

## **1. Операційний підсилювач, виводи та властивості операційного підсилювача**

Операційний підсилювач (ОП) – підсилювач постійного струму з диференційним входом, що має високий коефіцієнт підсилення. Призначений для виконання різноманітних операцій над аналоговими сигналами, переважно, в схемах з від’ємним зворотним зв’язком (ВЗЗ). ОП застосовуються в різноманітних схемах радіотехніки, автоматики, інформаційно-виміральної техніки, – там, де необхідно підсилювати сигнали, в яких є постійна складова.

На даний час ОП отримали широке застосування, як у вигляді окремих мікросхем, так і у вигляді функціональних блоків – у складі складніших мікросхем. Така популярність обумовлена тим, що ОП є універсальним блоком з характеристиками, близькими до ідеальних, на основі якого можна побудувати безліч різноманітних електронних вузлів.

За принципом дії ОП подібний до звичайного підсилювача. Його основне призначення – підсилення електричних сигналів за напругою чи потужністю. ОП виготовляються за схемою підсилювачів постійного струму з малою напругою зміщення нуля і великим коефіцієнтом підсилення. ОП характеризується великим значенням вхідного опору та малим значенням вихідного опору. Раніше подібні підсилювачі використовувалися виключно в аналогових обчислювальних пристроях для виконання математичних операцій, таких як, додавання, віднімання, інтегрування та ін., що й обумовило їхню назву – операційні підсилювачі.

ОП виготовляються, як правило, у вигляді напівпровідникових інтегральних схем. Їх вартість є приблизно такою ж як і вартість окремих транзисторів. Завдяки практично ідеальним властивостям ОП реалізація схем на їх основі виявляється набагато простішою, тому ОП замінюють окремі транзистори як елементи схем у багатьох областях аналогової схемотехніки.

На рис. 13.1, а показане позначення ОП на електричних схемах. Вхідна частина схеми ОП виготовляється на основі диференціального підсилювача

тому ОП має два входи. Один із входів позначають знаком “–” і називають інвертуючим входом, другий – знаком “+” і називають неінвертуючим входом. В області низьких частот фаза вихідної напруги ОП  $U_{вих}$  збігається з фазою різниці вхідних напруг  $U_2 - U_1$ .

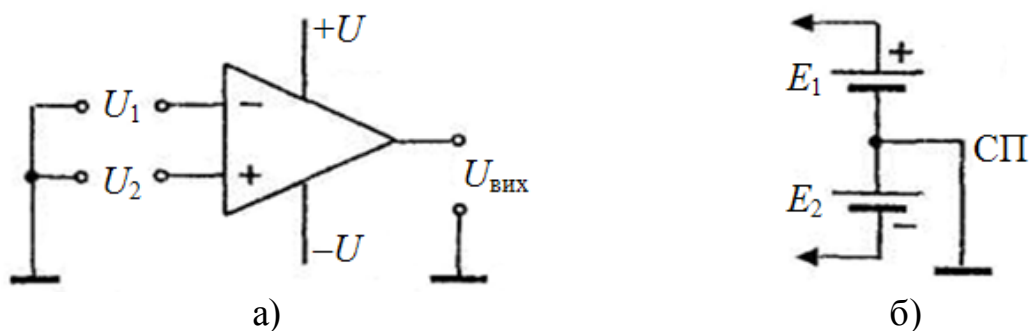


Рис. 13.1. Позначення ОП на схемах (а) та приєднання джерел живлення (б).

Щоб забезпечити можливість роботи ОП як з додатними, так і з від'ємними сигналами, використовуються два джерела живлення  $E_1$  та  $E_2$ , виходи яких приєднуються до відповідних виводів ОП  $+U$  та  $-U$ . Як правило, ОП, виготовлені у вигляді інтегральних схем, працюють з напругою живлення  $\pm 15$  В. Вхідні та вихідна напруги вимірюються відносно спільного провідника СП, яким є точка з'єднання двох різнойменних виводів джерел живлення (рис. 13.1, б). На принципових і структурних схемах виводи ОП, на які подається живлення, часто не показують.

Окрім вказаних, деякі ОП можуть мати додаткові виводи, призначені для:

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

і ряду інших функцій.

