

## 6.9. Багатокаскадні підсилювачі

Якщо один підсилюючий каскад не забезпечує потрібного рівня підсилення, то застосовують багатокаскадні підсилювачі. Структурна схема такого підсилювача зображена на рис. 6.28.

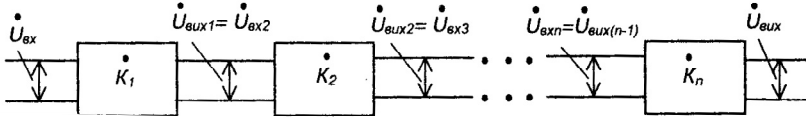


Рис. 6.28 – Структурна схема багатокаскадного підсилювача

Загальний коефіцієнт підсилення при цьому становить

$$\dot{K}_{\text{заг}} = \dot{K}_1 \dot{K}_2 \dots \dot{K}_n . \quad (6.39)$$

### 6.9.1. Багатокаскадні підсилювачі з резистивно-ємнісними міжкаскадними зв'язками

Широкого розповсюдження 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 під час створення підсилювачів на дискретних елементах, так і у інтегральному виконанні.

На рис. 6.29 наведено схему такого підсилювача.

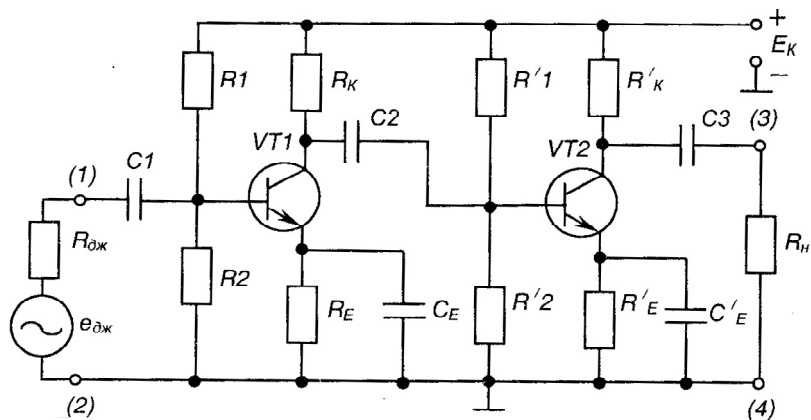


Рис. 6.29 – Двокаскадний підсилювач з резистивно-ємнісними зв'язками

Підсилювач складається із двох каскадів підсилення, виконаних на транзисторах  $VT1$  і  $VT2$  за схемою з СЕ.

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  $R_H$ .

Розрахунок багатокаскадного підсилювача починають із розрахунку вихідного (останнього) каскаду. Потім, знаючи його вхідну напругу, яка 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.

$$R_{n1\approx} = R_K // R' // R_{ex2},$$

де  $R' = R'_1 // R'_2$ ;  $R_{ex2}$  – вхідний опір за змінним струмом другого каскаду;  $R_{n2\approx} = R'_K // R_H$ .

Амплітудна характеристика такого підсилювача має вигляд, наведений на рис. 6.30.

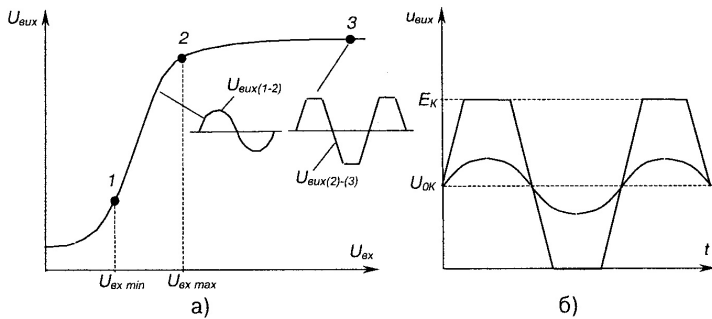


Рис. 6.30 – Амплітудна характеристика (а) та часові діаграми вихідного сигналу (б) двокаскадного підсилювача з  $RC$ -зв'язками

На характеристиці позначено: 1÷2 – робоча ділянка підсилювача; 2÷3 – режим насичення.

