

Підсилювач на біполярному транзисторі, включеному за схемою із спільним емітером

© Коломієць Р. О.

19.03.2020

З курсу „Компонентна база електронної апаратури“ відомо, що сімейство кривих під назвою вихідних характеристик біполярного транзистора (БТ) являють собою залежності колекторного струму (I_c) від напруги між колектором та емітером (V_{ce}) для різних значень струму бази (I_b).

Всі типи транзисторних підсилювачів при змінному сигналі на вході. Як правило, такий сигнал приймає значення, які чергуються між додатним і від'ємним значенням напруги, тому потрібен певний спосіб „встановлення“ режиму роботи схеми підсилювача між цими двома максимальними або піковими значеннями. Це досягається за допомогою процесу, відомого як *зміщення*. Зміщення дуже важливе в конструкції підсилювача, оскільки воно встановлює правильну робочу точку транзисторного підсилювача, а при правильному виборі такої точки будь-які спотворення вихідного сигналу є мінімальними.

Також відомо, що поверх цих кривих вихідних характеристик можна провести статичну (або постійну) пряму лінію навантаження, щоб показати всі можливі робочі точки транзистора — станом від від повністю закритого до повністю відкритого, і на якій буде знаходитися обрана робоча точка (як правило, її позначають Q).

Метою будь-якого підсилювача невеликого сигналу є посилення всього вхідного сигналу при мінімальній кількості спотворень.

Іншими словами, форма вихідного сигналу повинна бути точним відтворенням форми вхідного сигналу, але тільки більшою за амплітудою (посиленим).

Для отримання низьких спотворень потрібно правильно вибрати робочу точку. Фактично така робоча точка відповідає роботі підсилювача на постійному струмі, і її положення може встановлюватися в будь-якій точці вздовж навантажувальної прямої відповідною схемою зміщення.

Найкраще можливе положення для цієї точки Q — максимально наближене до центрального положення навантажувальної лінії, тим самим виставляючи режим роботи підсилювача у клас А, тобто

$$V_{ce} = \frac{1}{2}V_{cc}.$$

Розглянемо загальну схему підсилювача коливань, показану нижче.

1 Схема із спільним емітером

Загальний вигляд схеми включення транзистора із спільним емітером показаний на рис. 1. В цій схемі використовується зміщення за допомогою резистивного дільника напруги (рис. 2). Це проста схема з двох резисторів, з центральної точки з'єднання яких на транзистор подається необхідну напругу зміщення. Такий дільник напруги зазвичай використовується при проектуванні схем підсилювачів на біполярних та/або польових транзисторах.

Цей метод зміщення транзистора значно зменшує ефекти зміни коефіцієнта передачі струму бази (β), утримуючи зміщення бази на сталому рівні постійної напруги, що забезпечує найкращу стабільність схеми. Напруга на базі транзистора (V_b) визначається номіналами резисторів дільника та напругою живлення V_{cc} — див. рис. 2.

Якщо прийняти загальний опір дільника $R_T = R_1 + R_2$, то за законом Ома струм буде визначатися як $i = \frac{V_{cc}}{R_T}$. Тоді рівень напруги, що генерується на стику резисторів R_1 і R_2 , підтримує значення постійної напруги на базі (V_b) нижче значення напруги живлення.