Блок-схема ОП складається з трьох блоків (рис. 13.2):

- 1) вхідного диференціального підсилювача (1);
- 2) проміжного підсилювача (2), що забезпечує основне підсилення сигналу та зсув його рівня;
- 3) вихідного каскаду (3), який, зазвичай, являє собою емітерний повторювач.

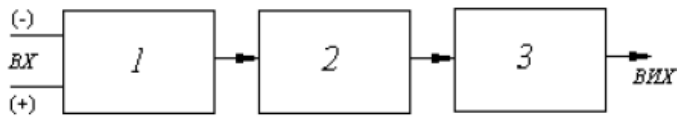


Рис. 13.2. Блок-схема ОП.

Оскільки на вході ОП діють дві напруги, то розрізняють:

а) диференціальну вхідну напругу  $U_d = U_2 - U_1$ ;

б) синфазну вхідну напругу  $U_c = (U_1 + U_2)/2$ ;

в) коефіцієнт підсилення за диференціальною вхідною напругою  $K_d = U_{вих} / U_d$ ;

г) коефіцієнт підсилення за синфазною вхідною напругою  $K_c = U_{вих} / U_c$  (коли  $U_2 = U_1$ ).

## 2. Ідеальний операційний підсилювач

При аналізі та проектуванні типових схем, в яких використовується ОП, часто використовують модель ідеального ОП. Ідеальний ОП є фізичною абстракцією, тобто не може реально існувати, проте дозволяє істотно спростити розгляд роботи схем на ОП, завдяки використанню простих математичних моделей. З ідеальним ОП пов'язують такі властивості:

- дуже великий коефіцієнт підсилення за диференціальною вхідною напругою ( $K_d \rightarrow \infty$ );
- дуже малий коефіцієнт підсилення за синфазною вхідною напругою ( $K_c \rightarrow 0$ ,  $U_{вих} = 0$ , коли  $U_2 = U_1$ );
- нескінченно великий вхідний опір ( $R_{вх} \rightarrow \infty$ ), іншими словами, струм, що протікає через ці входи, рівний нулю;
- дуже малий вихідний опір ( $R_{вих} \rightarrow 0$ );
- нескінченно широка смуга пропускання ( $\Delta f \rightarrow \infty$ );
- нескінченно велика швидкість наростання напруги на виході ОП.

Із перерахованих параметрів випливає властивість ідеального ОП, яка спрощує розгляд схем з його використанням: ідеальний ОП, охоплений від'ємним зворотним зв'язком, підтримує однакову напругу на своїх входах, тобто виконується рівність  $U_2 - U_1 = 0$ .

### 3. Параметри та характеристики операційних підсилювачів

ОП, які виготовляються у вигляді інтегральних схем, за своїми властивостями наближаються до ідеального ОП і характеризуються такими параметрами.

*Коефіцієнт підсилення* – коефіцієнт підсилення ОП без зворотного зв'язку, чисельно рівний коефіцієнту підсилення за диференціальною вхідною напругою  $K_d = U_{\text{вих}} / U_d$ .

*Напруга зміщення* – величина диференціальної вхідної напруги, яку слід подати на входи ОП, щоб напруга на його виході була рівна нулю.

*Вхідний струм* – струм, який протікає через входи ОП, коли вихідна напруга рівна нулю. Вхідні струми ОП можна оцінити за середнім вхідним струмом, який обчислюється як середнє арифметичне струмів інвертуючого та неінвертуючого входів:  $I_{\text{вх}} = (I_1 + I_2) / 2$ .

*Різниця вхідних струмів* – різниця між струмами, що протікають через входи ОП, взята за абсолютним значенням:  $\Delta I_{\text{вх}} = I_1 - I_2$ .

*Коефіцієнт послаблення синфазної вхідної напруги* – відношення коефіцієнта підсилення за диференціальною вхідною напругою до коефіцієнта підсилення за синфазною вхідною напругою  $K_{\text{посл}} = K_d / K_c$ .

*Діапазон допустимих синфазних вхідних напруг* – максимальні значення вхідних напруг, які можна одночасно подавати на входи ОП.

*Коефіцієнт послаблення впливу нестабільності джерел живлення* – відношення зміни вихідної напруги до зміни напруг живлення (зміна  $+U$  та  $-U$  одночасно) на 1 В.