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

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

$$K_n = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1}, \quad (6.40)$$

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

$U_2, U_3, U_n$  — ефективні значення напруги другої, третьої і т.д. (вищих) гармонік вихідного сигналу.

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

Це шумовий сигнал, зумовлений, наприклад, нестационарністю 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 під час його протікання 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 за 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  $2 \div 3$  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), яку зображено на рис. 6.31.

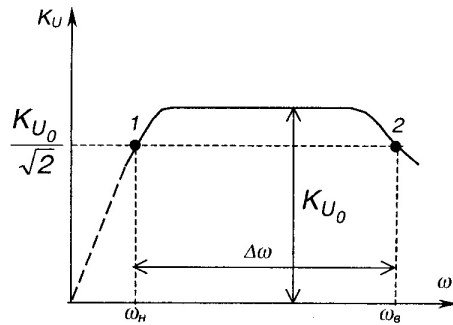


Рис. 6.31 – АЧХ двокасадного підсилювача з RC- зв'язками

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

$$X_{C|\omega \rightarrow 0} = \frac{1}{\omega C} \rightarrow \infty$$

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 НЗЗ за підсилюваним сигналом змінної напруги.

Причиною зниження коефіцієнта підсилення на високих частотах є:

1) зниження коефіцієнта передачі транзистора за струмом  $\beta$  при  $\omega > \omega_b$ ;

2) наявність у схемі паразитних ємностей та індуктивностей.

Оскільки  $X_{C|\omega \rightarrow \infty} = \frac{1}{\omega C} = 0$ ;  $X_{L|\omega \rightarrow \infty} = \omega L \rightarrow \infty$ , 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.

### 6.9.2. Багатокаскадні підсилювачі з трансформаторними зв'язками

У таких підсилювачах зв'язок між каскадами здійснюється за допомогою трансформаторів. Зазвичай, первинна обмотка вмикається у вихідне струмове коло транзистора попереднього каскаду, а вторинна обмотка – до входу наступного каскаду або безпосередньо до навантаження. У першому випадку маємо справу з підсилювачем напруги, у другому – з підсилювачем потужності.

Структурну схему підсилювача з трансформаторними зв'язками зображено на рис. 6.32.

У наведеній схемі перший каскад – підсилювач напруги, другий – підсилювач потужності.

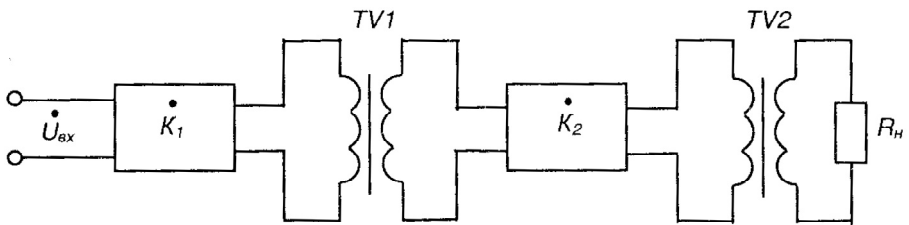


Рис. 6.32 – Двокаскадний підсилювач з трансформаторними зв'язками

Найширшого розповсюдження трансформаторні підсилювачі знаходили до недавнього часу як підсилювачі потужності. Будуються вони за однотактною або двотактною схемами.

Схему однотактного трансформаторного підсилювача потужності наведено на рис. 6.33.

У колекторне коло транзистора *VT1* увімкнено первинну обмотку трансформатора *TV1*, його вторинна обмотка підключена до навантаження  $R_n$ .

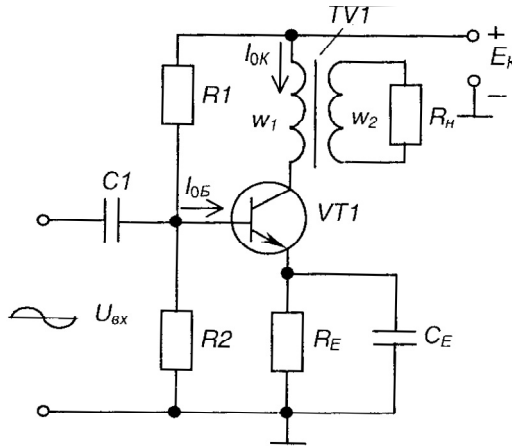


Рис. 6.33 – Однотактний трансформаторний підсилювач потужності

Коефіцієнт трансформації  $n = w_1 / w_2$ , де  $w_1, w_2$  – кількість витків первинної та вторинної обмоток відповідно. Призначення решти елементів те ж саме, що і в попередніх схемах. Працює цей підсилювач у режимі класу *A*.

