

Лекція 7. Операційні підсилювачі

Операційним підсилювачем (ОП) називають багатокаскадний диференціальний підсилювач постійного струму з двома входами і одним виходом.

Свою назву операційні підсилювачі отримали через те, що спочатку застосовувалися для виконання математичних операцій складання, віднімання, множення і ділення. Перші ОП, які використовувалися в аналогових обчислювальних машинах на лампах, працювали з напругою порядку ± 100 В.

Інтегральні ОП успадкували колишню назву від своїх попередників і дуже широко поширені в аналоговій схемотехніці. В даний час ОП виконуються, як правило, у вигляді монолітних інтегральних мікросхем і по своїх розмірах і ціні практично не відрізняються від окремо взятого транзистора. Завдяки практично ідеальним характеристикам операційних підсилювачів реалізація різних схем на їх основі виявляється значно простішою, ніж на окремих транзисторах.

Операційний підсилювач представляє собою пристрій з великим коефіцієнтом підсилення, великим входним опором, малим вихідним опором, великим динамічним діапазоном,

Умовне графічне позначення операційного підсилювача показано на рисунку 7.1.

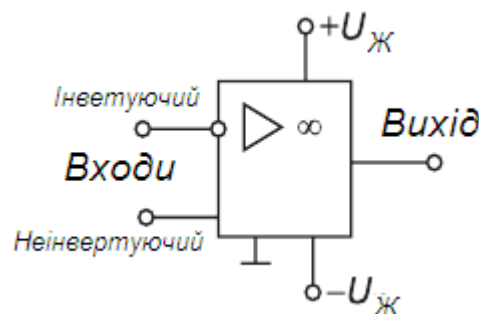


Рисунок 7.1 - Умовне графічне позначення операційного підсилювача

ОП живиться від джерела біполярної напруги. Вхідний сигнал не обов'язково повинен бути диференціальним (поступати на обидва входи), його можна подавати на один із входів ОП, заземлюючи другий.

В залежності від полярності сигналів на вході і виході один із входів називають інвертуючим, а другий – неінвертуючим. При подачі сигналу на вхід, який не інвертується, збільшення вихідного сигналу збігається за знаком (фазі) зі збільшенням вхідного сигналу. Якщо ж сигнал поданий на вхід, інвертується, то збільшення вихідного сигналу має зворотний знак (протилежний по фазі) у порівнянні зі збільшенням вхідного сигналу. Інвертуючий вхід часто використовується для введення в ОП зовнішніх негативних зворотних зв'язків. Живлення ОП здійснюється від двох джерел $E1$ і $E2$ з однаковими напругою. Джерела живлення мають загальну точку.

Найважливішим показником операційного підсилювача є коефіцієнт підсилення K_U .

$$K_U = \Delta U_{вих} / \Delta U_{вх}$$

Значення залежить від операційного підсилювача і може становити від декількох сотень до сотень тисяч і більше. Великі значення K_U отримують при охопленні таких підсилювачів глибоким негативним зворотним зв'язком, це дозволяє одержувати схеми із властивостями, які залежать тільки від параметрів кола від'ємного зворотного зв'язку. Найважливішими характеристиками ОП є його амплітудні (передатні) характеристики (рис. 7.2).

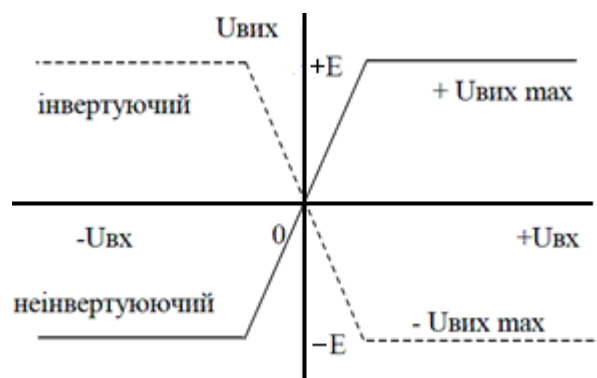


Рисунок 7.2 - Амплітудні (передатні) характеристики операційного підсилювача

Характеристики знімаються при подачі сигналу на один із входів, при нульовому сигналі на іншому. Кожна із кривих складається з горизонтальних

і похилих ділянок. Горизонтальні ділянки відповідають насиченню підсилювача. Похилій (лінійній) ділянці кривих відповідає пропорційна залежність вихідної напруги від вхідної. Кут нахилу ділянки визначається коефіцієнтом підсилення K_U .

7.1 Структурна схема операційного підсилювача

Реалізація властивостей ОП здійснюється виконанням їх по визначеним функціональним схемам. Для отримання великого коефіцієнта підсилення до складу ОП включають диференціальний підсилювач (ДП) (підсилювач з двома входами у якому вихідна напруга пропорційна різниці напруг на входах) і підсилювач напруги (ПН), вхід якого з'єднаний з виходом диференціального підсилювача.

Диференціальний каскад забезпечує: великий коефіцієнт посилення по відношенню до різниці вхідних сигналів (диференціальному сигналу), малий коефіцієнт посилення щодо синфазних перешкод, малий дрейф нуля і великий вхідний опір.

Підсилювач напруги може виконуватися по схемі диференціального підсилення, або по іншій схемі (однополюсний каскад). Малий вихідний опір і великий динамічний діапазон ОП досягається виконанням його вихідного каскаду по схемі емітерного повторювача (ЕП).

Підсилювач напруги дозволяє: отримати велике посилення напруги сигналу, змінити на 180° або зберегти нульовим фазове зрушення підсилюваного сигналу.

З метою забезпечення нульового потенціалу виходу ОП при відсутності вхідних сигналів між підсилювачем напруги і емітерним повторювачем включається каскад зсуву рівня (КЗР). Зазвичай КЗУ, який використовують в ОП, володіє підсилювальними властивостями, тому вважають, що підсилення напруги в ОП здійснюється трьома каскадами, а сам ОП називають трьохкаскадним (К140УД1, К153 УД1, К553УД1 та др.). Структурна схема такого підсилювача представлена на рисунку 7.3.

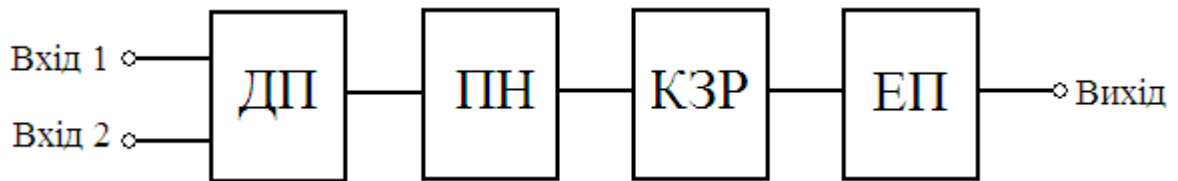


Рисунок 7.3 - Структурна схема трьохкаскадного операційного підсилювача

Схемотехніка останніх років дозволила передати функції зсуву рівня другому каскаду підсилення. У цьому випадку підсилення папруги здійснюється двохкаскадним підсилювачем, а ОП називають двохкаскадним (К140УД7, К140УД14, К153УД2). Структурна схема двохкаскадного підсилювача представлена на рисунку 7.4.

