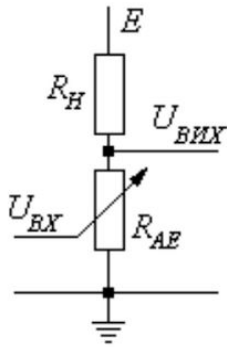


Контрольні запитання до змістового модуля II.

1. Дайте означення підсилювача та поясніть призначення його елементів, користуючись його принциповою схемою.

Підсилювачем називається активний чотирьохполюсник, що відтворює на виході вхідний сигнал без спотворення його форми, але зі збільшенням його потужності.



Основою підсилювача є два елементи: опір навантаження  $R_H$  та активний елемент  $R_{AE}$ , опір якого керується вхідним сигналом  $U_{ВХ}$ . Такими активними елементами можуть бути, наприклад, біполярні чи польові транзистори. Із зміною величини вхідної напруги  $U_{ВХ}$  змінюється опір  $R_{AE}$  і напруга джерела живлення  $E$  перерозподіляється між опорами ділянки  $R_H$  та  $R_{AE}$ . При цьому відповідно змінюється напруга  $U_{ВХ}$  на виході підсилювача. При широких змінах величини  $R_{AE}$ , сумірних з величиною  $R_H$ , можна досягнути великих змін вихідної напруги, сумірних з величиною напруги джерела живлення  $E$ , які будуть набагато більшими від змін вхідної напруги  $U_{ВХ}$ . Усе залежить від того, наскільки

ефективно вхідна напруга буде змінювати величину  $R_{AE}$ .

2. Для чого необхідний навантажувальний опір у схемі підсилювача?

Основою підсилювача є два елементи: опір навантаження  $R_H$  та активний елемент  $R_{AE}$ . Із зміною величини вхідної напруги  $U_{ВХ}$  змінюється опір  $R_{AE}$  і напруга джерела живлення  $E$  перерозподіляється між опорами ділянки  $R_H$  та  $R_{AE}$ . Навантаження – це фактично споживач, який приймає сигнал від підсилювача - вихідну напругу. Потрібен для моделювання справжнього споживача потужності в електричному колі

3. Дайте означення підсилювача потужності. У чому полягає його відмінність від підсилювача напруги?

Підсилювачі потужності, де основною метою є одержання якомога більшого абсолютного значення вихідної потужності (а не підсилення за напругою!), яке може забезпечити дааний активний елемент. Тому в таких підсилювачах навантаження повинне бути узгодженим з його внутрішнім опором  $R_{ВХ} \approx R_H$  (приблизно рівні). А у випадку з підсилювачами напруги  $R_{ВХ} \ll R_H$ .

4. Дайте означення широкосмугового підсилювача. У чому полягає його відмінність від підсилювача низької частоти?

Широкосмугові підсилювачі охоплюють дуже широкий діапазон частот - від кількох герц до кількох мегагерц. Їх ще називають імпульсними або відеопідсилювачами через те що ними зручно підсилювати імпульсні та відеосигнали. Вони відрізняються від низькочастотних тим, що низькочастотні підсилювачі забезпечують підсилення сигналів від кількох герц до 10-20 кілогерц. Оскільки люди здатні сприймати цей діапазон частот, ПНЧ часто називають звуковими підсилювачами.

5. Дайте означення селективного підсилювача. Де вони застосовуються?

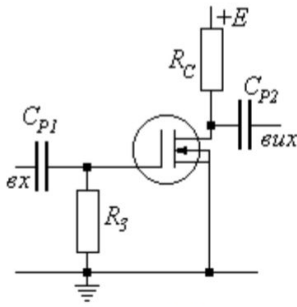
Селективні або вибіркові підсилювачі здійснюють підсилення в вузькій смузі частот і застосовуються там, де потрібно з широкого спектру частот виділити та підсилити сигнали заданої частоти. Їх використовують у радіоприймачах та радіовимірвальній апаратурі

6. Для чого у схемі підсилювального каскаду на польовому транзисторі потрібен резистор  $R_3$  у колі затвора? Що може статися за його відсутності?

Резистор  $R_3$  забезпечує виконання умови  $U_{зв} = 0$ : через нього малі струми затвору стікають на землю, не створюючи скільки-небудь помітного спаду напруги на цьому опорі. Але якби опору  $R_3$  не було, то постійний потенціал затвору визначався б струмами затвору та ізоляційними властивостями ємності і мав би непередбачуване значення. Величина  $R_3$  повинна бути значно більшою від реактивного опору ємності  $C_p$  в усьому діапазоні робочих частот і обирається зазвичай порядку  $10^5 - 10^7$  Ом

7. Для чого на вході підсилювального каскаду ставлять розділову ємність? З яких міркувань обирається її величина?

Розділовими ємностями  $C_{p1}$  та  $C_{p2}$  каскад "відгороджено" від пристроїв, які підключаються до його входу і виходу. Ці ємності вільно пропускають підсилюваний змінний сигнал, але не допускають впливу зовнішніх пристроїв на режим роботи транзистора. Ємності обираються за нижньою граничною частотою



8. Як впливає величина внутрішнього опору транзистора  $R_i$  на коефіцієнт підсилення підсилювального каскаду? Обґрунтуйте відповідь.

Більш докладний кількісний розрахунок коефіцієнта підсилення  $k = v_{ВИХ}(t)/v_{ВХ}(t)$  з урахуванням внутрішнього опору транзистора показує, що коефіцієнт підсилення виявляється рівним:

$$k = -S \cdot R_H = -S \cdot \frac{R_C \cdot R_i}{R_C + R_i} = -\frac{S \cdot R_C}{1 + R_C / R_i} \cdot 10 \quad (3.4)$$

Тут  $S$  – крутість прохідної характеристики транзистора в околі робочої точки,  $R_H$  – опір навантаження,  $R_C$  – опір у колі стоку.

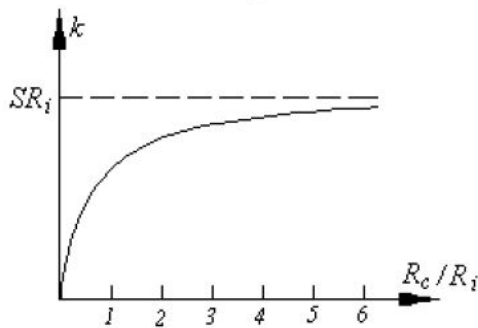


Рис. 3.12

З формули (3.4) видно, що нарощування величини  $R_C$  призводить до відповідного зростання коефіцієнта підсилення  $k$  лише доти, доки  $R_C \ll R_i$ ; при їхній сумірності внутрішній опір транзистора починає обмежувати зростання коефіцієнта підсилення. А при  $R_C \gg R_i$  коефіцієнт підсилення прямує до постійної величини, що дорівнює  $S \cdot R_i$  (рис. 3.12). Тому

9. Коефіцієнт підсилення підсилювального каскаду зростає зі збільшенням величини навантажувального опору  $R_C$ . Чому цей опір не варто робити дуже великим заради збільшення коефіцієнта підсилення?

Тому недоцільно, гонячись за великим коефіцієнтом підсилення, надмірно збільшувати величину опору  $R_C$ . Більш того, надмірне збільшення цього опору призведе до зменшення режимної компоненти напруги  $U_{c0}$ , що доходить до стоку нашого транзистора. А це зашкодить параметрам транзистора, зокрема, призведе до зменшення його крутості. Крім того, як ми це побачимо далі, збільшення опору навантаження призводить до погіршення роботи підсилювального каскаду в області високих частот.

10. Що називають фазово—частотною характеристикою підсилювача? Чи зв'язаний її хід якимось чином з ходом амплітудно—частотної характеристики цього ж підсилювача?

Частотною характеристикою чотириполісника називається залежність комплексу коефіцієнта передачі від частоти. Відповідно, залежність абсолютної величини (модуля) коефіцієнта передачі від частоти  $k(\omega)$  має назву амплітудно-частотної характеристики, а залежність створюваного чотириполісником повороту фази гармонічного сигналу, який крізь нього проходить, від частоти  $\phi(\omega)$  — фазово-частотною характеристикою. У випадку підсилювача частотна характеристика містить вельми важливу інформацію про нього, оскільки вказує в якому діапазоні частот він може успішно працювати та які спотворення він вносить у спектр підсилюваних сигналів.

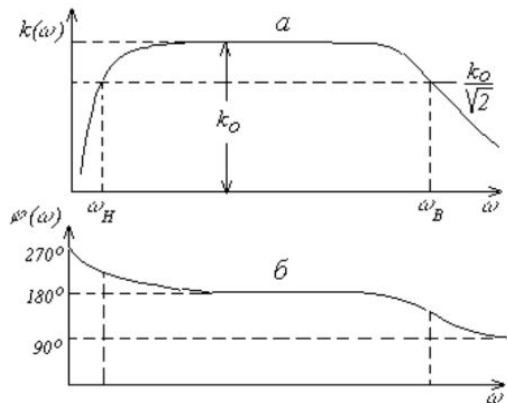
11. Поясніть призначення розділової ємності, встановленої на вході підсилювального каскаду. З яких міркувань обирається її величина та як вона впливає на частотні характеристики підсилювального каскаду? Обґрунтуйте відповідь.