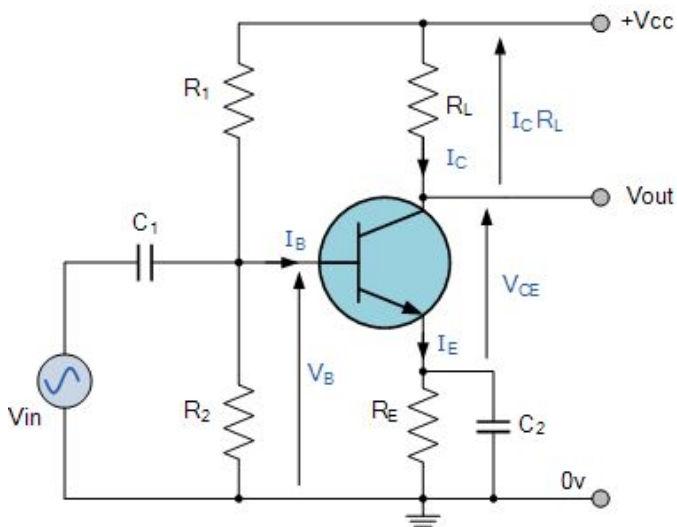


Рис. 1 – Включення біполярного транзистора за схемою із спільним емієром

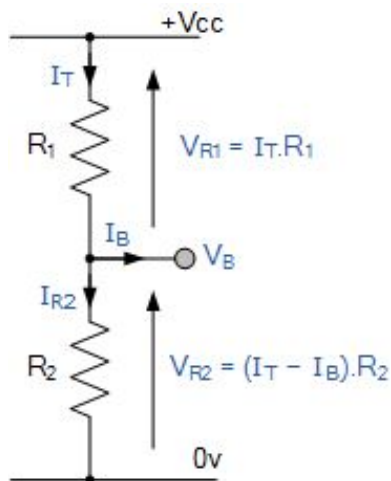


Рис. 2 – Резистивний дільник напруги

Таким чином, напруга зміщення на базі транзистора може бути легко обчислена за формулою дільника напруги:

$$V_b = \frac{V_{cc}R_2}{R_1 + R_2}.$$

Ця ж напруга живлення (V_{cc}) також визначає максимальний струм колектора, I_c , коли транзистор повністю вимкнений (або, іншими словами, знаходиться в режимі відсічки), тобто коли $V_{ce} = 0$. Базовий струм I_b для транзистора знаходимо, знаючи колекторний струм I_c і підсилення по постійного струму β транзистора:

$$\beta = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} \Rightarrow \Delta I_b = \frac{\Delta I_c}{\beta}.$$

Коефіцієнт β іноді називають h_{FE} (його наводять у довідниках, і, зокрема, саме його вимірюють сучасними мультиметрами, на яких він так і позначений — „ h_{FE} “). Цей коефіцієнт безрозмірний, оскільки це фіксоване відношення двох струмів, I_c та I_b , причому невелика зміна базового струму призводить до великих змін струму колектора.

Також важливо відзначити, що однотипні транзистори матимуть достатньо великий розкид значень β . Наприклад, біполярний транзистор BC107 $n-p-n$ -типу має значення коефіцієнта підсилення постійного струму між 110 і 450. Це означає, що якийсь один BC107 може мати β -значення 110, а інший — β -значення 450, але вони обидва — $n-p-n$ -транзистори BC107. Це тому, що значення β визначається конструкцією транзисторів, що лише потім відображається на їх функціонуванні.

Оскільки перехід база – емітер зміщений у прямому напрямку, значення напруги V_e буде відрізнятися від значення напруги на базі V_b . Якщо напруга на емітерному резисторі R_e відома, то струм емітера можна легко обчислити, використовуючи закон Ома. Значення струму колектора I_c буде майже таким самим, що і струм емітера.

1.1 Приклад розрахунку схеми із спільним емітером

Задача. До схеми підсилювача на БТ зі спільним емітером підключений опір навантаження $R_L = 1,2$ кОм і напруга живлення схеми становить 12 В. Обчислити максимальний струм колектора, що протікає через опір навантаження, коли транзистор повністю включений (знаходиться в режимі насичення), припустимо $V_{ce} = 0$. Також знайти значення опору емітера R_e , якщо падіння напруги на ньому становить 1 В. Обчисліть значення всіх інших резисторів кола, вважаючи, що транзистор є стандартним кремнієвим $n-p-n$ -типу.

