

Лабораторна робота 5

Тема: Дослідження біполярних транзисторів у статичному режимі

Мета роботи: поглиблення і закріплення знань з основ теорії біполярних транзисторів, особливостей їхньої роботи в режимі малих амплітуд, придбання навиків і умінь експериментального одержання і дослідження статичних характеристик, визначення за цими характеристиками малосигнальних параметрів, побудови низькочастотних моделей.

5.1. ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Біполярний транзистор – це напівпровідниковий прилад з двома р-п переходами, який має три виводи. Дію напівпровідникового транзистора засновано на використанні носіїв обох знаків (дірок і електронів), а керування струмом, який тече через нього, виконується за допомогою керуючого струму.

5.1.1. Будова транзистора.

Біполярний транзистор має три шари напівпровідника (р-п-р або п-р-п) і, відповідно, два р-п – переходи. Кожен шар напівпровідника через невикористаний контакт метал-напівпровідник приєднано до зовнішнього виводу.

Середній шар і відповідний вивід називають базою, один з крайніх шарів і відповідний вивід називають емітером, а другий крайній шар і відповідний вивід – колектором.

Схематичне, спрощене зображення структури транзистора типу п-р-п показано на рисунку 5.1,а. Транзистор типу р-п-р побудовано аналогічно, спрощена структура його показана на рисунку 5.1,в.

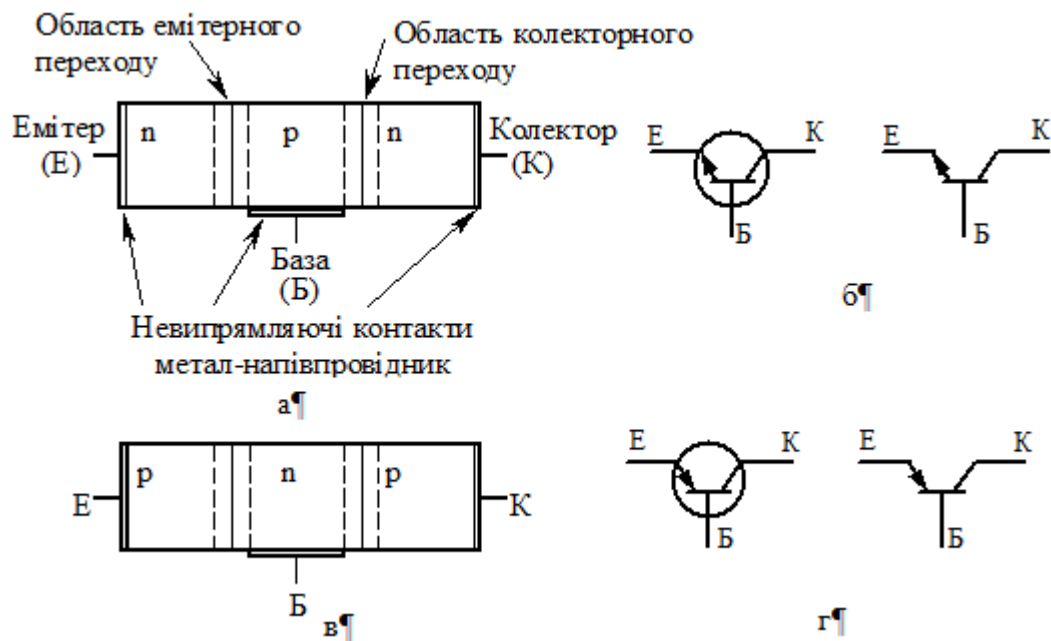


Рис. 5.1 Транзистор: а) схематичне зображення структури транзистора n-p-n – типу; б) припустимі варіанти умовного графічного зображення транзистора n-p-n – типу; в) схематичне зображення структури транзистора p-n-p – типу; г) припустимі варіанти умовного графічного зображення транзистора p-n-p – типу

Транзистор називають біполярним, тому що в процесі проходження електричного струму приймають участь носії заряду двох знаків – електрони і дірки. Але в різних типах транзисторів роль електронів і дірок різна.