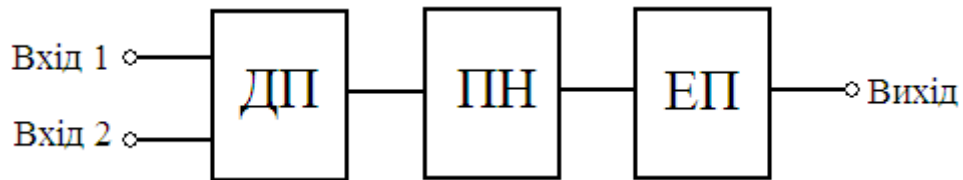


Рисунок 7.4 - Структурна схема двохкаскадного операційного підсилювача

7.1.1 Диференціальний підсилювач

Основою інтегрального ДП являється пара транзисторів з погодженими характеристиками. Проста схема ДП включає два симетричних плеча, кожне з яких складається з транзистора і резистора (рис. 7.5).

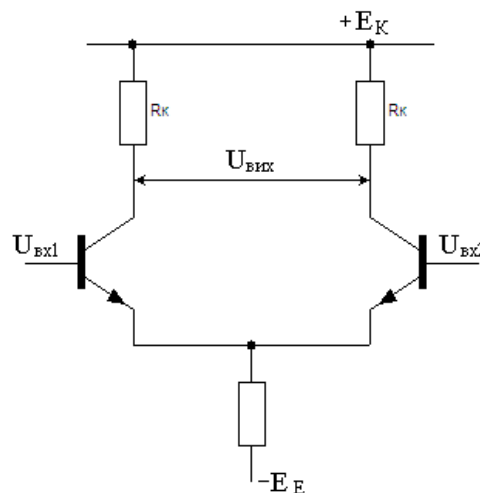


Рисунок 7.5 – Диференціальний підсилювач

$$U_{вих} = (U_{ex1} - U_{ex2}) K_U$$

Структура ДП аналогічна перемикачу струму, але режим роботи інший: жоден з транзисторів не замкнутий, вони обидва працюють в активному режимі.

При відсутності вхідних сигналів струми та колекторні потенціали будуть однаковими, а вихідна напруга – дорівнює нулю.

У силу симетрії нульове значення напруги $U_{вих}$ збережеться при одночасній однаковій зміні струмів в обох плечах, якими би причинами такі зміни не визивалися.

Тобто, у ідеальному ДП дрейф вихідної напруги відсутній, хоча в кожному із плечей вона може бути порівняно великою. Ідеальний ДП реагує лише на диференціальний сигнал

$$U_D = U_{ex1} - U_{ex2}$$

У двохкаскадному ДП (коли підсилювач напруги (ПН) виконано по схемі диференціального підсилювача) використовується безпосередні міжкаскадні зв'язки (рис. 7.4).

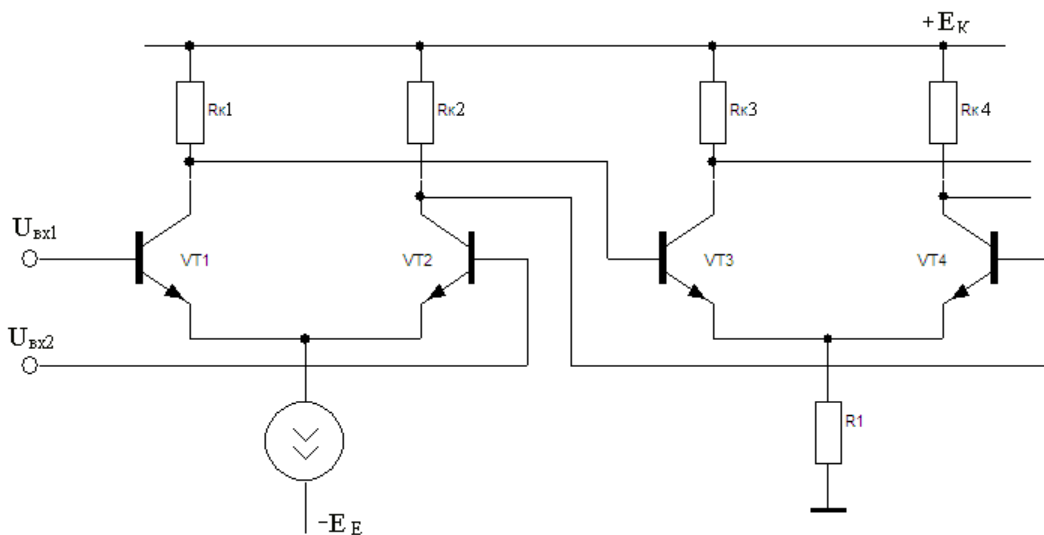


Рисунок 7.4 – Двохкаскадний диференціальний підсилювач

Перший каскад повинен володіти здатністю підсилювати вхідну напругу U_{ex1} і U_{ex2} обох полярностей. Тому вихідна робоча точка його транзисторів вибирається так, щоб в режимі спокою напруги на колекторах мали значну

величину, яка забезпечує переміщення робочої точки під впливом сигналів як у напрямі до насичення, так і у напрямі до їх відсічення.

При $U_{ex1} = U_{ex2} = 0$ транзистори $VT1$ і $VT2$ заперті. На колекторах цих транзисторів напруга буде дорівнювати E_K і вона приведе транзистори $VT3$ і $VT4$ у глибоке насичення. Тому у їх загальне емітерне коло підключається резистор R , падіння напруги на якому зменшує напругу на емітерних переходах цих транзисторів.

Включення резистора R приводить до того, що колектори транзисторів $VT3$ і $VT4$ виявляються під ще більшим позитивним потенціалом відносно заземленої шини, чим колектори транзисторів першого каскаду $VT1$ і $VT2$.

Приведення вихідного потенціалу підсилювача напруги до мулевого рівня (при відсутності вхідних сигналів, тобто при $U_{ex1} = U_{ex2} = 0$) забезпечується каскадом зрушення рівня.

7.1.2 Каскади зрушення рівня

Забезпечення нульового потенціалу на виході ПН – одне з основних завдань каскаду зрушення рівня.

