Лекція ЗВОРОТНИЙ ЗВ'ЯЗОК У ПІДСИЛЮВАЧАХ

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.

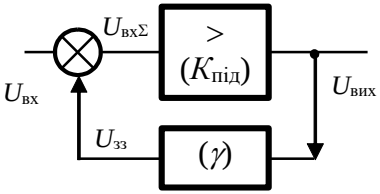


Рис. 1. Структурна схема зворотного зв'язку

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

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

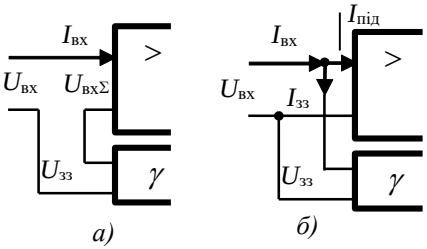


Рис. 2. Послідовний (а) та паралельний (б) зворотний зв'язок

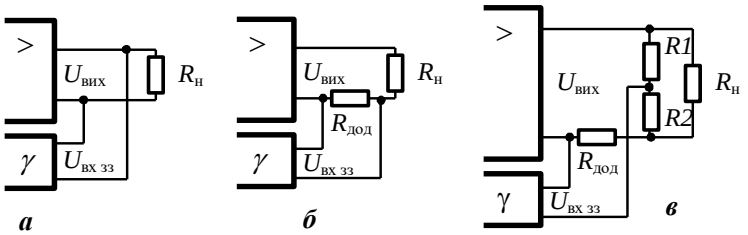


Рис. 3. Зворотний зв'язок за напругою (а), струмом (б) і комбінований (в)

$$R_{\text{дод}} << R_{\text{н}} << R_1 + R_2.$$

2. Вплив зворотного зв'язку на основні характеристики Підсилювача

$$K_{\text{під}} = U_{\text{вих}} / U_{\text{вхΣ}}, \tag{6.2}$$

$$K_{\text{зз}} = U_{\text{вих}} / U_{\text{вх}}. \tag{6.3}$$

При *додатному* ЗЗ, маємо:

$$U_{\text{вхΣ}} = U_{\text{вх}} + U_{\text{зз}}. \tag{6.4}$$

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

При *від'ємному* ЗЗ замість (6.4) маємо:

$$U_{\text{вхΣ}} = U_{\text{вх}} - U_{\text{зз}}, \tag{6.6}$$

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

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

Від'ємний зворотний зв'язок зменшує коефіцієнт підсилення в $(1 + \gamma K)$ разів, а додатній зворотний зв'язок – підвищує. Добуток γK називається *петлевим підсиленням*.

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

$$M_{\text{н}} = (K_{\text{ср}} / K_{\text{н}}), \tag{6.10}$$

$$M_{\text{н ВЗЗ}} = K_{\text{ср ВЗЗ}} / K_{\text{н ВЗЗ}}, \tag{6.11}$$

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

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

або, з урахуванням (6.10)

$$M_{\text{н ВЗЗ}} = M_{\text{н}} \frac{1+\gamma K_{\text{н}}}{1+\gamma K_{\text{ср}}} \tag{6.12}$$

Так, як $K_{\text{н}} < K_{\text{ср}}$, то відношення $(1 + \gamma K_{\text{н}}) / (1 + \gamma K_{\text{ср}}) < 1$.

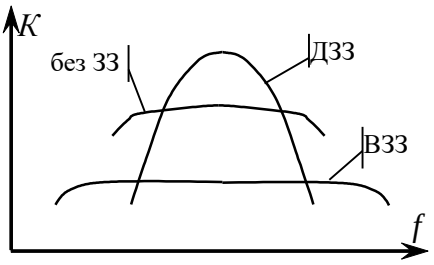


Рис. 4. АЧХ підсилювача з різними типами зворотного зв'язку

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

$$M_{\text{н ДЗЗ}} = M_{\text{н}} \frac{1-\gamma K_{\text{н}}}{1-\gamma K_{\text{ср}}}. \tag{6.14}$$

Оскільки $K_н < K_{ср}$, то $(1 - \gamma K_н) / (1 - \gamma K_{ср}) > 1$ й $M_{н\,ДЗЗ} > M_н$.