Транзистори типу n-p-n більш розповсюджені порівняно з транзисторами типу p-n-p, тому що зазвичай мають кращі характеристики. Це пояснюється більшою рухливістю електронів (основних носіїв заряду транзисторів n-p-n – типу), ніж дірок (основних носіїв заряду транзисторів p-n-p – типу).

Важливо відмітити, що реальна площа колекторного переходу суттєво більша площі емітерного переходу. Така несиметрія покращує властивості транзистора.

5.1.2. Моделювання біполярних транзисторів.

В програмі Multisim транзистори представлено в каталозі Transistors бібліотеки компонентів.

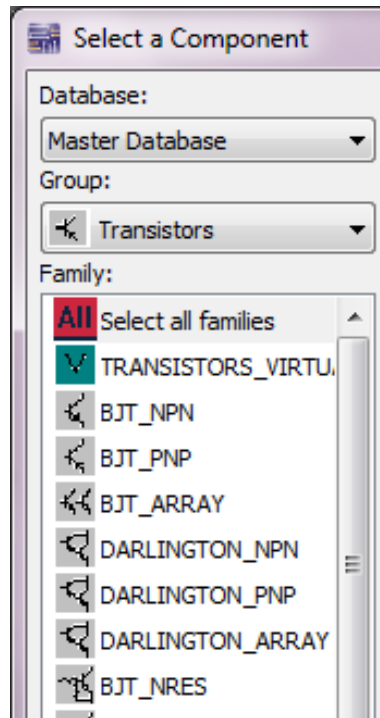


Рис. 5.2 Верхня частина каталогу бібліотеки
Transistors програми Multisim

Цей каталог можна умовно поділити на частину, яка містить різні типи біполярних транзисторів (рис. 5.2), і частину з польовими транзисторами. В цій лабораторній роботі розглядається тільки перша частина. До її складу входять моделі існуючих біполярних транзисторів обох типів, моделі віртуальних біполярних транзисторів обох типів з найбільш загальними параметрами, віртуальні чотирьох вивідні транзистори двох типів, пари Дарлінгтона на транзисторах різних типів та транзисторні збірки.

Після натискання кнопки BJT_NPN або BJT_PNP з'явиться діалогове вікно вибору конкретного транзистора (рис. 5.3).