Величина опору навантаження, приведена до первинної обмотки, становить

$$R_n' = R_n n^2 . \tag{6.41}$$

Оскільки  $R_{вих} = R_n'$ , то  $R_{вих} = R_n n^2$ , а коефіцієнт трансформації:

$$n = \sqrt{\frac{R_{вих}}{R_n}} . \tag{6.42}$$

Недоліками наведеної схеми є: низький к.к.д.  $\eta=0,25\div0,3$ ; наявність сталого підмагнічування осердя трансформатора внаслідок

протікання постійного струму  $I_{OK}$  по його первинній обмотці, що призводить до збільшення габаритів трансформатора.

Вказаних недоліків позбавлений двотактний підсилювач потужності, принципову схему якого зображено на рис. 6.34.

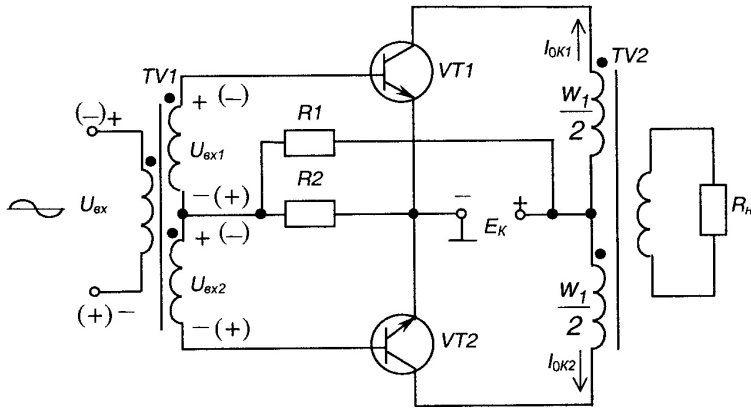


Рис. 6.34 – Двотактний трансформаторний підсилювач потужності

Підсилювач складається з двох однокласних каскадів, виконаних на транзисторах  $VT1$  і  $VT2$ . Параметри транзисторів повинні бути практично однаковими. Трансформатор  $TV1$  призначений для подачі на вхід підсилювача двох напруг  $U_{вх1}$  та  $U_{вх2}$ , рівних за величиною, але зсунутих за фазою на 180 електричних градусів. Трансформатор  $TV2$  узгоджує вихід підсилювача з навантаженням, тобто забезпечує виконання умови передачі максимальної потужності. Резистори  $R_1$ ,  $R_2$  призначені для створення режиму спокою (в режимі класу  $AB$ ) для обох транзисторів.

Такий підсилювач може працювати у класі  $B$  (за відсутності ділянки  $R_1 - R_2$ ) або  $AB$ . У трансформатора  $TV2$  стале підмагнічування відсутнє, оскільки по одній його напівобмотці постійний



струм тече в одному напрямку, а по другій – у протилежному, причому  $I_{OK1}=I_{OK2}$ .

Розглянемо роботу підсилювача за дії  $U_{ex}$ .

Якщо полярність  $U_{ex1}$ , така, як вказана на схемі без дужок, транзистор  $VT2$  закритий, а  $VT1$  працює у режимі підсилення. При цьому в колекторному колі  $VT1$  з'являється підсилена напівхвиля струму, що через верхню первинну напівобмотку трансформатора  $TV2$  передається до навантаження.

За полярності  $U_{ex1}$ , вказаної у дужках, транзистор  $VT1$  закритий, а  $VT2$  знаходиться у режимі підсилення під дією  $U_{ex2}$ . Напівхвиля струму, що протікає у колекторному колі  $VT2$ , має протилежний напрямок і через нижню первинну напівобмотку трансформатора  $TV2$  передається до навантаження. Таким чином, транзистори  $VT1$  і  $VT2$  за період підсилюваного сигналу працюють по черзі, створюючи підсилену змінну напругу на навантаженні за два такти.

