

## ОПЕРАЦІЙНИЙ ПІДСИЛЮВАЧ: ПОБУДОВА ТА ПАРАМЕТРИ

**Мета лекції:** надати відомості про найбільш часто використовуваний елемент у аналоговій схемотехніці – операційний підсилювач; розказати про побудову та параметри ідеального операційного підсилювача та реальних схемних реалізацій; навести схеми операційних вузлів різного призначення, створених на базі операційних підсилювачів з ланками зворотного від'ємного зв'язку.

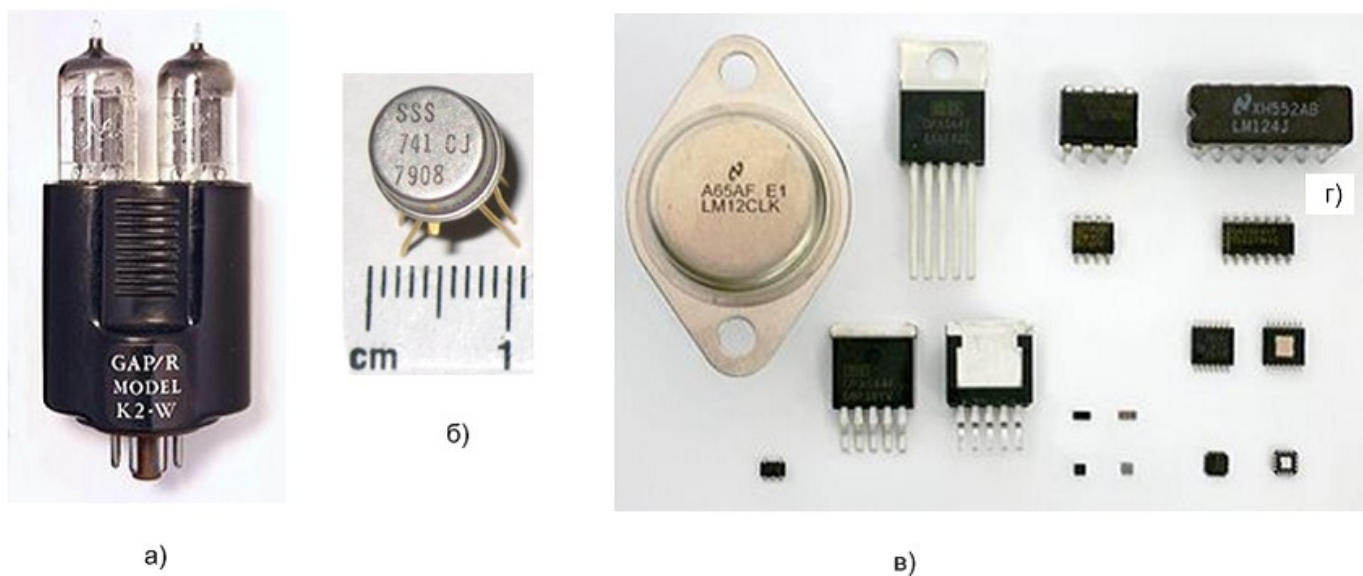
### ПОНЯТТЯ ОПЕРАЦІЙНОГО ПІДСИЛЮВАЧА

### ОПЕРАЦІЙНИЙ ПІДСИЛЮВАЧ: ПОБУДОВА ТА ПАРАМЕТРИ

**Операційний підсилювач** (ОП, англ. operational amplifier – «op-amp») – це підсилювач постійного струму з великим коефіцієнтом підсилення, який має диференціальний вхід і, як правило, один спільний вихід. Операційні підсилювачі майже завжди використовуються в схемах з глибоким від'ємним зворотним зв'язком, яка, завдяки високому коефіцієнту підсилення ОП, повністю визначає коефіцієнт передачі отриманої схеми. На сьогодні ОП отримали широке застосування як у вигляді окремих чіпів, так і у вигляді функціональних блоків у складі складних інтегральних схем. Така популярність обумовлена тим, що ОП є універсальним блоком з характеристиками, близькими до ідеальних, на основі якого можна побудувати безліч різних електронних вузлів.