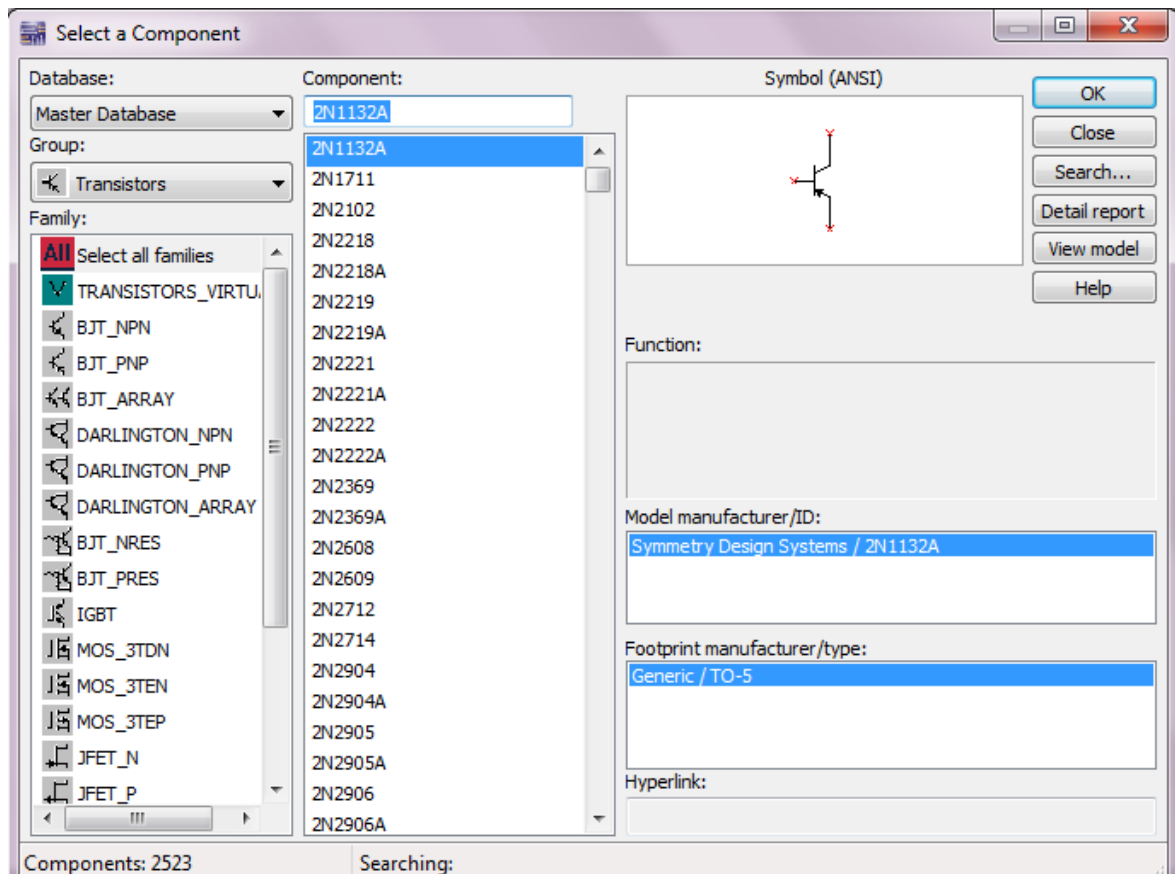


Рис. 5.3 Діалогове вікно вибору моделі транзистора

Для побудови підсилювачів на біполярних транзисторах (БТ) розрізняють три основних схеми включення БТ: з загальною базою (ЗБ), з загальним емітером (ЗЕ) та з загальним колектором (ЗК). Схеми для дослідження транзисторів у статичному режимі для цих включень та відповідні еквівалентні схеми транзисторів при їх роботі в активному режимі наведені на рисунках 5.4-5.6.

