

ОСНОВИ СУЧАСНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

Модуль 3. Схеми радіоелектроніки

Лекція №1

Викладач:

Кан.-фіз. мат. наук, доцент КЯФ

Єрмоленко Руслан Вікторович

План лекції

- Класифікація та основні характеристики підсилювачів.
- Коефіцієнт підсилення, частотна характеристика, вхідний та вихідний імпеданс, нелінійні спотворення.
- Зворотні зв'язки в підсилювачах. Їх класифікація.
- Негативний зворотній зв'язок, його необхідність.
- Схеми підсилювачів із спільною базою, спільним емітером.

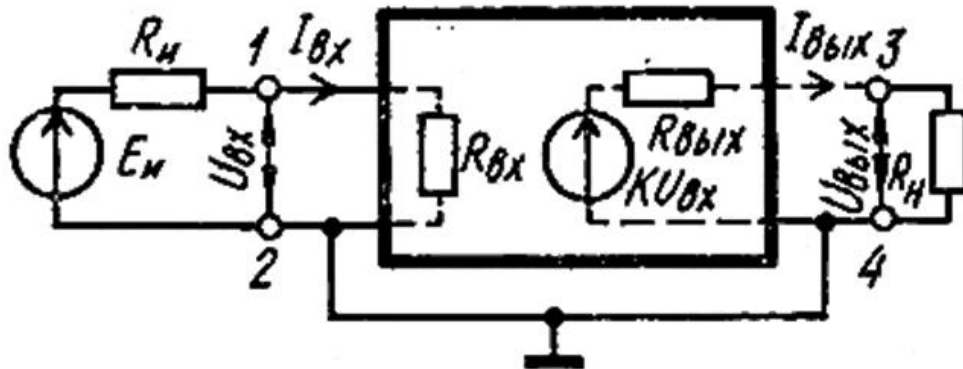
Література

- Гершунский В.С. Основы радиоэлектроники и микроэлектроники. 4-е изд. Киев: Вища школа, 1989., гл.12,14
- Исаков.Ю.А., Платонов А.П. Основы промышленной электроники. К.:Техніка, 1976., гл.7, п.1-4. [15], гл.8, п.8-1, 8-2,8-4.
- Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники. Изд. 2-е. М.: Радио и связь, 1985., гл.5, п.12, гл.8, п.1,3-10.
- Руденко В.С. та інш. Промышленная электроника. - К.:Техніка, 1979. Глава 5.
- Москатов Е.А. Электронная техника. Таганрог, 2004, ст.81-84.

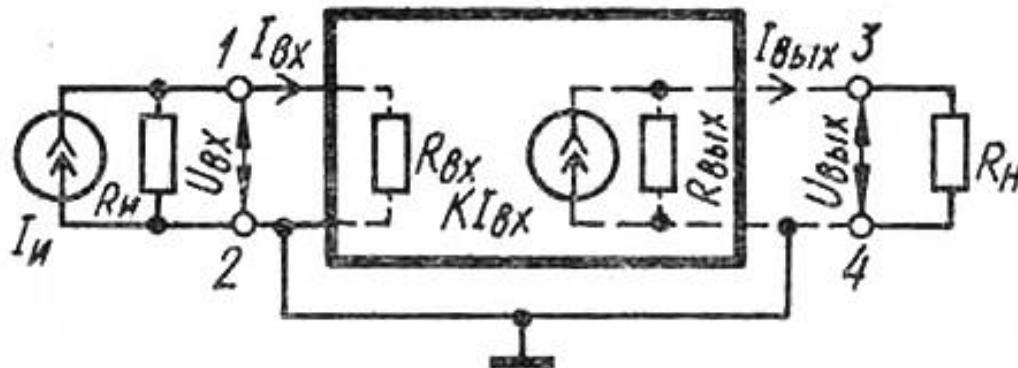
Означення підсилювача

- **Підсилювач** – це електронний пристрій, які використовуються для збільшення потужності електричного сигналу.
- Схема розрахована на перетворення низької напруги в високу, називається **підсилювачем напруги**.
- Схема розрахована на перетворення слабкого струму на більший, називається **підсилювачем струму**.

Структурні схеми

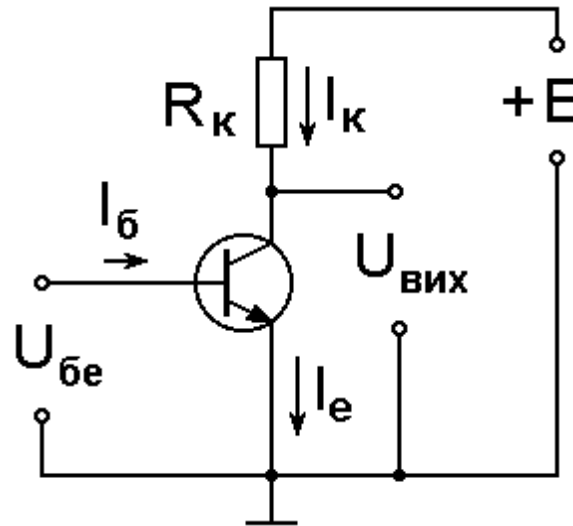


підсилювачів напруги



підсилювач струму

Підсилювач на транзисторах



- Транзистор не підсилює.
- Він є лише регулювальним елементом, а збільшення потужності сигналу відбувається за рахунок зовнішнього джерела струму (+E), струмом в колі якого й керує транзистор.

Класифікація підсилювачів за частотою підсилювального сигналу

Підсилювачі постійного струму

Підсилювачі низької частоти

Підсилювачі високої частоти

Вибіркові підсилювачі ($F_v/F_n < 1,1$)

Широкополосні підсилювачі ($F_v/F_n > 1000$)

Класифікація підсилювачів за формою підсилювального сигналу

Підсилювачі гармонічних сигналів

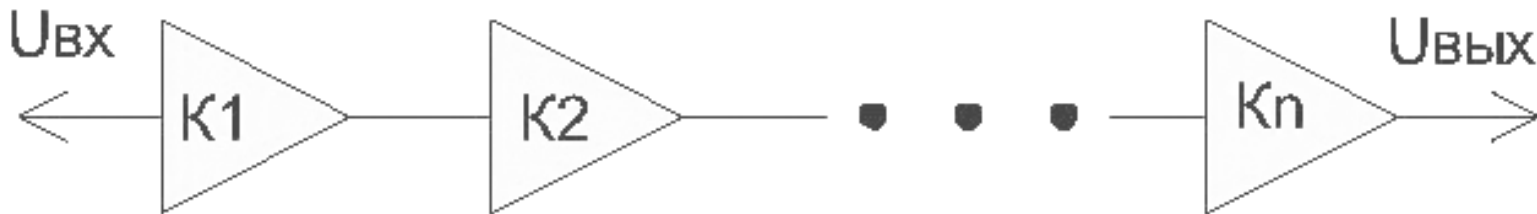
**Підсилювачі імпульсних сигналів
(вони ж, як правило широкополосні
підсилювачі)**

Класифікація підсилювачів за кількістю каскадів

Однокаскадні підсилювачі

Якщо коефіцієнта підсилення одного каскаду не достатньо, то використовують багато каскадну схему з послідовним з'єднанням каскадів.

Такий підсилювач називається багатокаскадним.



