

ЗВОРОТНИЙ ЗВ'ЯЗОК У ПІДСИЛЮВАЧАХ

6.1. Основні визначення

Зворотним зв'язком (ЗЗ) називається такий електричний зв'язок між каскадами підсилювача, при якому частина енергії підсиленого сигналу з виходу підсилювача повертається на його вхід.

Елементи схеми, що створюють зворотний зв'язок, утворюють *коло зворотного зв'язку* (рис. 6.1, елемент γ), яке часто також іменують зворотним зв'язком.

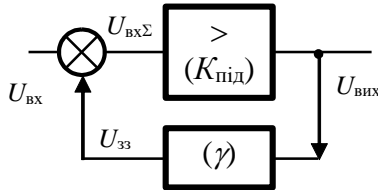


Рис. 6.1. Структурна схема зворотного зв'язку

Коло зворотного зв'язку характеризується коефіцієнтом передачі, якій найчастіше позначається символом β . Коефіцієнт передачі кола ЗЗ дорівнює:

$$\gamma = \frac{U_{зз}}{U_{вих}}, \quad (6.1)$$

де $U_{зз}$, $U_{вих}$ – напруги на виході кола ЗЗ і виході підсилювача.

В загальному випадку сигнал зворотного зв'язку може або додаватися до вхідного, або відніматися від вхідного сигналу підсилювача. У випадку, коли коливання сигналу і коливання, що надходять через коло зворотного зв'язку, збігаються за фазою, зворотний зв'язок називається *позитивним*, якщо ж ці коливання знаходяться в протифазі – *негативним*. При позитивному ЗЗ сигнали додаються, при негативному – відіймаються. Позитивний зв'язок називається *додатнім* (ДЗЗ), негативний – *від'ємним* (ВЗЗ).

В підсилювальних пристроях для поліпшення показників застосовують переважно від'ємний зворотний зв'язок. Додатній зворотний зв'язок знаходить застосування тільки в спеціальних типах підсилювачів (наприклад, в активних фільтрах) і в генераторах.

Зворотний зв'язок може бути *корисним* або *паразитним*.

Якщо вихід кола зворотного зв'язку підключається до входу підсилювача послідовно з джерелом вхідного сигналу, то зворотний зв'язок такого типу називається *послідовним* (рис. 6.2,а). Якщо ж вихід кола зворотного зв'язку і джерело вхідного сигналу підключені до входу підсилювача паралельно, то зв'язок називають *паралельним* (рис. 6.2,б).

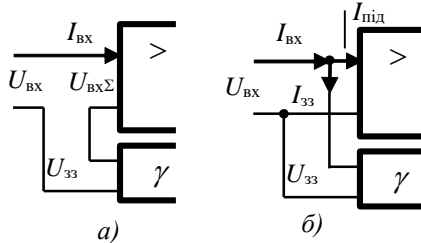


Рис. 6.2. Послідовний (а) та паралельний (б) зворотний зв'язок

Якщо напруга зворотного зв'язку U_{33} пропорційна вихідній напрузі підсилювача, то зворотний зв'язок такого виду називається *зворотним зв'язком за напругою* (рис. 6.3,а).

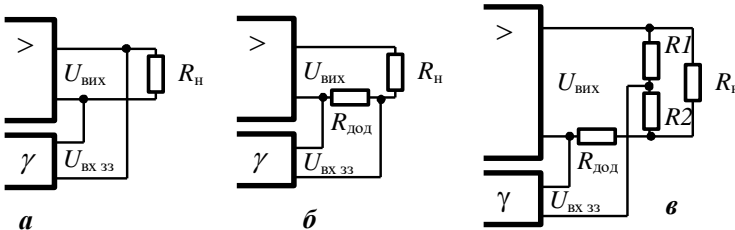


Рис. 6.3. Зворотний зв'язок за напругою (а), струмом (б) і комбінований (в)

Якщо напруга зворотного зв'язку U_{33} пропорційна струму навантаження підсилювача, то зворотний зв'язок такого виду називається *зворотним зв'язком за струмом* (рис. 6.3,б).

Можливий *комбінований* або *змішаний* зворотний зв'язок, коли напруга зворотного зв'язку має складові, пропорційні як напрузі навантаження, так і його струму. Приклад такого зв'язку зображений на рис. 6.3,в. $R_{\text{дод}} \ll R_{\text{н}} \ll R_1 + R_2$.

Відповідно до вищезазначеного, можна виділити основні типи кіл зворотного зв'язку:

- ◆ послідовний зворотний зв'язок за напругою;
- ◆ послідовний зворотний зв'язок за струмом;
- ◆ послідовний зворотний зв'язок за струмом та напругою;
- ◆ паралельний зворотний зв'язок за напругою;
- ◆ паралельний зворотний зв'язок за струмом;
- ◆ паралельний зворотний зв'язок за струмом та напругою.