Розділові ємності призначені для того, щоб пристрої, які можуть бути підключені до входу та виходу каскаду, не могли порушити встановлений режим транзистора. Разом з тим, ці ємності не повинні перешкоджати проходженню вхідних та вихідних змінних сигналів. Для цього потрібно забезпечити виконання співвідношень

$$\omega_H \cdot R_{BX} \cdot C_{P_1} \gg 1 \quad \text{та} \quad \omega_H \cdot R'_H \cdot C_{P_2} \gg 1,$$

де  $\omega_H$  — найнижча частота, яку має підсилювати каскад,

$R_{BX}$  – його вхідний опір, а  $R'_H$  – опір навантаження каскаду. Тобто реактивні опори ємностей  $C_{P_1}$  та  $C_{P_2}$  повинні бути набагато меншими від активних опорів  $R_{BX}$  та  $R'_H$ .



**Рис. 3.13**

Загальний вигляд частотних характеристик каскаду наведено на рис. 3.13. Амплітудно-частотна характеристика (рис. 3.13, а) складається з трьох частин.

По-перше, з області зниження (“завалу”) коефіцієнта підсилення на низьких частотах ( $\omega \leq \omega_H$ ), який зумовлюється існуванням на вході каскаду подільника напруги, що складається з розділової ємності  $C_{P_1}$  та опору в колі затвору  $R_3$ . Дійсно, для сигналів досить низьких частот розділова ємність являє собою великий реактивний опір, який просто не пропускає ці сигнали на затвор транзистора. Тому в таких підсилювачах  $k = 0$  при  $\omega = 0$ . Коефіцієнт передачі такого кола складає:

$$k_H(\omega) = \frac{R_3}{R_3 + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_{P_1}}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot \tau_H}}, \quad \text{де } \tau_H = R_3 \cdot C_{P_1} \text{ – стала часу кола подільника.}$$

12. Поясніть термін “паразитна ємність”. Які причини її виникнення та як вона впливає на частотні характеристики підсилювального каскаду? Обґрунтуйте відповідь.  
Головним чинником, який визначає хід частотної характеристики підсилювача в області високих частот, є величина вихідної ємності каскаду  $C_P$  (яку іноді називають “паразитною” ємністю), що завжди існує між стоком транзистора й землею. (+див. п. 13)

13. Яким чином вихідна ємність підсилювача впливає на коефіцієнт підсилення?

Починаючи з яких частот проявляється її вплив?

Ця ємність, звичайно, не зображується на схемі, але завжди в ній невидимо присутня і є під’єднаною паралельно до опору навантаження. Паразитна ємність складається з вихідної ємності транзистора, вхідної ємності пристрою, підключеного до виходу підсилювача (наприклад, вхідної ємності наступного каскаду), ємності монтажу, а її величина зазвичай, вкладається в межі від одиниць до кількох десятків пікофарад.

Вихідна ємність спричинює завал АЧХ підсилювача в області високих частот.

$$k(\omega) = -\frac{S \cdot R_H}{1 + j\omega \cdot R_H \cdot C_{\Pi}} = -\frac{k_0}{1 + j \cdot \omega \cdot \tau_B} \text{ - коефіцієнт підсилення в області високих частот.}$$

де  $k_0$  – модуль коефіцієнту підсилення на середніх частотах,  
коли можна нехтувати шунтуючою дією ємності  $C_{\Pi}$ ,  $\tau_B = R_H C_{\Pi}$  – стала часу вихідного кола підсилювача.

Умовно за граничну частоту приймають частоту  $\omega_B$ , на якій модуль коефіцієнту підсилення зменшується в  $2^{1/2}$  раз порівняно з  $k_0$ . Ця частота вважається верхньою границею смуги пропускання підсилювача й

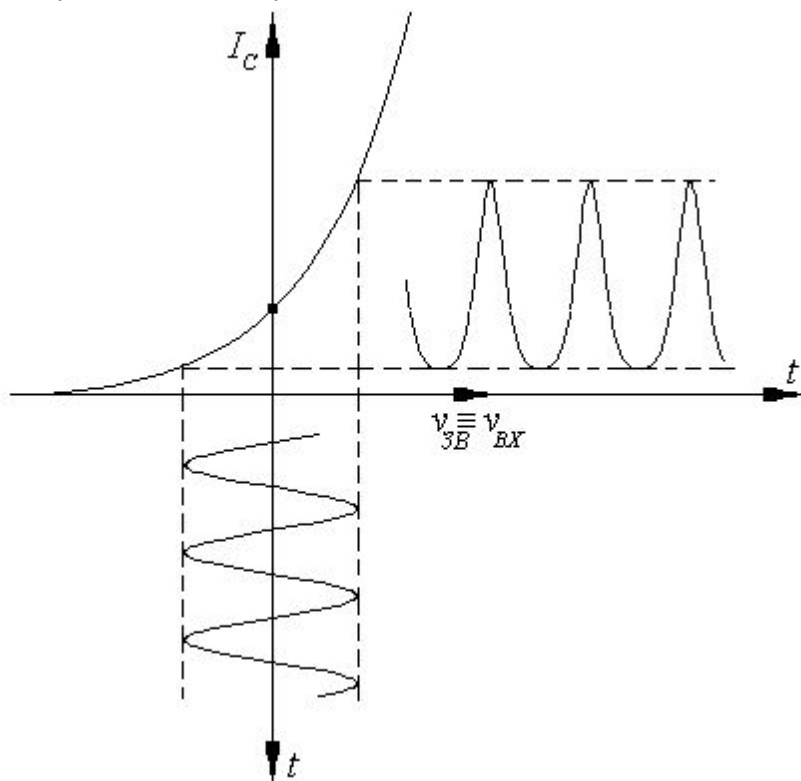
дорівнює  $\omega_B = 1/\tau_B$ .

#### 14. Що являють собою лінійні спотворення сигналу підсилювачем та чим вони відрізняються від нелінійних?

Лінійні спотворення, на відміну від нелінійних, не спричиняють появи нових частот у спектрі підсиленого сигналу.

#### 15. Що являють собою нелінійні спотворення сигналу підсилювачем та чим вони відрізняються від лінійних?

нелінійні спотворення на відміну від вищезгаданих лінійних спотворень призводять до виникнення в спектрі підсиленого сигналу нових частотних компонент, яких не було у вхідному сигналі. Нелінійні спотворення небажані саме тим, що вони, викривлюючи форму підсилюваного сигналу, “засмічують” його спектр новими частотними компонентами. Вони проявляються при великій амплітуді сигналу, коли неможливо нехтувати зміною крутості прохідної характеристики.



16. Яким має бути співвідношення між тривалістю прямокутного імпульсу та сталими часу  $H$  і  $B$ , щоб імпульс не зазнавав спотворень?



мало помітні, якщо  $T \ll \tau_H$ , оскільки напруга на затворі не встигає істотно змінитися за час імпульсу. Взявши до уваги, що  $T$  обернено пропорційне до  $\omega$  – першій гармоніці нашого імпульсу, а  $\tau_H = 1/\omega_H$ , дійдемо висновку, що вказана вище нерівність еквівалентна умові  $\omega \gg \omega_H$ , при якій всі частотні складові сигналу виявляються значно вищими нижньої граничної частоти  $\omega_H$ . При цьому сигнал не повинен зазнавати істотних спотворень, що

При  $T \gg \tau_B$  перехідний процес зарядки паразитної ємності через опір  $R_H$  закінчується за час, значно менший від  $T$  (рис. 3.17, б), так що вихідна напруга залишається майже незмінною протягом всього імпульсу, і спотворення його форми буде майже непомітним. Саме це відповідає випадку  $\omega \ll \omega_B$ , коли в області високих частот не повинно бути частотних спотворень.

17. Чому у підсилювальному каскаді на польовому транзисторі вихідний сигнал протилежної полярності порівняно з вхідним?

При подаче на вход положительной полуволны синусоидального сигнала будет возрастать ток базы, а, следовательно, и ток коллектора. В результате напряжение на  $R_k$  возрастет, а напряжение на коллекторе уменьшится, т.е. произойдет формирование отрицательной полуволны выходного напряжения. Таким образом, каскад с ОЭ осуществляет инверсию фазы входного сигнала на  $180^\circ$ .

// Это для ОЭ.

// Тот же принцип для полевого с общим стоком.