Розв'язання. Спочатку розрахуємо максимальний струм колектора:

$$I_{c_{max}} = \frac{V_{cc} - V_{R_e}}{R_L} = \frac{12 - 1}{1200} = 9,2 \text{ mA.}$$
$$V_{ce} = 0.$$

Потім будується навантажувальна пряма (рис. 3). Для цього спочатку встановлюється точка A на вертикальній осі (струм колектора). Ця точка відповідає максимальному струму колектора (9,2 мА) і напрузі насичення $V_{ce} = 0$. Коли транзистор повністю вимкнений, ні на резисторі R_E , ні на R_L падіння напруги немає, оскільки струм не тече через них. Тоді все падіння напруги відбувається на самому транзисторі і V_{ce} дорівнює напрузі живлення V_{cc} . Таким чином, точка B встановлюється на горизонтальній вісі і дорівнює V_{cc} .

Як правило, напруга робочої точки Q підсилювача з нульовим вхідним сигналом подається на базу, тому напруга колектора знаходиться приблизно на середині прямої навантаження між нульовою напругою та напругою живлення ($\frac{V_{cc}}{2}$). Отже, струм колектора в точці Q підсилювача буде визначатися виразом:

$$I_{c(Q)} = \frac{V_{cc} - V_{R_e}}{R_L} = \frac{12 - 1}{1200} = \frac{5,5}{1200} = 4,58 \text{ mA.}$$

Ця статична (по постійному струму) лінія навантаження створює рівняння прямої лінії, тангенс кута нахилу якого дорівнює