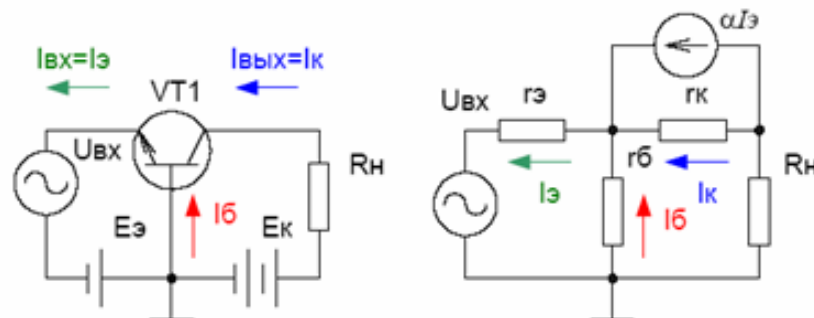


Рис. 5.4 Схема включення БТ з загальною базою

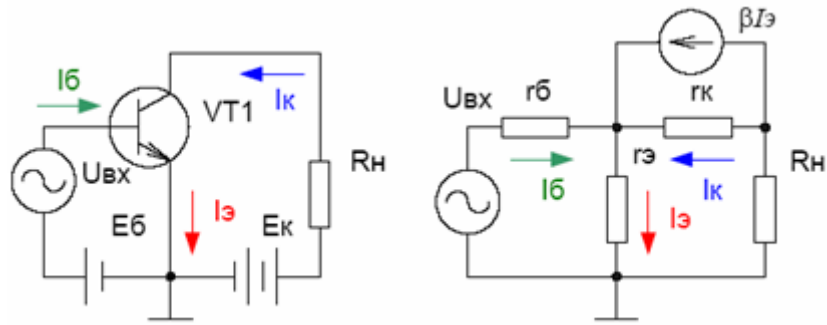


Рис. 5.5 Схема включення БТ із загальним емітером ЗЕ

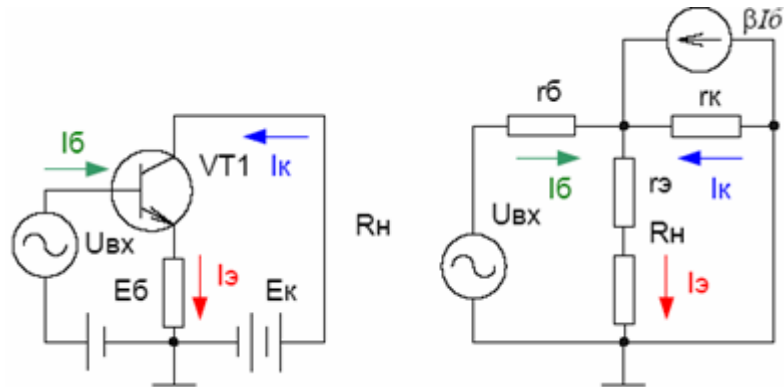


Рис. 5.6 Схема включення БТ з загальним колектором

5.1.3. Режими біполярних транзисторів (БТ).

Біполярні транзистори містять два взаємодіючих електронно-діркових переходи. Залежно від їхнього стану розрізняють чотири режими: активний (лінійне посилення сигналів), відсічення, насичення й інверсний.

В активному режимі на емітерний перехід для забезпечення інжекції носіїв заряду в базу подається пряма напруга $U_{бє}$, а на колекторний перехід, що здійснює екстракцію носіїв заряду - зворотна напруга $U_{кб}$. Таким чином емітерний перехід знаходиться у відкритому стані, а колекторний у закритому.

Транзистор є керованим приладом, його колекторний струм залежить від струму бази та емітера.

Ступінь впливу вхідного ланцюга транзистора (емітерного - у схемі з загальною базою (ЗБ) і базового - у схемі з загальним емітером (ЗЕ)) оцінюють за допомогою статичних параметрів: коефіцієнта передачі струму емітера $h_{21Б}$ або a і коефіцієнта передачі струму бази $h_{21Е}(\beta)$. Керована складового струму колектора в схемі з загальною базою (рисунок 5.4) дорівнює:

$$I_K = a I_E \quad (5.1)$$

А в схемі з загальним емітером (рисунок 5.5)

$$I_K = \beta I_B \quad (5.2)$$

Як впливає із рисунків 5.4-5.6:

$$I_E = I_B + I_K \quad (5.3)$$

Враховуючи вище наведені рівняння можна записати:

$$\alpha = \beta / (1 + \beta) \text{ або } \beta = \alpha / (1 - \alpha) \quad (5.4)$$

Рівняння (5.1-5.4) є основними рівняннями, що описують роботу біполярного транзистора у активному режимі, в якому БТ розглядається як лінійний прилад. Величини коефіцієнтів для реальних БТ становлять: $\beta = (30 - 1000) \times n$, а α наближується до 1, але завжди $\alpha < 1$.

У режимі насичення відкриті обидва переходи. Колекторний перехід уже не здійснює повної екстракції носіїв з бази, що приводить до їх накопичення в базі й інтенсивній рекомбінації. У режимі насичення струм бази може виявитися порівнянним зі струмом емітера. Транзистор повністю відкритий й проявляє себе як нелінійний елемент.

У режимі відсічення обидва переходи закриті. Через них проходять струми, обумовлені процесами теплової генерації носіїв заряду в обсязі напівпровідника, областях об'ємного заряду і на контактах, що не випрямляють, а також витоками. Вважається, що транзистор закритий й працює у нелінійному режимі.

В інверсному режимі емітерний перехід закритий, а колекторний – відкритий. Струм колектора визначається значенням прямої напруги $U_{кб}$. Цей режим аналогічний до активного, але характеризується значно гіршими властивостями до підсилювання. Використовується рідко.

