

## 6.8. Каскади попереднього підсилення на польових транзисторах

Під час побудови цих каскадів завжди слід пам'ятати, що польові транзистори керуються напругою, а не струмом, як біполярні. При цьому також можливі три схеми підключення транзистора: зі спільним витоком (з СВ), зі спільним стоком (з СС), зі спільним затвором (з СЗ). Практичного використання набули схеми з СВ та з СС.

### 6.8.1. Підсилюючий каскад з СВ

Схему підсилюючого каскаду з СВ наведено на рис. 6.20.

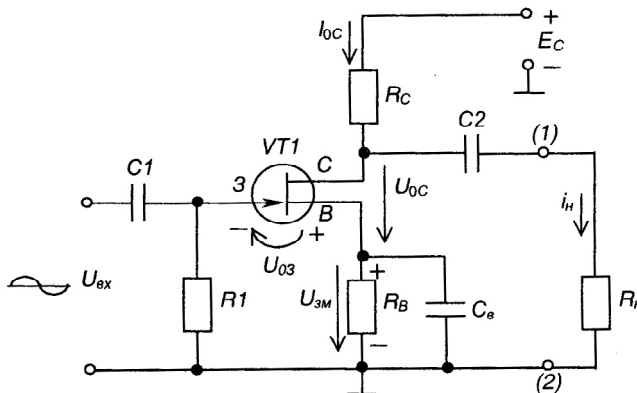


Рис. 6.20 – Підсилюючий каскад з СВ

Склад схеми та призначення елементів:

$VT1$  – польовий транзистор із керуючим  $p$ - $n$  переходом і каналом  $n$ -типу;  $R_C$  – навантаження за постійним струмом;

$E_C$  – джерело живлення каскаду (стокового кола).

Ці елементи утворюють вихідне коло каскаду, де, власне, і відбувається підсилення сигналу.

$R_B$ ,  $C_B$  – утворюють коло автоматичного зміщення, що задає режим спокою класу  $A$  шляхом подачі напруги зміщення до затвору

$V_{T1}$  через резистор  $R_I$ . Одночасно коло автоматичного зміщення забезпечує температурну стабілізацію режиму спокою.

$C_1, C_2$  – розділяючі конденсатори.

$C_B$  – конденсатор, що виключає негативний зворотний зв'язок за струмом для змінного вхідного сигналу.

Роботу каскаду ілюструють часові діаграми, наведені на рис. 6.21.

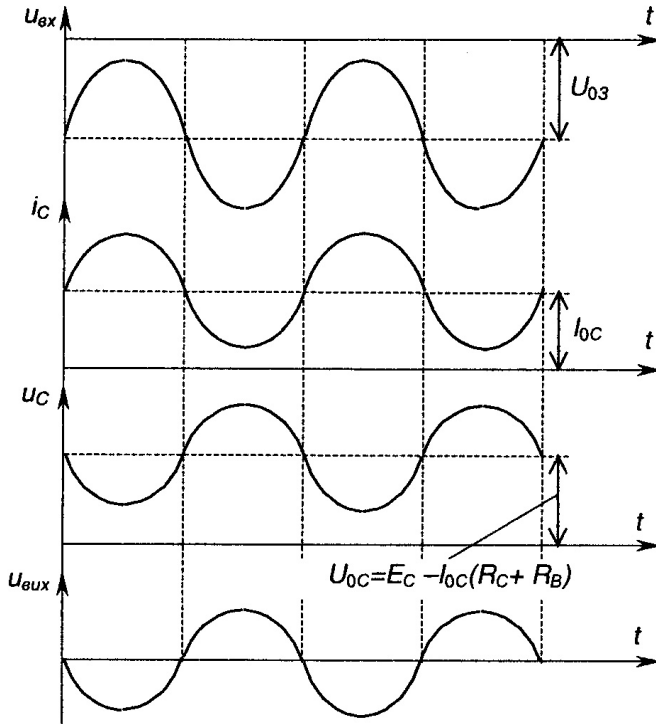


Рис. 6.21 – Часові діаграми роботи каскаду з СВ

Графоаналітичний розрахунок схеми проводиться у наступному порядку.

