерного p - n переходу);

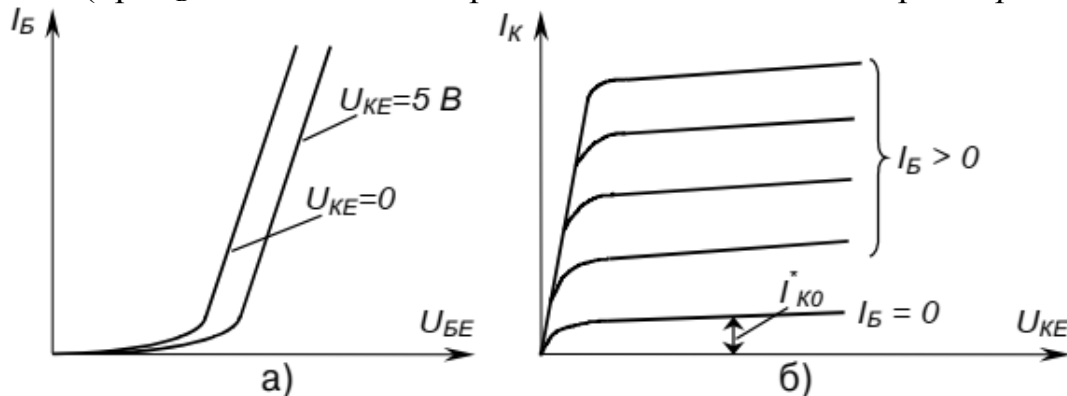


Рисунок 6 – ВАХ транзистора, увімкненого за схемою з СЕ: а) вхідні; б) вихідні

Вихідні ВАХ схеми з СЕ досить точно можна описати виразом:

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

або

$$I_K = \beta I_B + I_{K0}^* + \frac{U_K}{r_K^*},$$

де

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

ВАХ схеми з СК схожі з характеристиками схеми з СЕ, тому що в обох схемах вхідним є струм бази, а вихідні струми (I_E або I_K) відрізняються незначно. Тому при практичних розрахунках вихідні ВАХ схеми з СЕ можна використовувати як вихідні ВАХ схеми з СК, якщо замінити струм колектора

Транзистор далеко не ідеальний елемент. Його вхідні характеристики не є прямими, що починаються з нуля. Це виключає можливість підсилення сигналів, менших за ϕ_K .

Також слід зазначити, що, як і у всіх НП приладів, параметри транзистора (а отже, і положення його характеристик) значною мірою залежать від температури.

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

У режимі насичення, який настає при великому відпірному вхідному сигналі, 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 .

У режимі відтинання, обидва переходи зміщені у зворотному напрямі (закритий стан транзистора). При цьому у вихідному колі протікає струм, що є зворотним струмом емітерного та колекторного переходів, а опір транзистора високий.

Активний режим є проміжним. У ньому емітерний перехід зміщений у прямому напрямку, а колекторний - у зворотному.

Транзистор у цьому режимі працює як підсилювач сигналу.

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. 7. Тут:

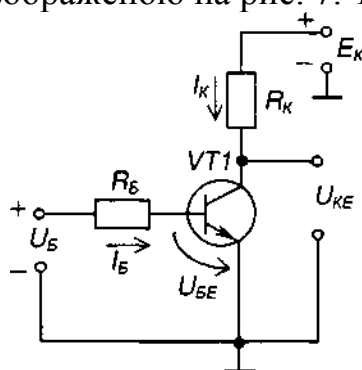


Рисунок 7 - Схема вмикання транзистора з СЕ

$$I_B = \frac{U_B - U_{BE}}{R_B};$$

$$I_K = \beta I_B;$$

$$U_{\text{вих}} = U_{KE} = E_K - I_K R_K.$$

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

Останнє рівняння характеризує зв'язок вихідної напруги з вихідним струмом і називається динамічною вихідною характеристикою транзистора або лінією навантаження.