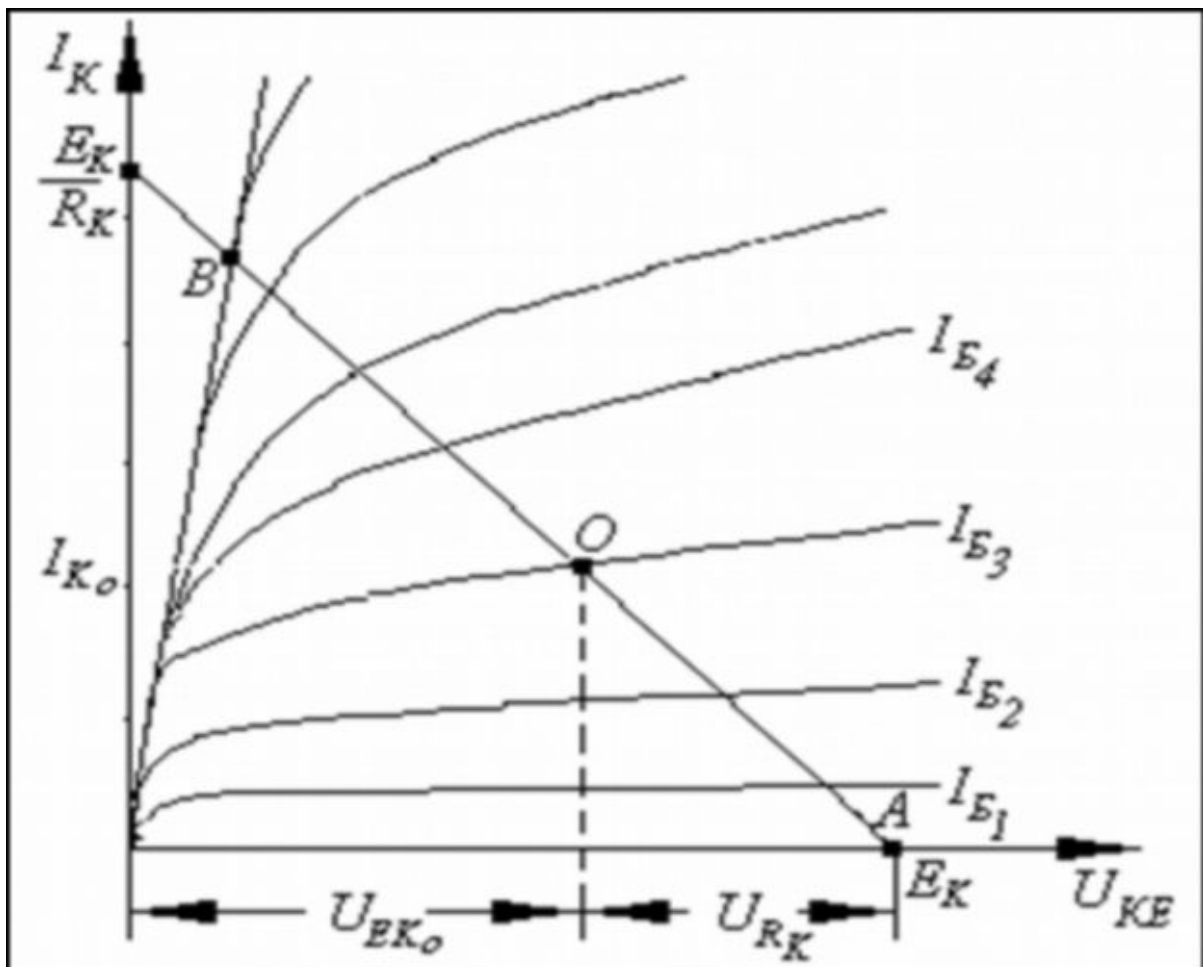
18. Дайте пояснення терміну “робоча точка” біполярного транзистора. Для чого потрібно встановлювати транзистор в робочу точку?

Робоча точка - це точка на сімействі вихідних характеристик, в якій знаходиться транзистор без сигналу на вході. При роботі з відсіченням і автозміщенням, робоча точка відповідає миттєвому нульовому значенню сигналу на вході.

Знаходиться робоча точка на навантажувальній прямій, яка в свою чергу є безліччю можливих миттєвих значень режиму транзистора при всіх можливих змінах вхідного сигналу.

Щоб визначити положення робочої точки транзистора, який працює в динамічному режимі, треба рівняння  $U_{KE0} = E - I_K \cdot R_K$  розв'язати спільно з рівнянням  $I_K = f(U_{BE}, I_B)$ , що описує сім'ю вихідних характеристик транзистора.

Цю задачу можна розв'язати графічно, накресливши на графіку сім'ю вихідних характеристик пряму, яка відповідає рівнянню  $U_{KE0} = E - I_K \cdot R_K$ . Пряма відсікає на вісі абсцис відрізок рівний  $E_K$  (відповідний режиму  $I_K = 0$ ,



коли транзистор повністю закритий), а на осі ординат відрізок  $I_K = E_K / R_K$  (який відповідає короткому замиканню транзистора).

Робоча точка визначається тепер як перетин цієї прямої з однією з характеристик, яка відповідає заданому значенню базового струму  $I_B$ .

Положення робочої точки “О” рекомендується обирати приблизно на рівних відстанях як від режиму запирання транзистора (точка “А”), так і від режиму його насичення (точка “В”). Таким чином, положення робочої точки визначає відповідне значення базового струму (в нашому випадку –  $I_{БЗ}$ ), а також величину постійних складових колекторного струму  $I_{К0}$  та напруги  $U_{КЕ0}$ . Спад напруги на опорі  $R_K$  становить  $U_{Rk}=I_{K0} \cdot R_K$ .

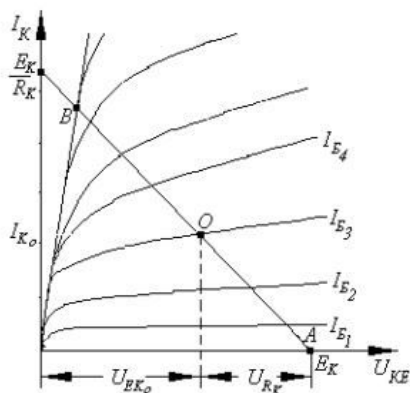
Нашо втсановлювати:

при включенні по схемі з ОЕ на становище робочої точки біполярного транзистора (тобто на струм колектора  $I_{К0}$ ), що знаходиться в режимі лінійного посилення (активний режим), найбільший вплив робить струм бази  $I_{Б0}$ , який, в свою чергу, може сильно коливатися під впливом змін напруги  $U_{БЕ0}$ . Токи колектора  $I_{К0}$  і емітера  $I_{Е0}$  практично повністю визначаються струмом бази транзистора. Напруга  $U_{КЕ0}$  не робить істотного впливу на інші електричні показники каскаду і має вибиратися тільки з міркувань забезпечення знаходження транзистора в області лінійного посилення і неперевищення граничних електричних режимів на електродах транзистора.

19. З яких міркувань вибирається положення робочої точки транзистора, який використовується в схемі підсилювача?

На зображенні - пряма  $U_{ке0}=E_k-I_k \cdot R_k$  на графіку сім'ї вихідних характеристик транзистора. Пряма відсікає на вісі абсцис відрізок рівний  $E_k$  (відповідний режиму  $I_k=0$ , транзистор повністю відкритий), а на осі ординат  $I_k=E_k/R_k$  (режим короткого замикання). Положення робочої точки “О” рекомендується обирати приблизно на рівних відстанях як від режиму запирання транзистора (точка “А”), так і від режиму його насичення (точка “В”).





20. Перелічіть основні параметри підсилювального каскаду на біполярному транзисторі. Чому ці параметри змінюють своє значення при зміні положення робочої точки транзистора? Обґрунтуйте відповідь.

Основними параметрами підсилювального каскаду на біполярному транзисторі є коефіцієнти підсилення:

- Коефіцієнт підсилення за напругою —  $K_U = V_{\text{вих}} / V_{\text{вх}}$  ;
- Коефіцієнт підсилення за струмом —  $K_I = i_{\text{вих}} / i_{\text{вх}}$  ;
- Вхідний і вихідний опір.

$$\frac{1}{R_{\text{вих}}} = h_{21} * (i_1/v_2) * h_{22} \quad k_U = \frac{v_2}{v_1} = \frac{i_H * R_H}{i_1 * R_{\text{BX}}} = k_i * R_H / R_{\text{BX}}$$

$$R_{\text{BX}} = h_{11} + h_{12} * k_i * R_H = h_{11} - \frac{h_{21} * h_{12}}{h_{22} + 1/R_H} \quad k_i = -\frac{i_{\text{вих}}}{i_{\text{вх}}} = -\frac{h_{21}}{1 + h_{22} * R_H}$$

Змінюючи положення робочої точки ми змінюємо значення h-параметрів, які присутні у формулах для визначення кожного з параметрів підсилювального каскаду.

21. У прикладі, розглянутому в конспекті лекцій, коефіцієнти підсилення  $K_{UE}$  та  $K_{UB}$  для схеми із спільним емітером та спільною базою відповідно виявились (за модулем) майже рівними. Це випадковий збіг, чи тут є певна закономірність?

Це випадковий збіг, не існує зв'язку між цими коефіцієнтами для схем зі спільними базою та емітером.

22. Чому мале значення вхідного опору підсилювального каскаду на біполярному транзисторі вважається його недоліком? Яка схема увімкнення з цього погляду краща — СЕ чи СБ? Обґрунтуйте відповідь.