*Швидкість наростання вихідної напруги* – максимальна швидкість зміни вихідної напруги при ідеально швидкій зміні напруги на входах.

*Частота одиничного підсилення* – частота, при якій коефіцієнт підсилення за диференціальною вхідною напругою рівний одиниці.

Основною характеристикою ОП є амплітудна характеристика, яка являє собою залежність вихідної напруги  $U_{\text{вих}}$  від диференціальної вхідної напруги  $U_d$ :  $U_{\text{вих}} = f(U_d)$  (рис. 13.3). Робочою є порівняно вузька ділянка у кілька мВ,

на якій зберігається пропорційність між  $U_d$  та  $U_{вих}$ . Вузкість робочої ділянки обумовлена тим, що через великий коефіцієнт підсилення вихідна напруга досягає насичення вже при досить малих значеннях вхідної напруги і далі вже не зростає.

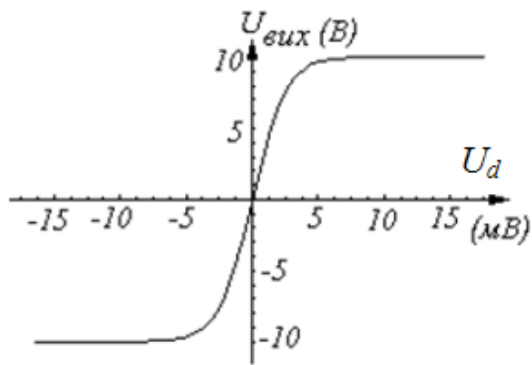


Рис. 13.3. Амплітудна характеристика ОП.

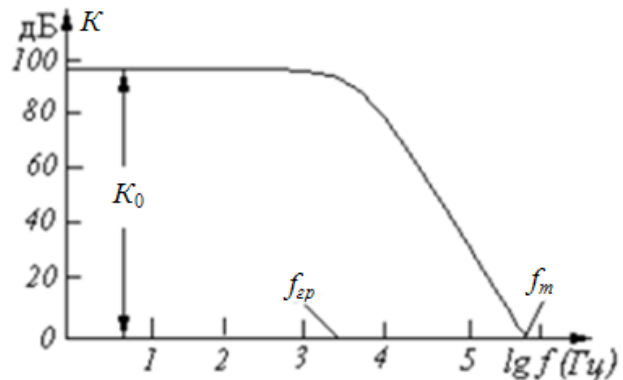


Рис. 13.4. Частотна характеристика ОП.

Іншою важливою характеристикою ОП є частотна характеристика  $K = f(f)$ , яку подано на рис. 13.4 в логарифмічному масштабі. Вона описується формулою АЧХ, аналогічною для підсилювачів:

$$K(f) = \frac{K_0}{\sqrt{1 + (f/f_{зр})^2}},$$

де  $K_0$  – коефіцієнт підсилення на низьких частотах,  $f_{зр}$  – гранична частота, що відповідає зниженню підсилення на 3 дБ (тобто у  $\sqrt{2}$  разів). Далеко за межами смуги пропускання, тобто при  $f \gg f_{зр}$ :

$$K(f) \approx \frac{K_0 \cdot f_{зр}}{f},$$

і коефіцієнт підсилення стає обернено пропорційним до частоти  $f$ . Добуток  $K_0 \cdot f_{зр}$  являє собою константу для даного типу ОП. Вона чисельно рівна  $f_m$  – частоті, на якій коефіцієнт підсилення стає рівним одиниці. Сама ця величина наводиться у довідниках для опису частотних властивостей ОП.

Розширити смугу підсилювальних частот можна шляхом застосування від'ємного зворотного зв'язку, втрачаючи підсилення, проте вигравши у граничній частоті та багатьох інших параметрах.

