

Розділ 7

АНАЛОГОВІ ІНТЕГРАЛЬНІ МІКРОСХЕМИ

7.1. Загальні відомості

Інтегральною схемою (ІС) є електронний пристрій, який виготовлений єдиним цілим. Звідси ІС є функціонально закінченим елементом, який виконує певні функції.

Усі ІС розподіляються на два класи: *аналогові* ІС та *цифрові* ІС. Така класифікація зумовлена видом вхідних та вихідних сигналів.

Аналоговий сигнал характеризується *неперервною* функцією, а *цифровий сигнал* – *дискретними* рівнями.

Для обробки цих сигналів і призначені відповідно аналогові та цифрові ІС.

Однією з характеристик ІС є *рівень (ступінь) інтеграції*, яким є $\lg N$, де N – кількість елементів в ІС (резисторів, транзисторів тощо). Перший рівень інтеграції відповідає $N \leq 10$, другий – $10 < N \leq 100$ і т. д. за десятиковою градацією. Зараз досягнутий шостий рівень, тобто $N > 10^5$ елементів.

Перший і частково другий рівні називають *низькими*, другий і третій – *середніми*, подальші – *високими* і *надвисокими* ступенями інтеграції.

За виготовленням ІС бувають *напівпровідниковими*, *гібридними* та *плівковими*.

Найбільш розповсюдженими ІС є напівпровідникові. Тому гібридні та плівкові ІС тут не розглядаються.

Марка ІС містить інформацію про довідкові дані, особливості та функцію, яку виконує ІС.

Наприклад, шифр “К 284 УН 1А” означає наступне:

- К – ІС широкого застосування;
- 284 – номер серії (розробки);
- 2 – перша цифра номера серії, якщо *парна*, то ІС *гібридна*, а якщо *непарна*, то ІС *напівпровідникова*.

- УН – літерне позначення функції; у даному випадку (рос: усилитель низкой частоты);

- 1А – параметри й особливості за паспортом ІС.

Шифр “К 140 УД 6” означає, що:

- ІС широкого застосування (літера К);
- ІС напівпровідникова (перша цифра *непарна*);
- УД – підсилювач (рос: “усилитель”) диференційний (операційний);
- 6 – малі вхідні струми та наявність корекції (балансування).

Зараз найбільш розповсюдженою аналоговою ІС є операційний підсилювач.

7.2. Операційні підсилювачі

Операційний підсилювач (ОП) – це модульний багатокаскадний підсилювач з диференційним входом, умовне позначення якого наведено на рис. 7.1.

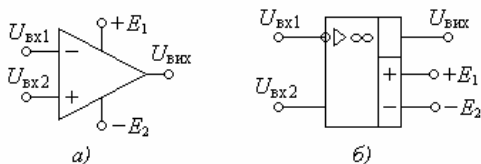


Рис. 7.1. Умовне позначення операційного підсилювача: а – колишнє; б – сучасне

Тут:

- $U_{\text{ВХ1}}$ – інвертуючий вхід;
- $U_{\text{ВХ2}}$ – неінвертуючий вхід;
- $U_{\text{ВХ}}$ – вихід ОП;
- $+E_1$ та $-E_2$ – входи живлення.

ОП за своїми параметрами наближається до ідеального, а саме:

- нескінченно великий коефіцієнт підсилення за напругою;
- нескінченно великий вхідний опір;
- нескінченно малий вихідний опір;
- рівність нулю вихідної напруги при рівних напругах на обох входах.

Реалізацію цих вимог частково пояснює еквівалентна схема ОП (рис. 7.2). Вона містить два входи $U_{\text{ВХ1}}$ та $U_{\text{ВХ2}}$, перший з яких повертає фазу сигналу на 180° і тому називається *інвертуючим*, а другий – не повертає і називається *неінвертуючим*.