На стоковій характеристиці польового транзистора будуюмо лінію навантаження за постійним струмом, як це показано на рис. 6.22,  $U_C = E_C - I_C \cdot (R_C + R_B)$ .

Знаючи  $U_{03}$ , знайдемо  $R_B = U_{03}/I_{0C}$ .

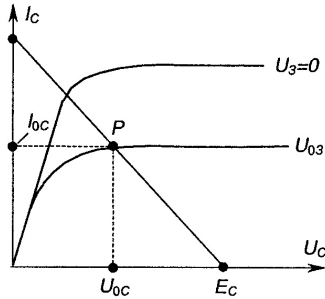


Рис. 6.22 – Стокові характеристики польового транзистора з керуючим  $p$ - $n$  переходом і каналом  $n$ -типу та динамічна характеристика каскаду з СВ

Оскільки навантаженням транзистора є, наприклад, наступний підсилюючий каскад на польовому транзисторі з дуже великим вхідним опором, то  $R_H \gg R_C$ ,  $R_H \approx R_C$ , і всі побудови за змінним струмом можна виконати за допомогою лінії навантаження за постійним струмом. Коефіцієнт підсилення за напругою визначається за виразом:

$$K_U = S \frac{R_i R_C}{R_i + R_C}, \quad (6.21)$$

де  $S$  – крутизна;  $R_i$  – внутрішній опір польового транзистора.

Розглянутий каскад набув широкого розповсюдження у вхідних колах інтегральних підсилювачів.

### 6.8.2. Підсилюючий каскад з СС

Схему підсилюючого каскаду з СС наведено на рис. 6.23.

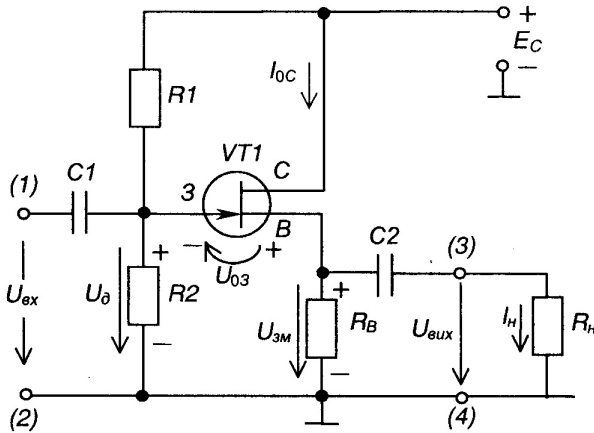


Рис. 6.23 – Підсилюючий каскад з СС

У наведеній схемі:

$VT1$  – польовий транзистор з керуючим  $p-n$  переходом і каналом  $n$ -типу;

$R_B$  – навантаження каскаду за постійним струмом (водночас створює напругу зміщення  $U_{зМ}$ );

$R_1, R_2$  – дільник напруги (створює напругу  $U_{\delta}$ ).

$U_{\delta}$  та  $U_{зМ}$  задають режим спокою підсилюючого каскаду:

$$U_{03} = U_{зМ} - U_{\delta}.$$

Призначення решти елементів аналогічне попереднім схемам. Навантаження каскаду за змінним струмом  $R_{H\approx} = R_B \parallel R_H$ . Роботу підсилювача ілюструють часові діаграми, наведені на рис. 6.24.

Ця схема має назву витокowego повторювача, оскільки  $U_{вих}$  майже повторює вхідну напругу.