Малий вхідний опір є істотним недоліком підсилювачів на біполярних транзисторах порівняно з польовими. Справа у тому, що вхідний опір каскаду разом з внутрішнім опором генератора  $R_{\Gamma}$  утворюють подільник напруги, так що до входу каскаду доходить лише частина тієї напруги  $e$ , яку створює джерело вхідного сигналу:

За цією ознакою тобто за величиною напруги, що доходить до входу каскаду СБ – підсилювачі значно гірші за СЕ – підсилювачі. Дійсно, якщо за ефективний коефіцієнт підсилення вважати відношення  $\eta$  ВІХ

у е , то

для розглянутого вище прикладу воно буде рівним 138 для підсилювача СЕ і лише 18,3 для СБ – підсилювача.

23. Чому в багатокаскадному підсилювачі коефіцієнт підсилення виявляється меншим, ніж у випадку, коли той же каскад працює сам по собі?

Інша справа у підсилювачах на біполярних транзисторах, у яких вхідний опір зазвичай, набагато менший від вихідного. Тут під величиною  $k_j$  слід вважати не коефіцієнт підсилення одного окремо взятого каскаду, а його ж таки коефіцієнт підсилення, коли цей каскад навантажений вхідним опором наступного каскаду. Для цього в формули  $\eta_{15} - \eta_{18}$  замість

Зменшення ефективного опору навантаження призводить до істотного зниження підсилення каскаду. Так, наприклад, для конкретного випадку, розглянутого раніше, модуль коефіцієнту підсилення за напругою для каскаду зі спільним емітером знижується при врахування вхідного опору наступного каскаду з 167 до 31.

Якщо ж виконується умова, то навантаженням каскаду можна просто вважати вхідний опір наступного каскаду. У випадку ідентичних каскадів в формулі  $\eta_{17}$   $R_{BX}$  та  $R_H$  скорочуються і коефіцієнт підсилення каскаду за напругою виявляється рівним коефіцієнту підсилення за струмом.

24. Чому не має сенсу робити багатокаскадний підсилювач з каскадів, складених за схемою зі спільною базою?

(Йдеться про схему, у якій вхід наступного каскаду підключений безпосередньо до виходу попереднього).

Для підсилювача зі спільною базою СБ, у якого це призводить до того, що коефіцієнт підсилення за напругою багатокаскадного підсилювача взагалі стає меншим від одиниці. Звідси випливає, що побудова багатокаскадного підсилювача з безпосередньо сполучених між собою каскадів, у яких транзистори увімкнені за схемою зі спільною базою, не має сенсу.

25. Дайте означення зворотного зв'язку у підсилювачі. Що таке позитивний та негативний зворотний зв'язок?

Зворотній зв'язок широко застосовується і у підсилювачах. Тут його сутність полягає в тому, що певна частина вихідного сигналу (напруги або струму) повертається на вхід

підсилювача. У ряді випадків завдяки цьому вдається істотно поліпшити деякі важливі характеристики та параметри підсилювачів.

Найбільш простий вигляд вираз

$$k' = \frac{k}{\sqrt{1 - 2 \cdot k \cdot \beta \cdot \cos \phi + k^2 \cdot \beta^2}}$$

набуває при  $\phi = 0$  або  $\phi = \pi$ . Позитивним зворотнім зв'язком (ПЗЗ) називається випадок, коли  $\phi = 0$  (або  $\phi = 2\pi n$ , де  $n = \dots -2, -1, 0, 1, 2 \dots$ ). При цьому сигнал зворотнього зв'язку  $U\beta$  буде синфазним із вхідною напругою підсилювача  $U_{вх}$  і ефективний коефіцієнт підсилення дорівнюватиме:

$$k' = k/(1 - k\beta) > k$$

При  $\phi = \pi$  (або  $\phi = (2n - 1)\pi$ ) сигнал зворотнього зв'язку є протифазним до вхідної напруги  $U_{вх}$  і послаблює останню. Такий зворотній зв'язок має назву негативного (НЗЗ). Ефективний коефіцієнт підсилення НЗЗ дорівнює:

$$k' = k/(1 + k\beta) < k, \text{ тобто він завжди менший від коефіцієнта підсилення «чистого» підсилювача.}$$

**26. Перелічіть основні параметри підсилювального каскаду, на які чинить вплив зворотній зв'язок. Обґрунтуйте відповідь.**

- Вхідний опір підсилювача. При позитивному зворотному зв'язку ефективний вхідний опір зменшується порівняно зі вхідним опором «чистого» підсилювача, а при негативному – збільшується. Останнє здебільше буває вельми бажаним, оскільки підсилювач з великим вхідним опором потребує меншої потужності вхідного сигналу і краще узгоджується з високоомним джерелом вхідної напруги.

- Зменшення завад та спотворень. Коли сигнал проходить через підсилювач, до нього, як правило, додаються завади, що виникають у самому підсилювачі – шуми, фон від недостатньо відфільтрованих джерел живлення та вищі гармоніки самого підсилюваного сигналу, що виникають внаслідок нелінійних спотворень. За наявності кола негативного зворотного зв'язку величина завад зменшується у  $1 + k\beta$  разів. Але у стільки ж разів зменшується і величина корисного сигналу. Для того, щоб компенсувати цю втрату, слід у  $1 + k\beta$  разів збільшити величину вхідного сигналу.

- Стабільність коефіцієнта підсилення. Відомо, що внаслідок різного роду причин (коливання температури, нестабільність напруги джерел живлення тощо) параметри транзисторів зазнають змін, і це у решті-решт позначається на величині коефіцієнта підсилення  $k$  підсилювача.

Зворотний зв'язок може посилити цю нестабільність, або, навпаки, зробити величину коефіцієнта підсилення  $k'$  менш схильною до всякого роду змін.

- Частотні характеристики каскаду. Негативний зворотний зв'язок стабілізує також коефіцієнт підсилення в діапазоні частот. При цьому коефіцієнт підсилення зменшується більшою мірою на тих частотах, на яких його значення великі, і майже не змінюється на частотах, де його величина мала.

- Стабільність режиму роботи каскаду. Значний вплив температури на величину колекторного струму – органічна властивість транзистора як напівпровідникового приладу. Проте, цей вплив можна дещо зменшити нескладним удосконаленням схеми (зі СБ чи СК), створивши

негативний зворотний зв'язок (за режимом, за напругою – дві схеми в підручнику с. 96). Удосконалення схеми відбуваються з метою стабілізації робочої точки. Проте іншими причинами, що здатні призводити до аналогічного зсуву робочої точки, можуть бути нестабільність джерел живлення, старіння транзисторів (поступові зміни їх властивостей), або заміна даного транзистора на інший. Але розглянуті схеми стабілізації робочої точки (у ФОКЕ) зменшують також і ці зміни і забезпечують стійкіший режим роботи радіоелектронних схем.

27. Як впливає негативний зворотний зв'язок за напругою на коефіцієнт підсилення підсилювача? А позитивний?

Обґрунтуйте відповідь.

При ПЗЗ ( $\varphi = 0$ ) сигнал зворотнього зв'язку  $U_{\beta}$  буде синфазним із вхідною напругою підсилювача  $U_{вх}$  і ефективний коефіцієнт підсилення дорівнюватиме:

$$k' = k / (1 - k \cdot \beta) > k.$$

Таким чином, ми одержуємо простий спосіб збільшення коефіцієнту підсилення – досить лише створити позитивний зворотний зв'язок. Спрямовуючи  $k \cdot \beta$  до одиниці можна одержати як завгодно великий коефіцієнт підсилення. Щоправда, ціною погіршення стабільності, частотних властивостей та інших важливих характеристик підсилювача.

При  $\varphi = \pi$  (або  $\varphi = (2n - 1)\pi$ ) сигнал зворотнього зв'язку є протифазним до вхідної напруги  $U_{вх}$  і послаблює останню. Ефективний коефіцієнт підсилення НЗЗ дорівнює:

$$k' = k / (1 + k \cdot \beta) < k, \text{ тобто він завжди менший від коефіцієнта підсилення «чистого» підсилювача.}$$

28. Чи можливий у підсилювачах позитивний зворотний зв'язок при  $k > 1$ ? А негативний? Обґрунтуйте відповідь.

1.  $k' = k / (1 - k \cdot \beta) > k$ . ПЗЗ

$k' = k / (1 + k \cdot \beta) < k$ . НЗЗ

Я думаю, що при  $k\beta > 1$  ПЗЗ неможливий через те, сигнал зворотнього зв'язку  $U_{\beta}$  стане протифазним із вхідною напругою підсилювача  $U_{вх}$  ( $\varphi$  не дорівнюватиме 0). А от ефективний коефіцієнт підсилення НЗЗ завжди менший від коефіцієнта підсилення «чистого» підсилювача. Тому НЗЗ можливий.

29. Яка причина нестійкості багатокаскадного підсилювача?

На високих та низьких частотах, де стає помітним вплив реактивних елементів каскаду, підсинюваний сигнал зазнає додаткового повороту фази на  $\Delta\psi_k(\omega)$ .

При достатньо великій кількості каскадів ( $N > 3$ ) доданок  $N \cdot \Delta\psi_k(\omega)$  у формулі 3.44 (ФОКЕ) на певній частоті може стати рівним  $\pi$ , і на цій частоті негативний зворотний зв'язок перетворюється на позитивний. Це

приведе до зростання підсилення на цих частотах(середніх), а, можливо, й до самозбудження підсилювача. Тому НЗЗ у багатокаскадних підсилювачах слід застосовувати з обережністю та перевіряти систему на самозбудження.