5.1.4. Статичні характеристики.

Як основні характеристики БТ використовують: вхідні (зв'язують струм і напругу на вході); вихідні (зв'язують струм і напругу на виході); характеристики передачі (зв'язують струми або напруги на виході зі струмами або напругами на вході); характеристики зворотного зв'язку (зв'язують напруги або струми на вході зі струмами або напругами на виході).

Для схеми з ЗЕ вхідні характеристики визначаються залежністю $I_B = f(U_{ББ})$ при $U_{КБ} = const$ (рис. 5.7,а). У кремнієвих транзисторів вони зміщені від нуля у бік прямих напруг. Як і в кремнієвих діодах, зсув дорівнює 0,6...0,7В.

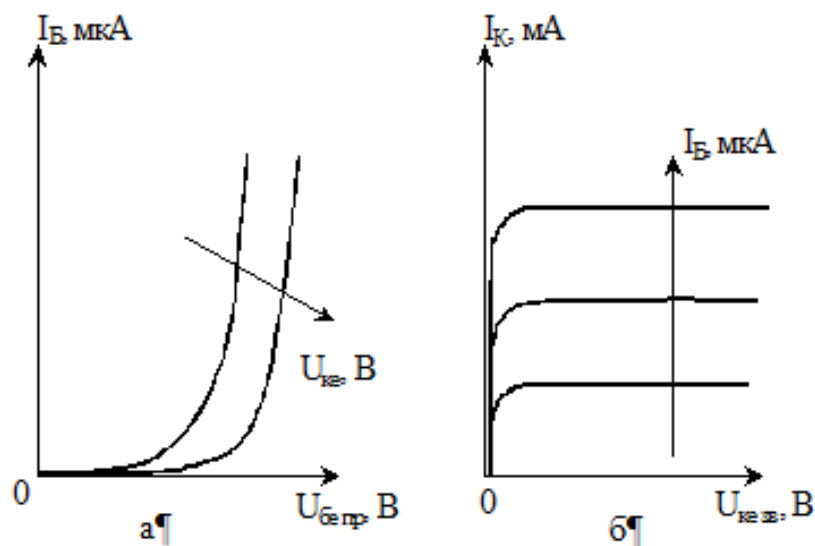


Рис. 5.7. Статичні характеристики біполярного транзистора в схемі з ЗЕ:

а) вхідні; б) вихідні

При збільшенні зворотної напруги на колекторі струм бази зменшується, характеристики зміщуються правіше. Це пояснюється тим, що напруга на колекторі впливає на концентрацію носіїв біля нього і змінює товщину бази внаслідок зміни товщини колекторного переходу (розширення збідненої зони). Це так званий ефект модуляції товщини бази. Зменшення товщини бази призводить до зменшення імовірності рекомбінації носіїв заряду в базі, а отже і до зменшення струму бази. Вихідні характеристики для схеми з ЗЕ визначаються залежністю $I_K = f(U_{КБ})$ при $I_B = const$ (рисунок 5.7,б).

Якщо струм бази дорівнює нулеві, то ця залежність являє собою характеристику електронно-діркового переходу при зворотному зсуві.

Статичні характеристики дають повну інформацію про транзистори, що є активними елементами радіoeлектронних ланцюгів.

У режимі великих сигналів вони є основою графоаналітичного методу аналізу і розрахунку транзисторних ланцюгів. У режимі малих сигналів транзистор може розглядатися як лінійний елемент. По характеристиках транзистора визначають малосигнальні диференціальні параметри.

5.1.5. Диференційні параметри транзисторів.

Величини, що зв'язують малі збільшення струмів і напруг, називають диференціальними параметрами транзистора.

У разі уявлення транзистора лінійним чотирьохполіусником (наприклад, для БТ у схемі із загальною базою, рис. 5.8) найбільше практичне застосування знаходять три системи параметрів: h , y , z - параметрів.