Кожний із зазначених типів може створювати як додатній, так і від'ємний зворотний зв'язок.

6.2. Вплив зворотного зв'язку на основні характеристики підсилювача

$$K_{\text{під}} = U_{\text{вих}} / U_{\text{вх}\Sigma}, \quad (6.2)$$

$$K_{\text{зз}} = U_{\text{вих}} / U_{\text{вх}}. \quad (6.3)$$

При додатному ЗЗ, маємо:

$$U_{\text{вх}\Sigma} = U_{\text{вх}} + U_{\text{зз}}. \quad (6.4)$$

$$K_{\text{дод}} = \frac{K_{\text{під}}}{1 - \gamma \cdot K_{\text{під}}}. \quad (6.5)$$

При від'ємному ЗЗ замість (6.4) маємо:

$$U_{\text{вх}\Sigma} = U_{\text{вх}} - U_{\text{зз}}, \quad (6.6)$$

$$K_{\text{від}} = \frac{K_{\text{під}}}{1 + \gamma \cdot K_{\text{під}}}. \quad (6.7)$$

$$K_{\text{зз}} = \frac{K}{1 \pm \gamma \cdot K}, \quad (6.8)$$

Як впливає з (6.8), від'ємний зворотний зв'язок зменшує коефіцієнт підсилення в $(1 + \gamma K)$ разів, а додатний зворотний зв'язок – підвищує. Добуток γK називається *петлевым підсиленням*.

Оцінімо *стабілізуючу дію* від'ємного зворотного зв'язку на коефіцієнт підсилення.

$$\frac{dK_{\text{від}}}{K_{\text{від}}} = \frac{1}{1 + \gamma K} \cdot \frac{dK}{K}. \quad (6.9)$$

При глибокому ЗЗ ($\gamma K \gg 1$), як видно з (6.7), коефіцієнт підсилення практично не залежить від коефіцієнта підсилення підсилювача ($K_{\text{від}} \approx 1 / \gamma$) та визначається тільки параметрами кола від'ємного зворотного зв'язку. Оскільки останній формується пасивними елементами, то їх стабільність більш висока в порівнянні зі стабільністю початкового підсилювача.

Введення від'ємного зворотного зв'язку забезпечує більш рівномірну амплітудно-частотну характеристику підсилювача.

$$M_{\text{н}} = (K_{\text{сп}} / K_{\text{н}}), \quad (6.10)$$

$$M_{\text{н ВЗЗ}} = K_{\text{сп ВЗЗ}} / K_{\text{н ВЗЗ}}, \quad (6.11)$$

$$K_{\text{сп ВЗЗ}} = \frac{K_{\text{сп}}}{1 + \gamma \cdot K_{\text{сп}}}, \quad K_{\text{н ВЗЗ}} = \frac{K_{\text{н}}}{1 + \gamma \cdot K_{\text{н}}}.$$

$$M_{\text{н ВЗЗ}} = \frac{\frac{K_{\text{сп}}}{1 + \gamma K_{\text{сп}}}}{\frac{K_{\text{н}}}{1 + \gamma K_{\text{н}}}} = \frac{K_{\text{сп}}}{K_{\text{н}}} \cdot \frac{1 + \gamma K_{\text{н}}}{1 + \gamma K_{\text{сп}}}$$

або, з урахуванням (6.10)

$$M_{\text{н ВЗЗ}} = M_{\text{н}} \frac{1 + \gamma K_{\text{н}}}{1 + \gamma K_{\text{сп}}} \quad (6.12)$$

Так, як $K_{\text{н}} < K_{\text{сп}}$, то відношення $(1 + \gamma K_{\text{н}}) / (1 + \gamma K_{\text{сп}}) < 1$. Таким чином $M_{\text{н ВЗЗ}} < M_{\text{н}}$, тобто частотні спотворення зменшились. Введення від'ємного ЗЗ приводить до більш рівномірної АЧХ й до розширення діапазону частот, у якому буде працездатний підсилювач.