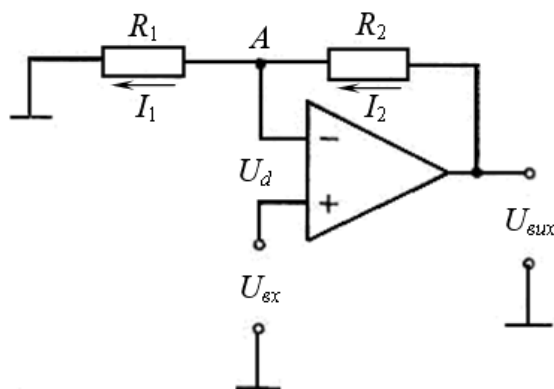
#### 4. Способи увімкнення операційних підсилювачів

Для поліпшення параметрів, зокрема для розширення смуги підсилювальних частот та стабілізації величини коефіцієнта підсилення, ОП зазвичай використовують із застосуванням від'ємного зворотного зв'язку. Завдяки великому коефіцієнту підсилення ОП це можна зробити без особливої шкоди. Для створення від'ємного зворотного зв'язку використовуються два способи увімкнення ОП – неінвертуюче та інвертуюче.

##### 4.1. Неінвертуючий підсилювач.

У схемі неінвертуючого підсилювача (рис. 13.5) вхідний сигнал подається на неінвертуючий вхід ОП, а його інвертуючий вхід приєднаний до спільного провідника. Ця схема є підсилювачем напруги з великим вхідним опором, оскільки вхідний струм (струм між входом і спільним провідником) може протікати лише через великий вхідний опір. Струм  $I_1$ , який протікає через резистор  $R_1$ , і струм  $I_2$ , який протікає через резистор  $R_2$ , однакові, оскільки в точці  $A$  немає розгалуження струмів ( $R_{ex} \rightarrow \infty$ ). Напруга в точці  $A$  рівна  $U_{ex} + U_d$ , тому

$$I_1 = (U_{ex} + U_d) / R_1, \quad I_2 = [U_{вих} - (U_{ex} + U_d)] / R_2.$$



Із рівності струмів  $I_1$  та  $I_2$  випливає, що

$$(U_{ex} + U_d) / R_1 = [U_{вих} - (U_{ex} + U_d)] / R_2.$$

Оскільки  $U_{вих} = K_d U_d$ , то для ідеального ОП з умови  $K_d \rightarrow \infty$  виходить, що  $U_d = 0$ . Тому можна

Рис. 13.5. Неінвертуючий підсилювач.

записати

$$U_{ex} / R_1 = (U_{вих} - U_{ex}) / R_2.$$

Із останньої рівності знаходимо коефіцієнт підсилення схеми:

$$K_u = \frac{U_{вих}}{U_{вх}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}. \quad (13.1)$$

## 4.2. Інвертуючий підсилювач.

Схема інвертуючого підсилювача зображена на рис. 13.6. Вхідна і вихідна напруги цієї схеми відрізняються за фазою на  $180^\circ$ . Якщо ОП ідеальний, то вхідні струми ОП відсутні і  $I_1 = I_2$ . Напруга в точці  $A$  рівна диференціальній вхідній напрузі ОП  $U_d$ . Точку  $A$  часто називають потенціально заземленою, тому що її потенціал рівний потенціалу “землі” (спільного провідника), оскільки  $U_d \cong 0$ . Використовуючи правила Кірхгофа та умову  $I_1 = I_2$  для схеми на рис. 13.6, можна одержати рівняння

$$(U_{вх} - U_d)/R_1 = -(U_{вих} - U_d)/R_2.$$

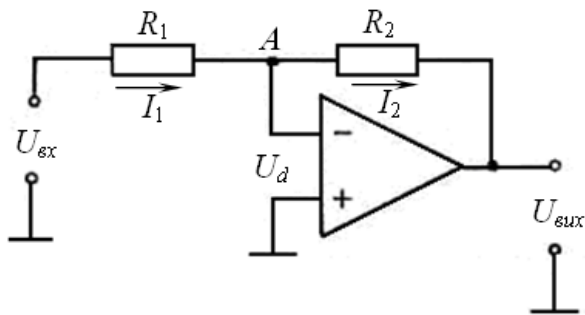


Рис. 13.6. Інвертуючий підсилювач.

Знак “-” перед правою частиною цього рівняння означає, що вихідна напруга протилежна за фазою вхідній. Із записаного рівняння при умові ідеального ОП ( $U_d = 0$ , бо  $K_d \rightarrow \infty$ ) одержуємо коефіцієнт підсилення схеми:

$$K_u = \frac{U_{вих}}{U_{вх}} = -\frac{R_2}{R_1}. \quad (13.2)$$

Коефіцієнт підсилення схеми за напругою інвертуючого підсилювача визначається лише параметрами резисторів  $R_1$  і  $R_2$  (для ідеального ОП). Вхідний опір схеми рівний  $R_1$ , тому що за рахунок зворотного зв’язку в точці  $A$  підтримується потенціал, близький до нуля.

