

Загальні відомості про зворотні зв'язки

Зворотним зв'язком (ЗЗ) у підсилювачах називають . На рис.1 зображена структурна схема підсилювача зі зворотним зв'язком. Зворотні зв'язки в підсилювачах звичайно створюють спеціально. Однак іноді вони виникають мимовільно.

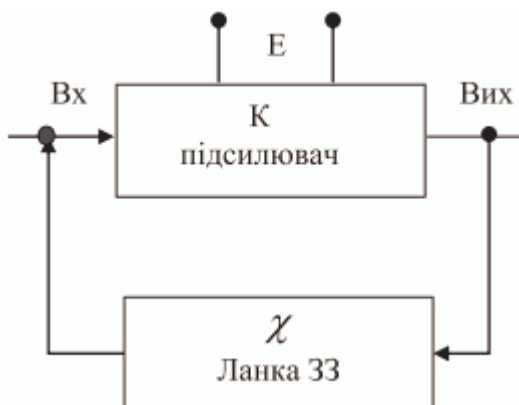


Рис 1 Схема підсилення ЗЗ

Мимовільні зворотні зв'язки називають паразитними. Підсилювач характеризується коефіцієнтом K , а ланка ЗЗ характеризується коефіцієнтом передачі χ . Коефіцієнти K і χ зазначені у вигляді комплексних значень.

У підсилювачах застосовуються різні види ЗЗ. У схемній реалізації підсилювача й ланцюга ЗЗ можливі варіанти, коли ЗЗ існує або тільки для повільно змінюючогося вихідного сигналу, або тільки для змінної його складової, або для всього сигналу. У цих випадках говорять, що зворотний зв'язок здійснений за змінним струмом, як за постійним так і за змінним струмом.

Класифікація зворотних зв'язків

Залежно від способу одержання сигналу розрізняють:

- зворотний зв'язок за напругою, коли сигнал ЗЗ пропорційний напрузі вихідного ланцюга;
- зворотний зв'язок за струмом, коли сигнал ЗЗ пропорційний току вихідного ланцюга;
- комбінований ЗЗ, коли сигнал ЗЗ пропорційний як напрузі, так і струму вихідного ланцюга.

За способом введення у вхідний ланцюг сигналу зворотного зв'язку розрізняють:

- послідовну схему введення ЗЗ, коли напруга сигналу ЗЗ сумується із вхідною напругою;

- паралельну схему введення ЗЗ, коли струм ланцюга ЗЗ сумується зі струмом вхідного сигналу;

- змішану схему введення ЗЗ, коли із вхідним сигналом складається струм і напруга ланцюга ЗЗ.

Зворотний зв'язок називають від'ємним, якщо він зменшує коефіцієнт підсилення (зменшує вхідний сигнал), і додатним, якщо коефіцієнт підсилення зростає (збільшує вхідний сигнал),

Для кількісної оцінки ступеня впливу ланцюга ЗЗ використовують коефіцієнт зворотного зв'язку, що показує яка частина вхідного сигналу, надходить на вхід підсилювача.