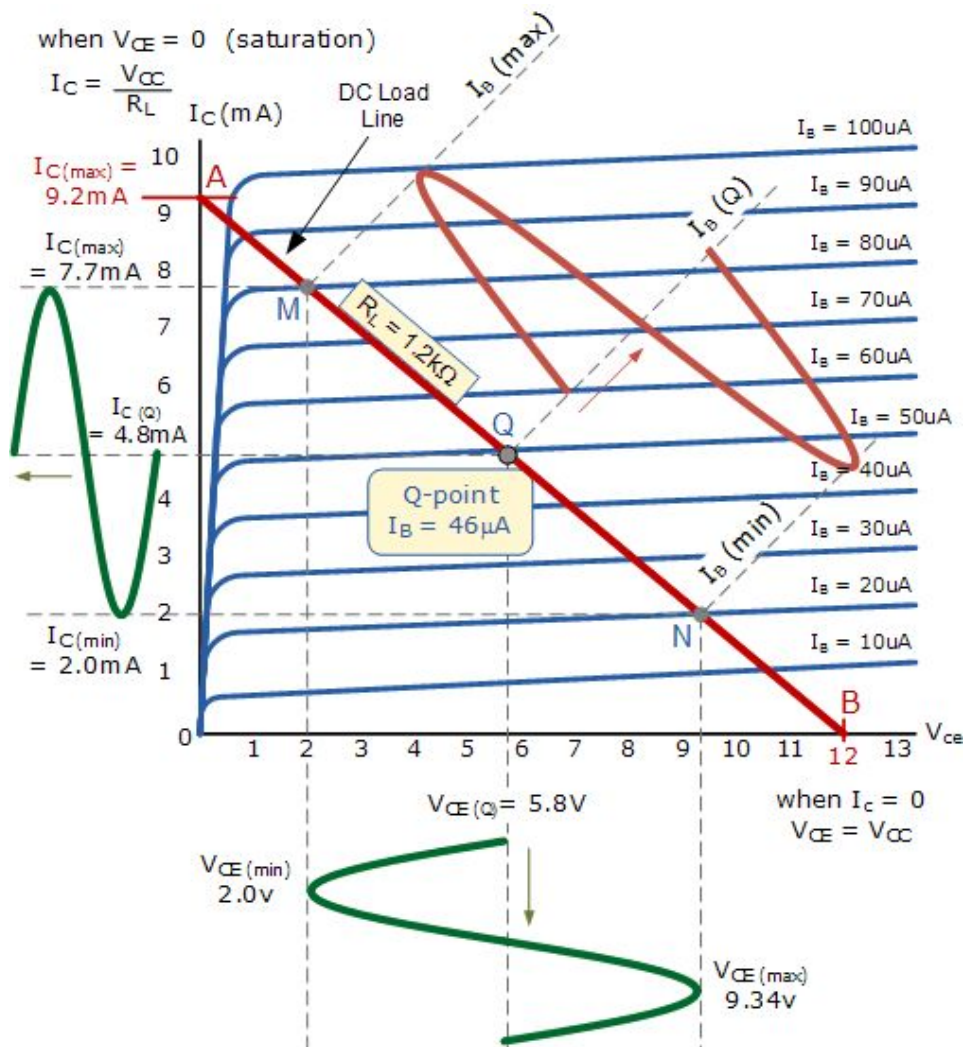


Рис. 3 – Діаграма для розрахунку підсилювача на БТ за схемою зі спільним емітером

$-1/(RL + RE)$, і вона перетинає вертикальну вісь I_c у точці, рівній $V_{cc}/(RL + RE)$. Фактичне положення точки Q на лінії навантаження постійного струму визначається середнім (або найближчим) значенням струму бази I_b .

Оскільки струм колектора I_c транзистора також дорівнює постійному коефіцієнту посилення транзистора (β), кратному базовому струму ($\beta \cdot I_b$), то, якщо припустити значення β для транзистора, скажімо, 100, (значення 100 є розумним середнім значенням для транзисторів сигналу малої потужності), тоді струм бази I_b , що надходить у транзистор, буде дорівнювати:

$$\beta = \frac{I_c}{I_b} \Rightarrow I_b = \frac{I_c}{\beta} = \frac{4,58 \text{ mA}}{100} = 45,8 \text{ }\mu\text{A}.$$

Замість того, щоб подавати напругу зміщення на базу від окремого джерела живлення, зазвичай її подають від основного джерела живлення (V_{cc}) через резистивний дільник напруги, утворений резисторами R_1 і R_2 . Тепер резистори R_1 і R_2 повинні бути обрані таким чином, щоб дати відповідний робочий базовий струм 45,8 мкА або 46 мкА, округлений до найближчого цілого числа.

Струм, що протікає через електричне коло дільника напруги, повинен бути порівняно більшим за фактичний струм бази I_b , щоб коло дільника напруги не було перевантажене колом бази. Загальне правило — значення струму в дільнику напруги повинно бути щонайменше в 10 разів більшим за струм бази I_b , що проходить через резистор R_2 . Напруга між базою та емітером транзистора V_{be} фіксується на рівні 0,7 В (кремнієвий транзистор), тоді значення R_2 розраховується так:

$$R_2 = \frac{V_{Re} + V_{be}}{10 \times I_b} = \frac{1 + 0,7}{10 \cdot 45,8 \cdot 10^{-6}} = 3,71 \text{ k}\Omega.$$

Якщо струм, що протікає через резистор R_2 , в 10 разів перевищує значення базового струму, то струм, що протікає через резистор R_1 в дільнику напруги повинен бути в 11 разів більше значення базового струму. Тобто:

$$I_{R_1} = I_{R_2} + I_b.$$

Таким чином, напруга на резисторі R_1 дорівнює $V_{cc} - 1,7 \text{ В}$ ($1,7 = V_{R_e} + 0,7 \text{ В}$ для кремнієвого транзистора), що в даному випадку дорівнює $10,3 \text{ В}$. Таким чином, R_1 можна обчислити так:

$$R_1 = \frac{V_{cc} \cdot (V_{R_e} + V_{be})}{11 \times I_b} = \frac{12 - 1,7}{11 \cdot 45,8 \cdot 10^{-6}} = 20,45 \text{ k}\Omega.$$