Основні характеристики підсилювачів

Коефіцієнт підсилення

В залежності від типу підсилювача є коефіцієнти підсилення за напругою, струмом та потужністю

$$\dot{K}_U = \dot{U}_{\text{ВЫХ}} / \dot{U}_{\text{ВХ}} \quad \dot{K}_I = \dot{I}_{\text{ВЫХ}} / \dot{I}_{\text{ВХ}} \quad K_P = P_{\text{ВЫХ}} / P_{\text{ВХ}}$$

Якщо підсилювач складається з n каскадів, тоді:

$$\dot{K} = \dot{K}_1 \cdot \dot{K}_2 \dots \dot{K}_n = \prod_{i=1}^n \dot{K}_i$$

Основні характеристики підсилювачів

Коефіцієнт підсилення

Для зручності, часто коефіцієнт підсилення виражають в логарифмічних одиницях, децибелах – позначення: **дБ**.

$$K_U \text{ (дБ)} = 20 \lg (U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}}) = 20 \lg K_U$$

$$K_I \text{ (дБ)} = 20 \lg (I_{\text{ВЫХ}}/I_{\text{ВХ}}) = 20 \lg K_I$$

$$K_P \text{ (дБ)} = 10 \lg (P_{\text{ВЫХ}}/P_{\text{ВХ}}) = 10 \lg K_P$$

Тоді для багато каскадного підсилювача:

$$K \text{ (дБ)} = K_1 \text{ (дБ)} + K_2 \text{ (дБ)} + \dots + K_n \text{ (дБ)} = \sum_{i=1}^n K_i \text{ (дБ)}$$

Основні характеристики підсилювачів.

Коефіцієнт передачі за напругою

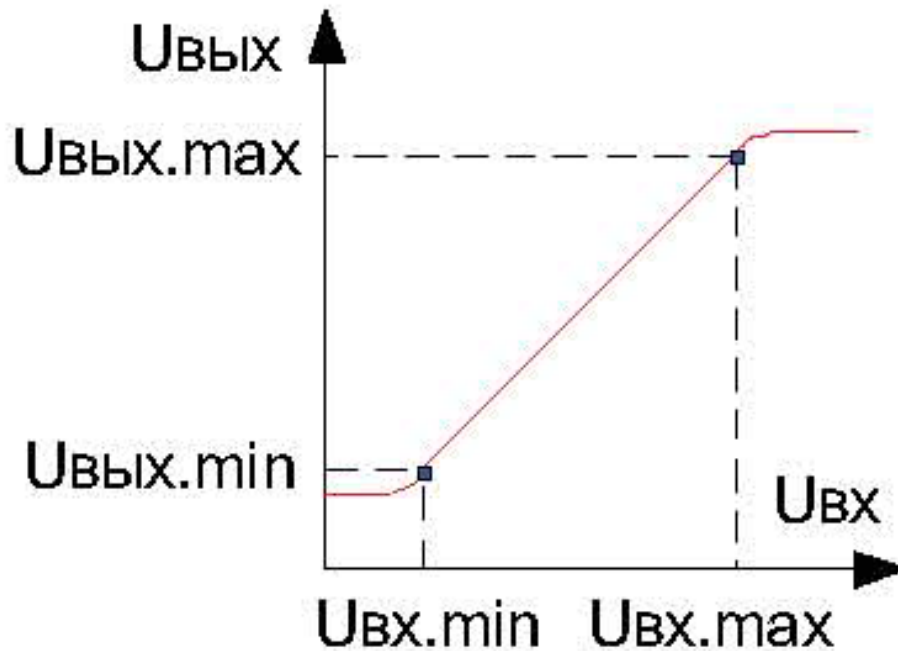
$$\tilde{K}_u(\omega) = \frac{\tilde{U}_{вих}(\omega)}{\tilde{U}_{вх}(\omega)} = K_u(\omega) e^{i\Phi(\omega)}$$

$K_u(\omega)$ – відношення модулів амплітуд вихідного і вхідного сигналів,

$\Phi(\omega)$ – різниця фаз між вихідним і вхідним сигналами

Основні характеристики підсилювачів

Амплітудна характеристика визначається при фіксованій частоті залежністю: $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$



Ідеальний підсилювач має лінійну амплітудну характеристику.

В робочому діапазоні залежність має форму прямої, а її кут нахилу визначається коефіцієнтом підсилення.

Основні характеристики підсилювачів

Динамічний діапазон підсилювача:

$$D = U_{\text{вх. макс}} / U_{\text{вх. мин}}$$

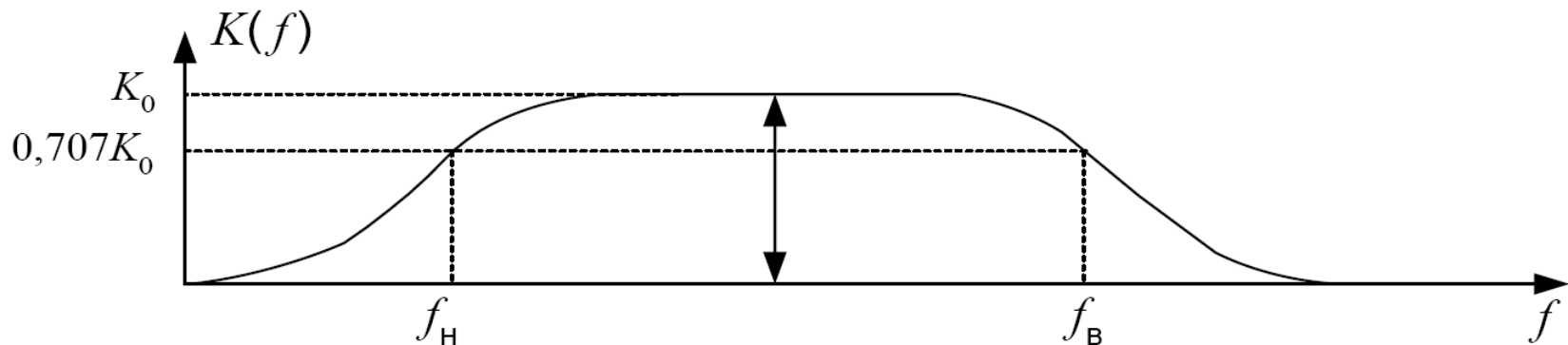
$U_{\text{вх. мин}}$

$U_{\text{вх. макс}}$

Мінімальна та максимальна вхідна напруга, при яких зберігається лінійна залежність амплітудної характеристики

$$D (\text{дБ}) = 20 \lg D$$

АЧХ підсилювача



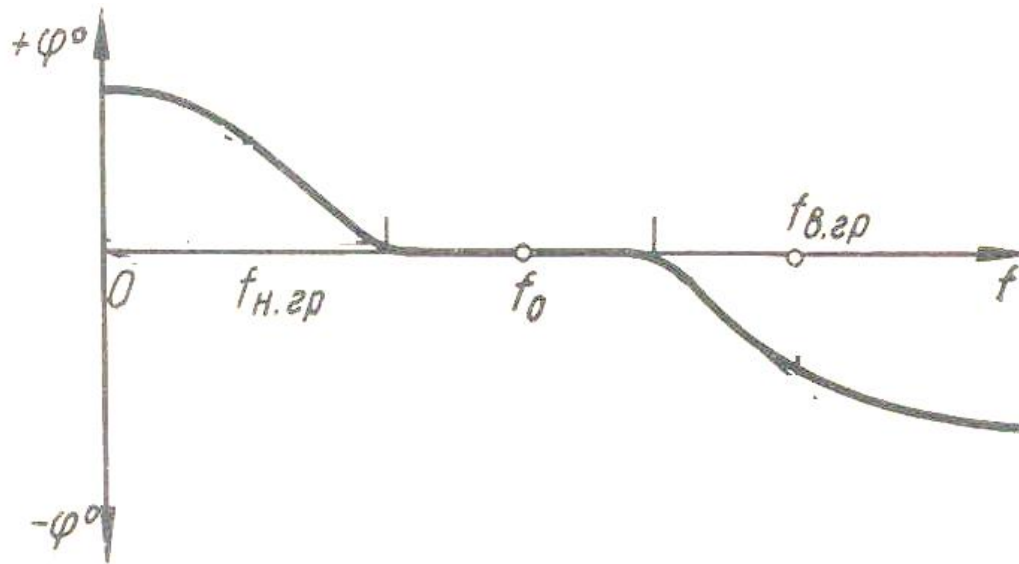
$K_U, K_I, R_{BX}, R_{ВИХ}$, як правило, розраховуються на середніх частотах – дійсні. Поза межами полоси пропускання необхідно враховувати реактивні елементи.