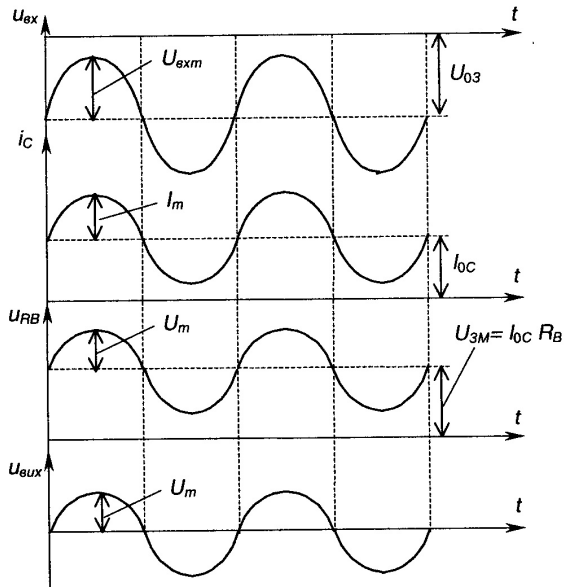


Рис. 6.24 – Часові діаграми роботи каскаду СС

Для каскаду можна записати такі співвідношення:

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{вих}} - U_{\text{зб}} ;$$

$$U_{\text{зб}} \ll U_{\text{вих}}, \text{ тому } U_{\text{вх}} \approx U_{\text{вих}} ;$$

$$K_U < 1; R_{\text{вих}} \approx R_B.$$

Каскад має великий  $R_{\text{вх}}$  і малий  $R_{\text{вих}}$ , тому використовується як узгоджувальний підсилювач у разі необхідності узгодження джерела сигналу з великим  $R_{\text{вих}}$  з навантаженням, що має малий  $R_{\text{вх}}$ , наприклад, підсилювачів на польових та біполярних транзисторах.

Каскади на польових МДН-транзисторах схематично будують так, як і каскади на біполярних транзисторах.

### 6.8.3. Зворотні зв'язки у підсилювачах

Поряд із колами прямої передачі сигналів у підсилювачі вводять штучно створені кола, через які частина енергії з виходу подається на вхід. Це явище має назву зворотного зв'язку.

Із застосуванням зворотних зв'язків ми вже зустрічалися, коли розглядали будову тиристора (внутрішній позитивний зв'язок) та температурну стабілізацію режиму спокою підсилюючого каскаду (негативний зворотний зв'язок).

Кола, за допомогою яких забезпечують зворотні зв'язки, називають колами зворотного зв'язку.

Коло прямої передачі сигналу і коло зворотного зв'язку утворюють петлю зворотного зв'язку.

Структурні схеми петльових зв'язків наведено на рис. 6.25.

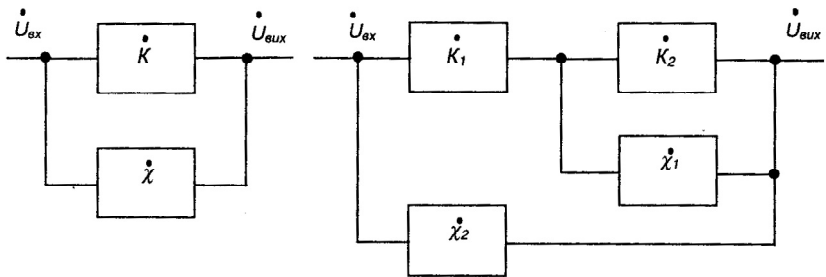


Рис. 6.25 – Приклади петльових зворотних зв'язків: а – однопетльовий; б – багатопетльовий

Зворотні зв'язки поділяються також на зв'язки за напругою та за струмом, як показано на рис. 6.26, або змішані.