## 4.3. Повторювач напруги.

Окремим випадком неінвертуючого увімкнення є повторювач напруги (рис. 13.7). За даною схемою вхідна напруга подається на неінвертуючий вхід



ОП, а інвертуючий вхід з'єднаний з його виходом. Якщо знову використати співвідношення  $U_{вих} = K_d U_{вх}$ , то при великому значенні  $K_d$  диференціальна вхідна напруга  $U_d$  буде мати значення, близьке до нуля, тому що  $U_{вих}$  буде приблизно рівним  $U_{вх}$ .

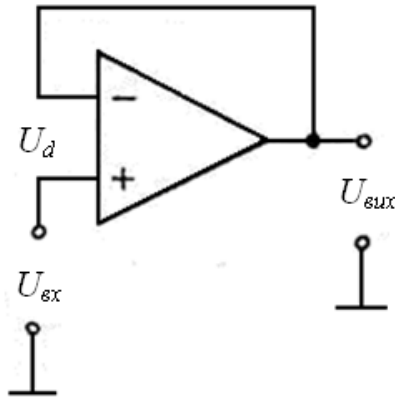


Рис. 13.7. Повторювач напруги.

Якщо  $K_d \leftarrow \infty$ , то  $U_{вих} = U_{вх}$ .

Дійсно, із закону Кірхгофа маємо:  $U_{вх} + U_d = U_{вих}$ . Вихідна напруга має той самий знак, що і вхідна, яка подається на неінвертуючий вхід. Врахувавши, що  $U_d = U_{вих} / K_d$ , одержуємо:

$$K_u = \frac{U_{вих}}{U_{вх}} = \frac{K_d}{1 + K_d}. \quad (13.3)$$

## 5. Відмінності реальних ОП від ідеального

Параметри ОП, що характеризують його неідеальність, можна розбити на групи.

### *Параметри за постійним струмом*

- Обмежене підсилення: коефіцієнт підсилення не є нескінченним (типове значення  $10^5 \div 10^6$  на постійному струмі).
- Ненульовий вхідний струм (або, що майже те ж саме, обмежений вхідний опір): типові значення вхідного струму складають  $10^{-9} \div 10^{-12}$  А. Це накладає обмеження на максимальне значення опорів в колі зворотного зв'язку, а також на можливість узгодження за напругою з джерелом сигналу. Деякі ОП мають на вході додаткові кола, для захисту входу від надмірної напруги – ці кола, можуть значно погіршувати вхідний опір. Тому деякі ОП випускаються в захищеній і незахищеній версіях.
- Ненульовий вихідний опір. Дане обмеження не має великого значення, оскільки наявність зворотного зв'язку ефективно зменшує вихідний опір каскаду на ОП (практично, до скільки завгодно малих значень).
- Ненульова напруга зсуву: вимога про рівність нулю вхідної напруги в активному стані для реальних ОП виконується не зовсім точно – ОП прагне підтримувати між своїми входами не точно нуль вольт, а деяку невелику напругу (напругу зсуву). Іншими словами, реальний ОП поводить себе як ідеальний ОП, у якого всередині, послідовно з одним із входів, включений генератор напруги, з ЕРС  $U_{зм}$ . Напруга зсуву – дуже важливий параметр, він обмежує точність ОП, наприклад, при порівнянні двох напруг. Типові значення  $U_{зм}$  складають  $10^{-3} \div 10^{-6}$  В.
- Ненульове підсилення синфазного сигналу. Ідеальний ОП підсилює лише різницю вхідної напруги, сама напруга значення не має. У реальних ОП, значення вхідної синфазної напруги має деякий вплив на вихідну напругу. Даний ефект визначається таким параметром, як коефіцієнт послаблення синфазного сигналу, який показує, в скільки разів приріст напруги на виході

менший, ніж приріст синфазної напруги на вході, що його викликала. Типові значення:  $10^4 \div 10^6$ .