$K_U, K_I, R_{BX}, R_{ВИХ}$ стають комплексними

Частотні спотворення оцінюють коефіцієнтом частотних спотворень (відношення модуля коефіцієнта підсилення на середній та даній частоті)

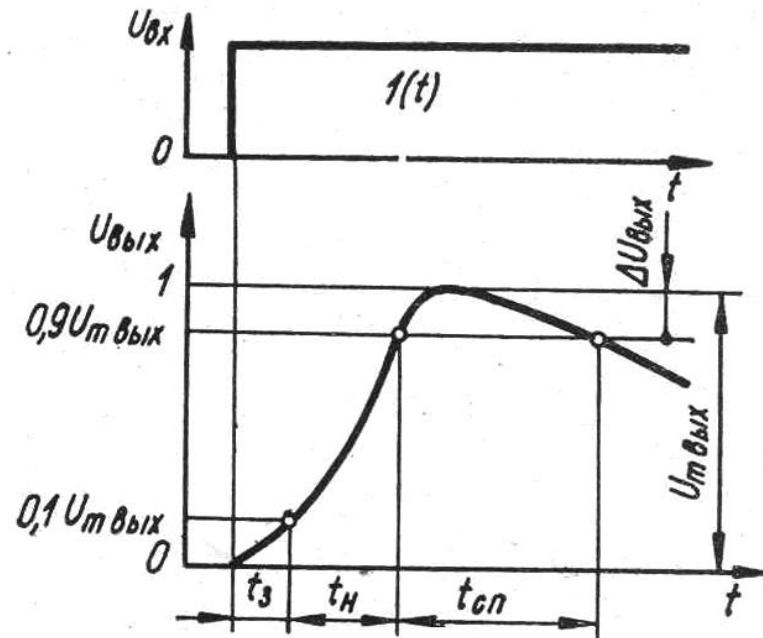
$$M = K_0 / K_f$$

ФЧХ підсилювача



$$\dot{K} = \dot{A}_{\text{ВЫХ}} / \dot{A}_{\text{ВХ}} = (A_{\text{ВЫХ}} / A_{\text{ВХ}}) e^{j(\varphi_{\text{ВЫХ}} - \varphi_{\text{ВХ}})} = K e^{j\varphi}$$

Перехідна характеристика підсилювача

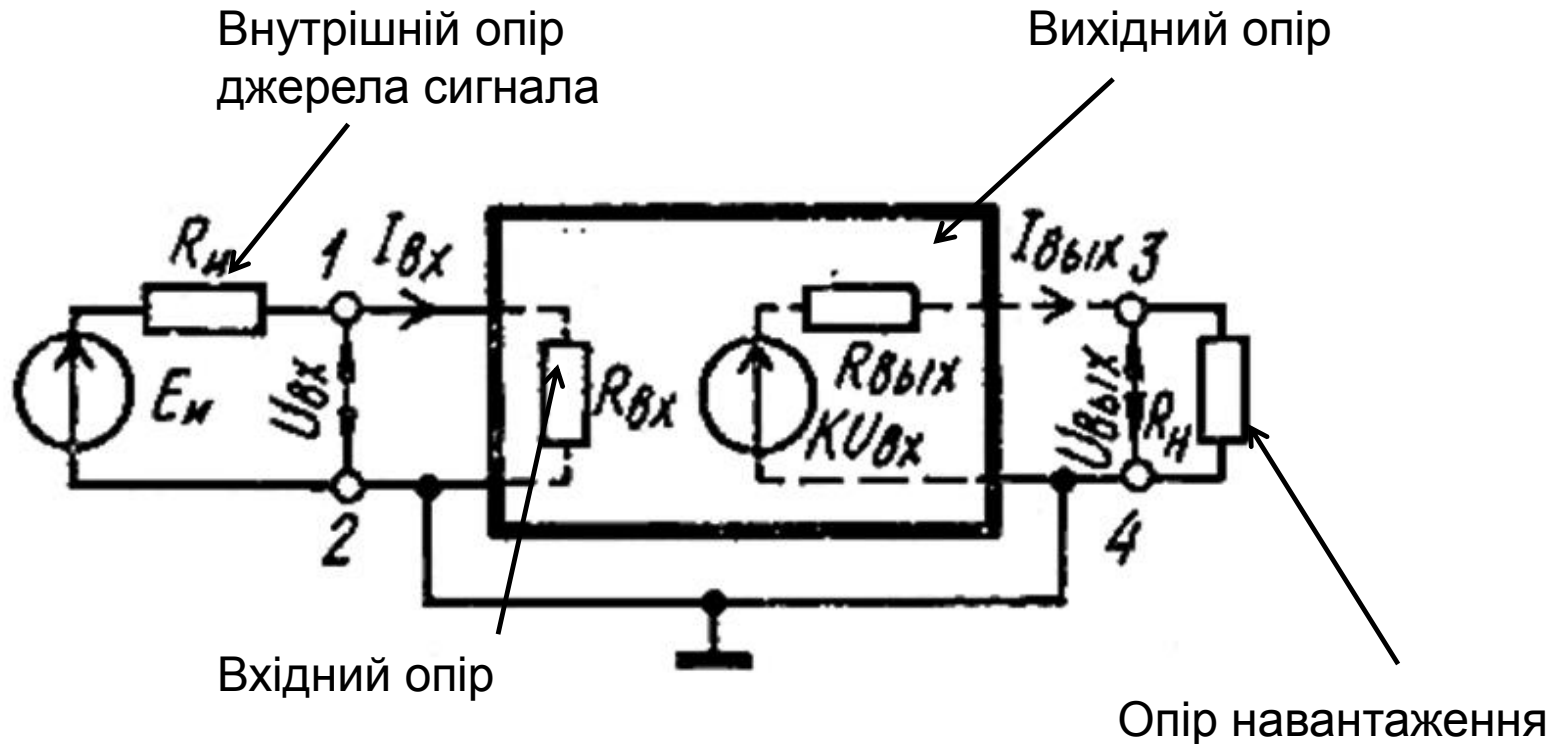


Із-за наявності реактивних елементів залежність вихідна напруги від часу не відповідає “сходинці” вхідної напруги. Виникають спотворення форми імпульсних сигналів, які називають перехідними спотвореннями.

