

## Практична робота № 4

### ДОСЛІДЖЕННЯ КАСКАДІВ ПІДСИЛЕННЯ НА БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРАХ

**Мета роботи:** дослідження характеристик і параметрів каскадів підсилення на біполярних транзисторах, схемах зі спільним емітером СЕ, спільною базою СБ, спільним колектором СК.

#### Теоретичні відомості. Основні параметри та характеристики підсилювачів

Підсилювач – це пристрій, який призначений для підсилення потужності вхідного сигналу за рахунок споживання енергії джерела живлення.

Залежно від схеми підключення біполярного транзистора (БТ) підсилювачі розрізняють: підсилювачі зі спільним емітером (СЕ), зі спільною базою (СБ) та зі спільним колектором (СК).

Головними параметрами, які характеризують якісні і кількісні характеристики підсилювачів, є коефіцієнт підсилення, точність відтворення форми підсилюваного сигналу, коефіцієнт корисної дії.

Коефіцієнт підсилення показує, в скільки разів вихідна величина напруги, струму чи потужності більша відповідної величини на вході.

Коефіцієнт підсилення напруги:

$$K_U = \frac{U_{ВИХ}}{U_{ВХ}}, \quad (4.1)$$

коефіцієнт підсилення струму:

$$K_I = \frac{I_{ВИХ}}{I_{ВХ}}, \quad (4.2)$$

коефіцієнт підсилення потужності:

$$K_P = \frac{P_{ВИХ}}{P_{ВХ}} = K_U \cdot K_I. \quad (4.3)$$

Вхідний опір  $R_{ВХ}$  – опір вхідного каналу підсилювача для змінного струму:

$$R_{ВХ} = \frac{U_{ВХ}}{I_{ВХ}}. \quad (4.4)$$

Вихідний опір  $R_{ВИХ}$  – опір вихідного каналу підсилювача для змінного струму при відключеному опорі навантаження:

$$R_{ВИХ} = \frac{U_{ВИХ}}{I_{ВИХ}}. \quad (4.5)$$

Підсилювачі також характеризуються коефіцієнтом корисної дії (ККД). Розрізняють електричний і повний ККД. Електричний ККД:

$$\eta_e = \frac{P}{P_0}, \quad (4.6)$$

де  $P_0$  – потужність, що споживається колекторним колом від джерела живлення,

$P$  – корисна потужність, виділена на навантаженні.

Повний ККД:

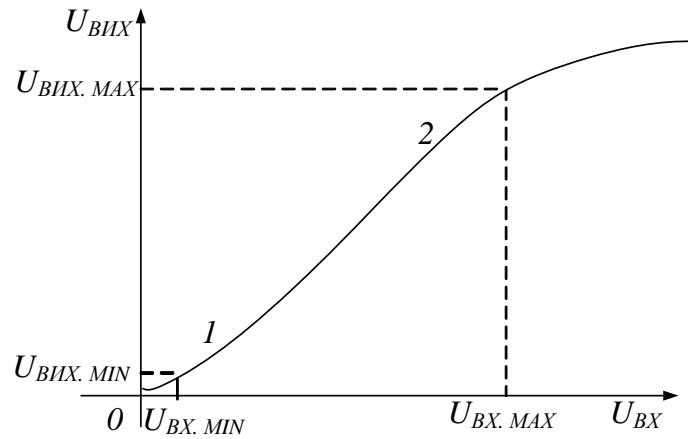
$$\eta_n = \frac{P}{P_{ЗАГ}}, \quad (4.7)$$

де  $P_{ЗАГ}$  – потужність, що споживається всіма колами підсилювача від джерела живлення.

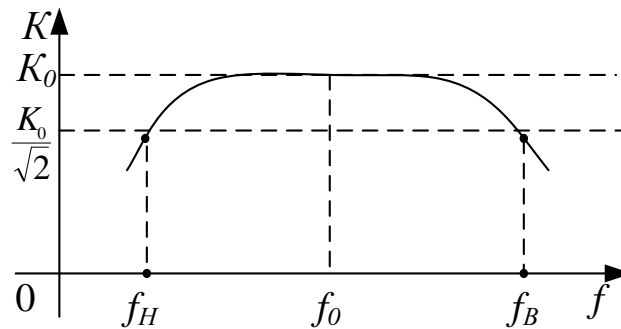
До основних характеристик підсилювача відносять: амплітудні (рис. 4.1, а) та амплітудно-фазочастотні характеристики В загальному випадку коефіцієнт підсилення напруги і струму є величина комплексна, що характеризується модулем і фазою, які залежать від частоти підсилювального сигналу. Тому амплітудно-фазочастотну характеристику розділяють на дві: амплітудно-частотну (рис. 4.1, б) та фазочастотну.

Через наявність в схемі реактивних елементів і залежність властивостей транзистора від частоти, коефіцієнт підсилення підсилювача має різні значення на різних частотах. Це явище називають частотними спотвореннями підсилювача. Для їх оцінення вводиться параметр, який називають коефіцієнтом частотних спотворень  $M(f)$ , що дорівнює відношенню коефіцієнта підсилення на заданій частоті  $K(f)$  до коефіцієнта підсилення на середніх частотах :

$$M(f) = \frac{K(f)}{K(f_0)}. \quad (4.8)$$



а)



б)

Рисунок 4.1 – Характеристики підсилювача: а) амплітудна  
б) амплітудно-частотна

Частоти, на яких коефіцієнт підсилення досягає гранично допустимого (межового) значення називаються верхньою  $f_B$  і нижньою  $f_H$  граничними частотами, а різниця  $f=f_B-f_H$  – смугою пропускання підсилювача (рис. 4.1, б).

$$K = \frac{K(f_0)}{\sqrt{2}} \approx 0.707K(f_0). \quad (4.9)$$

Амплітудна характеристика ідеального підсилювача являє собою пряму лінію, яка проходить через початок координат, а амплітудна характеристика реального підсилювача збігається з характеристикою ідеальною лише на обмеженому відрізку характеристики (рис. 4.1, б). За великих вхідних сигналів  $U_{ВХ} > U_{ВХ. MAX}$  вихідна напруга перестає збільшуватись. Це пов'язано з тим, що робоча точка транзистора потрапляє в область насичення або відсічки (проявляються нелінійні властивості транзистора). При цьому вхідний сигнал спотворюється. Таке явище називається нелінійним спотворенням і оцінюється коефіцієнтом гармонік:

$$K_r = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \frac{P_n}{P_1}}, \quad (4.10)$$

де  $P_n$  – потужність  $n$ -ої гармонічної складової вихідного сигналу;  
 $P_1$  – потужність першої гармоніки.