Проста схема зрушення рівня, яка використовується і в логічних елементах – схема емітерного повторювача. Напруга на навантаженні такої схеми відрізняється від вхідної напруги на величину падіння на ділянці база-емітер (рис. 7.5)

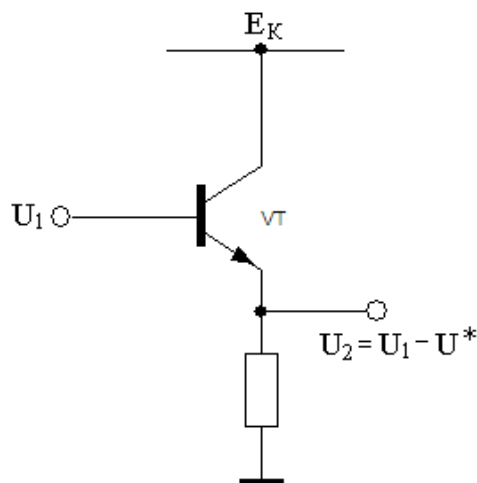


Рисунок 7.5 - Проста схема зрушення рівня

У багатьох випадках величини зрушення рівної U^* виявляється недостатньо. Тоді застосовують складніші схеми. Одним з різновидів такої схеми є каскад з генерацією струму, який використовується для зрушення рівня в ОП (рис. 7.6).

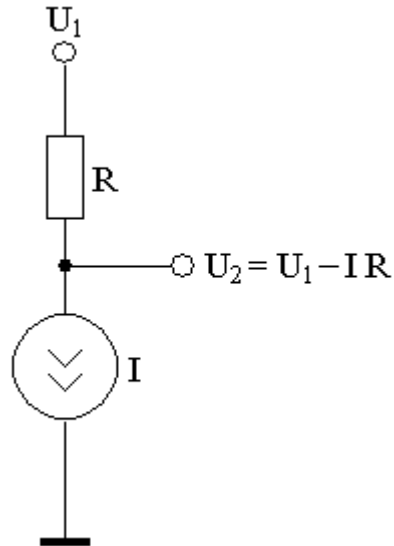


Рисунок 7.6 - Каскад з генерацією струму

Як генератор струму використовуються транзистори з фіксованою напругою на переході база-емітер. Фіксація рівня вказаної напруги забезпечується підключенням бази струмозадаючого транзистора до середньої точки A дільника напруги, який складається з послідовно включеного резистора і транзистора в діодному включенні (або діода) (рис. 7.7).

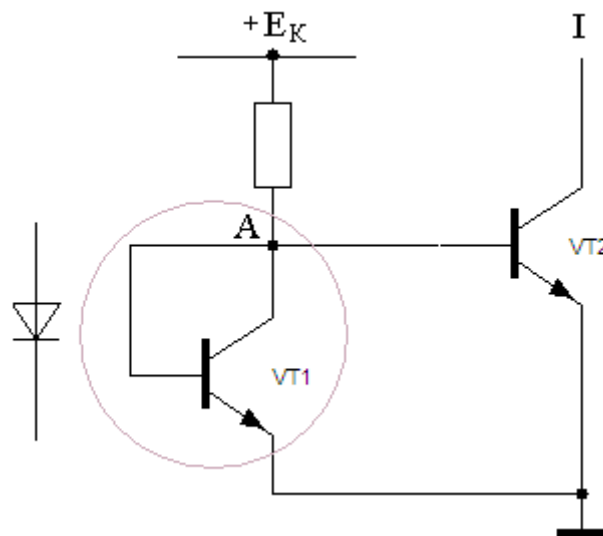


Рисунок 7.7 – Варіант генератора струму

7.1.3 Вихідний каскад операційного підсилювача

Принципова схема типового емітерного повторювача, який використовується у якості вихідного каскаду, приведена на рисунку 7.8.

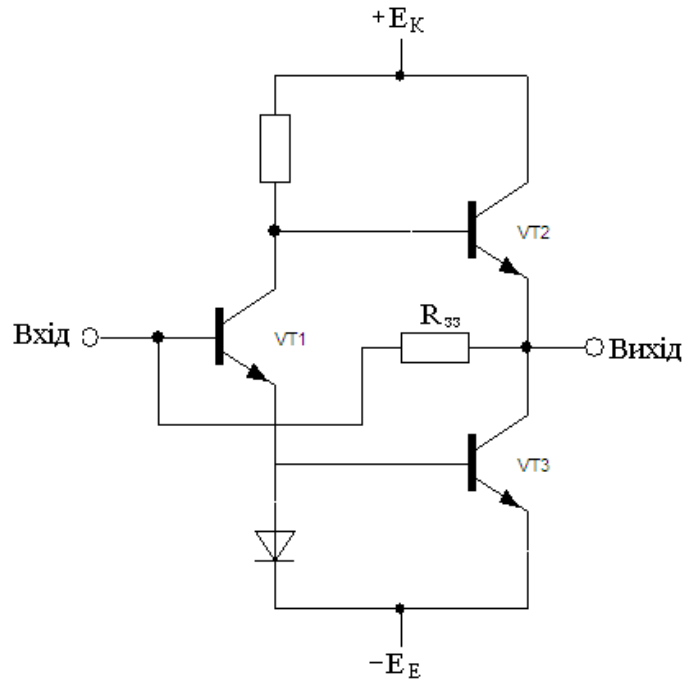


Рисунок 7.8 – Вихідний каскад операційного підсилювача

Каскад підсилення на транзисторі $VT1$ являється управляючим для емітерного повторювача на транзисторі $VT2$ з нелінійним навантаженням транзистором $VT3$.

Резистор міжкаскадного зворотного зв'язку R_{33} грає роль стабілізуючого елемента.

При нульовій напрузі на входах ОП ($U_{ex1} = U_{ex2} = 0$) потенціал виходу емітерного повторювача близький до потенціалу заземленої шини, а при вступі вхідних сигналів відхиляється в обидві сторони майже до $+E_K$ і $-E_E$.