ККД підсилювача

$$\eta = (P_{\text{вых}}/P_0) \cdot 100\%$$

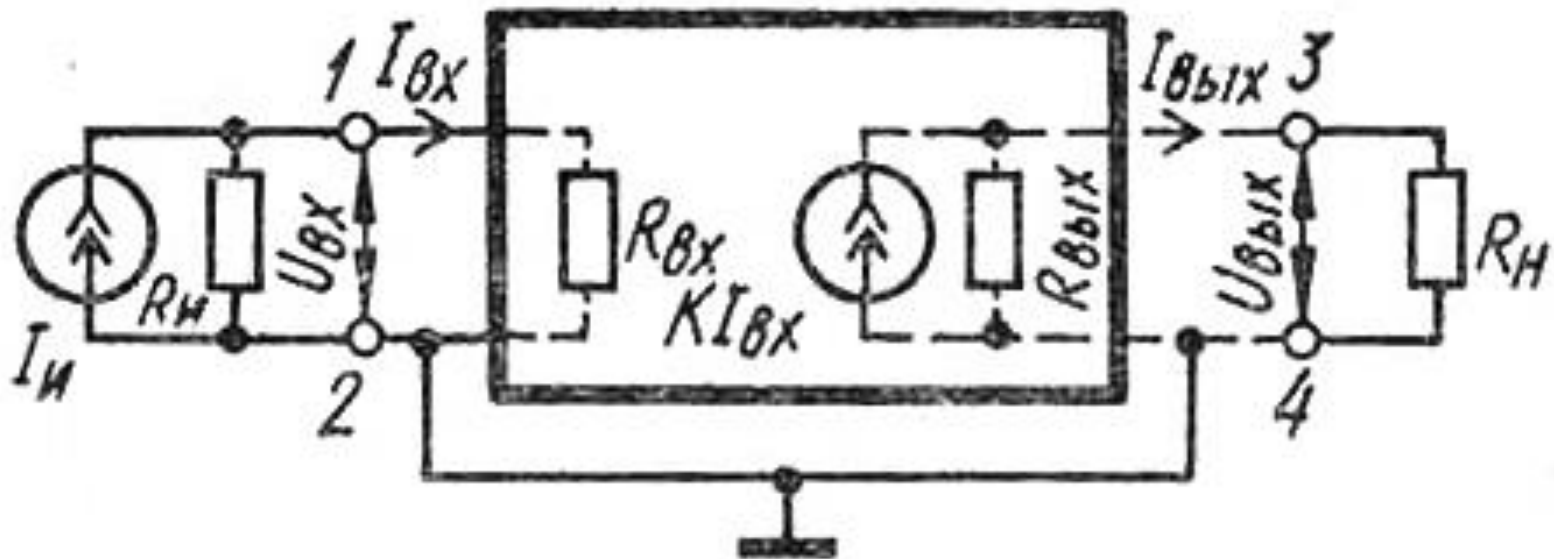
Структурна схема підсилювача напруги у вигляді активного 4-х полюсника



$$U_{\text{вх}} = E_{\text{и}} R_{\text{вх}} / (R_{\text{вх}} + R_{\text{и}})$$

Щоб втрати на внутрішньому опорі джерела сигналу були малі, необхідно: $R_{\text{вх}} \gg R_{\text{и}}$

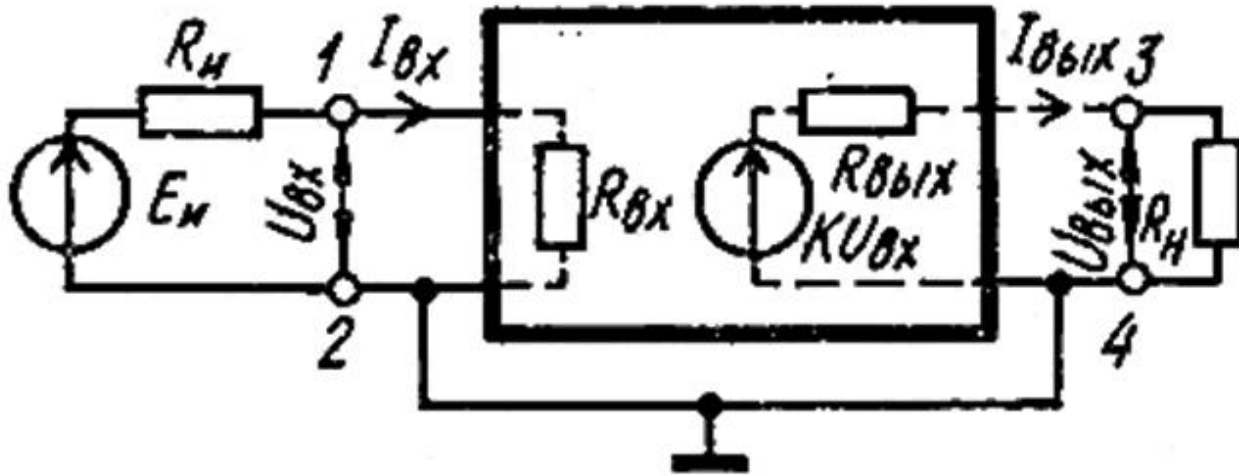
Структурна схема підсилювача струму у вигляді активного 4-х полюсника



$$I_{\text{вх}} = I_{\text{и}} [R_{\text{и}} / (R_{\text{и}} + R_{\text{вх}})]$$

Майже весь струм джерела проходить
через вхідний опір підсилювача при умові:

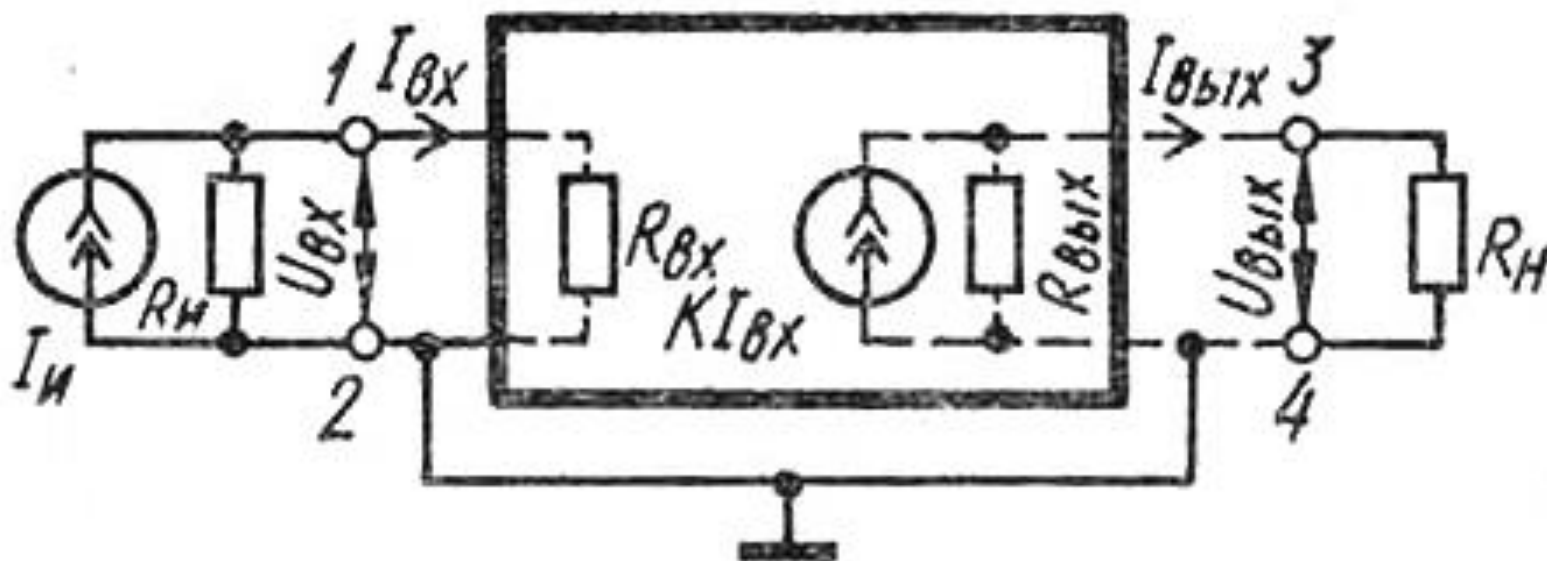
$$R_{\text{и}} \gg R_{\text{вх}}$$



Вихідний ланцюг підсилювача напруги можна представити у вигляді: $KU_{\text{вх}}$

Тоді K – коефіцієнт підсилення по напрузі.