На сім'ї вихідних статичних характеристик побудуємо лінію навантаження, як показано на рис. 8. Для цього розглянемо режими холостого ходу (Х.Х.) та короткого замикання (К.З.).

Для режиму Х.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.

Коли робоча точка лежить у межах відрізка ab , транзистор працює у активному (підсилювальному) режимі.



Рисунок 8 – Вихідна динамічна характеристика транзистора

Якщо робочу точку намагатися задати нижче точки b , транзистор переходить до режиму відтинання.

Якщо ж робочу точку задавати вище точки a - транзистор знаходиться в режимі насичення. В такому режимі подальшому збільшенню вхідної дії не відповідає збільшення вихідної реакції, що досягла деякого значення.

До основних параметрів біполярних транзисторів належать:

- максимально допустимий струм колектора $I_{K \max}$;
- допустима робоча напруга $U_{KE \max}$, що визначається напругою лавинного пробою колекторного переходу, становить (20...1000) В;
- коефіцієнт передачі струму $\beta = 20...50$;
- допустима потужність на колекторі $P_K = I_K U_{KE}$ (якщо $P_K < 0,3$ Вт, то маємо транзистор малої потужності, якщо $P_K = 0,3...1,5$ Вт - середньої потужності, якщо $P_K > 1,5$ Вт - великої потужності).

4. 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. 9,а. Її називають схемою Дарлінгтона.

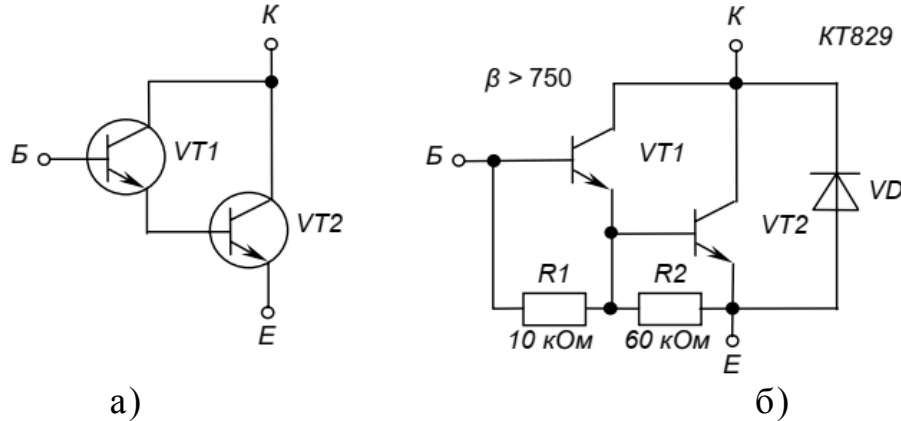


Рисунок 9 – Складений транзистор за схемою Дарлінгтона

Тут вхідний струм є струмом бази першого транзистора. Після підсилення останнім у β_1 разів він подається у базу другого транзистора, яким підсилюється ще в β_2 разів. У результаті загальний коефіцієнт підсилення за струмом становить

$$\beta = \beta_1 \beta_2$$

Таку схему широко застосовують як у дискретному виконанні, так і в інтегральному. На рис. 9,б, наприклад, наведено еквівалентну схему потужного транзистора КТ829, що має $\beta > 750$.

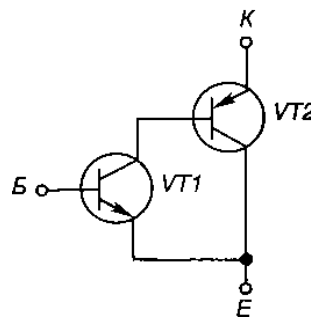


Рисунок 10 – Складений транзистор за схемою Шиклаї

Схема складеного транзистора, виконаного на транзисторах різного типу провідності - схема Шиклаї, наведена на рис. 10. 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