30. Які умови повинні бути виконані для того, щоб багатокаскадний підсилювач самозбудився? Обґрунтуйте відповідь.

1. Щоб охоплений зворотним зв'язком підсилювач самозбудився, необхідно і достатньо виконання таких умов:

А) фазової умови:  $\psi = \psi_k + \psi_\beta = 2\pi \cdot n$ . Ця умова означає, що сигнал, який пройшов через підсилювач, коло зворотного зв'язку і повернувся назад на його вхід, повинен мати ту ж саму фазу, що і первинний вхідний сигнал.

Б) Амплітудної умови:  $1 - k \cdot \beta < 0$ , тобто  $k \cdot \beta > 1$ . Зміст цієї умови полягає в тому, що сигнал, який повернувся на вхід підсилювача, повинен бути хоч трохи більший за первинний. Тоді після кожного обходу кола зворотного зв'язку сигнал зростатиме в геометричній прогресії в  $k \cdot \beta$  разів. Якщо ж  $k \cdot \beta < 1$ , то прогресія буде спадаючою і сигнал, що виник одного разу, буде не зростати, а згасати.

Самозбуджуватися будуть коливання з тією частотою, для якої обидві умови (3.42 і 3.43) виконуються водночас.

31. Як позначиться на повному вхідному опорі паралельний негативний зворотний зв'язок за напругою, якщо він здійснений не резистором  $R_{ЗЗ}$ , а ємністю  $C_{ЗЗ}$  ?

32. У схемі стабілізації робочої точки шляхом сполучення колектора і бази транзистора опором  $R_B$  сигнал з виходу може проникнути на вхід. Як це може вплинути на коефіцієнт підсилення каскаду?

33. Як впливає позитивний зворотний зв'язок на загальний вигляд АЧХ підсилювача?

34. Як опір, включений в коло емітера, впливає на коефіцієнт підсилення та на вхідний опір підсилювального каскаду?

**Інфа з лекцій:**

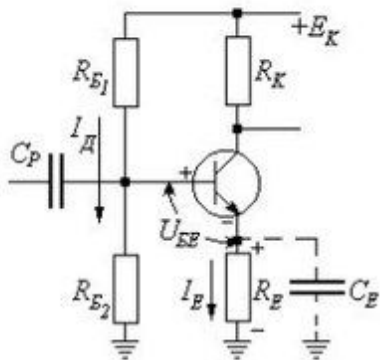


Рис. 3.27

При температурному зростанні струму  $I_K$  зростає відповідно також емітерний струм  $I_E$ , у результаті чого збільшується спад напруги  $U_{R_E}$  на резисторі  $R_E$ . Напруга  $U_{BE}$ , що безпосередньо керує транзистором, є різницею двох напруг:

$$U_{BE} = U_{R_{E2}} - I_E \cdot R_E = U_{R_{E2}} - I_B \cdot R_E - I_K \cdot R_E$$

Два перших члени цього виразу визначаються лише режимом базового кола і від колекторного струму не залежать.

Врахування ж останнього члену призводить до висновку, що зі зростанням  $I_K$  напруга  $U_{BE}$  зменшується, внаслідок чого зменшується також і струм  $I_K$ , так що його зростання буде дещо меншим, ніж у випадку, коли опору  $R_E$  немає.

Схема, зображена на рис. 3.27, є не що інше, як каскад з негативним зворотним зв'язком через емітерний опір  $R_E$ . Її коефіцієнт підсилення описується формулою:

$$k' = \frac{k}{1 + k \cdot \frac{R_E}{R_K}}, \text{ або } k' = \frac{k}{1 + k \cdot \beta}, \text{ де } \beta = \frac{R_E}{R_K}. \quad (3.42)$$

і є істотно меншим, ніж у відсутності опору  $R_E$ . Тому для того, щоб

#### Інфа для розуміння:

При увеличении температуры увеличивается ток эмиттера  $I_z$ . При увеличении тока эмиттера  $I_z$  увеличивается напряжение на резисторе в цепи эмиттера  $U_{Rz}$  (т.к.  $U_{Rz} = I_z \cdot R_z$ ). Напряжение база-эмиттер  $U_{bz}$  связано с напряжением на резисторе в цепи эмиттера  $U_{Rz}$  соотношением:  $U_{bz} = U_{vx} - U_{Rz}$ . Это соотношение показывает что чем больше напряжение на резисторе в цепи эмиттера  $U_{Rz}$  тем меньше напряжение база-эмиттер при неизменном напряжении на входе  $U_{vx}$ . Ток базы  $I_b$  связан с напряжением  $U_{bz}$  входной вольт амперной характеристикой (рисунок 2 б). Из характеристики на рисунке 2 б видно что ток базы  $I_b$  прямо пропорционален напряжению  $U_{bz}$ . Следовательно чем больше напряжение  $U_{bz}$  тем больше ток  $I_b$  и наоборот. Ток эмиттера прямо пропорционален току базы ( $I_z = I_b \cdot h_{21z}$ ).

**Остаточна відповідь:** чим більший опір резистора в колі емітера, тим більший вхідний опір. Цей опір (рез-ра в колі емітера) суттєво зменшує коефіцієнт підсилення підсилювального каскаду.

35. Яка схема підсилювального каскаду стабільніша при зміні температури — з спільним емітером (СЕ) чи з спільною базою (СБ)? Обґрунтуйте відповідь?



Втім, слід відзначити, що підсилювачі зі спільною базою мають і деякі позитивні якості: їм притаманна більш висока порівняно із СЕ – підсилювачами температурна стабільність та здатність успішно

#### Інтуїтивне обґрунтування:

При підключенні транзистора за схемою СЕ обернений струм утворюється на межі закритого п-н переходу База-Колектор неосновні носії заряду (кількість яких сильно залежить від температури) створюють обернений струм за допомогою зовнішньої (запираючої п-н переходу) напруги.

У випадку підключення за схемою СБ зовнішня напруга, рухаючи неосновні носії заряду, буде лише підсилювати прямий струм.

36. На АЧХ багатокаскадного підсилювача, охопленого негативним зворотним зв'язком, на краях смуги пропускання

іноді спостерігаються піки. Яка причина їхнього виникнення?

**Інфа з лекцій (все знати не обов'язково, крім формул (3.43) , (3.44), але для розуміння не завадить):**

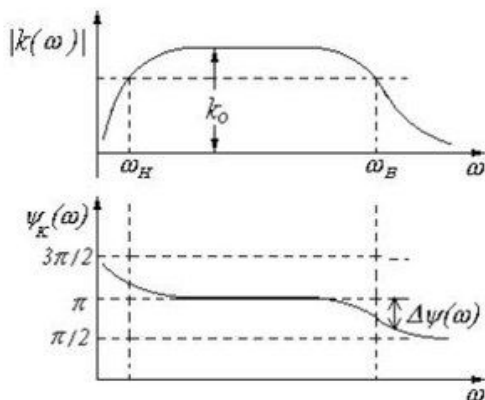


Рис. 3.28

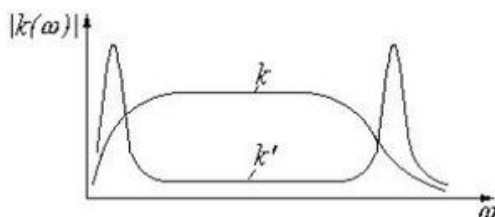


Рис. 3.29

Складнішим є випадок багатокаскадного підсилювача. Один каскад, увімкнений за схемою із СЕ, на середніх частотах, де  $k(\omega) \approx k_0$ , повертає фазу сигналу на  $\psi_k = \pi$  (рис. 3.28).<sup>16</sup> Однак на високих та низьких частотах, де стає помітним вплив реактивних елементів каскаду, підсилюваний сигнал зазнає додаткового повороту фази на  $\Delta\psi_k(\omega)$  (див. п. 3.4 цього розділу), таким чином, що при  $\omega \rightarrow 0$   $\psi_k \rightarrow 3\pi/2$ , а при  $\omega \rightarrow \infty$   $\psi_k \rightarrow \pi/2$ . Для  $N$  каскадів загальний поворот фази в підсилювачі становить:

$$\begin{aligned} \Psi_k(\omega) &= N \cdot \psi_k = \\ &= N \cdot \pi + N \cdot \Delta\psi_k(\omega) \end{aligned} \quad (3.43)$$

Загальний поворот фази в колі зворотного зв'язку становитиме:

$$\begin{aligned} \Psi(\omega) &= \Psi_k(\omega) + \psi_\beta = \\ &= N \cdot \pi + N \cdot \Delta\psi_k(\omega) + \psi_\beta \end{aligned} \quad (3.44)$$

Поклавши  $\psi_\beta + N \cdot \pi = \pi \cdot (2n - 1)$ , ми забезпечимо на середніх частотах негативний зворотний зв'язок.