Для вихідного каскаду, як і для емітерного повторювача характерні:

- великий вхідний опір R_{ex} ;
- малий вихідний опір;
- коефіцієнт підсилення напруги $K_U < 1$;
- коефіцієнт підсилення струму $K_I > 1$;
- коефіцієнт підсилення потужності $K_P > 1$;

7.1.4 Узагальнена схема операційного підсилювача

Розглянуті каскади ОП з'єднуються між собою по схемі, яка приведена на рисунку 7.9

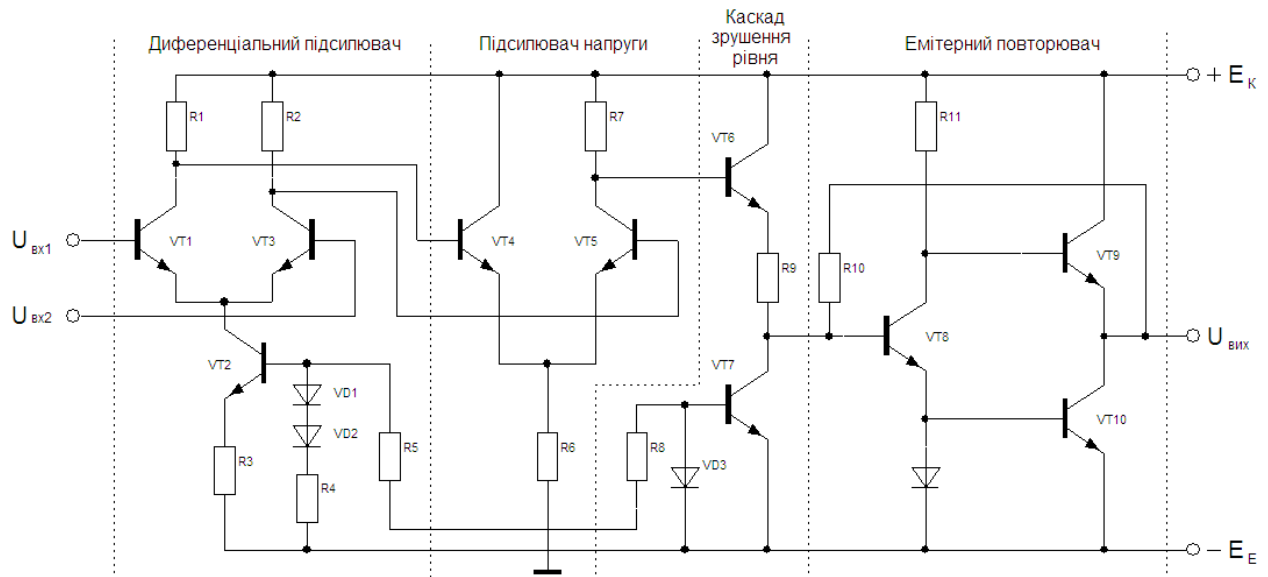


Рисунок 7.9 - Узагальнена схема операційного підсилювача

Аналізуючи проходження вхідних сигналів $U_{вх1}$ і $U_{вх2}$ скрізь каскади ОП неважко переконатися, що сигнал $U_{вх1}$ на виході диференціального підсилювача фази не змінює, а сигнал $U_{вх2}$ інвертується.

7.2 Підключення ОП до джерела живлення

Будь-який ОП має не менше п'яти виводів: два вхідних (інвертуючий і неінвертуючий), два виводи для підключення живлення і один вихідний вивід. Варіанти позначення операційних підсилювачів на принципових схемах представлені на рисунку 7.10 (1 – інвертуючий вхід, 2 – неінвертуючий вхід, 3 – вихід, 4 і 5 – виводи для підключення джерела живлення).

Багато ОП додатково мають декілька виводів, які не несуть функціонального навантаження (допоміжні), до яких підключаються кола корекції АЧХ, кола для підключення елементів балансування по постійному струму, а також виведення металевого корпусу (\perp) для з'єднання із загальним дротом пристрою, в який входить ОП.

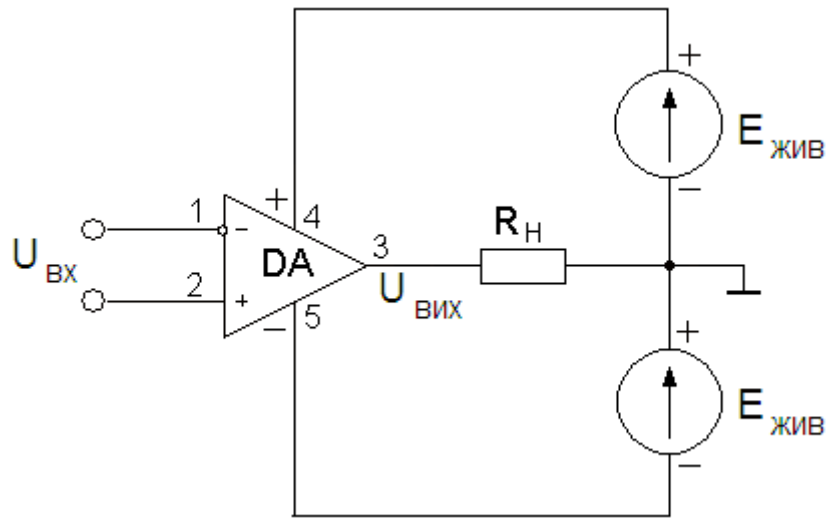


Рисунок 7.10 – Типова схема включення операційного підсилювача

Напругу живлення для більшості ОП можна довільно змінювати у широких межах. У загальному випадку для роботи операційного підсилювача потрібне двохполярне джерело живлення; типові значення напруги джерела складають ± 6 В; ± 12 В; ± 15 В (іноді 18 В). Схема підключення ОП до двохполярного джерела живлення і навантаження представлена на рисунку 7.11.

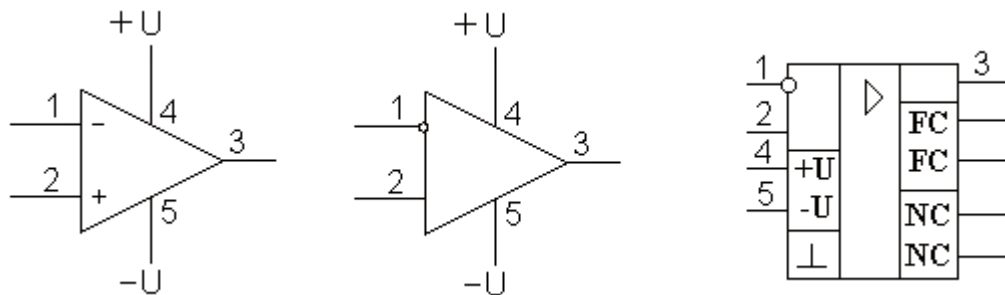


Рисунок 7.11 – Позначення операційного підсилювача на електричних схемах

У ряді випадків для живлення ОП використовується несиметричне живлення, наприклад $+12$ В і -6 В, або навіть однополярне живлення, наприклад $+30$ В і земля. Оскільки в представленій схемі земля не підключена до ОП, струми повертаються від ОП до джерела живлення через зовнішні (навісні) елементи схеми (у нашому випадку це опір навантаження R_H).

Вихідний сигнал $U_{вих}$ забезпечується якимось умовним генератором з наругою $K_0 \cdot (U_{ex2} - U_{ex1})$, де K_0 – власний коефіцієнт підсилення, який для сучасних ОП становить $10^5 \dots 10^6$.