Якщо навантаження підсилювача активне, то коефіцієнт гармонік має вигляд:

$$K_r = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \frac{U_{mn}^2}{U_{m1}^2}} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \frac{I_{mn}^2}{I_{m1}^2}}. \quad (4.11)$$

За малих вхідних сигналів  $U_{BX} < U_{BX.MIN}$  вихідна напруга підсилювача залишається практично постійною і дорівнює  $U_{ВИХ.MIN}$ , напруга  $U_{ВИХ.MIN}$  називається напругою власних шумів підсилювача. Власні шуми підсилювача обумовлені різними переходами, а також нестабільністю електричних процесів в часі. За допомогою підсилювача неможливо підсилити сигнали з амплітудою  $U_{BX} < U_{BX.MIN}$ , оскільки підсилений сигнал не може бути виявленим з власних шумів підсилювача. Відношення  $\frac{U_{ВИХ.MAX}}{U_{ВИХ.MIN}} = D$  називається динамічним діапазоном підсилювача.

### Підсилювальний каскад на біполярному транзисторі

В таблиці 4.1 наведено вирази для визначення основних параметрів підсилювачів залежно від схем включення БТ.

Найбільш поширеною схемою підсилювального каскаду на БТ є схема СЕ. Вхідна підсилювальна змінна напруга  $U_{BX}$  визначається джерелом вхідного сигналу з діючим значенням ЕДС –  $E_g$ , внутрішнім опором  $R_{BH}$  та підводиться до входу підсилювача через розділювальний конденсатор  $C_p$ . Конденсатор  $C_{p1}$  розділяє джерело вхідного сигналу та базовий вхід підсилювача за постійним струмом, щоб виключити порушення початкового режиму роботи транзистора  $VT$ . Підсилена змінна напруга, яка виділяється на колекторі транзистора  $VT$ , підводиться до зовнішнього навантаження із опором  $R_H$  через розділювальний конденсатор  $C_{p2}$ . Цей конденсатор слугує для розділення вихідного (колекторного) кола транзистора і зовнішнього навантаження за постійною складовою колекторного струму  $I_{OK}$ . Значення  $I_{OK}$  та інших постійних складових струмів і напруги в колах транзисторів залежить від режиму його роботи за постійним струмом (початкове положення робочої точки  $P_0$  на рис. 4.2). За відсутності вхідного змінного сигналу в колі колектора БТ проходить постійний струм  $I_{OK}$ , значення якого залежить від напруги джерела живлення  $E_K$ , опору резисторів  $R_H$  і  $R_E$  і постійного струму в колі бази  $I_{0B}$ . Для початкового режиму виконується баланс напруги в схемі підсилювача:

$$U_{0KE} + I_{OK} R_K + I_{0B} R_B \sim U_{0KE} + I_{OK} (R_K + R_B) = E_K. \quad (4.12)$$