Для зниження втрат напруги: $R_{\text{н}} \gg R_{\text{вых}}$



Вихідний ланцюг підсилювача струму можна представити у вигляді: $K I_{\text{вх}}$

Тоді K – коефіцієнт підсилення по напрузі.

Для зниження втрат струму: $R_{\text{н}} \ll R_{\text{вых}}$

Класифікація підсилювачів за підсилювальною характеристикою

Підсилювачі напруги, для яких:
(тобто великий вхідний та малий вихідний опори)

$$R_{\text{вх}} \gg R_{\text{н}}$$

$$R_{\text{н}} \gg R_{\text{вых}}$$

Підсилювачі струму, для яких:
(тобто малий вхідний та великий вихідний опори)

$$R_{\text{н}} \gg R_{\text{вх}}$$

$$R_{\text{н}} \ll R_{\text{вых}}$$

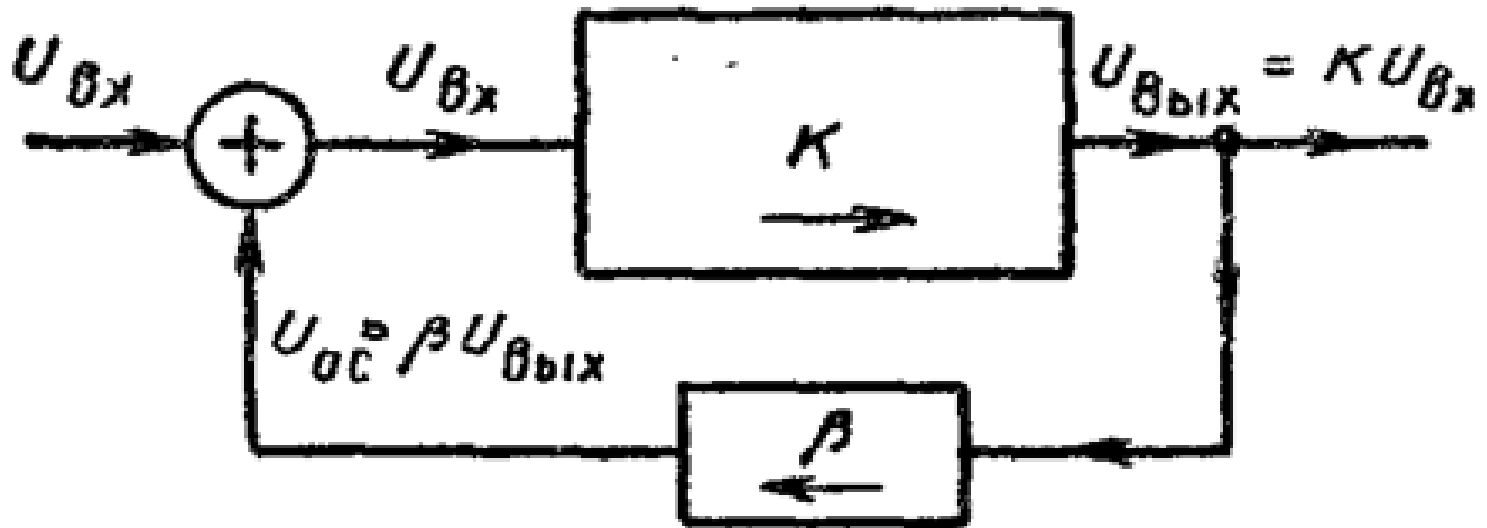
Підсилювачі потужності:
(для передачі максимальної потужності)

$$R_{\text{вх}} \approx R_{\text{н}}$$

$$R_{\text{вых}} \approx R_{\text{н}}$$

Зворотній зв'язок в підсилювачах

- В різних радіоелектронних пристроях використовується зворотній зв'язок. Він забезпечується подачею частини напруги або струму із виходу пристрою на його вхід.
- Структурну схему підсилювача із зворотнім зв'язком можна представити у вигляді двох підсилювачів.



Коефіцієнт передачі напруги та коефіцієнт зворотнього зв'язку

- Верхній підсилювач має в напрямку, вказаному стрілкою, коефіцієнт передачі напруги:

$$K = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}},$$

де $U_{\text{вих}}$ – напруга на виході підсилювача. $U_{\text{вх}}$ – напруга на його вході.

- Нижній підсилювач використовується для передачі напруги зворотнього зв'язку. Його коефіцієнт передачі в напрямку, вказаному стрілкою, рівний:

$$\beta = U_{\text{оз}} / U_{\text{вых}},$$

де $U_{\text{оз}}$ – напруга зворотнього зв'язку, що передається із виходу підсилювача на його вхід.

Ця напруга є частиною вихідної напруги. Коефіцієнт β показує, яка частина вихідної напруги передається назад на вхід, тому його називають **коефіцієнтом зворотнього зв'язку**

Зв'язок коефіцієнтів підсилення із та без зворотнього зв'язку

- Напруга на вході підсилювача із зворотнім зв'язком:

$$U_{вх} = U'_{вх} + U_{ос} = U'_{вх} + \beta U_{вых}.$$

- Напруга на виході підсилювача:

$$U_{вых} = K U_{вх} = K (U'_{вх} + \beta U_{вых}).$$

- Відповідно для підсилювача із зворотнім зв'язком:

$$K' = U_{вых} / U'_{вх} = K + \beta K K',$$

звідки $K' = K / (1 - \beta K).$

Величина βK характеризує підсилення петлі зворотнього зв'язку.

Величина βK

- В загальному випадку величини K' , K і β є комплексними. Якщо величина βK є дійсною і від'ємною або комплексною із модулем K' меншим за модуль K , то зворотній зв'язок називається негативним.
- Якщо при негативному зворотньому зв'язку $|\beta K| \gg 1$, то кажуть, що підсилювач охоплений глибоким зворотнім зв'язком.
- Якщо величина βK є дійсною і додатною або комплексною із модулем K' більшим за модуль K , то зворотній зв'язок називається позитивним.
- При $\beta K = 1 \Rightarrow K' \rightarrow \infty$. Тобто підсилювач може самозбуджуватися і перетворюється в генератор.