$$\chi = \frac{U_{зз}}{U_{вх}} \text{ або } \chi = \frac{I_{зз}}{I_{вх}}$$

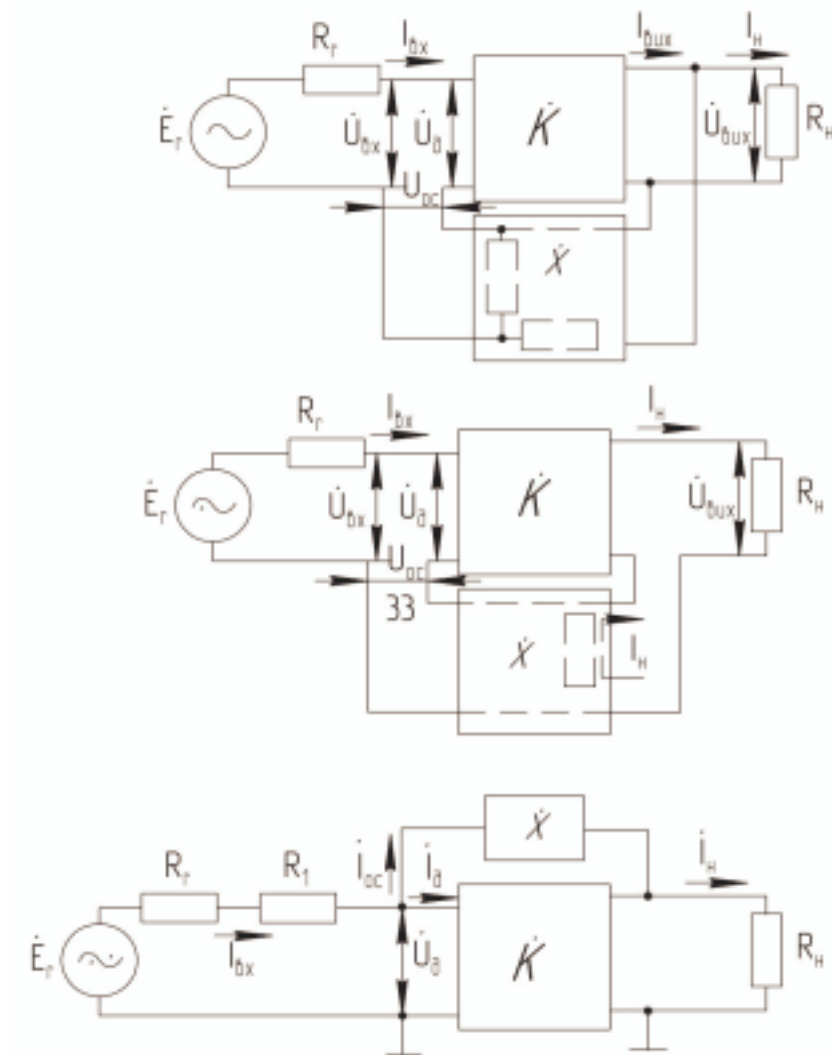


Рис. 2 - Різновиди ЗЗ

При від'ємному ЗЗ за напругою для вхідного ланцюга підсилювача можна скласти рівняння запишеться

$$U_{ex} = U_{oc} + U_y = U_y + \chi U_{вих}$$

Для підсилювача без ЗЗ

$$K_U = \frac{U_{вих}}{U_n}$$

Коефіцієнт підсилення підсилювача з ЗЗ

$$K_{Uoc} = \frac{U_{вих}}{U_{ex}} = \frac{U_{вих}}{U_y + \chi U_{вих}}$$

Розділивши чисельник і знаменник на U_n , одержимо

$$K_{Uoc} = \frac{K_U}{1 + \chi K_U}$$

Із цієї формули бачимо, що введення від'ємного ЗЗ зменшує коефіцієнт підсилення підсилювача в $1 + \chi K_U$ раз. Аналогічно можна показати, що додатний ЗЗ збільшує коефіцієнт підсилення підсилювача в $1 - \chi K_U$ разів.

У результаті введення ЗЗ:

- підвищується стабільність коефіцієнта підсилення підсилювача при змінах параметрів транзисторів;
- знижується рівень нелінійних викривлення;
- збільшується вхідний й зменшується вихідний опір підсилювача й т.д.

На рис.3,а наведена схема підсилювача з від'ємним зворотнім зв'язком за струмом, а на рис.3,б - схема підсилювача з від'ємним ЗЗ за напругою.

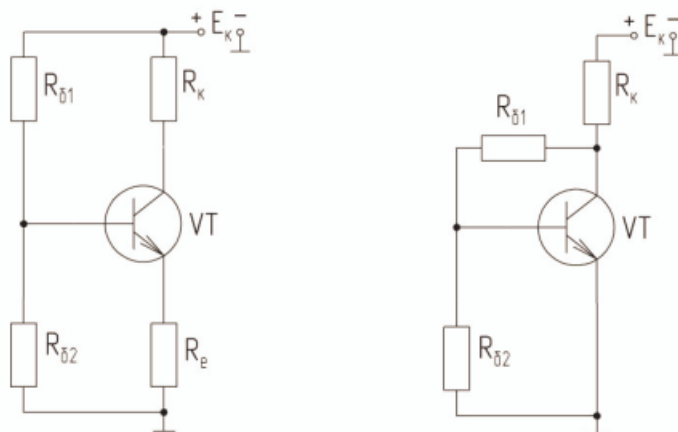


Рис. 3 Схема підсилювача з від'ємним зворотнім зв'язком за струмом (а) і схема підсилювача з від'ємним ЗЗ за напругою (б).

Багатокаскадні підсилювачі

Якщо один підсилюючий каскад не забезпечує потрібного рівня підсилення, то застосовують багатокаскадні підсилювачі. Структурна схема такого підсилювача зображена на рис.4.