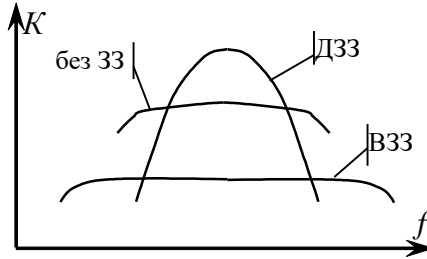


Рис. 6.4. АЧХ підсилювача з різними типами зворотного зв'язку

$$\left| \frac{dK_{\text{ДЗЗ}}}{K_{\text{ДЗЗ}}} \right| = \frac{1}{1 - \gamma K} \cdot \frac{dK}{K}, \quad (6.13)$$

$$M_{\text{н ДЗЗ}} = M_{\text{н}} \frac{1 - \gamma K_{\text{н}}}{1 - \gamma K_{\text{сп}}}. \quad (6.14)$$

Вираз (6.13) показує, що відносна зміна коефіцієнта підсилення підсилювача з додатнім ЗЗ за інших рівних умов завжди більше, ніж у простого підсилювача. З (6.14) випливає: оскільки $K_{\text{н}} < K_{\text{сп}}$, то відношення $(1 - \gamma K_{\text{н}}) / (1 - \gamma K_{\text{сп}}) > 1$ й $M_{\text{н ДЗЗ}} > M_{\text{н}}$. Ці міркування правомірні при $\gamma K < 1$. При $\gamma K = 1$ модуль коефіцієнта підсилення підсилювача з додатним зворотним зв'язком прагне до нескінченності, що фізично відповідає переходу підсилювача в режим генерації коливань.

Вхідний опір підсилювача, охопленого зворотним зв'язком, залежить від способу введення сигналу ЗЗ у вхідне коло. При відсутності ЗЗ вхідний опір визначається вхідною напругою та струмом підсилювача:

$$Z_{\text{вхпід}} = \frac{U_{\text{під}}}{I_{\text{під}}}. \quad (6.15)$$

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{вх}\Sigma} - U_{\text{ДЗЗ}}; \quad (6.16)$$

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{вх}\Sigma} + U_{\text{ВЗЗ}}. \quad (6.17)$$

Незалежно від типу зворотного зв'язку

$$U_{33} = \gamma K U_{\text{вх}\Sigma}, \quad (6.18)$$

а вхідною напругою підсилювача є $U_{\text{вх}\Sigma}$, для вхідного опору одержуємо:

$$Z_{\text{вх ДЗЗ}} = \frac{U_{\text{вх}\Sigma} - \gamma K U_{\text{вх}\Sigma}}{I_{\text{вх}}} = Z_{\text{вх під}} (1 - \gamma K); \quad (6.19)$$

$$Z_{\text{вх ВЗЗ}} = \frac{U_{\text{вх}\Sigma} + \gamma K U_{\text{вх}\Sigma}}{I_{\text{вх}}} = Z_{\text{вх під}} (1 + \gamma K). \quad (6.20)$$

З виразу (6.20) видно, що при введенні послідовного від'ємного зворотного зв'язку вхідний опір підсилювача зростає в $(1 + \gamma K)$ разів.

При паралельному ЗЗ (рис. 6.2,б) вхідна напруга є вхідною напругою підсилювача, а у вхідному колі додаються (з урахуванням напрямків) струми джерела вхідного сигналу і зворотного зв'язку:

$$I_{\text{вх}} = I_{\text{під}} + I_{\text{ВЗЗ}};$$

$$I_{\text{вх}} = I_{\text{під}} - I_{\text{ДЗЗ}}$$

$$I_{\text{вх}} = I_{\text{під}} + I_{\text{ВЗЗ}} = U_{\text{вх}} / Z_{\text{вх під}} + (U_{\text{вх}} + U_{\text{вих}}) / Z_{\text{ПЗЗ}} =$$

$$U_{\text{вх}} / Z_{\text{вх під}} + U_{\text{вх}} (1 + \gamma K) / Z_{\text{ВЗЗ}};$$

$$I_{\text{вх}} = I_{\text{під}} - I_{\text{ДЗЗ}} = U_{\text{вх}} / Z_{\text{вх під}} - (U_{\text{вх}} - U_{\text{вих}}) / Z_{\text{ВЗЗ}} =$$

$$U_{\text{вх}} / Z_{\text{вх під}} - U_{\text{вх}} (1 - \gamma K) / Z_{\text{ВЗЗ}}$$

Замість вхідного опору визначимо вхідну провідність. Використовуючи отримані вирази для ВЗЗ, маємо:

$$\frac{1}{Z_{\text{вх}}} = \frac{I_{\text{вх}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{1}{Z_{\text{під}}} + \frac{1 + \gamma K}{Z_{\text{ВЗЗ}}} \quad (6.21)$$

До вхідного опору підсилювача паралельно підключений у $(1 + \gamma K)$ разів зменшений опір кола зворотного зв'язку. Це призводить до зменшення вхідного опору в порівнянні з вхідним опором початкового підсилювача.