Значення опору емітера R_e можна легко обчислити, використовуючи закон Ома. Струм, що протікає через R_e , є суперпозицією (сумою) струму бази I_b та струму колектора I_c :

$$I_e = I_c + I_b = 4,58 \text{ mA} + 45,8 \text{ }\mu\text{A} = 4,63 \text{ mA}.$$

Резистор R_e підключений між емітером транзистора і землею, і ми раніше говорили, що на ньому відбувається падіння напруги на 1 В . Таким чином, значення резистора R_e обчислюється як:

$$R_e = \frac{V_{R_e}}{I_e} = \frac{1\text{V}}{4,63 \text{ mA}} = 216\Omega.$$

Тепер вибираємо номінальні значення опорів всіх резисторів з ряду, наприклад, E24:

$$R_1 = 20 \text{ k}\Omega; \quad R_2 = 3,6 \text{ k}\Omega; \quad R_L = 1,2 \text{ k}\Omega; \quad R_e = 220 \Omega.$$

На рис. 4 приведена підсумкова схема розрахованого підсилювача на біполярному транзисторі, включеному за схемою із спільним емітером. Правда, на ній не показані значення ємностей конденсаторів, і тому далі ми розглянемо це питання детальніше.

2 Конденсатори зв'язку

У схемах підсилювачів зі спільним емітером конденсатори C_1 і C_e використовуються для відділення сигналів змінного струму від напруги зміщення постійного струму, і вони називаються конденсаторами зв'язку (coupling capacitors). Використання конденсатора C_1 гарантує, що на напругу зміщення, встановлену для правильної роботи схеми, не будуть впливати ніякі додаткові паразитні

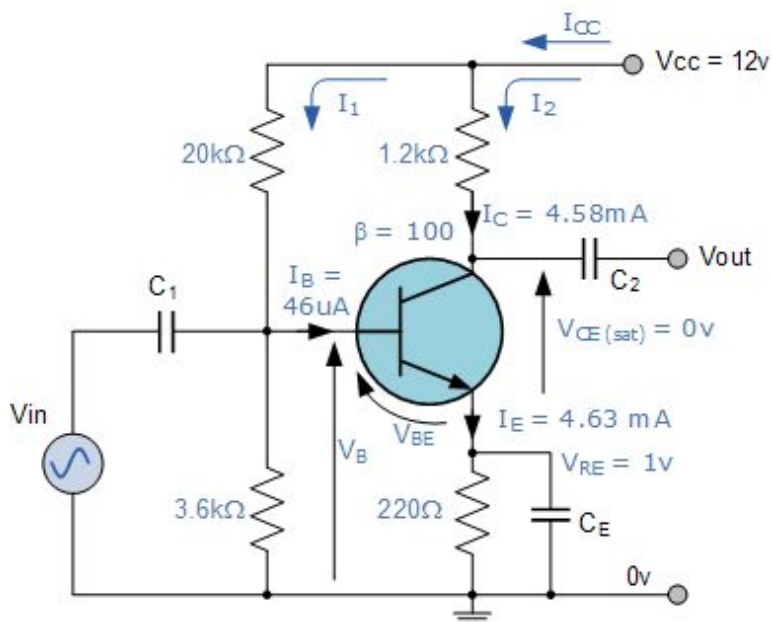


Рис. 4 – Розрахована схема підсилювача на БТ

напруги підсилювача, оскільки конденсатори передаватимуть лише сигнали змінного струму та блокуватимуть будь-які постійні складові струму. Потім вихідний сигнал змінного струму накладається на постійну напругу зміщення наступних каскадів. І ще один розв'язуючий конденсатор C_e включений в коло емітера. Основна функція цього конденсатора полягає у підтримці стабільності точки Q за рахунок пропускання через себе змінної складової струму емітера.