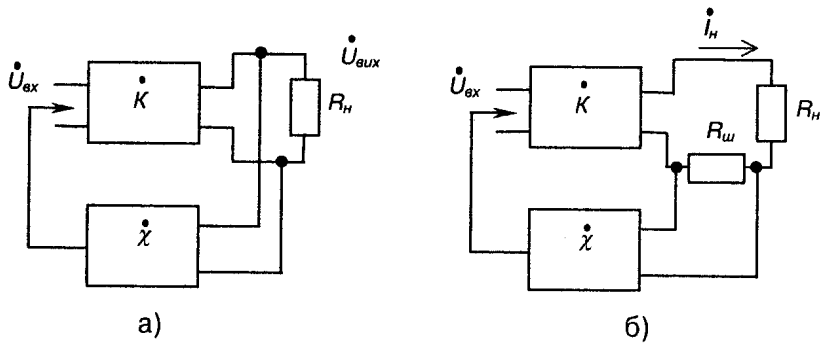


Рис. 6.26 – Зворотні зв'язки: а - за напругою; б - за струмом  
(шунт  $R_{ш}$  – давач струму навантаження)

Залежно від способу подачі сигналу зворотного зв'язку у вхідне коло розрізняють паралельний та послідовний зворотні зв'язки, як показано на рис. 6.27. Зазвичай вони використовуються для стабілізації параметрів підсилювача.

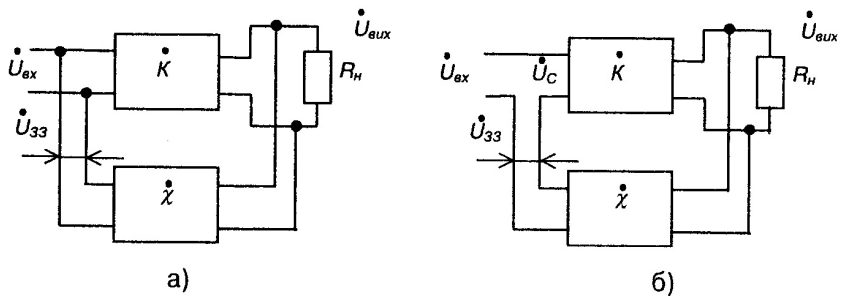


Рис. 6.27 – Паралельний (а) та послідовний (б) зворотні зв'язки

Властивості підсилювача із зворотним зв'язком розглянемо на прикладі послідовного зворотного зв'язку за напругою.

Основним показником є коефіцієнт передачі зворотного зв'язку, що визначає, яка частка вихідної напруги надходить до вхідного кола підсилювача ( $\dot{U}_{зз}$  – комплекс напруги зворотного зв'язку):

$$\dot{\chi} = \frac{\dot{U}_{33}}{\dot{U}_{вих}}. \quad (6.22)$$

Для вхідного кола можна записати рівняння:

$$\dot{U}_C = \dot{U}_{вх} + \dot{U}_{33}, \quad (6.23)$$

де  $\dot{U}_C$  – комплекс напруги на вході.

З урахуванням виразу (3.22)

$$\dot{U}_C = \dot{U}_{вх} + \dot{\chi} \dot{U}_{вих}. \quad (6.24)$$

Запровадимо такі позначення:

1) коефіцієнт підсилення підсилювача без зворотного зв'язку:

$$\dot{K} = \frac{\dot{U}_{вих}}{\dot{U}_C}. \quad (6.25)$$

2) коефіцієнт підсилення підсилювача зі зворотним зв'язком:

$$\dot{K}_{33} = \frac{\dot{U}_{вих}}{\dot{U}_{вх}}. \quad (6.26)$$

Можна записати

$$\dot{U}_{вих} = \dot{K} \dot{U}_C. \quad (6.27)$$

З урахуванням виразу (3.24), маємо:

$$\dot{U}_{вих} = \dot{K} (\dot{U}_{вх} + \dot{\chi} \dot{U}_{вих}). \quad (6.28)$$