7.3 Вхідна і вихідна напруга

Вихідна напруга ОП залежить від різниці напруги на його входах:

$$E_D = U_{BX}(+) - U_{BX}(-),$$

де $U_{BX}(+)$ і $U_{BX}(-)$ – напруги на неінвертуючому і інвертуючому входах підсилювача. Тому для ОП справедливо:

$$U_{вих} = K \cdot E_D, \quad (7.1)$$

де K – коефіцієнт посилення ОП без зворотного зв'язку (розімкненого підсилювача). Припустимо, що $E_D > 0$ (напруга на вході (+) позитивна по відношенню до напруги на вході (-)), тоді вихідна напруга позитивна (рис. 7.12 а).

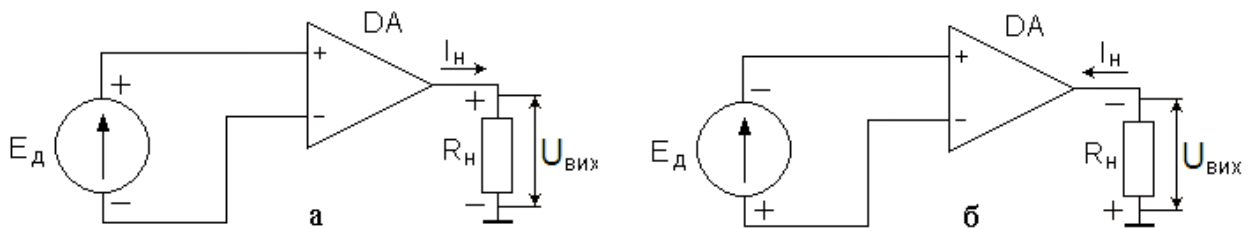


Рисунок 7.12 - Полярність вихідної напруги в залежності від диференціального сигналу: а – при позитивній диференціальній напрузі, б – при негативній диференціальній напрузі

У випадку, якщо $E_D < 0$ (напруга на вході (+) негативна по відношенню до напруги на вході (-)), вихідна напруга негативна (рис. 7.12 б). Загальна залежність $U_{вих} = F(E_D)$ представлена на рисунку 7.13). Вихідна напруга лінійно залежить від E_D лише в деякому діапазоні зміни останнього (від $+E_{max}$ до $-E_{max}$) і не може перевищувати величини напруги джерела живлення.

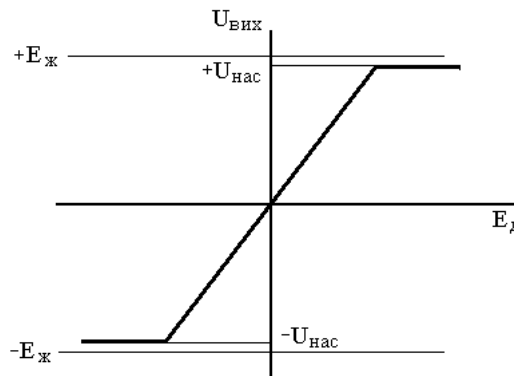


Рисунок 7.13 – Вихідна характеристика ОП

7.4 Два правила, справедливі для ідеального ОП

Визначимо значення $-E_{Д\max}$ і $+E_{Д\max}$. Відповідно до (7.1) маємо

$$\begin{aligned} -E_{Д\max} &= \frac{-U_{НАС}}{K}, \\ +E_{Д\max} &= \frac{+U_{НАС}}{K}. \end{aligned} \quad (7.2)$$

Величина K надзвичайно велика; вона може досягати 200000 одиниць і більш. Приймаючи $K = 200000$, для ОП, який живиться від джерела 12 В, на підставі (7.2) отримаємо:

$$\begin{aligned} -E_{Д\max} &= \frac{-12\text{ В}}{200000} = -60\text{ мкВ}, \\ +E_{Д\max} &= \frac{+12\text{ В}}{200000} = +60\text{ мкВ}. \end{aligned}$$

Тут допущено, що $+U_{нас} = +E_{жс}$ і $-U_{нас} = -E_{жс}$. Напруга 60 мкВ дуже мала. У типовому вимірювальному приладі напруги наведених шумів, мережевих наведень і напруги від струмів витoku можуть перевищувати 1 мВ (1000 мкВ). Через це можна прийняти $+E_{Д\max} = -E_{Д\max} \approx 0$. Останнє дозволяє сформулювати важливе правило.

Правило 1. Якщо ОП знаходиться в лінійному режимі (вихідна напруга $U_{вих} \neq +U_{нас} \neq -U_{нас}$), різниця напруги між його входами дорівнює нулю ($U_{вх(+)} = U_{вх(-)}$).

Для того, щоб ОП працював в лінійному режимі, в схему необхідно ввести негативний зворотний зв'язок (НЗЗ). Образно можна сказати, що будучи охопленим НЗЗ операційний підсилювач зробить все від нього залежне, щоб усунути різницю напруги між своїми входами.

ОП являється хорошим підсилювачем напруги з великим вхідним опором. Для ідеального ОП опори по обох входах можна вважати рівними нескінченності. Звідси слідує друге важливе правило.

Правило 2. Входи ОП струму не споживають.

7.5 Зворотні зв'язки в операційному підсилювачі

Підсилювач із зворотним зв'язком являється електричним колом, яке містить сукупність активних і пасивних елементів, розташованих між його входом і виходом (рис. 7.14).

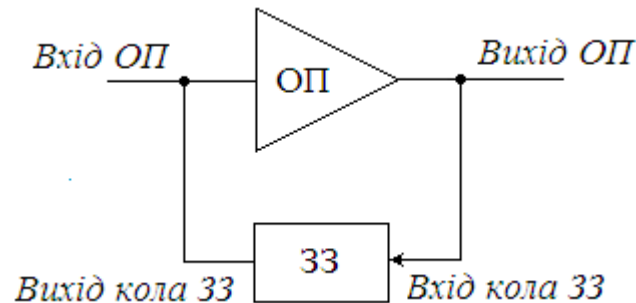


Рисунок 7.14 - Підсилювач із зворотним зв'язком

Зворотний зв'язок називають позитивним, якщо на виході підсилювача амплітуда за рахунок зворотного зв'язку збільшується і негативною – якщо амплітуда зменшується.

Залежно від підключення входу кола зворотного зв'язку відносно навантаження розрізняють зворотний зв'язок по напрузі і зворотний зв'язок по струму (рис. 7.15).