На рис. 6.35 зображено вихідні характеристики транзистора та побудову часової діаграми імпульсу колекторного струму.

Повна та вихідна потужності відповідно будуть рівними:

$$P = \frac{I_m U_m}{2}, P_{вих} = \eta P. \quad (6.43)$$

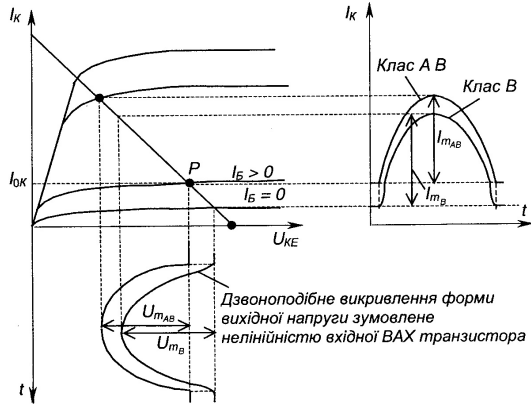


Рис. 6.35 – Побудова часової діаграми імпульсу колекторного струму за допомогою вихідної характеристики транзистора

### 6.9.3. Безтрансформаторні вихідні каскади підсилення

Безтрансформаторні вихідні каскади підсилення дуже широко використовуються як у складі ІМС, так і у дискретному виконанні. Схему такого каскаду, виконану на однотипних транзисторах  $n-p-n$  типу, наведено на рис. 6.36.

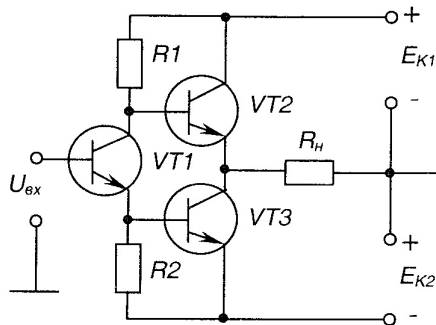


Рис. 6.36 – Безтрансформаторний каскад підсилення на однотипних транзисторах

Транзистор  $VT_2$  і навантаження  $R_H$  утворюють каскад з СК, а  $VT_3$  і  $R_H$  – каскад з СЕ. Сигнали, що підсилюються, надходять на входи транзисторів  $VT_2$ ,  $VT_3$  із зміщенням за фазою на 180 електричних градусів: одержання двох протифазних напруг забезпечує фазоінверсний каскад на транзисторі  $VT_1$ . Транзистори  $VT_2$  і  $VT_3$  поперемінно відкриваються позитивними напівперіодами, зумовлюючи протікання у навантаженні змінного струму.

Живлення такого каскаду можливе і від однополярного джерела. У такому випадку навантаження підключається через конденсатор великої ємності ( $1/\omega_n C \ll R_H$ ).

Останнім часом широко використовують каскади підсилення, побудовані на транзисторах різного типу провідності – на комплементарних (від лат. *complement* – доповнення) парах транзисторів. Схема найпростішого такого каскаду наведена на рис. 6.37. Кожен із транзисторів разом з навантаженням тут утворює схему з СК.

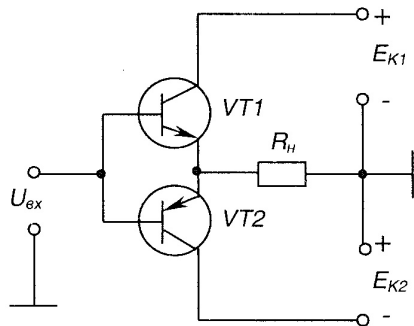


Рис. 6.37 – Найпростіший каскад підсилення на транзисторах різного типу провідності

Працює каскад у режимі класу  $B$ , який характеризується значними нелінійними викривленнями при підсиленні гармонійних сигналів.

Характерна особливість такої схеми: для неї не потрібен фазоінверсний каскад.

Для забезпечення роботи у режимі класу  $AB$  використовують невелике зміщення ( $0,6 \pm 0,7$ )В, як це показано на рис. 6.38 (дільник  $R_1$ – $R_3$ ).