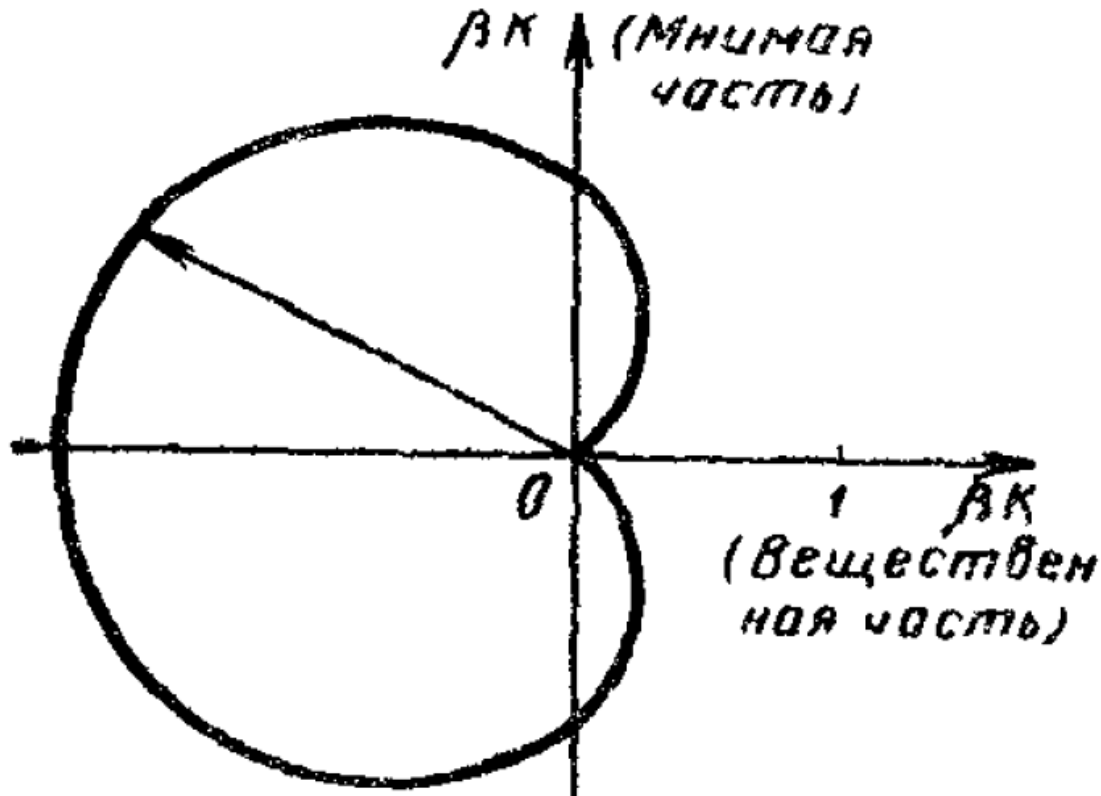
Зворотній зв'язок в підсилювачах

**Позитивний зворотній зв'язок може бути причиною автоколивань.
(Підсилювач “збуджується”).**

Автоколивання можуть виникнути тому, що коефіцієнти K та β залежать від частоти і для деяких частот зворотній зв'язок інколи перетворюється в позитивний.

За допомогою діаграми Найквіста можна перевірити, чи не буде “самозбуджуватися” підсилювач.

Діаграма Найквіста (АФЧХ зворотного зв'язку)

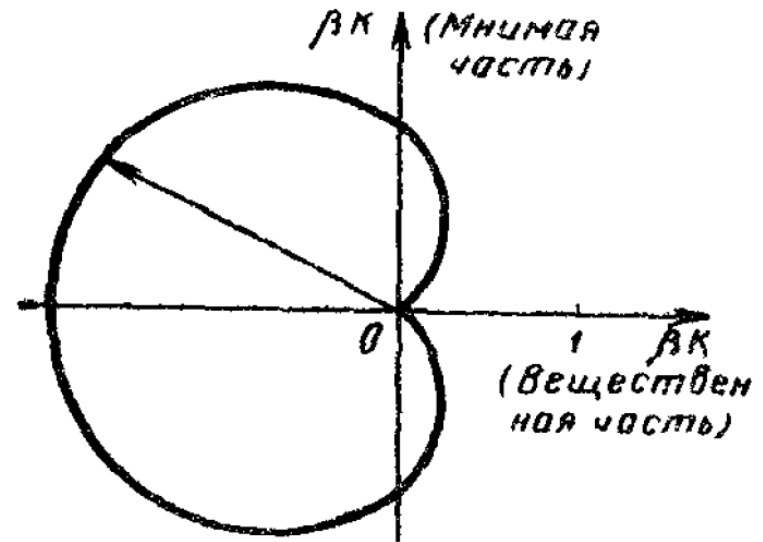


Радіус-вектор характеризує залежність коефіцієнта зворотного зв'язку від частоти.

Діаграма Найквіста

Модуль K - це довжина вектора

Кут – фазовий зсув між вхідною та вихідною напругою підсилювача



Якщо діаграма не охоплює точку $(0,1)$, то підсилювач не буде самозбуджуватися.

Інакше – в виразі

$$K' = K / (1 - \beta K).$$

В знаменнику - 0 , що є причиною автоколивань.

Підвищення стабільності підсилення і розширення полоси

- Коефіцієнт передачі підсилювача може змінюватися внаслідок температурної зміни параметрів транзисторів, зміни живлень та ін.
- Але підсилювач із глибоким негативним зворотнім зв'язком має високу стабільність підсилення:

$$K' = K / (1 - \beta K), \text{ то при } |\beta K| \gg 1$$

$$K' \approx -1/\beta.$$

- Коефіцієнт зворотнього зв'язку β , який зазвичай визначається дільником, що складається із пасивних елементів, є досить стабільним.

Підвищення стабільності підсилення і розширення полоси

- В загальному випадку, враховуючи, що

$$\ln K' = \ln K - \ln(1 - \beta K)$$

Отримаємо

$$\frac{dK'}{K'} = \frac{dK}{K} + \frac{\beta dK}{(1 - \beta K)} = \frac{dK}{K} \frac{1}{(1 - \beta K)}.$$

$$\frac{\Delta K'}{K'} = \frac{\Delta K}{K} \frac{1}{(1 - \beta K)}.$$

Введення в підсилювач негативного зворотнього зв'язку дозволяє розширити полосу його пропускання.

$$F_1' = F_1 / (1 - \beta K_0);$$

$$F_2' = F_2 (1 - \beta K_0),$$

де F_1' та F_2' – відповідні нижня та верхня частоти підсилювача із зворотнім зв'язком.

АЧХ

- АЧХ побудовані на основі формули:

$$|y'| = \frac{1 - \beta K_0}{\sqrt{(1 - \beta K_0)^2 + 2(1 + \beta K_0)x^2 + x^4}}.$$

$F_n = 10^2 \text{ Гц}$ и $F_c = 10^4 \text{ Гц}$.