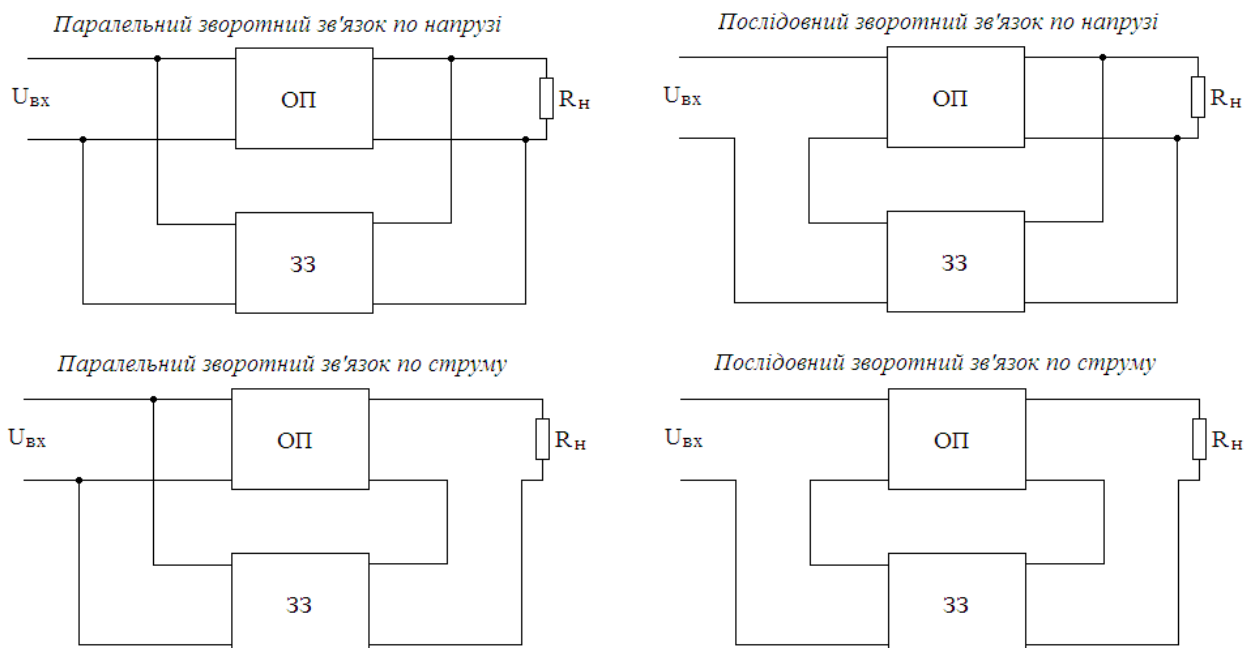


Рисунок 7.15 – Варіанти зворотних зв'язків

Зворотний зв'язок по напрузі - вхід кола зворотного зв'язку підключений паралельно навантаженню.

Зворотний зв'язок по струму - вхід кола зворотного зв'язку підключений послідовно з навантаженням.

Залежно від підключення виходу кола зворотного зв'язку відносно входу підсилювача зворотний зв'язок може бути послідовним і паралельним.

В реальних умовах кола зворотного зв'язку більш складні, тому для визначення характеру зворотного зв'язку використовують правило: якщо у думках замкнути навантаження, то зворотний зв'язок по струму залишається, а зворотний зв'язок по напрузі зникає.

Наявність двох різнополярних входів ОП забезпечує реалізацію як позитивного, так і негативного зворотного зв'язку, що дозволяє змінювати властивості ОП в широких межах і створювати на ньому за допомогою зовнішніх кіл зворотного зв'язку різні пристрої. Особливо великими можливостями володіють ОП охоплені негативним зворотним зв'язком (рис. 7.16)

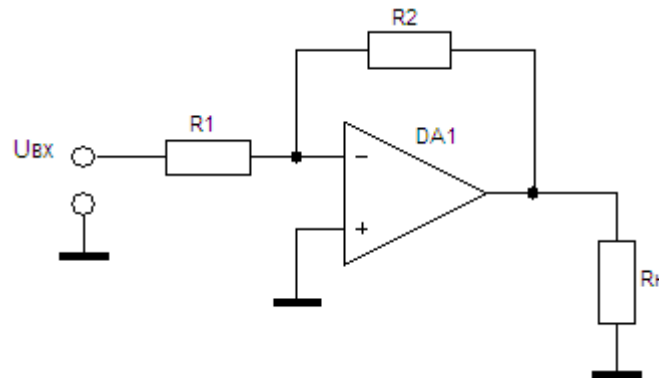


Рисунок 7.16 - ОП охоплений негативним зворотним зв'язком

Класифікуючи характеристики ОП можна отримати вираз для коефіцієнта посилення схеми

$$K = -\frac{R2}{R1}. \quad (5.3)$$

З цього виразу виходить, що за певних умов коефіцієнт посилення схеми залежить лише від параметрів самого ОП (від температури, напруги живлення, зміни коефіцієнтів β).

Умовами при яких справедливий приведений вираз для коефіцієнта посилення, являються:

- суттєво більше значення диференціального коефіцієнта посилення ОП K_D в порівнянні з необхідним коефіцієнтом посилення

$$K_D \gg K;$$

- чим вище гранична частота коефіцієнта посилення K_D , тим в ширшому діапазоні частот дійсний вираз (6.3);

- вплив вхідного опору ОП буде неістотним при

$$R_I \ll R_{ex}.$$

7.6 Властивості операційних підсилювачів

Для пояснення принципу дії операційного підсилювача і схем на його основі скористаємося умовним позначенням ОП (рис. 7.17).

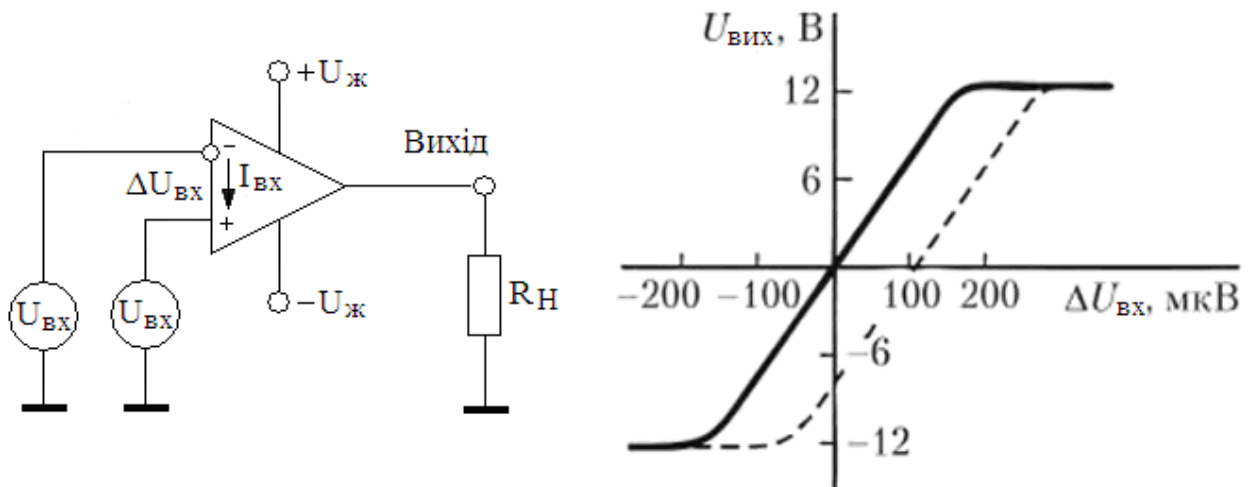


Рисунок 7.17 - Позначення ОП на функціональних схемах і залежність вихідної напруги від диференціального вхідного сигналу