Таблиця 4.1

|  | Підсилювач зі<br>спільним емітером   | Підсилювач зі<br>спільною базою   | Підсилювач зі<br>спільним колектором   |
|--|--|---|--|
| $K_u = \frac{U_2}{U_1}$                                | $-h_{11E} \cdot R_0 / R_{BXE} =$ $= -h_{11E} \cdot \frac{R_0}{r_B + (h_{12E} + 1) \cdot r_E},$ $\partial e \quad R_0 = \frac{R_K \cdot R_H}{R_H + R_K};$ $h_{21E} = \frac{i_K}{i_B} = \frac{h_{21B}}{1 - h_{21B}}$ | $-h_{21B} \cdot R_0 / R_{BX0} =$ $= h_{21B} \cdot \frac{R_0}{r_E + (1 - h_{21B}) \cdot r_B},$ $\partial e \quad R_0 = \frac{R_K \cdot R_H}{R_H + R_K}$  | $(h_{21E} + 1) \cdot R_0 / R_{BKK} =$ $= \frac{(h_{21E} + 1) \cdot R_0}{r_B + (h_{21E} + 1) \cdot (R_0 + r_B)} \approx$ $\approx \frac{h_{21E} \cdot R_0}{r_B + h_{21E} \cdot R_0},$ $\partial e \quad R_0 = \frac{R_K \cdot R_H}{R_H + R_K};$ |
| $k_i = \frac{i_H}{i_1} = \frac{R_{BX} \cdot k_U}{R_H}$ | $\frac{h_{21E} \cdot R_K \cdot R}{R_K + R_H \cdot R + R_{BX.E}} =$ $= e_1 \cdot e_2 \cdot h_{21E},$ $\partial e \quad e_1 = \frac{R_K}{R_K + R_H};$ $e_2 = \frac{R}{R + R_{BX.E}};$                                | $\frac{h_{21B} \cdot R_K \cdot R}{R_K + R_H \cdot R + R_{BX.B}} =$ $= \bar{\sigma}_1 \cdot \bar{\sigma}_2 \cdot h_{21B},$ $\partial e \quad \bar{\sigma}_1 = \frac{R_K}{R_K + R_H};$ $\bar{\sigma}_2 = \frac{R}{R + R_{BX.B}};$ | $\frac{h_{21E} \cdot R_K \cdot R}{R_K + R_H \cdot R + R_{BX.K}} =$ $= k_1 \cdot k_2 \cdot h_{21E},$ $\partial e \quad k_1 = \frac{R_K}{R_K + R_H};$ $k_2 = \frac{R}{R + R_{BX.K}};$  |
| $k_P = k_U \cdot k_I$                                  | $e_1 \cdot e_2 \cdot \frac{h_{21E} \cdot R_0}{R_{BX.E}}$   | $\bar{\sigma}_1 \cdot \bar{\sigma}_2 \cdot \frac{h_{21B} \cdot R_0}{R_{BX.B}}$  | $k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{h_{21E} \cdot R_0}{R_{BX.K}}$   |
| $R_{BX} = \frac{U_1}{I_1} = R_{BX} \parallel R$        | $R_{BXE} \parallel R, \partial e$<br>$R = R_1 \parallel R_2;$<br>$R_{BXE} = r_B + (h_{21E} + 1) \cdot r_E \approx$<br>$\approx r_B + h_{21E} \cdot r_E$  | $R_{BXB} \parallel R, \partial e$<br>$R_{BXB} = r_E + (1 - h_{21B}) \cdot r_B$<br><i>мале</i>   | $R_{BKK} \parallel R, \partial e$<br>$R_{BKK} = r_B + (1 + h_{21E}) \times$<br>$\times (R_E + r_E) \approx r_B + h_{21E} \cdot R_E$<br><i>велике</i>   |
| $R_{BHX} = \frac{U_2}{I_2} = R_{BHX} \parallel R_0$    | $R_{BHX.E} \parallel R_0,$<br>$\partial e \quad R_{BHX.E} \approx r_K (1 - \alpha)$  | $R_{BHX.B} \parallel R_0,$<br>$\partial e \quad R_{BHX.B} \approx r_K$  | $R_{BHX.K} \parallel R_0, \partial e$<br>$R_{BHX.K} \approx r_K (1 - h_{21B}) - r_E - \frac{r_E r_K}{r + r_B}$   |

Розв'язавши рівняння (4.12) відносно  $I_{OK}$ , одержимо динамічну характеристику за постійним струмом (статичну навантажувальну пряму):

$$I_{OK} = \frac{E_K}{R_{KE}} - \frac{U_{0KE}}{R_{KE}}, \quad (4.13)$$

де  $R_{KE} = R_K + R_E$ .

Вираз (4.12) – це рівняння прямої лінії, яка проходить через точки з координатами  $(E_K, 0)$  і  $(0, \frac{E_K}{R_{KE}})$ , з кутовим коефіцієнтом  $tg\alpha = \frac{1}{R_{KE}}$  (рис. 4.2).

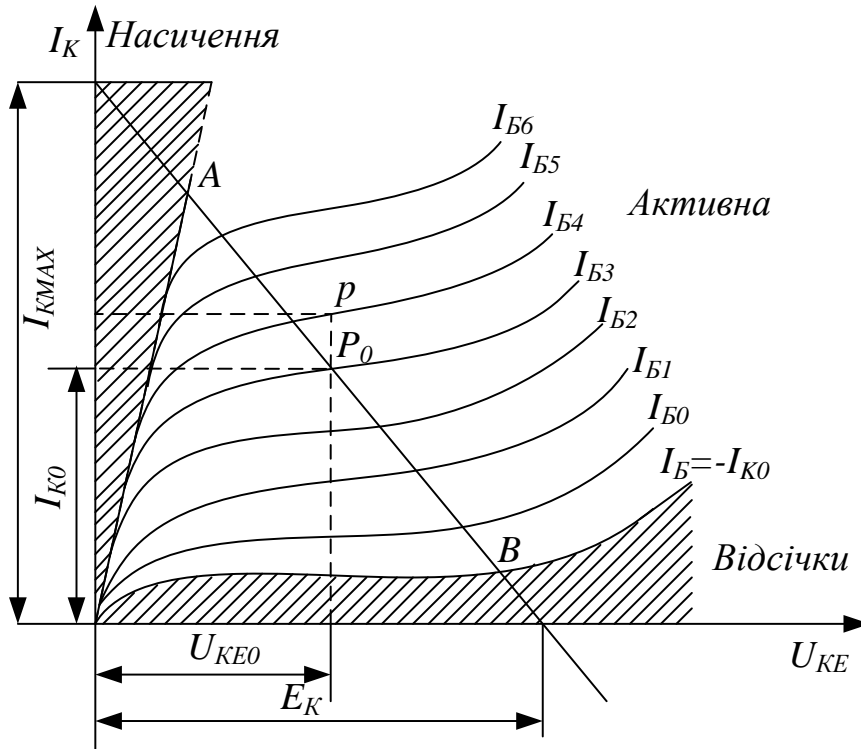


Рисунок 4.2

Підсилювальні каскади можуть працювати в одному з режимів: А, В, С, АВ. Вони визначаються початковим положенням робочої точки за відсутності вхідного змінного сигналу. Це положення визначається за характеристиками транзистора (рис. 4.2) сукупністю постійних складових струмів та напруги у вихідних  $(I_{OK}, U_{0KE})$  і вхідних  $(I_{0B}, U_{0BE})$  колах. Під час роботи транзистора в активному (підсилювальному) режимі (клас А) початкове положення робочої точки має бути таким, щоб струм через активний елемент БТ протікав протягом всього періоду змінення вхідного сигналу, а амплітудне значення вихідного струму  $I_{KM}$  не перевищувало початкового струму  $I_{OK}$ . Початкове положення робочої точки забезпечується подільником напруги, що складається з резисторів  $R_1$  і  $R_2$  (див. табл. 4.1), значення яких визначаються співвідношеннями.

$$R_1 = \frac{E_K - U_{0BE} - U_{RE}}{I_{ПОДЛ} + I_{0B}}, \quad (4.14)$$

$$R_2 = \frac{U_{0BE} + U_{RE}}{I_{ПОДЛ}}, \quad (4.15)$$

де  $I_{ПОДЛ} = (2 \dots 5)I_{0B}$  – струм в колі подільника;

$U_{RE}$  для каскадів попереднього підсилення дорівнює  $(0,1 \dots 0,25)E_K$ .