Однак цей паралельно з'єднаний розв'язуючий конденсатор може перетворюється на коротке замикання для опору емітера на високочастотних сигналах завдяки його реактивності. Як правило, значення ємності конденсатора e вибирається таким чином, щоб забезпечити його реактивний опір максимум на $1/10$ значення R_e на найнижчій робочій частоті сигналу.

3 Вихідні характеристичні криві

Тепер ми можемо побудувати ряд кривих, які показують залежність струму колектора I_c проти напруги колектор / випромінювач, V_{ce} з різними значеннями базового струму, I_b для нашої простої загальної схеми підсилювача випромінювачів.

Ці криві відомі як характеристичні вихідні криві і вони використовуються для ілюстрації того, як транзистор буде працювати в своєму динамічному діапазоні. На кривих для навантажувального резистора $R_L = 1,2 \text{ k}\Omega$ накреслюється пряма сталого навантаження (інші назви: статична пряма, навантажувальна пряма), що показує всі можливі робочі точки транзистора (див. рис. 3).

Коли транзистор вимкнений, V_{ce} дорівнює напрузі живлення V_{cc} , і це точка B на лінії. Так само, коли транзистор повністю включений та насичений, струм колектора визначається опором навантаження R_L , і це точка на лінії.

Раніше ми вирахували з коефіцієнту підсилення транзистора, що струм бази, необхідний для встановлення робочої точки транзистора, був $45,8 \text{ мкА}$, і це позначено як точка Q на прямій навантаження, або робочу точку підсилювача. Ми могли б досить легко полегшити собі життя і точно закріпити це значення до 50 мкА — принципово роботу схеми це не змінило б.

Точка Q на навантажувальній лінії дає нам струм бази $I_b = 45,8 \text{ мкА}$ або 46 мкА . Нам потрібно знайти максимальні та мінімальні пікові перепади основного струму, які призведуть до пропорційної зміни струму колектора I_c без жодних спотворень вихідного сигналу.

Коли навантажувальна лінія перетинає різні значення струму бази на вихідних характеристичних кривих струму, ми можемо знайти максимуми коливань струму бази, які однаково розташовані вздовж лінії навантаження. Ці значення позначаються як точки N та M на лінії, даючи мінімальний та максимальний струм бази 20 мкА та 80 мкА відповідно.

Ці точки N і M можуть знаходитися в будь-якому місці вздовж навантажувальної прямої, але бажано, що вони були майже однаково розташовані відносно точки Q (їх несиметричність відносно

Q говорить про те, що клас підсилювача - не А, а якийсь інший (В, АВ тощо). Ці випадки будуть детальніше розглянуті в наступних лекціях). Таким чином, маємо теоретичний максимальний вхідний сигнал на базі 60 мкА від мінімуму до максимуму (peak-to-peak), або 30 мкА в середньому, не створюючи жодних спотворень вихідного сигналу.

Будь-який вхідний сигнал, що має струм бази, більший за це значення, призведе до того, що транзистор вийде за межі точки N в область відсікання або за межі точки M в область насичення, що призведе до спотворення вихідного сигналу (у формі „відсікання“ тих частин сигналу, які виходять за точки N і M).

Використовуючи в якості прикладу точки N та M , миттєві значення струму колектора та відповідні значення напруги колектор-емітер можуть бути спроектовані відносно навантажувальної прямої. Видно, що напруга колектор-емітер перебуває в протифазі (-180°) з струмом колектора.

Коли струм бази I_b змінюється в позитивному напрямку від 50 мкА до 80 мкА, напруга колектор-емітер, яка також є вихідною напругою, зменшується від його стаціонарного значення 5,8 вольт до 2,0 вольт.

Таким чином, однокаскадний підсилювач зі спільним емітером також є „інвертуючим підсилювачем“, оскільки збільшення напруги бази спричиняє зниження V_{out} , а зниження напруги бази призводить до збільшення V_{out} . Іншими словами, вихідний сигнал знаходиться у протифазі відносно вхідного сигналу.