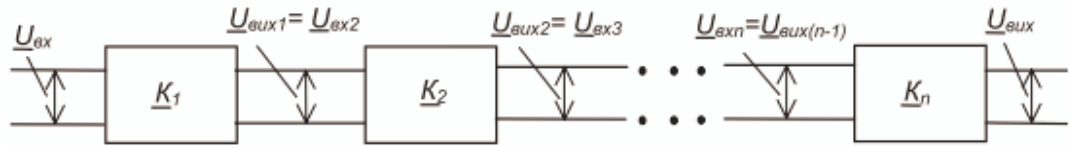


Рис. 4 – Структурна схема багатокаскадного підсилювача

Загальний коефіцієнт підсилення при цьому становить

$$\underline{K}_{заг} = \underline{K}_1 \underline{K}_2 \dots \underline{K}_n.$$

Багатокаскадні підсилювачі з резистивно-ємнісними міжкаскадними зв'язками

Найбільш широкого вжитку набули підсилювачі змінного струму з резистивно-ємнісними міжкаскадними зв'язками (з RC-зв'язками). Вони мають добрі частотні властивості, невеликі габарити, високу надійність і тому широко використовуються як при створенні підсилювачів на дискретних елементах, так і у інтегральному виконанні. На рис. 5 наведена схема такого підсилювача.

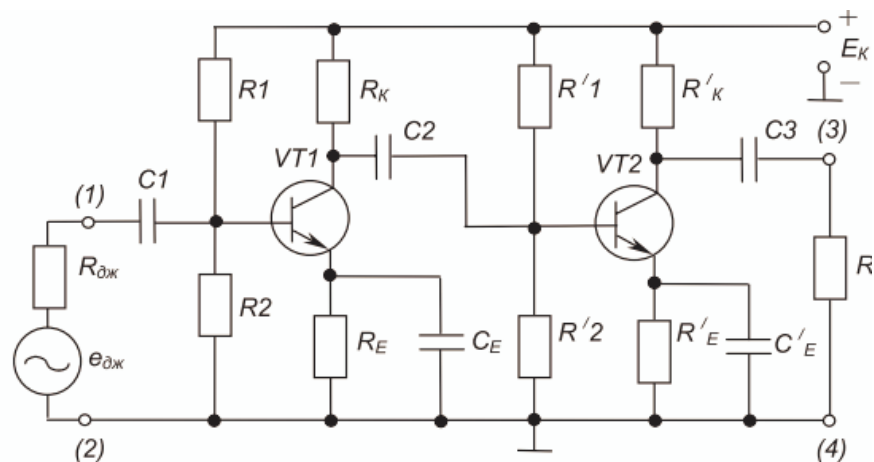


Рис. 5 – Двокаскадний підсилювач з резистивно-ємнісними зв'язками

Підсилювач складається із двох каскадів підсилення, виконаних на транзисторах VT1 і VT2 за схемою з спільним емітером SE. Вхідний сигнал після підсилення першим каскадом через конденсатор C_2 надходить на вхід другого каскаду, з виходу якого підсилений вдруге через конденсатор C_3 подається на навантаження R_n .

Розрахунок багатокаскадного підсилювача починають із розрахунку вихідного (останнього) каскаду. Потім, знаючи його вхідну напругу, що є вихідною напругою попереднього каскаду, приступають до розрахунку попереднього каскаду і т.д. Виходячи із умови забезпечення однотипності, каскади попереднього підсилення виконують однаковими (зазвичай із найбільш можливим коефіцієнтом підсилення).

Тому розрахунок завжди зводиться фактично до розрахунку одного каскаду

$$R_{n1 \gg} = R_K \parallel R' \parallel R_{вх2},$$

де $R' = R'_1 \parallel R'_2$;

$R_{вх2}$ – вхідний опір за змінним струмом другого каскаду;

$$R_{n2 \gg} = R'_K \parallel R_n.$$

Амплітудна характеристика такого підсилювача має вигляд, наведений на рис. 6

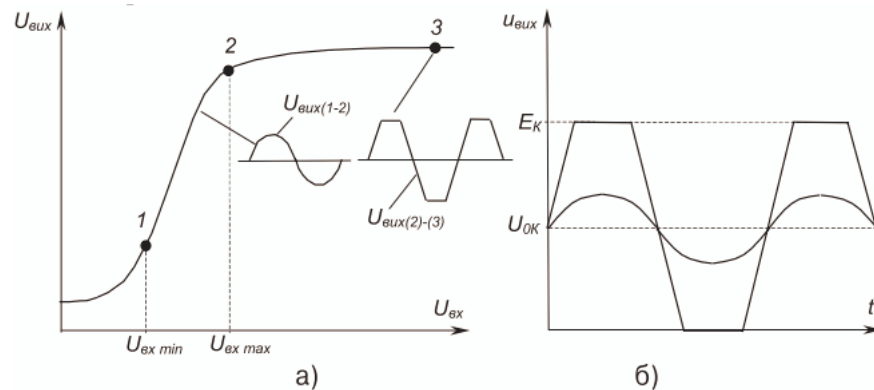


Рис. 6 – Амплітудна характеристика (а) та часові діаграми вихідного сигналу (б) двокаскадного підсилювача з RC-зв'язками