Поділимо обидві частини рівняння (3.28) на  $\dot{U}_{вх}$  і одержимо:

$$\dot{K}_{33} = \dot{K} (1 + \dot{\chi} \dot{K}_{вих}), \quad (6.29)$$

звідки

$$\dot{K}_{33} = \frac{\dot{K}}{1 - \dot{\chi} \dot{K}}. \quad (6.30)$$

Зобразимо  $\dot{K}$  та  $\dot{\chi}$  у вигляді:

$$\dot{K} = K e^{j\varphi_K}, \quad (6.31)$$



$$\dot{\chi} = \chi e^{j\varphi_{\chi}} , \quad (6.32)$$

де  $\varphi_K, \varphi_{\chi}$  – фазовий зсув сигналу у колі прямої передачі та колі зворотного зв'язку відповідно. Вираз (3.30) матиме вигляд:

$$\dot{K}_{33} = \frac{K e^{j\varphi_K}}{1 - \chi K e^{j(\varphi_K + \varphi_{\chi})}} . \quad (6.33)$$

Розглянемо випадок, коли  $\varphi_K + \varphi_{\chi} = \pi n$  ( $\pi = 1, 3, 5 \dots$ ).

Тоді  $e^{j\pi} = -1$ , а  $\varphi_K \approx 0$  і вираз (3.33) матиме вигляд:

$$K_{33} = \frac{K}{1 + \chi K} . \quad (6.34)$$

Отже, якщо сигнал зворотного зв'язку зсунутий відносно вхідного сигналу на кут  $\pi$ , то цей зв'язок називається негативним зворотним зв'язком (НЗЗ). Коефіцієнт підсилення підсилювача, охопленого негативним зворотним зв'язком, зменшується у  $1 + \chi K$  разів. Незважаючи на це, НЗЗ широко використовують для підвищення стабільності роботи підсилювачів і покращення інших їх параметрів.

У першу чергу, НЗЗ знижує залежність  $K_{33}$  від  $K$  (наприклад, пов'язаних зі змінами температури).

Покажемо це, для чого продиференціюємо вираз (6.34) за  $K$ :

$$\frac{dK_{33}}{dK} = \frac{(1 + \chi K) - K\chi}{(1 + \chi K)^2} = \frac{1}{(1 + \chi K)^2} . \quad (6.35)$$

Перегрупуємо та поділимо ліву і праву частини цього рівняння на  $K_{33}$  із урахуванням (6.34) і отримаємо:

$$\frac{dK_{33}}{K_{33}} = \frac{dK}{K(1 + \chi K)} . \quad (6.36)$$

Цей вираз свідчить, що зміни  $K_{33}$  у  $(1 + \chi K)$  разів менші від змін  $K$ . У випадку глибокого НЗЗ отримаємо:

$$\chi K \gg 1, \text{ і тому } K_{33} \approx \frac{1}{\chi} - \text{ не залежить від } K.$$

Якщо, наприклад,  $K = 10^3$ ,  $\chi = 0,1$ , то  $K_{33} \sim 10$ .

НЗЗ також підвищує  $R_{вх}$  і знижує  $R_{вих}$ :

$$R_{вх33} = R_{вх}(1 + \chi K); \quad R_{вих33} = \frac{R_{вих}}{(1 + \chi K)}. \quad (6.37)$$

Також НЗЗ знижує коефіцієнт нелінійних та частотних спотворень. Отже, зрозуміло, чому його широко застосовують у підсилювачах.

Розглянемо випадок, коли  $\varphi_K + \varphi_\chi = 0$  (тобто сигнал зворотного зв'язку співпадає за фазою з вхідним сигналом). Такий зв'язок називається позитивним зворотним зв'язком (ПЗЗ).

У випадку ПЗЗ  $e^{j0} = 1$ ,  $\varphi_K = 0$  і вираз (3.33) має вигляд:

$$K_{33} = \frac{K}{1 - \chi K}. \quad (6.38)$$

Це свідчить, що  $K_{33}$  у  $\frac{1}{1 - \chi K}$  разів більший, ніж  $K$ . Тобто ПЗЗ суттєво підвищує коефіцієнт підсилення підсилювача за  $\chi K < 1$ . Але у той же час він погіршує інші його параметри. Тому практично застосовують граничний випадок, коли  $\chi K = 1$  і  $K_{33} \rightarrow \infty$ . Цей режим роботи називається генераторним (підсилювач самозбуджується) і використовується під час створення генераторів різного виду.