$\gamma K < 1$

$$Z_{вх\,під} = \frac{U_{під}}{I_{під}}. \qquad (6.15)$$

$$U_{вх} = U_{вхΣ} - U_{ДЗЗ}; \qquad (6.16)$$

$$U_{вх} = U_{вхΣ} + U_{ВЗЗ}. \qquad (6.17)$$

Незалежно від типу зворотного зв'язку

$$U_{ЗЗ} = \gamma K\, U_{вхΣ}, \qquad (6.18)$$

а вхідною напругою підсилювача є $U_{вхΣ}$

$$Z_{вх\,ДЗЗ} = \frac{U_{вхΣ} - \gamma K U_{вхΣ}}{I_{вх}} = Z_{вх\,під}\left(1 - \gamma K\right); \qquad (6.19)$$

$$Z_{вх\,ВЗЗ} = \frac{U_{вхΣ} + \gamma K U_{вхΣ}}{I_{вх}} = Z_{вх\,під}\left(1 + \gamma K\right). \qquad (6.20)$$

При введенні послідовного від'ємного зворотного зв'язку вхідний опір підсилювача зростає в $(1 + \gamma K)$ разів.

$I_{вх} = I_{під} + I_{ВЗЗ}$;

$I_{вх} = I_{під} - I_{ДЗЗ}$

$$I_{вх} = I_{під} + I_{ВЗЗ} = U_{вх} / Z_{вх\,під} + (U_{вх} + U_{вих}) / Z_{ПЗЗ} = U_{вх} / Z_{вх\,під} + U_{вх}\,(1 + \gamma K) / Z_{ВЗЗ};$$

$$I_{вх} = I_{під} - I_{ДЗЗ} = U_{вх} / Z_{вх\,під} - (U_{вх} - U_{вих}) / Z_{ВЗЗ} = U_{вх} / Z_{вх\,під} - U_{вх}\,(1 - \gamma K) / Z_{ВЗЗ}$$

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

У випадку додатного ЗЗ:

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

При $\gamma K = 1$ $Z_{вх} = Z_{під}$. При $Z_{під}\,(1 - \gamma K) \to - Z_{ДЗЗ}$, маємо $Z_{вх\,ДЗЗ} \to \infty$, а при $Z_{під}(1 - \gamma K) << - Z_{ДЗЗ}$.

Введення в підсилювальний пристрій від'ємного ЗЗ за вихідною напругою зменшує вихідний опір підсилювача ($Z_{вих\ ВЗЗ(н)}$ =

$Z_{\text{вих під}} / (1 + \gamma K)$).

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 $Z_{\text{вих ВЗЗ(с)}} = Z_{\text{вих під}} (1 - \gamma K)$.

6.3. Паразитні зворотні зв'язки і способи їх усунення

Паразитні – зворотні зв'язки, викликані особливостями конструкцій підсилювача в цілому або окремих його елементів.

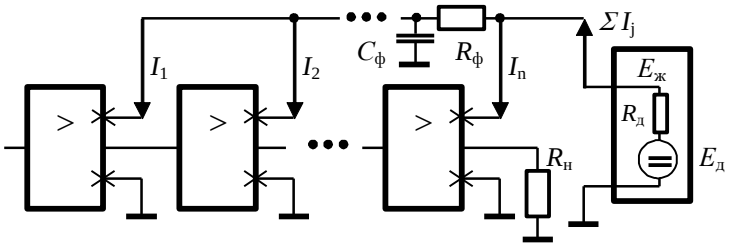


Рис. 6.4. Паразитний зворотний зв'язок через джерело живлення

$$E_ж = E_д - \left(\sum_j^N I_j \right) \cdot R_д, \qquad (6.23)$$

де $\sum I_j$ – сума всіх струмів, що проходять через джерело живлення;

$R_д$ – внутрішній опір джерела живлення.

$$E_ж \approx E_д - (I_m \, sin \, \omega t) \cdot R_д$$

$$\frac{1}{\omega_н C_ф} << R_д, \qquad (6.24)$$

де $\omega_н$ – нижча частота посилюваного сигналу.

$$\frac{1}{\omega_н C_ф} << (R_д + R_ф) \qquad (6.24)$$