### Відповідь:

Але при достатньо великій кількості каскадів ( $N > 3$ ) доданок  $N \cdot \Delta\psi_k(\omega)$  на певній частоті може стати рівним  $\pi$ , і на цій частоті негативний зворотний зв'язок перетворюється на позитивний. Це призведе до зростання підсилення на цих частотах (рис. 3.29), а, можливо, й до самозбудження підсилювача. ~~Тому НЗВ у багатокаскадних підсилювачах~~

---

**37. Чи забезпечують розглянуті нами схеми стабілізації робочої точки лише захист від змін зовнішньої температури чи також і від саморозігріву транзистора? Обґрунтуйте відповідь.**

У всіх викладених вище міркуваннях ми вважали, що причиною зміни режиму транзистора (нестабільність робочої точки) є коливання температури. Проте іншими причинами, що здатні призводити до аналогічного зсуву робочої точки, можуть бути нестабільність джерел живлення, поступові зміни властивостей транзисторів (старіння транзисторів), або заміна даного транзистора на інший. Але розглянуті схеми стабілізації робочої точки зменшують також і ці зміни і забезпечують стійкіший режим роботи радіoeлектронних схем. До цього слід додати, що аналогічними методами можна стабілізувати режими також і в схемах на польових транзисторах.

**38. Для узгодження високоомного джерела сигналу з низькоомним навантаженням можна використовувати трансформатор або емітерний повторювач. У чому переваги останнього?**

Емітерний повторювач – підсилювальний каскад, у якому коефіцієнт негативного зворотного зв'язку  $\beta = 1$ . Навантаженням у ньому є опір  $R_E$ , увімкнений в емітерне коло транзистора, тоді як колектор приєднаний безпосередньо до джерела живлення  $E$ . При цьому вся вихідна напруга виявляється введеною у вхідне коло з полярністю, що протилежна до полярності вхідного сигналу. Перевага емітерного повторювача - хоча і не будучи підсилювачем за напругою, емітерний повторювач виявляється прекрасним підсилювачем за потужністю. Дійсно, потужність вхідного сигналу потрібного керування повторювачем дорівнює:

Емітерний повторювач застосовується там, де потрібне узгодження низькоомного навантаження з генератором, який має великий вихідний опір. Така задача досить часто зустрічається в радіoeлектроніці і вона розв'язується шляхом увімкнення між генератором і навантаженням емітерного повторювача.

**39. Чому вивчення частотних властивостей підсилювачів на біполярних транзисторах виявляється складнішим за вивчення частотних властивостей підсилювачів на польових транзисторах?**

При аналізі частотних властивостей підсилювача на біполярному транзисторі доводиться рівною мірою враховувати як вплив реактивних параметрів схеми (вихідну ємність каскаду), так і інерційність самого транзистора, на відміну від підсилювача на польовому транзисторі, де інерційністю самого транзистора нехтують. Тому у випадку підсилювача на біполярному транзисторі аналіз виявляється значно складнішим

порівняно з аналізом підсилювача на польовому транзисторі, де основна роль у формуванні частотних властивостей належить реактивним параметрам схеми.

40. Яка з частот буде вищою — гранична частота транзистора  $f_{h21E}$  чи верхня гранична частота підсилювального

каскаду, зібраного на цьому транзисторі?

41. Що більшою мірою визначає частотні властивості підсилювального каскаду — інерційність транзистора чи

інерційність, обумовлена його вихідною ємністю? Обґрунтуйте відповідь.

42. Чому вхідна розділова ємність у підсилювальному каскаді на біполярному транзисторі як правило у багато разів

більша, ніж у каскаді на польовому транзисторі?

43. Дайте означення підсилювача постійного струму та постійної напруги. Чому ці назви не можна вважати цілком точними?

Усилитель постоянного тока — электронный усилитель, рабочий диапазон частот которого включает нулевую частоту (постоянный ток).

Усилитель постоянного напряжения — электронный усилитель, рабочий диапазон частот которого включает нулевую частоту (постоянное напряжение).

Эти названия нельзя считать точными, т.к. их вернее было бы называть

низкочастотными усилителями (которые могут работать и на нулевой частоте).

44. Як здійснюється зсув рівня напруги в ППН? Як можна зсунути рівень, не зазнавши при цьому втрат у коефіцієнті підсилення? Обґрунтуйте відповідь.

Зсув рівня напруги в ППН здійснюється за допомогою дільника на виході каскаду.

Зсунути рівень не зазнавши втрат у коефіцієнті підсилення можна якщо зробити дільник з нелінійних елементів, які мають диференціальні опори відмінні від омичних опорів.

45. З якою метою застосовується схема струмового дзеркала? Наведіть приклади.

Схема токового зеркала используется для копирования через одно активное устройство, контролируя ток в другом активном устройстве цепи, сохраняя постоянный ток на выходе, независимо от нагрузки.

46. Яке призначення другого (увімкненого діодом) транзистора у схемі струмового дзеркала? Чи можна обійтися без нього? Обґрунтуйте відповідь.

Другий транзистор включається у схему для зменшення температурної залежності

струму  $I = I_s \cdot \frac{R_2}{R_E} \cdot (3.51)$ , яка впливає з того, що ми нехтуємо величиною  $U_{BE0}$ , що істотно

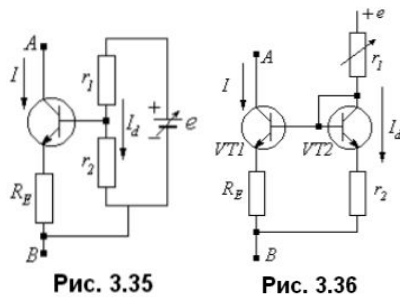
залежить від температури.  $I_d r_2 = U_{EE0} + (I + I_E) R_E$  (звідси отримуємо 3.51)

Але вдосконаливши схему за допомогою ще одного транзистора, отримуємо

$I_d r_2 + U_{EE0}^{(2)} = U_{EE0}^{(1)} + I R_E$  Якщо транзистори ідентичні, то  $U_{BE0}^{(1)}$  та  $U_{BE0}^{(2)}$  скорочуються і

випадають із співвідношення струмів, так що одержаний вище вираз (3.51) стає точнішим. Можливо обійтися й без транзистора, зібравши схему простого струмового

дзеркала(3.35).



47. У чому причина дрейфу нуля у підсилювачах постійного струму та напруги?

Обґрунтуйте відповідь.

Справа в тому, що навіть у найпростішому ППН величина  $U_{KE0}$  не залишається незмінною у часі: через неконтрольовані випадкові зміни напруги джерел живлення, температури та інших чинників величини  $I_{K0}$  та  $U_{KE0}$  повільно змінюються. При підсиленні швидкозмінних напруг з цим можна не рахуватись, бо розділова ємність на виході каскаду завжди відділить змінні компоненти сигналу від режимної постійної компоненти. Якщо ж зміни  $U_{KE0}$  і  $U_{вих}$  за швидкістю і величиною виявляються сумірними, відділити їх одна від одної у ППН стає неможливо.

48. Які переваги та недоліки притаманні баланській схемі підсилювача постійної напруги? Дайте пояснення принципу її дії.

49. Чому підсилювачі постійної напруги вельми зручно виготовляти за мікроелектронною технологією?

Тому що для підсилювачів постійної напруги ми не використовуємо ємності. А отже лише транзистори та опори, які легко виготовляються за планарною технологією на ОДНОМУ кристалі і нам не потрібно виносити жодних елементів назовні. Виготовлення за мікроелектронною технологією дає перевагу у вартості продукту, надійності, компактності.

50. Чому в першому каскаді підсилювача малих постійних струмів бажано використовувати не біполярний, а польовий транзистор?

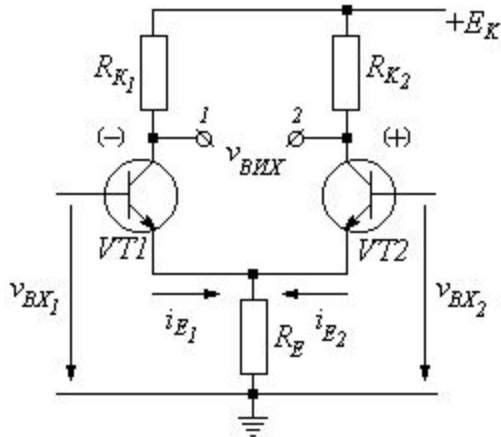
Тому що біполярний транзистор має великий вхідний опір, а отже він споживає малу вхідну потужність.

**51. Для успішної роботи диференційного підсилювача опір  $R_E$  у колі емітера повинен бути досить великим. Про який опір йде мова — омичний чи диференційний? Обґрунтуйте відповідь.**

Запорукою успішної роботи ДП є добре виконання нерівності  $R_E \gg h_{11B}$ . Проте просте збільшення опору резистора  $R_E$  виявляється не можливим. Опір  $R_E$  буде таким великим, що спад напруги на резисторі буде просто нереальним.

Розв'язати цю проблему можна застосувавши замість резистора  $R_E$  елемент, що має великий диференціальний опір (для сигнальних складових струму) та невеликий омичний опір (для режимних складових). Таким елементом може бути струмове дзеркало.