При забезпеченні режиму роботи транзистора необхідно здійснити температурну стабілізацію робочої точки (зменшити вплив температури на початкове положення робочої точки). З цією метою в емітерне коло вводяться резистор  $R_E$ , на якому виникає напруга негативного зворотного зв'язку НЗЗ за постійним струмом. Для виключення НЗЗ за змінним струмом за наявності вхідного змінного сигналу резистор  $R_E$  шунтують конденсатором  $C_E$ , опір якого на частоті підсилювального сигналу має бути незначним.

За підключення на вхід підсилювача джерела синусоїдальної напруги  $E_D$  на базі транзистора з'являється синусоїдальна напруга  $U_{BX}$ , яка змінює початкову напругу  $U_{OBE}$ . Під впливом напруги  $U_{BX}$  в колі бази з'являється змінна складова струму  $I_B$ , яка викликає появу змінної складової струму в колі колектора  $I_K \approx h_{21} \cdot I_B$  (на рис. 4.2 показано штриховою лінією). За наявності на виході підсилювального каскаду опору навантаження  $R_H$  (див. табл. 4.1) змінна складова струму колектора  $I_K$  розподіляється між  $R_K$  і  $R_H$ , які для змінного струму включено паралельно (вважаємо, що внутрішній опір джерела напруги  $E_K$  дорівнює нулю). Динамічна характеристика за змінним струмом являє собою пряму лінію, яка проходить через точку  $P_0$  (див. рис. 4.2) з кутовим коефіцієнтом  $tg \alpha = \frac{1}{R_{KE}}$ , при  $R_H \rightarrow \infty$  динамічні

характеристики за змінним і постійним струмами збігаються. Необхідно звернути увагу на те, що напруга на виході підсилювального каскаду з СЕ знаходиться в протифазі з напругою на його вході:

$$tg \alpha \sim \frac{1}{R'_H}, \quad (4.16)$$

$$\text{де } R'_H = \frac{R_K R_H}{R_K + R_H}.$$

Аналітичний розрахунок коефіцієнтів підсилення за струмом, за напругою та потужністю, а також вхідного та вихідного опорів однокаскадних підсилювачів (див. табл. 4.1) виконується за еквівалентними схемами для змінних складових струмів та напруги для різних діапазонів частот вхідного сигналу: низьких, середніх та високих.

Орієнтовні (приблизні) значення основних параметрів підсилювальних каскадів на БТ подано в таблиці 4.2.

В області низьких частот ( $f \ll f_H$ , див. рис. 4.1, б) на роботу підсилювача здійснюють вплив розподільні  $C_{P1}$ ,  $C_{P2}$  та емітерний  $C_E$  конденсатори. Вплив розподільних конденсаторів полягає в тому, що при зниженні частоти вхідного сигналу збільшуються ємнісні опори конденсаторів  $X_{CP}$ , з'являється спад напруги на цих опорах від струмів, що проходять по

вхідному та вихідному колах, за рахунок чого знижується напруга  $U_{BX}$  при  $E_g = const$  і напруга на навантаженні  $U_{BHX}$ . Таким чином, наявність розподільних конденсаторів призводить до зниження вихідної напруги в області низьких частот, тобто до зниження коефіцієнта підсилення. Вплив конденсатора  $C_E$  полягає в тому, що при зниженні частоти і збільшенні  $X_{CE}$  сильніше виявляється дія напруги від'ємного зворотного зв'язку  $U_{RE}$  за змінним струмом. На низьких частотах напруга зворотного зв'язку стає одного порядку з напругою  $U_{BX}$ , що призведе до зменшення напруги  $U_{BE}$ , а потім і до зниження коефіцієнта підсилення каскаду. Вплив розподільних і емітерного конденсаторів призведе до зниження модуля коефіцієнта підсилення і до появи фазового зсуву між вихідними та вхідними напругами, тобто коефіцієнт підсилення стає комплексною величиною (див. рис. 4.1, б).

В області високих частот ( $f > f_B$ , див. рис. 4.1, б) на роботу підсилювача впливає: залежність коефіцієнта підсилення (передачі) струму транзистора від частоти, ємність колекторного переходу транзистора  $C_K$ , ввімкнена паралельно диференційному опору колекторного переходу  $r_K$  (див. табл. 4.1), ємність емітерного переходу  $C_E$ , включена паралельно диференційному опору емітерного переходу  $r_E$ , ємність  $C_0$ , яка включена паралельно опору навантаження  $R_H$  і складається з ємності навантаження та паразитної ємності схеми підсилювача. Вплив залежності коефіцієнта підсилення струму транзистора від частоти в області високих частот найбільш суттєвий в схемі підсилювача з СЕ. Вплив ємності  $C_K$  полягає в тому, що зі збільшенням частоти зменшується опір ємності колекторного переходу  $X_{CK}$ , за рахунок внутрішнього зворотного зв'язку збільшується частина колекторної вихідної напруги, яка передається на вхід транзистора, в результаті зменшується струм в колі навантаження, вихідна напруга та коефіцієнт підсилення (див. рис. 4.1, б). Ємність емітерного переходу  $C_E$ , хоча і перевищує ємність  $C_K$ , однак, впливає тільки на дуже високих частотах, оскільки вона ввімкнена паралельно малому диференційному опору емітерного переходу  $r_E$ . Вплив ємності  $C_0$  полягає в тому, що з підвищенням частоти зменшується ємнісний опір  $X_{C0}$ , збільшується частина струму  $I_K$ , який проходить через ємності  $C_0$ , що призводить до зменшення струму в колі навантаження, вихідної напруги та коефіцієнта підсилення.