Вхідний каскад виконується у вигляді диференціального підсилювача, так що операційний підсилювач має два входи. Вхід позначений знаком «плюс» називається інвертуючим, а вхід позначений знайомих «мінус» – неінвертуючим. Вхідним сигналом для ОП є різниця між напругою на входах:

$$\Delta U_{ex} = U_{BX}(+) - U_{BX}(-).$$

Для забезпечення можливості роботи ОП як з позитивними, так і з негативними вхідними сигналами, використовується двохполярна напруга живлення. Як правило, стандартні операційні підсилювачі працюють з напругою живлення ± 15 В.

Насправді не існує ідеальних ОП. Для того, щоб можна було оцінити, наскільки той або інший ОП близький до ідеалу, наводяться технічні характеристики підсилювачів.

Диференціальний коефіцієнт посилення операційного підсилювача визначається як:

$$\Delta K_{\text{д}} = \frac{\Delta U_{\text{вих}}}{\Delta U_{\text{вх}}} = \frac{\Delta U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}(+)-U_{\text{вх}}(-)} = \begin{cases} \frac{\Delta U_{\text{вих}}}{\Delta U_{\text{вх}}(+)} \text{ при } U_{\text{вх}}(-) = \text{const} \\ \frac{\Delta U_{\text{вих}}}{\Delta U_{\text{вх}}(-)} \text{ при } U_{\text{вх}}(+)= \text{const} \end{cases}$$

На рисунку 5.17 показана типова залежність вихідної напруги підсилювача від вхідного сигналу. У діапазоні від -12 В до $+12$ В воно залежить від $\Delta U_{\text{вх}}$ майже лінійно. Нелінійність спостерігається лише при наближенні до кордонів діапазону. Цей діапазон вихідної напруги називається областю посилення. В області насичення із зростанням $\Delta U_{\text{вх}}$ збільшення вихідної напруги не відбувається. Кордони області посилення відстоять приблизно на 3В від відповідних позитивної і негативної напруг живлення. При роботі ОП з напругою живлення ± 15 В типовий діапазон області посилення вихідної напруги складає ± 12 В.

Ідеальний ОП при нульовому вхідному сигналі $\Delta U_{\text{вх}} = 0$ повинен мати нульове значення вихідної напруги. У реального підсилювача це не так. Його характеристика показана пунктирною лінією на рисунку 5.17, і при нульовому вхідному сигналі на його виході присутня ненульова вихідна напруга. Для того, щоб зробити вихідну напругу рівною нулю, необхідно на вхід ОП подати деяку напругу зсуву нуля U_0 . Вона складає зазвичай декілька мілівольт.

Оскільки ОП виконується на основі напівпровідників, його характеристики залежать від температури. Так, із зменшенням температури різко зни-

жується коефіцієнт посилення. Зміна температури впливає на величину напруги зсуву нуля і вхідний струм підсилювача, а це робить вплив на точність роботи схем на основі ОП.

Вплив температури оцінюється такими характеристиками реального підсилювача, як температурний дрейф напруги зсуву нуля і температурний дрейф вхідного струму. В кращих операційних підсилювачів температурний дрейф напруги зсуву нуля складає одиниці – долі мікрвольт на один градус, а дрейф вхідного струму складає долі наноампер – одиниці пикоампер (10^{-12} А) на один градус.

Окрім температури ще одним чинником, який змінює параметри ОП, є час роботи. З часом відбувається дрейф напруги зсуву нуля і вхідного струму ОП. Проте ці параметри підсилювача дуже важко нормувати.

7.7 Основні схеми включення операційних підсилювачів

Згідно з двома правилами для ідеального ОП зробимо два допущення.

1. Оскільки ОП має дуже високий власний коефіцієнт посилення K_D (порядку 10^5), а його вихідна напруга може змінюватися від -12В до $+12\text{В}$, то його вхідний сигнал $\Delta U_{\text{вх}} = \Delta U_{\text{вих}} / K_D$ не перевищує долей мілівольт. Тому для аналізу схем можна прийняти, що потенціали на інвертуючому і неінвертуючому входах практично рівні.

2. Оскільки вхідний струм реального підсилювача складає долі мікроампер, можна вважати, що він практично дорівнює нулю.

Розглянемо схему на рисунку 7.18. Оскільки один з входів сполучений з корпусом, потенціал якого прийнятий за нуль, потенціал точки А (згідно з першим допущенням) теж близький до нуля, а значить, струм через резистор дорівнює

$$I_1 = \frac{(U_{\text{вх}} - U_A)}{R1} = \frac{(U_{\text{вх}} - 0)}{R1} = \frac{U_{\text{вх}}}{R1} \quad (7.4)$$

У точці А струм I_1 , розділяється на $I_{\text{вх}}$ і I_2 . При цьому згідно другому допущенню струмом $I_{\text{вх}}$ можна нехтувати, тому: $I_2 = I_1 - I_{\text{вх}} = I_1$ (7.5)

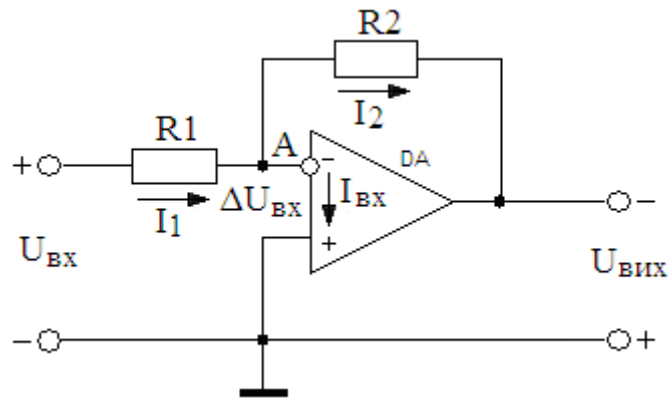


Рисунок 7.18 – Інвертуюча схема включення операційного підсилювача

Напруга $U_{вих}$ повинно встановитися таким, аби забезпечити струм I_2 , який протікає через $R2$ під дією різниці потенціалів ($U_A - U_{вих}$), тобто (з урахуванням того, що $U_A \approx 0$)

$$I_2 = \frac{(U_A - U_{вих})}{R2} = -\frac{U_{вих}}{R2}. \quad (7.6)$$

Підставивши (7.4) і (7.5) в (7.6), отримаємо

$$\begin{aligned} -\frac{U_{вих}}{R2} &= \frac{U_{вх}}{R1} \\ U_{вих} &= -U_{вх} \frac{R2}{R1} \\ \frac{U_{вих}}{U_{вх}} &= -\frac{R2}{R1} \\ K &= -\frac{R2}{R1}. \end{aligned} \quad (7.7)$$