**52. Що таке різницевий коефіцієнт підсилення диференційного підсилювача? Що таке коефіцієнт ослаблення за синфазним сигналом? В чому його фізичний зміст?**



Якщо на базу транзистора VT1 подати вхідний сигнал  $V_{BX1}$ , а на базу VT2 – другий вхідний сигнал  $V_{BX2}$ , то вихідний сигнал буде пропорційним до різниці цих вхідних

сигналів.  $V_{ВИХ} = k \cdot (V_{BX2} - V_{BX1})$  |  $V_{ВИХ} = -\frac{R_K}{h_{11Б}} \cdot (V_{BX1} - V_{BX2}) = -k_P \cdot (V_{BX1} - V_{BX2})$

,де  $k_P$  – різницевий коефіцієнт підсилення. Відповідно для виходів 1 та 2 коефіцієнти підсилення дорівнюватимуть:

$$k_{P1} = \frac{V_{ВИХ1}}{V_{BX1} - V_{BX2}} = -\frac{R_K}{2 \cdot h_{11Б}}; \quad k_{P2} = \frac{V_{ВИХ2}}{V_{BX1} - V_{BX2}} = \frac{R_K}{2 \cdot h_{11Б}}$$

=====

Вхідні сигнали  $V_{BX1}$  та  $V_{BX2}$  можна розкласти на різницеву  $V_{ВХР}$  та середню  $V_{ВХС}$  (синфазну) компоненти.

Розглянемо випадок, коли до обох входів ДП прикладена однакова напруга  $V_{BX1} = V_{BX2} = V_{ВХ}$ . Оскільки при цьому кожна з половин ДП працює симетрично, то їхню роботу можна розглядати нарізно, так, ніби ми розрізали схему навпопівсеред і одержали просто каскад підсилювача з емітерним опором  $2 \cdot R_E$ .

Коефіцієнти підсилення такої схеми за симетричним (синфазним) сигналом по виходах

$$1 \text{ і } 2 \text{ дорівнюватимуть: } k_{C1} = \frac{V_{ВИХ1}}{V_{ВХ1}} = \frac{R_K}{2 \cdot R_E}, \quad k_{C2} = \frac{V_{ВИХ2}}{V_{ВХ2}} = \frac{R_K}{2 \cdot R_E}$$

Їхнє відношення називається коефіцієнтом ослаблення синфазних сигналів  $k_{ОСС}$ :

$$k_{ОСС} = \frac{k_{P1}}{k_{C1}} = \frac{k_{P2}}{k_{C2}} = \frac{R_E}{h_{11Б}} \text{ і є мірою якості диференціального підсилювача.}$$

Їх фізичний зміст полягає в тому, що якщо на вхід надходять однакові сигнали, то на виході напруга визначається  $k_C$ , а якщо сигнали протифазні, то вихідна напруга визначається  $k$ . Зазвичай  $k \gg k_C$ .

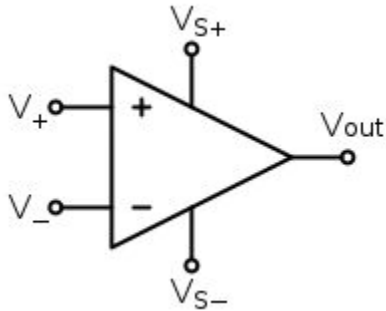
### 53. Перелічіть, яким основним вимогам повинен задовольняти операційний підсилювач?

Хороший підсилювач повинен задовольняти таким вимогам:

- мати великий коефіцієнт підсилення  $k$ ;
- великий вхідний опір  $R_{ВХ}$  та малий вихідний опір  $R_{ВИХ}$ ;
- широку смугу пропускання за частотою;
- здатність підсилювати постійну напругу зі зсувом режимної складової на виході;

- диференціальні входи з великим коефіцієнтом ослаблення за синфазним сигналом;
- малі нелінійні спотворення при майже повному використанні напруги живлення;
- малий температурний дрейф нуля  $U_{др}$ .

**54. Намалюйте структурну схему операційного підсилювача та поясніть призначення її окремих частин.**



На рисунку показане зображення ОП на схемах.

Де:

- $V_+$  — неінвертуючий вхід;
- $V_-$  — інвертуючий вхід;
- $V_{out}$  — вихід;
- $V_{S+}$  — плюс джерела живлення (також може позначатися як  $V_{DD}$ ,  $V_{CC}$ , або  $V_{CC+}$ );
- $V_{S-}$  — мінус джерела живлення (також може позначатися як  $V_{SS}$ ,  $V_{EE}$ , або  $V_{CC-}$ ).

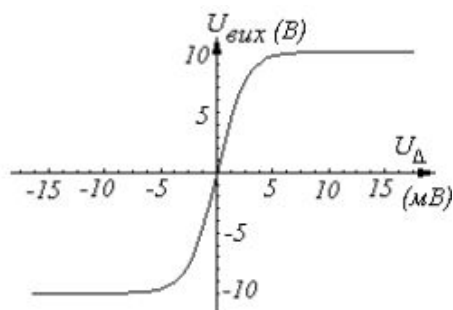
Вказані п'ять виводів, має будь-який ОП, вони абсолютно необхідні для його функціонування. Окрім вказаних, деякі ОП можуть мати додаткові виводи, призначені для:

- встановлення струму спокою;
- частотної корекції;
- балансування (корекції зсуву) нуля;

і ряду інших функцій.

**55. Чому область робочих значень вхідної напруги операційного підсилювача вельми вузька і становить лише одиницімілівольт? Обґрунтуйте відповідь.**





Амплітудна характеристика ОП зображена на рисунку. Тут  $U$  – диференціальна вхідна напруга;  $U_{вих}$  – вихідна напруга. Робочою є порівняно вузька ділянка у кілька мВ, на якій зберігається пропорційність між  $U$  та  $U_{вих}$ . Вузькість робочої ділянки обумовлена тим, що через великий коефіцієнт підсилення вхідна напруга досягає насичення (8 В) вже при досить малих значеннях вхідної напруги і далі вже не зростає.

#### **56. Що таке частота одиничного підсилення операційного підсилювача?**

Параметром операційного підсилювача є частота одиничного підсилення  $f_1$ , на якій модуль коефіцієнта підсилення ОП без зворотного зв'язку рівний одиниці ( $K_{ОП} = 1$ ,  $K_{ОПдБ} = 0$  дБ). Тобто це частота, на якій модуль коефіцієнта підсилення ОП дорівнює одиниці. У сучасних операційних підсилювачів частота одиничного підсилення має порядок декількох мегагерц ( $f_1 \gg (1...10)$  МГц).

==

#### **57. Які переваги має інвертуюче увімкнення операційного підсилювача? Що при цьому втрачається?**

Переваги - зменшення вхідного опору у  $1 + \beta \cdot k$  (см. №60)

Втрати - оскільки інвертуюче увімкнення є фактично увімкненням з НПЗЗ, то сигнал зворотного зв'язку є протифазним до вхідної напруги  $U_{вх}$  і послаблює останню.

#### **58. Які переваги має неінвертуюче увімкнення операційного підсилювача? Що при цьому втрачається?**

Переваги - значне збільшення вхідного опору

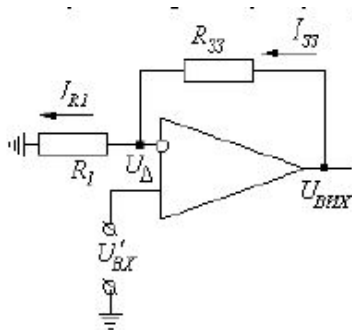


Рис. 3.48

Неінвертуюче увімкнення ОП зображене на рис. 3.48. Застосувавши той самий прийом представлення ОП як ідеального підсилювача, одержимо:

$$I_{33} = I_{R_1}, U_{(-)} \approx U_{(+)} = U'_{BX},$$

$$I_{33} = \frac{U_{ВНХ} - U'_{BX}}{R_{33}}, I_{R_1} = \frac{U'_{BX}}{R_1}.$$

Коефіцієнт підсилення виявляється рівним:

$$k' = 1 + \frac{R_{33}}{R_1}. \quad (3.61)$$

Оскільки в схемі є послідовний негативний зворотний зв'язок за напругою, то її вхідний опір дорівнюватиме:

$$R'_{BX} = (1 + \beta \cdot k) \cdot R_{BX}, \quad (3.62)$$

де  $\beta \approx \frac{R_1}{R_1 + R_{33}}$ , що значно більше ніж у самого ОП.

Окремим випадком неінвертуючого увімкнення є повторювач напруги (рис. 3.49), в якому  $R_{33} = 0$  та  $k' \approx 1$ . При цьому вхідний опір виявляється дуже великим  $R'_{BX} = (1 + k) \cdot R_{BX}$ . Область застосування цієї схеми та ж сама, що і у емітерного повторювача.

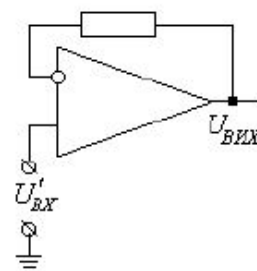


Рис. 3.49

(почему это хорошо - ниже)

оскільки підсилювач з великим вхідним опором потребує меншої потужності вхідного сигналу і краще узгоджується з високоомним джерелом вхідної напруги.