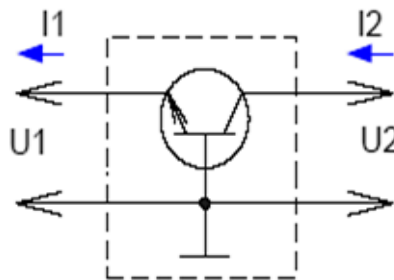


Рис. 5.8 Чотирьохполіусне включення БТ із загальною базою

Під час використання h -параметрів як незалежні перемінні вибирають вхідний струм I_1 і вихідну напругу U_2 .

Рівняння мають вигляд:

$$U_1 = h_{11}I_1 + h_{12}U_2 \quad (5.5)$$

$$I_1 = h_{21}I_1 + h_{22}U_2 \quad (5.6)$$

Звідси випливає фізичний зміст і найменування h -параметрів: $h_{11} = U_1/I_1 | U_2 = 0$ - вхідний опір транзистора при короткому замиканні на виході для змінної складової струму, тобто $h_{11} = R_{\text{вх}}$.

Виходячи із рис. 5.4 для схеми включення ЗБ:

$$R_{\text{BX}} = \frac{U_{\text{BX}}}{I_{\text{BX}}} = \frac{U_{r\varepsilon} + U_{r\delta}}{I_{\varepsilon}} = \frac{I_{\varepsilon} \cdot r\varepsilon + I_{\delta} \cdot r\delta}{I_{\varepsilon}} = r\varepsilon + \frac{I_{\varepsilon} - I_{\text{K}}}{I_{\varepsilon}} r\delta = r\varepsilon + (1 - \alpha) \cdot r\delta$$

$$(1 - \alpha) \rightarrow 0$$

$$R_{\text{BX}} = r\varepsilon = n \cdot 10 \text{ Ом}$$

Для схеми включення ЗЕ (рис. 5.5)

$$R_{\text{BX}} = \frac{U_{\text{BX}}}{I_{\text{BX}}} = \frac{U_{r\varepsilon} + U_{r\delta}}{I_{\delta}} = \frac{I_{\varepsilon} \cdot r\varepsilon + I_{\delta} \cdot r\delta}{I_{\delta}} = r\delta + \frac{I_{\delta} + I_{\text{K}}}{I_{\delta}} r\varepsilon = r\delta + (1 + \beta) r\varepsilon$$

$$R_{\text{BX}} \approx n \cdot (100 \div 1000) \text{ Ом}$$

Для схеми включення ЗК (рис. 5.6)

$$R_{\text{BX}} = \frac{U_{\text{BX}}}{I_{\text{BX}}} = \frac{U_{r\varepsilon} + U_{r\delta}}{I_{\delta}} = \frac{I_{\varepsilon} \cdot (r\varepsilon + R_{\text{H}}) + I_{\delta} \cdot r\delta}{I_{\delta}} = r\delta + \frac{I_{\varepsilon} (r\varepsilon + R_{\text{H}})}{I_{\delta}}$$

$$= r\delta + \frac{(I_{\text{K}} + I_{\delta}) \cdot (r\varepsilon + R_{\text{H}})}{I_{\delta}} = r\delta + (1 + \beta) \cdot (r\varepsilon + R_{\text{H}})$$

$h_{12} = U_1 / U_2 | I_1 = 0$ - коефіцієнт зворотного зв'язку по напрузі при розімкнутому вході для змінної складової струму;

$h_{12} = I_2 / I_1 | U_2 = 0$ - диференціальний коефіцієнт передачі струму при короткому замиканні на вході для змінної складової струму. Для схеми включення БТ з загальною базою $h_{213\text{Б}} = \alpha$, а для включення із загальним емітером (ЗЕ) $h_{213\text{Е}} = \beta$.

$h_{22} = I_2 / U_2 | I_1 = 0$ - вихідна провідність транзистора при розімкнутому вході для змінної складової струму, $h_{22} = 1 / R_{\text{вих}}$.

Низькочастотні значення параметрів транзистора залежать від схеми включення і визначаються за статичними характеристиками.