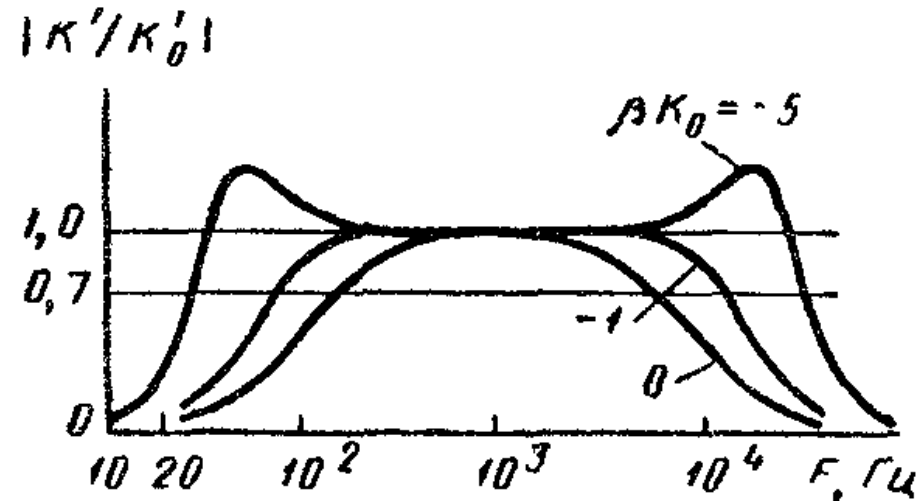


Рис. 8.3. Амплитудно-частотные характеристики двухкаскадного резисторного усилителя с отрицательной обратной связью

Зменшення спотворень

- Покажемо, що в підсилювачі із негативним зворотнім зв'язком, фон, шуми і спотворення, які виникають всередині підсилювача, зменшуються в стільки разів, у скільки разів падає підсилення.
- На малюнку підсилювач, який створює невеликі спотворення, представлений як неспотворюючий підсилювач, до виходу якого додана зовнішня спотворююча напруга $U_{иск}$.
- Очевидно, що спотворююча напруга на виході:

$$U'_{иск} = \beta K U'_{иск} + U_{иск},$$

- Звідки:

$$U'_{иск} = U_{иск} / (1 - \beta K).$$

- В стільки разів зменшаться шуми і фон, які виникають всередині підсилювача.
- Відмінність фону і шумів від спотворень в тому, що перші не залежать від амплітуди підсиленого сигналу.

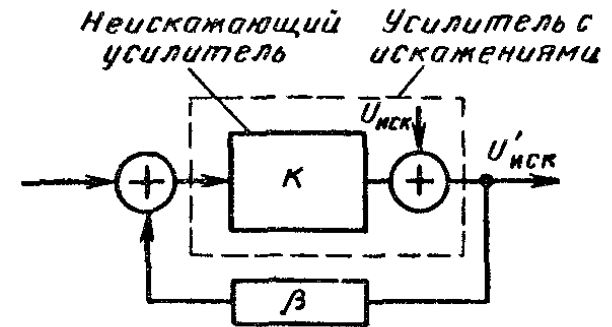
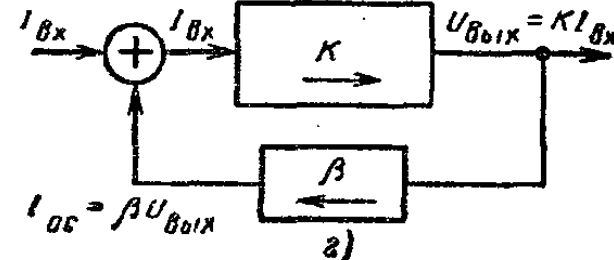
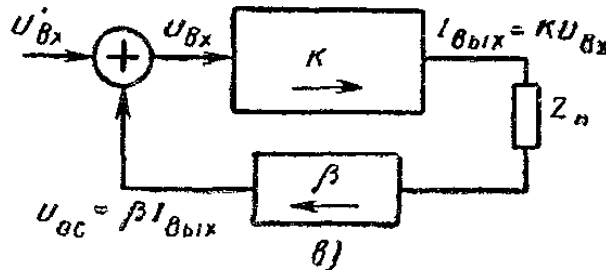
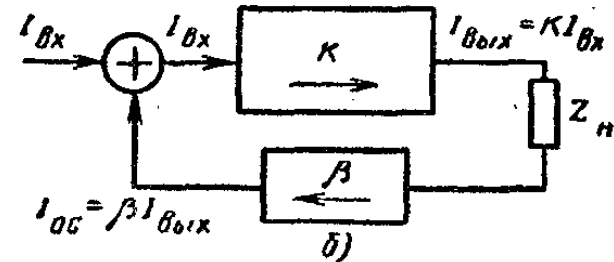
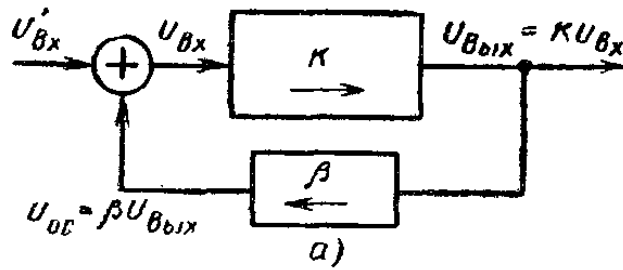


Рис. 8.4. Структурная схема усилителя, поясняющая, что при отрицательной обратной связи искажения уменьшаются

Типи зворотнього зв'язку

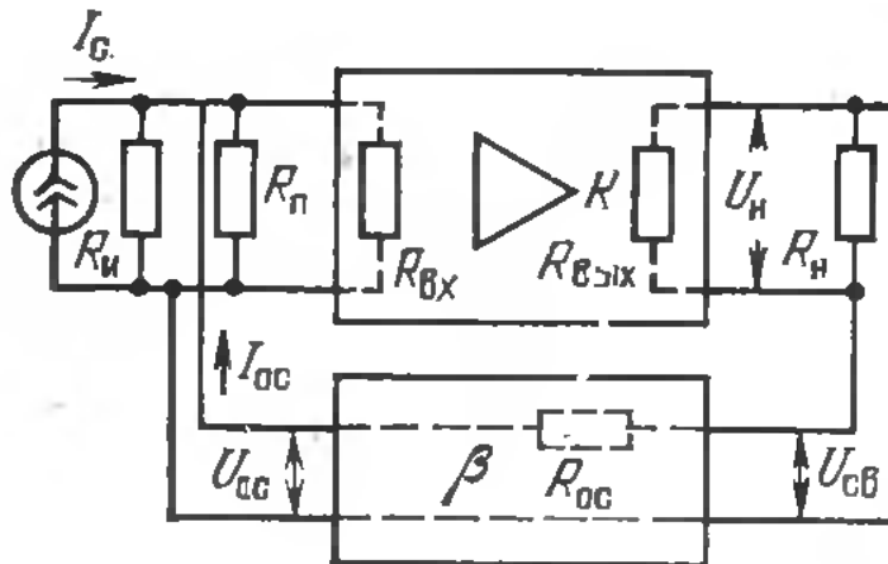


- а) схема послідовної подачі зворотнього зв'язку по напрузі
- б) схема паралельної подачі зворотнього зв'язку по струму
- в) схема послідовного зворотнього зв'язку по струму
- г) схема паралельного зворотнього зв'язку по напрузі