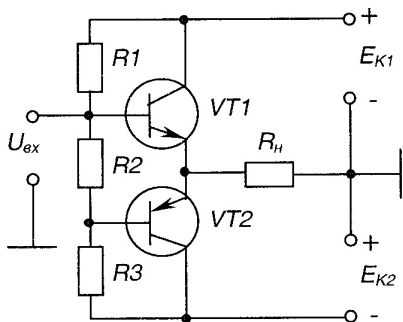


Рис. 6.38 – Безтрансформаторний каскад підсилення на транзисторах різного типу провідності у режимі класу  $AB$

При цьому за відсутності вхідного сигналу через обидва транзистори протікає невеликий струм спокою (наскрізний струм), а через навантаження не протікає.

Оскільки в цих схемах обидва транзистори увімкнені відносно навантаження як емітерні повторювачі, то вони досить просто узгоджуються з низькоомним опором навантаження і к.к.д. при цьому досить високий. Вихідна напруга дорівнює вхідній, а підсилення потужності відбувається за рахунок підсилення струму.

#### 6.9.4. Вибіркові підсилювачі

Вибіркові підсилювачі застосовують, якщо необхідно із сукупності вхідних сигналів широкого діапазону частот виділити групу сигналів, близьких за частотами, що несуть корисну інформацію (наприклад, при налаштуванні радіоприймача на конкретну станцію). АЧХ такого підсилювача має вузьку смугу підсилюваних частот, як це показано на рис. 6.39 (порівняйте з рис. 6.31).

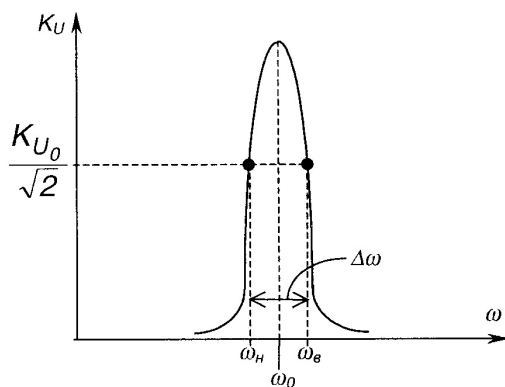


Рис. 6.39 – АЧХ вибіркового посилювача

Вибіркові підсилювачі зазвичай виконують як підсилювачі з СЕ, колекторним навантаженням яких є паралельний  $LC$ -контур, що налаштовується у резонанс на деяку частоту  $\omega_0$ , тому їх ще називають резонансними підсилювачами.

Схему вибіркового (резонансного) підсилювача наведено на рис. 6.40. Для нього

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_K C_K}},$$

де  $L_K$  і  $C_K$  – індуктивність і ємність контуру.

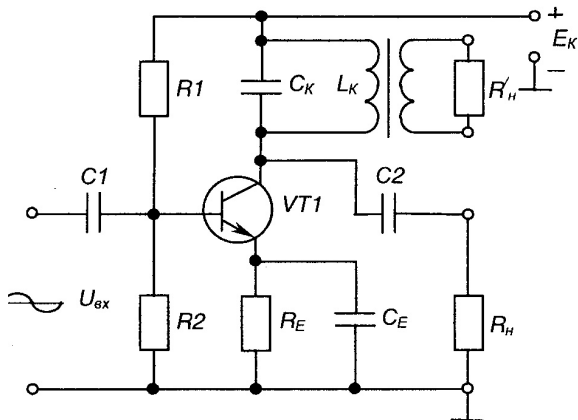


Рис. 6.40 – Вибірковий (резонансний) підсилювач

Зв'язок із навантаженням (часто це наступний каскад підсилення) може бути трансформаторним (якщо навантаження відімкнене як  $R'_H$ ), або резистивно-ємнісним (якщо навантаження відімкнене як  $R_H$ ).

За низьких частот (тисячі і десятки тисяч герц) застосування  $LC$ -контурів недоцільне, бо тут низька їх добротність, великі габарити та маса. У такому разі застосовують підсилювачі з частотно-залежними зворотними зв'язками, зазвичай резистивно-ємнісними.