5.2. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Запустити програму Multisim. Скласти схему дослідження біполярного транзистора за схемою загального емітера та вивчити призначення всіх елементів схеми (рис. 5.9). Компонент DC_CURRENT (джерело постійного струму) знаходиться в бібліотеці Sources, вкладка SIGNAL_CURRENT_SOURCES

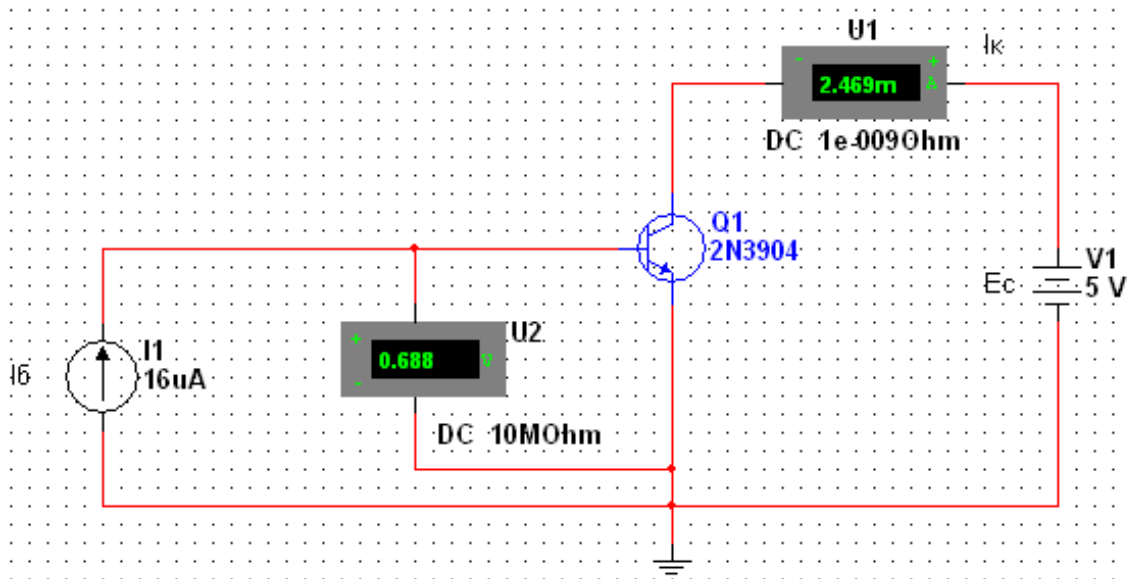


Рис. 5.9 Електрична принципова схема виміру вольт-амперної характеристики біполярних транзисторів, увімкнених за схемою з загальним емітером

2. Дослідити входні статичні характеристики. Для цього необхідно:

- встановити напругу джерела E_c рівною 5В;
- для струму джерела I_b 16мкА, 26мкА, 36мкА, 46мкА, 57мкА провести виміри напруги бази-емітер U_{BE} ;

- занести результати в протокол;
- повторити виміри для напруг джерела E_c 10В і 20В;
- побудувати входну вольт-амперну характеристику.

3. Дослідити вихідні статичні характеристики. Для цього треба:

- встановити струм джерела I_b рівним 16мкА;
- для напруг джерела E_c 0.1В, 0.5В, 1В, 5В, 10В, 20В провести виміри струму колектора I_c ;

- занести результати в протокол;
- повторити виміри для струмів джерела I_b 26мкА, 36мкА, 46мкА, 57мкА;
- побудувати вихідну вольт-амперну характеристику.

4. Обчислити коефіцієнт передачі струму транзистора при напрузі джерела $E_c=10В$ та струмі $I_b=57мкА$.

5. Обчислити h -параметри транзистора в схемі з загальним емітером.

6. Скласти схему дослідження біполярного транзистора за схемою

загальної бази та вивчити призначення всіх елементів схеми (рис. 5.10).