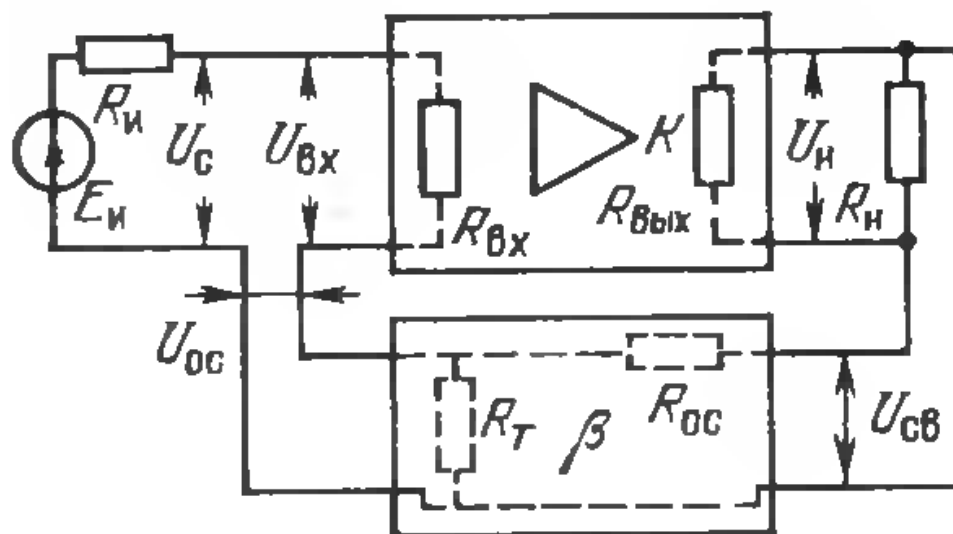
Зворотній зв'язок в підсилювачах

ЗЗ по напрузі

Паралельний



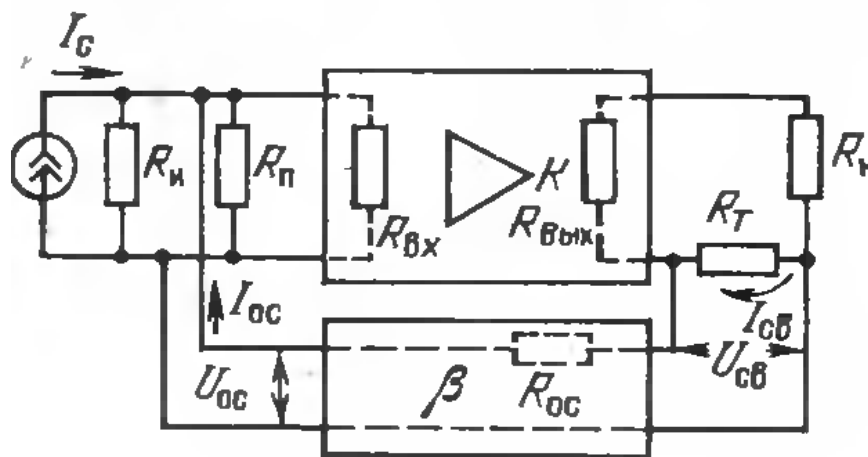
Послідовний



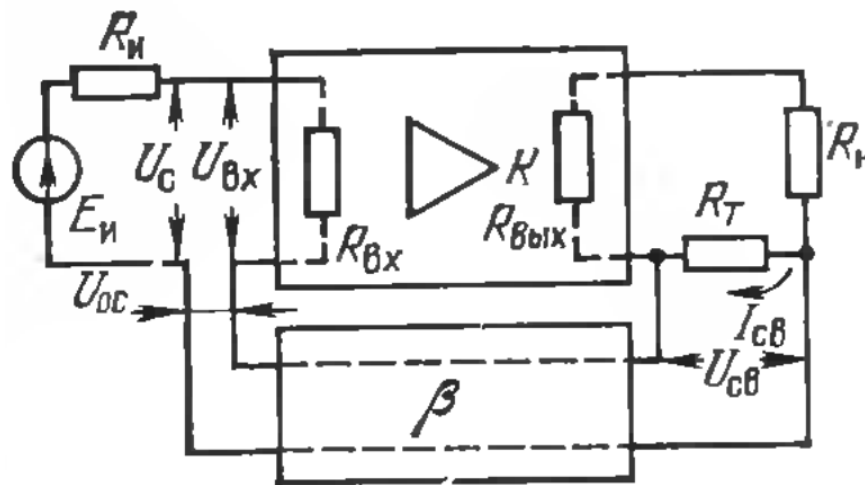
Зворотній зв'язок в підсилювачах

33 по струму

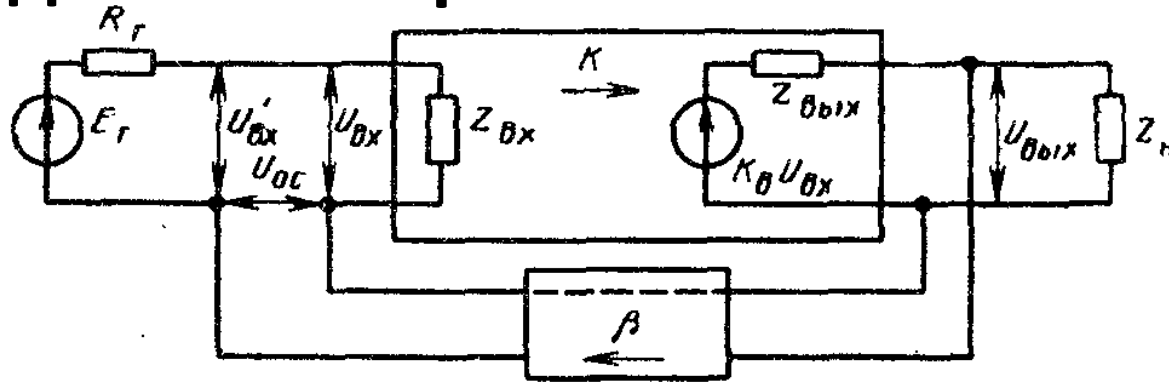
Паралельний



Послідовний



Послідовний зворотній зв'язок по напрузі



- Нехай $K = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$ - коефіцієнт передачі навантаженого підсилювача, а $K_{\text{в}}$ - внутрішній коефіцієнт передачі напруги. При $Z_{\text{н}} = \infty$ $K_{\text{в}} = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$.
- Коефіцієнт передачі напруги підсилювача із зворотнім зв'язком.

$$K' = \frac{U_{\text{вых}}}{U'_{\text{вх}}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}} - U_{\text{ос}}} = \frac{K}{1 - U_{\text{ос}} / U_{\text{вх}}}$$

- Підставляючи $U_{\text{ос}} = \beta U_{\text{вых}}$

Послідовний зворотній зв'язок по напрузі

- Отримуємо: $K' = K / (1 - \beta K)$.

- Знайдемо вхідний опір(імпеданс):

$$Z'_{вх} = U'_{вх} / I_{вх} = U'_{вх} Z_{вх} / U_{вх}.$$

- Підставивши:

$$U'_{вх} = U_{вх} - U_{ос} = U_{вх} (1 - \beta K),$$

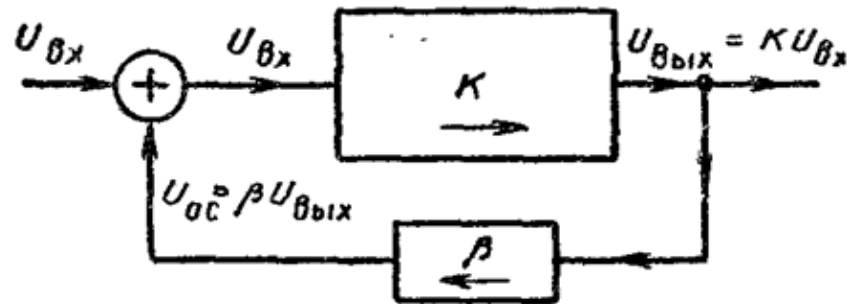
- Отримуємо для вхідного опору:

$$Z'_{вх} = (1 - \beta K) Z_{вх}.$$

- Знайдемо вихідний опір:

$$Z'_{вых} = \frac{U_{вых}}{I_{вых}} = \frac{Z_{вых}}{1 - \beta Z_{вх} K_v / (R_z + Z_{вх})}.$$

Контрольне завдання



$$K=1000$$

$$\beta = 0,01$$

$K' - ?$ (в дБ)