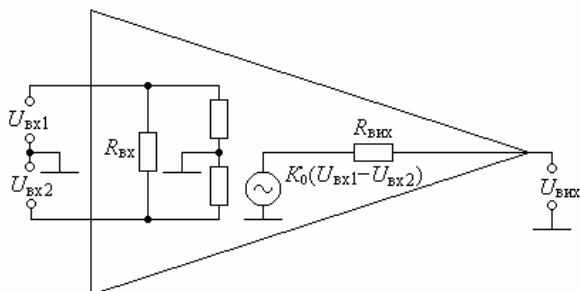


Рис. 7.2. Еквівалентна схема операційного підсилювача

Вихідний сигнал $U_{\text{ВХ}}$ забезпечується якимось умовним генератором з напругою $K_0(U_{\text{ВХ2}} - U_{\text{ВХ1}})$, де K_0 – власний коефіцієнт підсилення, який для сучасних ОП становить $10^5 \dots 10^6$. З таким великим коефіцієнтом підсилення ОП випускаються промисловістю, а користувач має вміти одержувати будь-яке потрібне підсилення (про це йдеться нижче).

Отже, ОП підсилює різницю ($U_{\text{вх}2} - U_{\text{вх}1}$) і тому вихідна напруга становить

$$U_{\text{вих}} = K_0 (U_{\text{вх}2} - U_{\text{вх}1}). \quad (7.1)$$

З формули (7.1) випливає, що вихідна напруга $U_{\text{вих}}$ найбільша для диференціальних (протифазних) сигналів ($U_{\text{вх}2} = -U_{\text{вх}1}$) і дорівнює нулю при синфазних сигналах ($U_{\text{вх}2} = U_{\text{вх}1}$), тобто ОП підсилює протифазні і придушує синфазні сигнали.

Однак, повного придушення синфазних сигналів практично не буває, але чим менше $U_{\text{вих}}$ від підсилення ($U_{\text{вх}2} = U_{\text{вх}1}$), тим вище якість ОП. Оцінкою цієї якості є *коефіцієнт ослаблення синфазного сигналу* (КОСС).

$$\text{КОСС} = \frac{K_0}{K_{\text{сс}}}, \quad (7.2)$$

де $K_{\text{сс}} = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх сс}}}$ – коефіцієнт підсилення синфазного сигналу;

$$U_{\text{вх сс}} = U_{\text{вх}1} = U_{\text{вх}2}.$$

Завжди $\text{КОСС} \gg 1$ і чим більше, тим вище якість ОП.

Структура ОП (рис. 7.3) містить на вході *вхідний каскад* ВК, а на виході – *кінцевий каскад* КК, які зв'язані через *проміжний каскад* підсилення ПК.

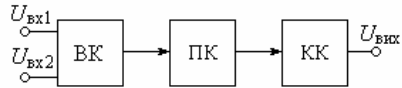


Рис. 7.3. Структурна схема операційного підсилювача

7.2.1. Вхідний каскад ОП

Основним призначенням *вхідного каскаду* ВК є придушення наведень. Вхідним каскадом є резистивний диференціальний підсилювач. Схема резистивного диференціального підсилювача здійснюється на підставі розгалужувального з'єднання (див. розд. 5).

Резистивний диференціальний підсилювач, принципова схема якого наведена на рис. 7.4, є симетричним розгалужувальним з'єднанням на транзисторах $VT1$ та $VT2$, які створюють два підсилювачі зі спільними емітерами і диференціальними входами $U_{\text{вх}1} = -U_{\text{вх}2}$. Розгалужувальним з'єднанням є перше коло $VT1$ та друге $VT2$ разом з джерелом незмінного струму $I_0 = I_{K1} + I_{K2} = \text{const}$. Сигнали

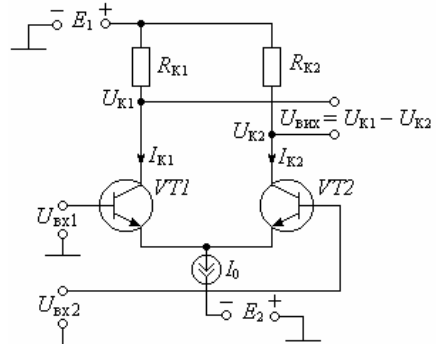


Рис. 7.4. Принципова схема диференціального підсилювача

$U_{\text{вх1}}$ та $U_{\text{вх2}}$, підсилюючись, створюють колекторні напруги $U_{\text{К1}}$ та $U_{\text{К2}}$ так само, як і в одноконтурному підсилювачі.