В області середніх частот ( $f_H \leq f \leq f_B$ , див. рис. 4.1, б) ємкісні опори  $X_{C0}$  і  $X_{CE}$  малі і ними можна знехтувати, ємкісні опори  $X_{CR}$  і  $X_{CER}$ ,  $X_{C0}$  досить великі і суттєво не впливають на роботу підсилювача, коефіцієнт підсилення (передачі) струму транзистора змінюється незначно. Тому в цьому частотному діапазоні  $K_U(f) = K_U(f_0) = const$  (див. рис. 4.1, б).

Еквівалентні схеми підсилювачів зі СЕ, СБ, СК для діапазону середніх частот наведено в таблиці 4.1. Більша кількість електронних пристроїв автоматики та систем управління працює в діапазоні середніх частот, тому він вибирається як основний при дослідженні підсилювачів.



**Орієнтовні (приблизні) значення основних параметрів підсилювальних каскадів на БТ**

Таблиця 4.2

| параметри           | Схеми включення   |  |   |
|---------------------|---|--|---|
|                     | СБ  | СЕ   | СК  |
| $k_I$               | $\alpha < 1$  | десятки–сотні ( $\beta$ )<br>10..100                   | десятки–сотні $\beta+1$<br>10..100  |
| $k_U$               | десятки–сотні<br>$\alpha \frac{R_H}{R_{BX}}$<br>до 1000 | десятки–сотні<br>$\frac{\beta R_H}{R_{BX}}$<br>до 1000 | $\frac{R_H}{R_H + h_{11E}(1-\alpha)} < 1$<br>$\frac{R_H}{R_H + R_{BX}} < 1$<br>до 1 |
| $k_P$               | десятки–сотні<br>до 1000                                | сотні – десятки<br>тисяч<br>до 10000                   | десятки–сотні<br>до 100   |
| $R_{BX}$            | одиниці –<br>десятки Ом<br>$h_{11B}$<br>1...50          | сотні Ом–одиниці<br>кОм<br>$h_{11E}$<br>до 1000        | десятки–сотні кОм<br>$R_H(\beta+1)$<br>до 50000                                     |
| $R_{ВИХ}$           | сотні кОм –<br>одиниці МОм<br>до 20000                  | одиниці – десятки<br>кОм<br>до 5000                    | сотні Ом – одиниці<br>кОм<br>$h_{11E}(1-\alpha)$<br>10...1000                       |
| Зсув фази $\varphi$ | 0   | $\pi$  | 0   |

**Порядок виконання роботи**

Лабораторна робота виконується за допомогою лабораторного стенду або за допомогою пакетів прикладних програм моделювання електронних схем.

1. Підключити лабораторний стенд для дослідження схеми СЕ (рис. 4.3, а).

2. Зняти амплітудну характеристику. Для одержання амплітудної характеристики встановлюють частоту вхідної напруги 1 кГц і за допомогою осцилографа контролюють вихідну напругу. Збільшуючи вхідну напругу до появи помітних спотворень, визначають  $U_{ВХМАХ}$ . Потім, плавно зменшуючи вхідну напругу до нуля, знімають ще 8–10 точок залежності  $U_{ВИХ} = f(U_{ВХ})$ .

3. Зняти амплітудно-частотну характеристику за  $U_{ВХ} < U_{ВХМАХ}$ . Для одержання АЧХ встановлюють рівень вхідного сигналу дещо меншим за  $U_{ВХМАХ}$ . Змінюючи частоту генератора при постійному вхідному сигналі, заміряють вихідний сигнал. Будувати АЧХ необхідно в логарифмічному масштабі. Для цього потрібно зняти покази на частотах 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000 і т. д.

4. Виконати пп. 1 та 3 для схеми СБ (рис. 4.3, б).
5. Виконати пп. 1–3 для схеми СК (рис. 4.3, в).
6. Побудувати отримання амплітудні характеристики в одній системі координат.
7. Аналогічно виконати побудову АЧХ.