Коефіцієнт посилення схеми визначається лише відношенням опорів і не залежить від власного коефіцієнта посилення підсилювача. Знак «мінус» показує, що подача сигналу на інвертуючий вхід підсилювача наводить до того, що полярність вихідного сигналу протилежна до полярності вхідного, тобто відбувається її інверсія. Приведений аналіз справедливий лише за умови, що вхідний сигнал не перевищує таких значень, при яких напруга $U_{вих}$ знаходиться на лінійній ділянці характеристики підсилювача.

На рисунку 7.19 приведена схема, в якій $U_{\text{вх}}$ подається на неінвертуючий вхід ОП. Її аналіз також легко провести за допомогою вказаних допущень.

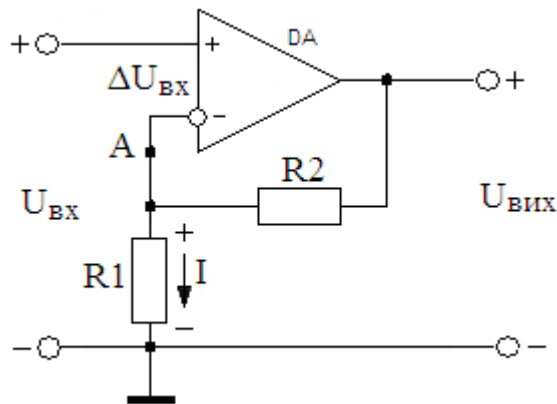


Рисунок 7.19 – Неінвертуюча схема включення операційного підсилювача

При подачі $U_{\text{вх}}$ вказаної полярності напруга $U_{\text{вих}}$ почне зростати до тих пір, поки не досягне значення, при якому падіння напруги на $R1$ струму I , який з'явився, не створить потенціал точки A , приблизно рівний $U_{\text{вх}}$ (за першим допущенням).

При $U_A \approx U_{\text{вх}}$ виявляться виконаними обидва допущення (точніше, обидві умови, відповідної сталому режиму роботи операційного підсилювача):

$$U_{\text{вх}} \approx U_A = I \cdot R1 = \frac{U_{\text{вих}} R1}{R1 + R2}. \quad (7.8)$$

Звідси коефіцієнт посилення схеми

$$K = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{R1 + R2}{R1} = 1 + \frac{R2}{R1}. \quad (7.9)$$

В обох схемах включення ОП використовується негативний зворотний зв'язок. Дійсно, в першій схемі вихідна напруга через резистор $R2$ подається на вхід операційного підсилювача і віднімається з вхідного сигналу, який подається на вхід через резистор $R1$. Оскільки на інвертуючому вході здійснюється порівняння цих двох сигналів, ця точка називається підсумовуючою. Опір знаходиться в прямому колі, а опір $R2$ – в колі зворотного зв'язку. Таким чином, коефіцієнт посилення схеми, який визначається співвідношенням

$R2/R1$, залежить як від параметрів кола зворотного зв'язку, так і від параметрів прямого кола. Принцип дії негативного зворотного зв'язку в схемі можна сформулювати таким чином: за рахунок цього зв'язку ОП вимушений забезпечувати таку величину вихідної напруги, щоб напруга на його інвертуючому вході дорівнювала нулю.

У другій схемі негативний зворотний зв'язок формується за рахунок того, що частина вихідної напруги з дільника подається на інвертуючий вхід. Вхідна напруга $\Delta U_{ex} = U_{ex} - U_A$ при цьому зменшується. Якщо представити коефіцієнт зворотного зв'язку K_{zz} як відношення напруги, яка подається через зворотний зв'язок до вихідної напруги, то:

$$K_{zz} = \frac{U_A}{U_{вих}} = \frac{U_{вих} R1}{(R1 + R2)U_{вих}} = \frac{R1}{R1 + R2}$$

Коефіцієнт посилення другої схеми, таким чином, цілком визначається коефіцієнтом зворотного зв'язку.

Важливим особливим випадком неінвертуючого підсилювача є випадок, коли коефіцієнт посилення схеми K дорівнює одиниці. Для цього вихід ОП безпосередньо з'єднується з інвертуючим входом, тобто $R2 = 0$, а зв'язок з корпусом через $R1$ виключається, тобто $R1 = \infty$. Подібна схема включення ОП називається стежачою. Цю схему використовують, коли джерело сигналу має високий внутрішній опір. Завдяки тому, що ОП має низький вихідний опір, схема забезпечує перетворення опорів. Різниця між вхідною і вихідною напругою в схемі складає декілька мілівольт.

Всі відхилення реального ОП від ідеального, не дивлячись на їх малу величину, роблять вплив на роботу схем, виконаних на його основі. Особливо шкідливо цей вплив визначається у вимірювальних схемах, від яких вимагається висока точність і стабільність роботи протягом достатньо довгого часу. Вхідні струми, напруга зсуву нуля і їх температурний дрейф спотворюють вихідний сигнал. Наприклад, в схемі неінвертуючого підсилювача (рис. 7.19) напруга зсуву нуля еквівалентна вхідному сигналу і посилюється точно з та-

ким же коефіцієнтом посилення. Аналогічно діє напруга зсуву нуля і в схемі інвертуючого підсилювача.

Дію вхідного струму зручно розглянути за допомогою схеми інвертуючого підсилювача. Дійсно, за відсутності вхідного струму струм кола зворотного зв'язку визначається лише вхідним сигналом. Але вхідний струм підсилювача додається до цього струму і спотворює вихідний сигнал на величину

$$\Delta U_i = i_{ex} \cdot R_2$$

При налаштуванні схем на основі ОП спотворення вихідного сигналу, які мають постійну величину і не змінюються під дією температури та з часом, як правило, можна усунути за допомогою регулювань. Але спотворення, пов'язані з дрейфом, врахувати при налаштуванні не представляється можливим, тому так поважно, аби ОП володіли малим дрейфом.