Диференційний підсилювач працює наступним чином. Якщо кожний підсилювач на $VT1$ та $VT2$ збільшує вхідну напругу в K разів, то колекторні напруги становлять

$$U_{\text{К1}} = -K U_{\text{вх1}}, \quad (7.3)$$

$$U_{\text{К2}} = -K U_{\text{вх2}}. \quad (7.4)$$

Тоді вихідна напруга визначиться як

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{К1}} - U_{\text{К2}} = K(U_{\text{вх2}} - U_{\text{вх1}}). \quad (7.5)$$

При синфазних сигналах

$$U_{\text{вх1}} = U_{\text{вх2}} \quad (7.6)$$

вихідна напруга (7.5) дорівнює нулю ($U_{\text{вих}} = 0$), бо знаки колекторних напруг (7.3), (7.4) однакові. Так здійснюється придушення будь-якого синфазного сигналу (7.6).

За наявності диференційного сигналу

$$U_{\text{вх2}} = -U_{\text{вх1}} \quad (7.7)$$

знаки колекторних напруг (7.3), (7.4) протилежні, через що вихідна напруга сигналу відрізняється від нуля:

$$U_{\text{вих}} = -2 K U_{\text{вх1}}. \quad (7.8)$$

Таким чином диференційний резистивний підсилювач підсилює протифазні сигнали (7.7) і придушує синфазні (7.6).

Крім цього, диференційний підсилювач має ту необхідну перевагу, що придушує наведення. Це здійснюється наступним чином.

Напруга наведень $U_{\text{н}}$ в обох колекторах є синфазною, через що за наявності сигналу (7.7) колекторні напруги (7.3), (7.4) визначаються як

$$U_{\text{К1}} = -K U_{\text{вх1}} + U_{\text{н}}, \quad (7.9)$$

$$U_{\text{К2}} = +K U_{\text{вх1}} + U_{\text{н}}. \quad (7.10)$$

Підставляючи (7.9) та (7.10) в (7.5), одержуємо залежність (7.8), тобто вихідна напруга є вільною від наведень, незважаючи на те, що в кожному колекторному колі вони є.

Таким чином, диференційний підсилювач придушує синфазні сигнали й наведення і підсилює тільки диференційні сигнали, здійснюючи певну завадостійкість.

Щодо джерела незмінного струму

$$I_0 = I_{K1} + I_{K2} = \text{const}, \quad (7.11)$$

то воно живить розгалужувальне з'єднання ($VT1; VT2$) і призначене для надання можливості керувати підсилювачем лише по одному входу. З співвідношення (7.11) видно, що при змінненні будь-якого струму I_{K1} чи I_{K2} у певному напрямі інший струм має змінити напрям на протилежний.

Нехай вхід $U_{\text{вх}2}$ закорочений, а до $U_{\text{вх}1}$ подається сигнал U_c (рис. 7.5). Незважаючи на те, що вхід $U_{\text{вх}2}$ закорочений, транзистор $VT2$, завдяки I_0 , також охоплений сигналом.

Дійсно, при збільшенні $U_{\text{вх}1} = U_c$ транзистор $VT1$ додатково відкривається, тобто зростає I_{K1} , через що I_{K2} згідно з (7.11) має зменшитись. Це відбувається наступним чином.

Через зростання струму I_{K1} на опорі джерела I_0 збільшується падіння напруги, яке прикладене до емітерного переходу $VT2$ у зворотному напрямі. Тому $VT2$ запирається, зменшуючи струм I_{K2} . Так, наявність джерела струму I_0 зумовлює керування обома транзисторами, незважаючи на те, що сигнал U_c потрапляє лише до одного. Без джерела I_0 транзистор $VT2$ не керувався б.

П о п е р е д ж е н н я. Оскільки входами ОП “обірвані” бази транзисторів, то вони обов'язково повинні мати коло за постійним струмом.

Недоліком диференційного резистивного підсилювача є відносно малий коефіцієнт підсилення (не більше сотні). Однак диференційні підсилювачі сучасних ОП повинні мати коефіцієнт підсилення близько мільйона. Таке високе підсилення забезпечує проміжний каскад.

7.2.2. Проміжний каскад ОП

Основним призначенням *проміжного каскаду* є забезпечення високого коефіцієнта підсилення.