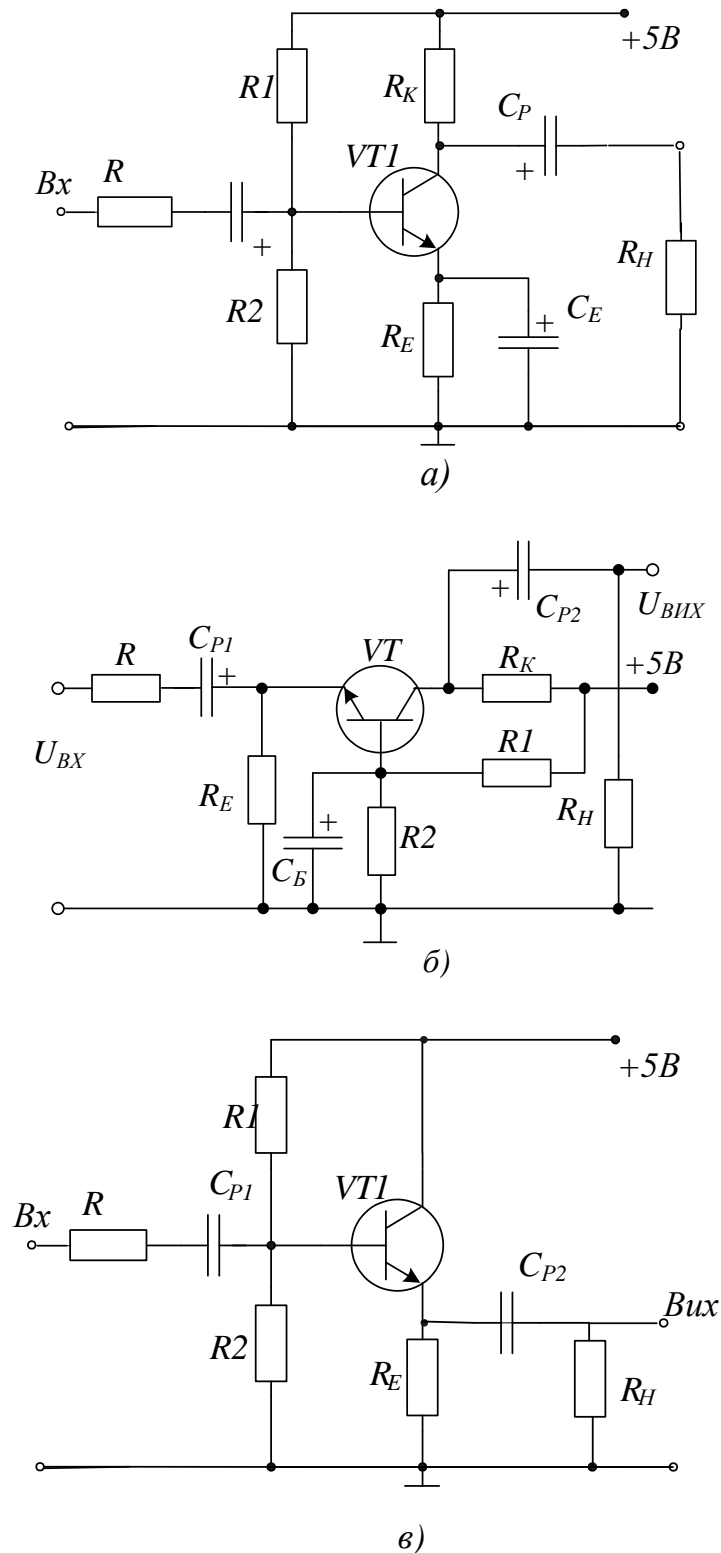
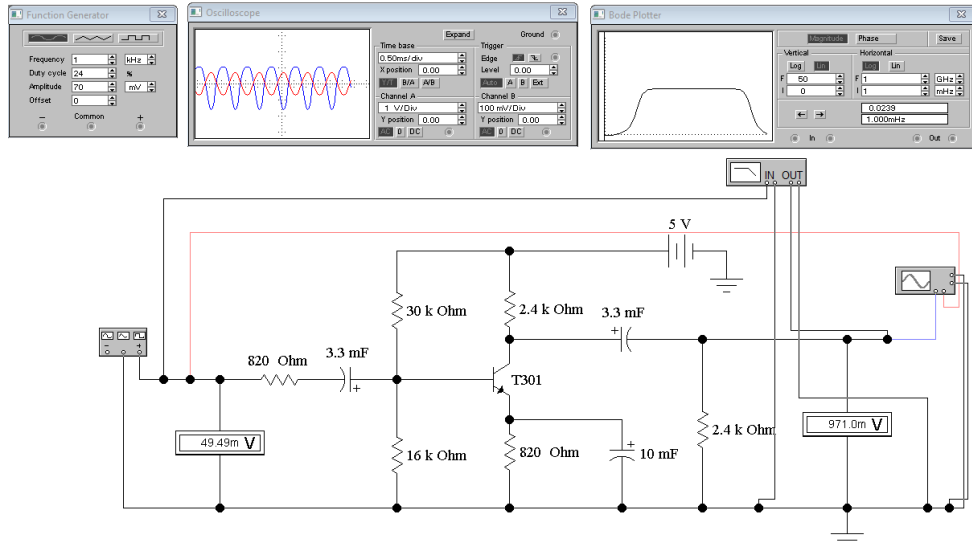


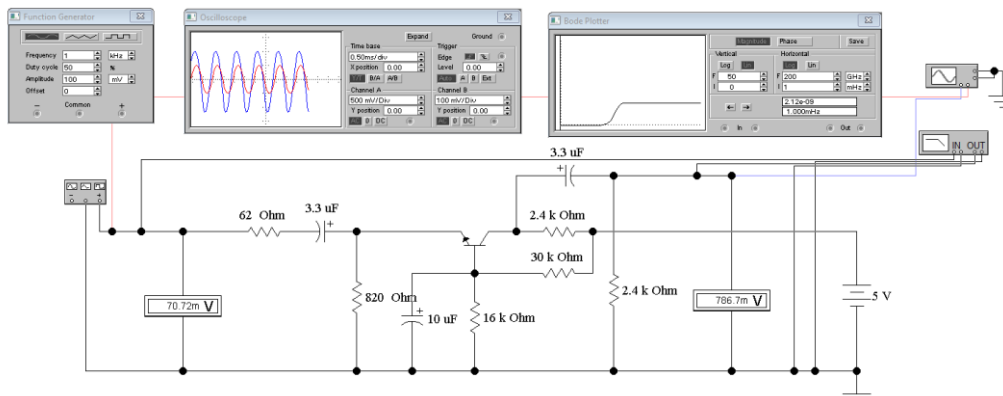
Рисунок 4.3 – Схема лабораторного стенда

Схеми підсилювальних каскадів та результати моделювання в пакеті EWB зображено на рисунку 4.4, в пакеті Multisim на рисунку 4.5.