### ***Параметри за змінним струмом***

- Обмежена смуга пропускання. Будь-який підсилювач має обмежену смугу пропускання, але чинник смуги особливо значущий для ОП, оскільки вони мають внутрішню частотну корекцію, для збільшення запасу по фазі.
- Ненульова вхідна ємність. ОП утворює паразитний фільтр низьких частот.

### ***Нелінійні ефекти***

- Насичення – обмеження діапазону можливих значень вихідної напруги. Звичайна вихідна напруга не може вийти за межі напруги живлення. Насичення має місце у разі, коли вихідна напруга “повинна бути” більшою максимальної, або меншою від мінімальної вихідної напруги. ОП не може вийти за межі, і виступаючі частини вихідного сигналу “зрізаються” (тобто обмежуються).
- Обмежена швидкість наростання. Вихідна напруга ОП не може змінитися миттєво. Швидкість зміни вихідної напруги вимірюється у вольт-секундах за мікросекунду, типові значення становлять  $1 \div 100$  В/мкс. Параметр обумовлений часом, необхідним для перезарядження внутрішніх ємностей ОП.

### ***Обмеження, обумовлені живленням***

- Обмежений вихідний струм. Більшість ОП широкого застосування мають вбудований захист від перевищення вихідного струму. Типове значення максимального струму – 25 мА. Захист запобігає перегріву і виходу ОП з ладу.
- Обмежена вихідна потужність. Більшість ОП призначені для застосувань, не вимогливих до потужності: опір навантаження не повинен бути меншим 2 кОм.

## **6. Класифікація операційних підсилювачів**

ОП класифікуються за наступними ознаками.

### ***За типом елементної бази***

- на біполярних транзисторах;
- на польових транзисторах.

### ***За галуззю застосування***

ОП, що випускаються промисловістю, постійно удосконалюються, параметри ОП наближаються до ідеальних. Проте, поліпшити всі параметри одночасно технічно неможливо, або недоцільно через дорожнечу отриманого чипу. Для того, щоб розширити область застосування ОП, випускаються різні їх типи, в кожному з яких один або декілька параметрів є переважаючими, а інші знаходяться на звичайному рівні (або навіть трохи гірші). Це виправдано, оскільки, залежно від сфери застосування, від ОП потрібне високе значення того або іншого параметра, а не всіх їх відразу. Звідси впливає класифікація ОП за областями застосування.

- Індустріальний стандарт. Так називають широко вживані, дуже дешеві ОП загального застосування з середніми характеристиками (наприклад, Lm324).
- Прецизійні ОП мають дуже малу напругу зсуву, застосовуються в точних вимірювальних схемах. Зазвичай ОП на біполярних транзисторах за цим показником дещо кращі, ніж на польових. Також від прецизійних ОП потрібна довготривала стабільність параметрів. Виключно малими зсувами володіють стабілізовані перериванням ОП (наприклад, Ad707, у якого напруга зсуву становить 15 мкВ).
- ОП з малим вхідним струмом. Всі ОП на основі польових транзисторів на вході мають малий вхідний струм. Але серед них існують спеціальні ОП з виключно малим вхідним струмом. Щоб повністю реалізувати їхні переваги, при проектуванні пристроїв з їх використанням необхідно навіть враховувати

витік струму по друкованій платі (наприклад, Ad549, у якого вхідний струм становить  $6 \cdot 10^{-14}$  А).

- Мікропотужні і програмовані ОП мають малий струм споживання. Такі ОП не можуть бути швидкодіючими, оскільки малий споживаний струм і висока швидкодія – взаємовиключні вимоги. Програмованими називаються ОП, для яких всі внутрішні струми спокою можна задати за допомогою зовнішнього струму, що подається на спеціальний вивід ОП.

- Потужні (сильнострумні) ОП, можуть віддавати великий струм в навантаження.

- Високовольтні ОП. Всі напруги для них (живлення, синфазна вхідна, максимальна вихідна) значно більші, ніж для ОП широкого застосування.

- Швидкодіючі ОП. Мають високу швидкість наростання і частоту одиничного підсилення. Такі ОП не можуть бути мікропотужними.

Можливі також комбінації даних категорій, наприклад, прецизійний швидкодіючий ОП.