Діаграма роботи резистивного підсилювача (рис. 7.6) пояснює проблему одержання високого підсилення, з якої видно, що для підвищення коефіцієнта підсилення треба за одним і саме тим же сигналом $I_{\text{мб}}$ збільшити вихідну напругу від $U_{\text{мвих}1}$ до $U_{\text{мвих}2}$. Для цього лінія навантаження 2 має розміщуватись під меншим кутом, ніж лінія 1. Це досягається лише при збільшенні опорів навантаження від R_{K1} до R_{K2} , що спричиняє підвищення напруги живлення від E_{K1} до E_{K2} , тобто лінія навантаження

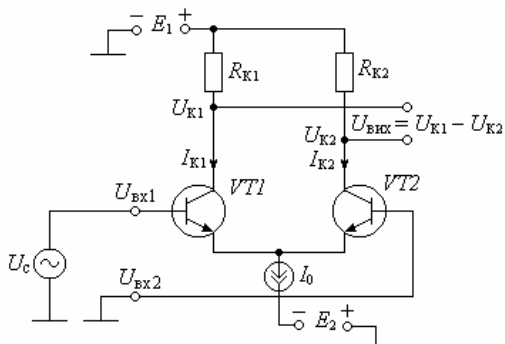


Рис. 7.5. Диференційний каскад з керуванням по одному входу

$$I_K = \frac{E_K}{R_K} - \frac{U_K}{R_K} \quad (7.12)$$

повинна наближатися до ВАХ джерела струму.

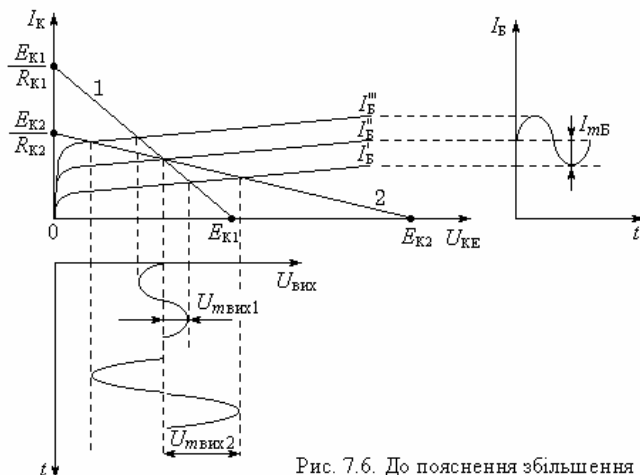


Рис. 7.6. До пояснення збільшення підсилення

Опір джерела струму

$$R_{\text{вих}} = \frac{dU_{\text{вих}}}{dI_{\text{вих}}}, \quad (7.13)$$

ВАХ якого наведена на рис. 7.7, є нескінченно великим, але при цьому постійну напругу живлення U_0 не треба підвищувати, як у резистивному підсилювачі. Вона може бути скільки завгодно малою, бо положення робочої точки РТ не впливає на $R_{\text{вих}}$.

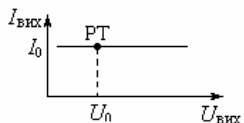


Рис. 7.7. ВАХ джерела струму

ВАХ ідеального джерела струму здійснити важко, бо треба необмежено збільшувати напругу живлення E_K , але при розгляданні діаграми роботи (рис. 7.6) видно, що підвищення підсилення можна здійснити, якщо одержати лінію навантаження вигляду 2, тобто достатньо полого.

Такою лінією навантаження може бути вихідна ВАХ транзистора (рис. 7.8).

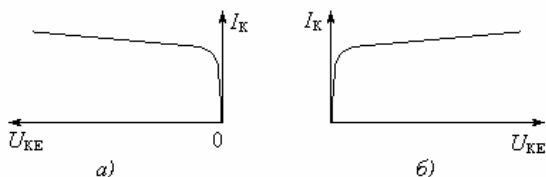


Рис. 7.8. Вихідні ВАХ транзисторів: а – типу $p-n-p$; б – типу $n-p-n$

Якщо вихідне коло транзистора “колектор-емітер” включити в колектор іншого транзистора, то ці транзистори будуть колекторним навантаженням один у одного. Із зіставлення рис. 7.8,а та 7.8,б випливає, що згадані два транзистори мають бути протилежних провідностей. Таке з’єднання транзисторів реалізоване в диференційному підсилювачі з динамічним навантаженням.