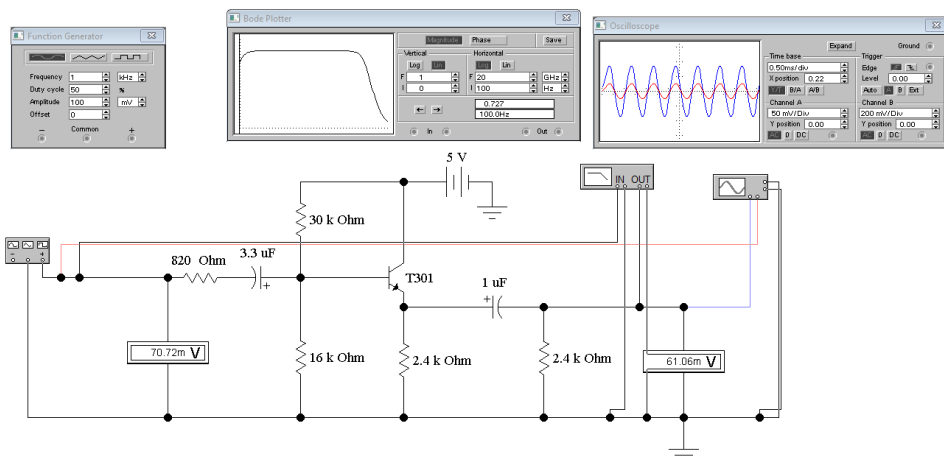
При зміні типів біполярних транзисторів необхідно виконати перерахунок всіх необхідних радіоелементів.



a)

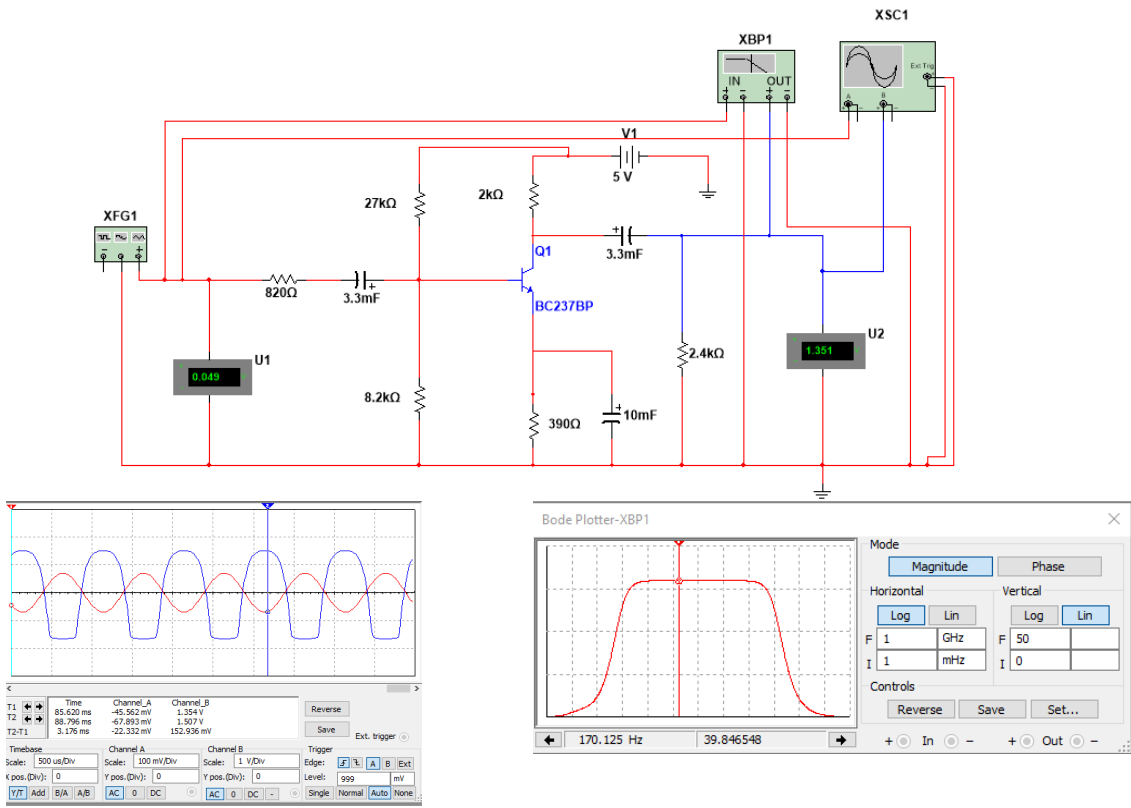


b)