Втрати - ?

59. Як впливає послідовний НЗЗ на коефіцієнт підсилення каскаду на ОП?

Обґрунтуйте відповідь.

Для інвертуючого увімкнення :

Звідси можна визначити коефіцієнт підсилення підсилювача, охопленого негативним зворотним зв'язком:

$$k' = \frac{U_{ВНХ}}{U'_{BX}} = -\frac{R_{33}}{R_1}. \quad (3.59)$$

Для неінвертуючого :

Оскільки в схемі є послідовний негативний зворотний зв'язок за напругою, то її вхідний опір дорівнюватиме:

$$R'_{BX} = (1 + \beta \cdot k) \cdot R_{BX}, \quad (3.62)$$

де  $\beta \approx \frac{R_1}{R_1 + R_{33}}$ , що значно більше ніж у самого ОП.

В обох випадках послідовний НЗЗ забезпечує значне підвищення вхідного опору каскаду. (более детально - скрини по каждому виду подключения в вопросах 60 (инвертирующее) и 58 (неинвертирующее)).

==

60. Як впливає паралельний НЗЗ на коефіцієнт підсилення каскаду на ОП? Обґрунтуйте відповідь.

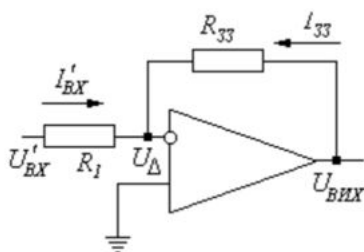


Рис. 3.47

При інвертуючому увімкненні (рис. 3.47) вихідний сигнал  $U_{ВИХ}$  протифазний вхідному сигналу  $U'_{BX}$ . Фактично, це є увімкнення підсилювача з негативним паралельним зворотним зв'язком. Для наближеного розрахунку такого увімкнення ОП останній можна зобразити як ідеалізований підсилювач, у якого  $k \approx \infty$  та

$R_{BX} \approx \infty$ . Тоді скінчена величина  $U_{ВИХ}$  досягається при  $U_{\Delta} = U_{(+)} - U_{(-)} \approx 0$ , і можна вважати, що інвертуючий вхід має потенціал, що практично дорівнює нулеві. Отже, можна вважати, що

$$I'_{BX} \approx \frac{U'_{BX}}{R_1} \text{ та } I_{33} \approx \frac{U_{ВИХ}}{R_{33}}.$$

Враховавши, що  $R_{BX} \approx \infty$  і на вхід підсилювача струм не відгалужується, дістанемо  $I'_{BX} \approx I_{33}$ , так, що

$$\frac{U'_{BX}}{R_1} = -\frac{U_{ВИХ}}{R_{33}}.$$

Звідси можна визначити коефіцієнт підсилення підсилювача, охопленого негативним зворотним зв'язком:

$$K' = \frac{U_{ВИХ}}{U'_{BX}} = -\frac{R_{33}}{R_1}. \quad (3.59)$$

Вхідний опір ОП увімкненого за інвертуючою схемою буде  $R'_{BX} \approx R_1$ . А вихідний опір знижується у  $1 + \beta \cdot k$  разів:

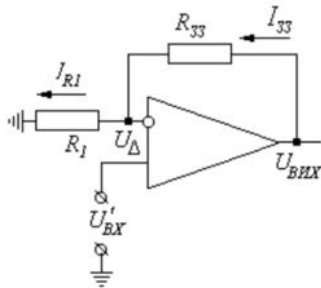
$$R'_{ВИХ} = \frac{R_{ВИХ}}{1 + \beta \cdot k} \text{ де } \beta = \frac{R_1}{R_1 + R_{33}}. \quad (3.60)$$

Вірність усіх цих результатів обмежена умовою  $K' \ll k$ .

61. Чи буде вхідний опір операційного підсилювача, увімкненого за інвертуючою схемою більшим або меншим вхідного опору власне ОП? Обґрунтуйте відповідь.

Вхідний опір ОП при інвертуючій схемі буде мати нескінченний опір, отже однозначно більший за власний вхідний опір. Доведення див. попереднє питання

**62. Чи буде вхідний опір операційного підсилювача, увімкненого за неінвертуючою схемою більшим або меншим вхідного опору власне ОП? Обґрунтуйте відповідь.**



**Рис. 3.48**

Неінвертуюче ввімкнення ОП зображене на рис. 3.48. Застосувавши той самий прийом представлення ОП як ідеального підсилювача, одержимо:

$$I_{33} = I_{R_1}, \quad U_{(-)} \approx U_{(+)} = U'_{BX},$$

$$I_{33} = \frac{U_{VHX} - U'_{BX}}{R_{33}}, \quad I_{R_1} = \frac{U'_{BX}}{R_1}.$$

Коефіцієнт підсилення  $K' = U_{VHX} / U'_{BX}$  виявляється рівним:

$$K' = 1 + \frac{R_{33}}{R_1}. \quad (3.61)$$

Оскільки в схемі є послідовний негативний зворотний зв'язок за напругою, то її вхідний опір дорівнюватиме:

$$R'_{BX} = (1 + \beta \cdot k) \cdot R_{BX}, \quad (3.62)$$

де  $\beta \approx \frac{R_1}{R_1 + R_{33}}$ , що значно більше ніж у самого ОП.

**63. Що таке масштабний множник у схемі суматора?**

Масштабні множники вводяться у схеми для покращення шумових характеристик (зменшення необхідної розрядності оперативної пам'яті) та нормування сигналу в будь-якій точці. Масштабний множник обирається таким чином, щоб на виході АЧХ залишалася незмінною.

**64. З яких міркувань слід вибирати величину опору  $R_{33}$  у схемі суматора аналогових сигналів?**

/\*тут и далее:  $R_{OC} = R_{33}$ \*/

З першого правила Кіргофа маємо, що струм через резистор  $R_{33}$  дорівнює сумі струмів через резистори  $R_1$ - $R_n$ :

$$I_{OC} = I_1 + I_2 + \dots + I_n.$$

Таким чином, схема виконує над вхідними сигналами операцію сумування з негативним ваговим коефіцієнтом (наче це і є масштабний множник):

$$U_{OUT} = -U_1 \frac{R_{OC}}{R_1} - U_2 \frac{R_{OC}}{R_2} - \dots - U_n \frac{R_{OC}}{R_n}.$$

У випадку, якщо  $R_{OC} = R_1 = R_2 = \dots = R_n$ , то схема є інвертуючим суматором із усіма вихідними коефіцієнтами, рівними -1, якщо ж опори різні за значенням, то маємо зважуючий суматор, причому всі коефіцієнти будуть рівні приблизно

$$k_i = -\frac{R_{OC}}{R_i}.$$

*/\*Сугубо из моих умозаключений: чем меньше это сопротивление, тем лучше?\*/*

65. Що таке “режим компарації напруг”, в якому може працювати операційний підсилювач? Де такий режим роботи ОП використовується?

Ще одним важливим прикладом використання операційних підсилювачів є процедура компарації напруг, яка лежить в основі роботи будь-якого аналого-цифрового перетворювача. Вона полягає в порівнянні перетвореної аналогової напруги з певною еталонною напругою. Таке порівняння здійснюється за допомогою операційного

підсилювача, що працює в режимі компарації.

Нехтуючи вузькою ділянкою активного режиму, можна вважати, що при переході U через нуль відбувається миттєвий стрибок режиму з високого рівня вихідної напруги, яку вважають логічною одиницею, до режиму з вихідним сигналом низького рівня – логічного нуля (або навпаки).

Точність такої компарації залежить від ширини ділянки активного режиму операційного підсилювача, в межах якої отриманий результат може бути непевним.

Використовується в пристроях, що перетворюють аналоговий код в цифровий.

66. Які переваги та недоліки мають аналогові обчислювальні машини порівняно з цифровими ЕОМ? Де їх доцільно використовувати?

Вони здатні виконувати обробку сигналів у реальному масштабі часу, тобто з тією ж швидкістю, з якою ці сигнали надходять. В цьому велика перевага аналогових машин порівняно з цифровими ЕОМ. Останні, хоч і набагато точніші, однак часто не встигають робити розрахунки, якщо первісна інформація надто швидко надходить на їхні входи. Аналогові ЕОМ набагато простіші і дешевші за цифрові і широко застосовуються для керування технологічними процесами, де точність розрахунків, забезпечувана ними, є цілком достатньою.

67. Що означає вираз “математична обробка сигналів у режимі реального часу”? Як її здійснити та де її доцільно використовувати?

Математична обробка в режимі реального часу означає миттєве(тобто з такою ж швидкістю, з якою вони надходять) перетворення числових даних в аналогові сигнали і навпаки (не враховуючи затримок пов'язаних з фізичною роботою елементів схеми) . Здійснюється вона аналоговими обчислювальними машинами та використовується там де потрібно перетворювати сигнали миттєво (наприклад при наведенні ракети на рухомих ціль)