Диференційний підсилювач з динамічним навантаженням, принципова схема якого наведена на рис. 7.9, містить транзистор $VT4$, який має навантаженням коло “колектор-емітер” $VT3$, а навантаженням транзистора $VT3$ є коло “колектор-емітер” $VT4$.

Розглянемо роботу підсилювача при підведенні сигналу лише до одного входу $U_{вх1}$. Другий вхід $U_{вх2}$ закорочений.

Транзистори $VT1$ та $VT3$ створюють так зване *струмове дзеркало*, тобто колекторні струми цих транзисторів завжди рівні:

$$I_{K1} = I_{K3} \quad (7.14)$$

Це пояснюється тим, що емітерні переходи $VT1$ та $VT3$ перебувають під однією й самою ж напругою U_{BE} , яка встановлюється резистором R_d .

Транзистор $VT1$ ввімкнений за діодною схемою, тобто він є діодом. Його струм I_{K2} визначається мірою відкриття транзистора $VT1$ сигналом $U_{вх1}$. Через це сигнал $U_{вх1}$ визначає струм

$$I_{K2} \approx I_{K1} \quad (7.15)$$

Тому сигнал $U_{вх1}$ визначає струм I_{K2} , якому згідно з (7.14) та (7.15) дорівнює струм I_{K3} .

Підсилювач з динамічним навантаженням працює наступним чином.

У початковому стані при $U_{вх1} = 0$, як і завжди завдяки струмовому дзеркалу, спостерігається рівність струмів $I_{K4} = I_{K3}$ (рис. 7.10). Через це вихідна напруга $U_{вих} = U_{OK}$ визначається робочою точкою РТ.

Подано сигнал. Нехай напруга $U_{вх1}$, яку треба підсилити, зростає. При цьому транзистор $VT2$, додатково відкриваючись, збільшує струм I_{K2} , через що зростає струм бази I_{B3} транзистора $VT3$ від I_{B3} до $I_{B3} + \Delta I_B$.

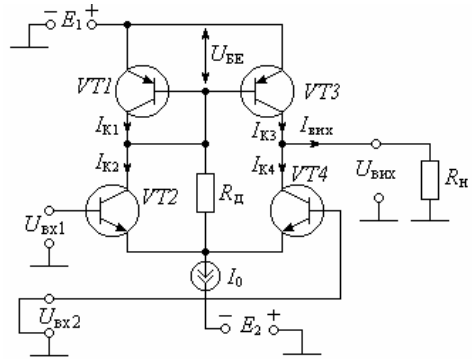


Рис. 7.9. Диференційний підсилювач з динамічним навантаженням

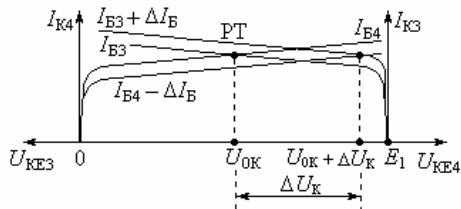


Рис. 7.10. Діаграма роботи диференційного підсилювача з динамічним навантаженням

Збільшений струм I_{K2} створює на опорі джерела I_0 падіння напруги, яка прикладається до емітерного переходу $VT4$ у зворотному напрямі. Тому струм бази I_{B4} транзистора $VT4$ зменшується від I_{B4} до $I_{B4} - \Delta I_B$.

Вихідний опір транзистора $VT3$ зменшується, а $VT4$ – зростає. Тому вихідна напруга збільшується на ΔU_K і становить

$$U_{\text{вих}(+)} = U_{0K} + \Delta U_K. \quad (7.16)$$

При зменшенні $U_{\text{вх}1}$ вихідна напруга зменшується на ΔU_K і становить

$$U_{\text{вих}(-)} = U_{0K} - \Delta U_K. \quad (7.17)$$

Через високий вихідний опір транзисторів змінення вихідної напруги

$$\Delta U_{\text{вих}} = U_{\text{вих}(+)} - U_{\text{вих}(-)} = 2 \Delta U_K \quad (7.18)$$

значне, що забезпечує високий коефіцієнт підсилення.