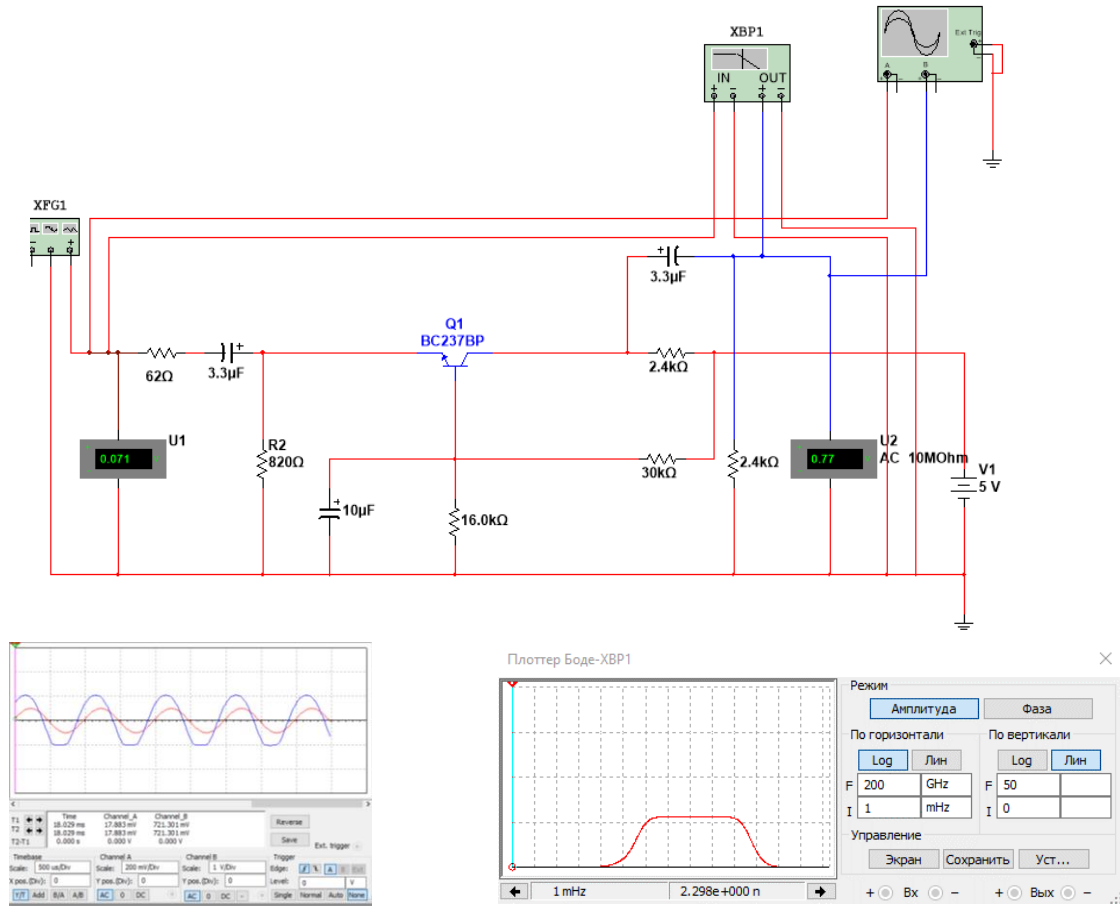


b)

Рисунок 4.4

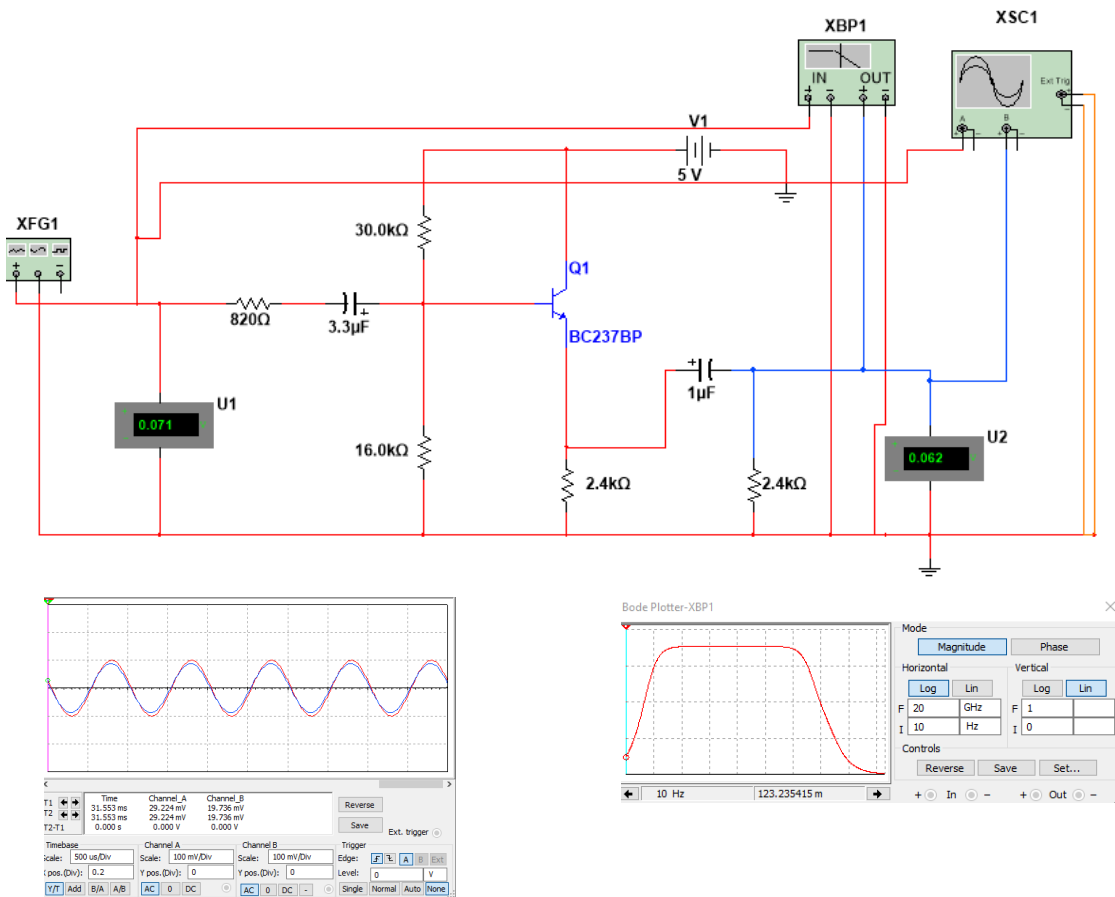


а)



б)

Рисунок 4.5



В)

Рисунок 4.5, аркуш 2

### Контрольні питання

1. Поясніть, як забезпечується та стабілізується режим спокою каскаду.
2. Поясніть відмінності параметрів  $R$ ,  $R_{BX}$ ,  $R_{ВИХ}$ ,  $K_U$ ,  $K_I$ ,  $K_P$  для різних схем включення БТ.
3. Поясніть АЧХ каскадів. Визначить граничні частоти та смугу пропускання.
4. Поясніть амплітудні характеристики каскадів.
5. Від яких параметрів залежить  $f_H$ ?
6. Від яких параметрів залежать верхні частоти  $f_B$ ?
7. Пояснити призначення всіх радіоелементів в схемах підсилювальних каскадів.