На ній позначено:

1-2 – робоча ділянка;

2-3 – режим насичення.

$$D = \frac{U_{вх \max}}{U_{вх \min}} - \text{динамічний діапазон підсилювача.}$$

На ділянці 1-2 маємо незначне спотворення форми вихідного сигналу, зумовлене нелінійністю характеристик транзистора. Ступінь спотворень визначається коефіцієнтом нелінійних викривлень

$$K_n = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1},$$

де U_1 – ефективне значення напруги першої (основної) гармоніки вихідного сигналу;

U_2, U_3, \dots, U_n – ефективні значення напруги другої, третьої і т.д. (вищих) гармонік вихідного сигналу.

Наявність сигналу на виході підсилювача при $U_{вх} < U_{вх \min}$ і навіть при $U_{вх} = 0$, визначається власними шумами елементів підсилювача.

Це шумовий сигнал, зумовлений, наприклад, нестаціонарністю процесу інжекції носіїв із емітера в базу біполярного транзистора (до речі, польові транзистори позбавлені цього недоліку, у зв'язку з чим їх часто використовують у першому каскаді підсилювачів малих сигналів); виникають шуми також за рахунок флуктуацій струму при його протіканні

через металокомпозиційні, вугільні та інші резистори і т.п. Крім того, причиною вихідних шумів є сигнали, наведені на елементах і з'єднаннях підсилювача зовнішніми електромагнітними полями, завади, що проникають на його вхід із кіл живлення при наявності в них пульсацій напруги.

Для зниження вихідних шумів використовують елементи з малими власними шумами, застосовують екранування, додаткові фільтри, вибирають схеми джерел живлення з мінімальними пульсаціями.

На ділянці 2-3 маємо режим насичення підсилювача через те, що транзистор тут виходить за межі лінійного режиму: поперемінно переходить із режиму відтинання через лінійний режим до режиму насичення і навпаки (не плутайте динамічний режим насичення підсилювача зі статичним режимом насичення транзистора).

Другою важливою характеристикою двокаскадного підсилювача з RC- зв'язками є амплітудно-частотна характеристика (АЧХ), зображена на рис.7.

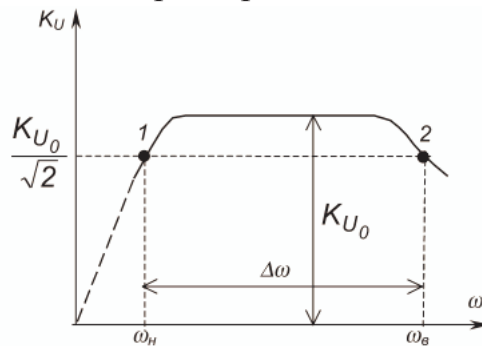


Рис. 7 – АЧХ двокаскадного підсилювача з RC- зв'язками

Причиною зниження коефіцієнта підсилення на низьких частотах є наявність розділяючих конденсаторів C_1, C_2, C_3 , а також C_E , оскільки опір конденсатора

$$X_C \Big|_{\omega \rightarrow 0} = \frac{1}{\omega C} \rightarrow \infty.$$

У результаті на розділяючих конденсаторах падає частина напруги сигналу, що повинен передаватися у наступний каскад або навантаження, а з ростом опору C_E виникає суттєвий негативний зворотним зв'язк НЗЗ за підсилюваним сигналом змінної напруги коефіцієнт підсилення знижується.

Причиною зниження коефіцієнта підсилення на високих частотах є:

- 1) зниження коефіцієнта передачі транзистора за струмом β при $\omega > \omega_{\beta}$;
- 2) наявність у схемі паразитних конденсаторів та індуктивностей, оскільки

$$X_C \Big|_{\omega \rightarrow \infty} = \frac{1}{\omega C} = 0; \quad X_L \Big|_{\omega \rightarrow \infty} = \omega L \rightarrow \infty,$$

то зі збільшенням частоти сигналу (або для його вищих складових гармонік) розосереджена ємність ліній зв'язку в межах каскаду шунтує частину енергії

сигналу, що підсилюється, а індуктивність провідників веде до падіння на них напруги. У результаті коефіцієнт підсилення знижується.