У випадку додатного ЗЗ:

$$\frac{1}{Z_{\text{вх}}} = \frac{1}{Z_{\text{під}}} - \frac{1 - \gamma K}{Z_{\text{ДЗЗ}}} \quad (6.22)$$

Однозначної відповіді на питання, як впливає введення паралельного ДЗЗ на вхідний опір підсилювача, немає. Цей вплив залежить від конкретного співвідношення параметрів підсилювача і кола ДЗЗ. Так, при $\gamma K = 1$ $Z_{\text{вх}} = Z_{\text{під}}$. При $Z_{\text{під}}(1 - \gamma K) \rightarrow -Z_{\text{ДЗЗ}}$, маємо $Z_{\text{вх ДЗЗ}} \rightarrow \infty$, а при $Z_{\text{під}}(1 - \gamma K) \ll -Z_{\text{ДЗЗ}}$, вхідний опір $Z_{\text{вх ДЗЗ}}$ стає негативним, причому збільшення значення γK приводить до зменшення модуля $Z_{\text{вх ДЗЗ}}$.

Вихідний опір підсилювального пристрою, охопленого колом зворотного зв'язку, залежить тільки від способу зняття сигналу зворотного зв'язку з виходу підсилювача і не залежить від паралельного чи послідовного приєднання виходу ЗЗ до вхідного кола підсилювача.

Введення в підсилювальній пристрій від'ємного ЗЗ за вихідною напругою зменшує вихідний опір підсилювача ($Z_{\text{вих ВЗЗ(н)}} = Z_{\text{вих під}} / (1 + \gamma K)$).

Для додатного ЗЗ за напругою $Z_{\text{вих ДЗЗ(н)}} = Z_{\text{вих під}} / (1 - \gamma K)$. При збільшенні коефіцієнта передачі кола ДЗЗ вихідний опір спочатку збільшується, прагнучи до нескінченності, а при $\gamma > 1/K$ змінює знак і стає негативним.

Введення від'ємного ЗЗ за вихідним струмом збільшує вихідний опір підсилювача $Z_{\text{вих ВЗЗ(с)}} = Z_{\text{вих під}}(1 - \gamma K)$.

Вихідний опір підсилювача, охопленого додатнім зворотним зв'язком за струмом, зменшується, і при певному виборі параметрів кола ДЗЗ вихідний опір підсилювача може стати негативним.

Від'ємний зворотний зв'язок у $(1 + \gamma K)$ разів зменшує *нелінійні викривлення*, які виникають лише в тій частині підсилювача, що охоплена зворотним зв'язком. Це приводить до такого ж зменшення і для його коефіцієнта нелінійних спотворень.

6.3. Паразитні зворотні зв'язки і способи їх усунення

В підсилювачах часто виникають зворотні зв'язки, викликані особливостями конструкцій підсилювача в цілому або окремих його елементів. Такі зворотні зв'язки називаються *паразитними*.

Основними видами паразитного зворотного зв'язку в підсилювачах є:

- ◆ Зв'язок через міжелектродні ємності.
- ◆ Зв'язок, що виникає в результаті індуктивної і ємнісної взаємодії між деталями і проводами підсилювача.
- ◆ Зв'язок через джерела живлення.
- ◆ *Електромеханічний зв'язок* виявляється в підсилювачах, що піддаються струсам і вібраціям.

Паразитний зворотний зв'язок через джерело живлення виникає в наслідок спадання напруги на внутрішньому опорі джерела живлення при протіканні через нього змінних складових струмів окремих каскадів.

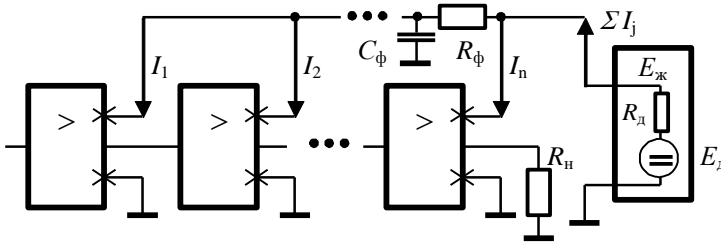


Рис. 6.4. Паразитний зворотний зв'язок через джерело живлення

$$E_{\text{ж}} = E_{\text{д}} - \left(\sum_j^N I_j \right) \cdot R_{\text{д}}, \quad (6.23)$$

де $\sum I_j$ – сума всіх струмів, що проходять через джерело живлення;
 $R_{\text{д}}$ – внутрішній опір джерела живлення.

$$E_{\text{ж}} \approx E_{\text{д}} - (I_m \sin \omega t) \cdot R_{\text{д}}$$

$$\frac{1}{\omega_{\text{н}} C_{\phi}} \ll R_{\text{д}}, \quad (6.24)$$

де $\omega_{\text{н}}$ – нижча частота посилюваного сигналу.

$$\frac{1}{\omega_{\text{н}} C_{\phi}} \ll (R_{\text{д}} + R_{\phi}) \quad (6.24)$$