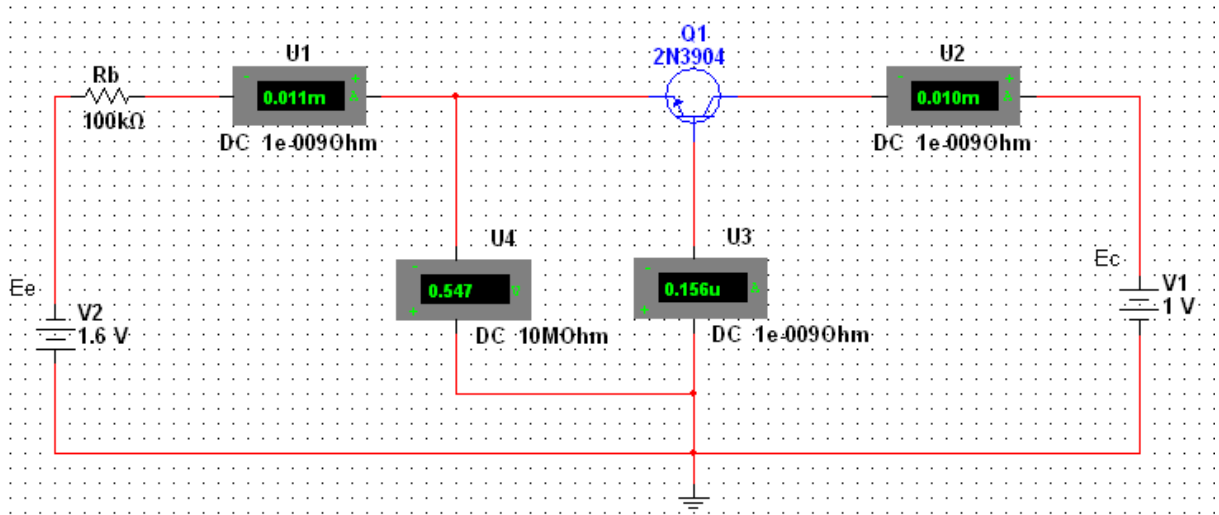


Рис. 5.10. Електрична принципова схема виміру вольт-амперної характеристики біполярних транзисторів, увімкнених за схемою з загальною базою

7. Дослідити входні статичні характеристики. Для цього необхідно:

- встановити напругу джерела $E_c=1V$;
- для напруг джерела E_e 1.6V, 2.6V, 3.6V, 4.6V, 5.7V провести виміри струму емітера I_E та напруги емітер-база U_{BE} ;

- занести результати в протокол;
- повторити виміри для напруги джерела $E_c=10V$;
- побудувати входну вольт-амперну характеристику.

8. Дослідити вихідні статичні характеристики. Для цього треба:

- встановити напругу джерела E_e рівною 1.6V;
- для напруг джерела E_c 0.1V, 0.5V, 1V, 5V, 10V, 20V провести виміри струму колектора I_K та струму емітера I_E ;

- занести результати в протокол;
- повторити виміри для напруг джерела E_e 3.6V і 5.7V;
- побудувати вихідну вольт-амперну характеристику.

10. Обчислити коефіцієнт передачі струму транзистора при напругах джерел $E_c=10V$ та $E_e=5,7V$.

11. Обчислити h -параметри транзистора в схемі з загальною базою.

12. Вимкнути програму Multisim.

13. Проаналізувати отримані результати, зробити висновки й оформити

протокол звіту.

5.3. ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ

Звіт повинний містити:

- мету лабораторної роботи;
- значення h -параметрів, отримані в ході експерименту;
- формальну модель БТ для h -параметрів;
- результати досліджень у вигляді таблиць, графіків (на стандартному аркуші формату А4);
- висновки, що базуються на аналізі отриманих результатів.

5.4. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Дайте опис структури БТ.
2. Опишіть режими роботи біполярних транзисторів.
3. Наведіть статичні характеристики для трьох схем підключення біполярного транзистора (БТ).
4. Поясніть фізичний зміст і найменування h -параметрів.
5. Чому в режимі малих сигналів для аналізу транзисторних каскадів можна скористатися h -параметрами?
6. Якими параметрами обмежується робоча зона транзистора?