7.2.3. Кінцевий каскад ОП

Кінцевий каскад ОП має забезпечити малий вихідний опір та нульову вихідну напругу при $U_{\text{вх}1} = U_{\text{вх}2}$. Це досягається тим, що кінцевим каскадом є *комплементарний емітерний повторювач* (рис. 7.11), що живиться від двох різнополярних джерел $+E_1$ та $-E_2$.

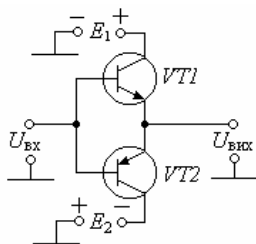


Рис. 7.11. Структурна схема комплементарного емітерного повторювача

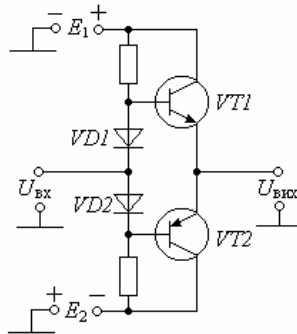


Рис. 7.12. Принципова схема комплементарного емітерного повторювача

Комплементарною називається пара транзисторів з протилежними типами провідностей: $VT1$ типу $n-p-n$, а $VT2$ типу $p-n-p$.

Комплементарний емітерний повторювач діє наступним чином.

У початковому стані при $U_{\text{вх}} = 0$ обидва транзистори закриті. Оскільки їхні колектори живляться від різнополярних джерел напруги $+E_1$ та $-E_2$, то при $|E_1| = |E_2|$ вихід перебуває під нульовим потенціалом $U_{\text{вих}} = 0$. З поданням

сигналу $U_{\text{вх}} > 0$ закривається транзистор $VT2$ і відкривається $VT1$, пропускаючи частину напруги $+E_1$ до виходу, забезпечуючи $U_{\text{вих}} > 0$.

Зменшення ж напруги сигналу $U_{\text{вх}} < 0$ закриває $VT1$ і відкриває $VT2$, пропускаючи до виходу частину напруги $-E_2$ і створюючи саме тим $U_{\text{вих}} < 0$.

Отже, вихідний сигнал змінюється навколо нульової вихідної напруги $U_{\text{вих}} = 0$.

Недоліком повторювача (рис. 7.11) є режим C . Тому доки $U_{\text{вх}}$ не перевищить $0,7$ В, транзистори не відкриваються, тобто від амплітуди сигналу віднімається $0,7$ В.

Для усунення цього недоліку входи транзисторів зміщують прямою напругою діодів (рис. 7.12). Це зміщення створюється на діодах $VD1$ та $VD2$, пряма напруга ($0,7$ В) яких додається до $U_{\text{вх}}$. Ця напруга виводить транзистори на межу відкриття без зменшення вхідного сигналу, як у схемі (рис. 7.11).

7.3. Каскади на операційних підсилювачах

7.3.1. Приймач струму

Приймач струму, схема якого наведена на рис. 7.13, наближається до ідеального і є базовим каскадом багатьох пристроїв на операційних підсилювачах (ОП).

Живлення входів забезпечується тим, що неінвертуючий вхід підключений до нульової шини, а інвертуючий – через резистор від'ємного зворотного зв'язку R_{33} до виходу. Ця схема живлення входів є найбільш розповсюдженою для більшості каскадів на ОП.

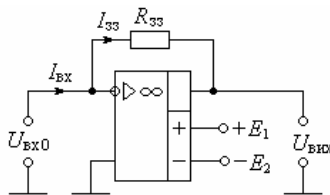


Рис. 7.13. Приймач струму

Критерієм ідеального приймача струму є нехтовно малий вхідний опір

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}0}}{I_{\text{вх}}} \rightarrow 0. \quad (7.19)$$

Покажемо це.

Оскільки вхідний опір входів саме ОП нескінченно великий, то вхідний струм $I_{\text{вх}}$ цілком тече по колу R_{33} :

$$I_{\text{вх}} = I_{33}. \quad (7.20)$$

Тоді вихідна напруга в будь-якому каскаді, який охоплений колом R_{33} , визначається як

$$U_{\text{вих}} = I_{33} R_{33}. \quad (7.21)$$

З формул (7.19) та (7.21) маємо