Назва **«операційний підсилювач»** історично зв'язана з призначенням перших схем. Операційний підсилювач був спроектований для виконання математичних операцій шляхом використання напруги як аналогової величини для моделювання базових математичних операцій (додавання, віднімання, інтегрування, диференціювання та інших). Перші промислові лампові ОП, що з'явилися у 1940 році, виконувалися на парі подвійних триодів у вигляді окремих конструктивних збірок в корпусах з цоколем (рис. 11.1,а)). Згодом ОП стали виконувати як складні багатокаскадні підсилювачі, що реалізувались на дискретних транзисторах. На жаль, такі ОП мали нестабільні параметри, були чутливі до температурних змін і стрибків напруги джерел живлення. З появою інтегральної технології ОП стали виготовляти у вигляді мікросхем, що

дозволило значно вдосконалити їх характеристики і наблизити до ідеальних. У 1963 році Роберт Відлар, інженер Fairchild Semiconductor, спроектував перший інтегральний ОП на 9 транзисторах –  $\mu$ A702. При ціні в 300 доларів такий прилад використовувався тільки у військових цілях. Перший доступний інтегральний ОП  $\mu$ A709, також спроектований Відларом, був випущений в 1965 році, і незабаром після випуску його ціна впала нижче 10 доларів, що було все ще занадто дорого для побутового застосування, але цілком доступно для масової промислової автоматики. У 1967 National Semiconductor, куди перейшов працювати Відлар, випустила LM101, а в 1968 Fairchild випустила практично ідентичний  $\mu$ A741 – перший ОП з вбудованою частотною корекцією (рис. 11.1, б)). Багато виробників досі випускають версії цього класичного чіпа (їх можна впізнати за цифрами «741» в найменуванні). Пізніше були розроблені ОП на інших елементних базах: на польових транзисторах з *p-n*-переходом (кінець 1970-х років) і на польових транзисторах з ізольованим каналом (початок 1980-х років), що дозволило істотно поліпшити ряд характеристик. Більшість сучасних ОП (рис. 11.1, в-г)) можуть бути встановлені в схеми, що були спроектовані для  $\mu$ A741, без яких-небудь доопрацювань; при цьому характеристики схеми тільки покращаться.



**Рисунок 11.1 – Операційні підсилювачі: ламповий K2-W (а); один із перших ОП на біполярних транзисторах  $\mu$ A741 (б); сучасні реалізації (в), чіп з чотирма ОП в одному корпусі (г)**

У сучасній електронній техніці операційні підсилювачі застосовують надзвичайно широко – не тільки для виконання математичних операцій, а й як **багатоцільові елементи для побудови апаратури різного призначення**: підсилювачів, генераторів синусоїдних та імпульсних сигналів, стабілізаторів напруги, активних фільтрів і т.п. Отже, операційний підсилювач, ймовірно, найбільш часто використовуваний елемент у аналоговій схемотехніці. Додавання лише кількох зовнішніх компонентів створює з ОП конкретну схему аналогової обробки сигналів. Більшість стандартних ОП коштують всього кілька центів у великих партіях, але підсилювачі з нестандартними характеристиками (в інтегральному або дискретному виконанні) можуть коштувати \$ 100 і більше.

Операційні підсилювачі **класифікують** за наступними ознаками:

1) **за типом елементної бази** (на польових транзисторах, на біполярних транзисторах, на електронних лампах (застаріли));

2) **за вхідними сигналами**: на звичайні з двома входами та ОП з трьома входами (третій вхід забезпечує коефіцієнт передачі +1, що розширює можливості ОП, наприклад, дає змогу організувати зсув за напругою вихідних сигналів щодо вхідних);

3) **за вихідними сигналами**: на звичайні з одним виходом та ОП з диференціальним виходом;

4) **за областю застосування**. Зауважимо, що реалізації операційних підсилювачів постійно удосконалюються, тому параметри ОП наближаються до ідеальних. Проте, поліпшити всі параметри одночасно технічно неможливо або недоцільно через чималу коштовність отриманого чіпа. Для того, щоб розширити область застосування ОП, промисловістю випускаються різні їх типи, в кожному з яких один або декілька параметрів наближаються до ідеальних, а інші знаходяться на звичайному рівні (або виявляються навіть трохи гіршими). Це виправдано, оскільки залежно від сфери застосування від ОП вимагаються високі значення того чи іншого параметра, але не всіх відразу. Розрізняють наступні категорії:

– **індустріальний стандарт.** Так називають широко уживані, дуже дешеві ОП загального застосування з середніми характеристиками. Приклад «класичних» ОП з біполярним входом – LM324, з польовим входом – TL084;

– **прецизійні** ОП мають дуже малу напругу керування між входами і довготривалу стабільність параметрів. Застосовуються в точних вимірювальних схемах. Зазвичай ОП на біполярних транзисторах за цим показником дещо кращі, ніж на польових. Приклади: AD707, AD708 з напругою керування між входами 30 (мкВ), а також новітні AD8551 з типовою напругою керування між входами 1 (мкВ);

– **електрометричні** з малим вхідним струмом. Такими є усі ОП, що мають польові транзистори на вході. Але серед них існують спеціальні ОП з виключно малим вхідним струмом. Приклад: AD549 з вхідним струмом  $i_{\text{вх}} = 6 \cdot 10^{-14}$  (А). Щоб повністю реалізувати переваги таких ОП, при проектуванні пристроїв з їх використанням необхідно навіть враховувати витік струму по платі;

– **мікропотужні і програмовані** ОП споживають малий струм на власне живлення. Такі операційні підсилювачі не можуть бути швидкодіючими, оскільки малий споживаний струм і висока швидкодія – це взаємовиключні вимоги. Програмованими називають ОП, для яких усі внутрішні струми спокою можна задати за допомогою зовнішнього струму, що подається на спеціальний електрод ОП;

– **потужні (сильнострумові)** ОП можуть віддавати великий струм у навантаження, що дає змогу працювати на низькоомне навантаження (до 50 (Ом) замість стандартних 2 (кОм));

– **низьковольтні** ОП, що є працездатними при напругах живлення до 3 (В);

– **високовольтні** працюють при напругах значно більших, ніж ОП широкого застосування;

– **швидкодіючі** ОП як правило виконані на біполярних транзисторах;

– ОП **з малим рівнем шумів**;

– **звукові** ОП мають мінімально можливі коефіцієнти гармонік;

– **спеціалізовані** ОП зазвичай розроблені для конкретних завдань (підключення фотодатчика, магнітної головки, та інші). До складу таких підсилювачів входять готові ланцюги від'ємного зворотного зв'язку або окремі необхідні для цього прецизійні резистори.

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

## **ОПЕРАЦІЙНИЙ ПІДСИЛЮВАЧ: ПОБУДОВА ТА ПАРАМЕТРИ**

Концепція операційного підсилювача склалася у 30-і роки у зв'язку з розробкою аналогових електронних обчислювальних машин, призначених для розв'язування систем алгебраїчних та диференціальних рівнянь. Принциповим було забезпечення лінійного масштабування сигналів з заданою точністю (до 0,01%), а для цього потрібен був прилад з нескінченно великим вхідним опором, дуже малим вихідним опором і дуже великим коефіцієнтом підсилення за напругою. Прилади з такими властивостями отримали назву операційних підсилювачів.

**Структури** операційних підсилювачів різних марок відрізняються, але основи побудови однакові. Більшість ОП виконуються **трикаскадними з безпосередніми зв'язками між каскадами**. Це три функціональні блоки:

1. **Вхідний каскад**, який виконується за схемою **диференціального підсилювача** і забезпечує високий вхідний опір приладу та підсилення на фоні малих і шумів. Оскільки вхідним каскадом операційного підсилювача є диференціальний каскад, ОП має два входи – **прямий (неінвертуючий)** і **інверсний (інвертуючий)**.

2. **Підсилювач напруги**. Має дуже великий коефіцієнт посилення за напругою і зазвичай єдиний вихід.

3. **Вихідний підсилювач**, який зазвичай виконується за схемою емітерного повторювача, забезпечує підсилення за потужністю, дуже малий вихідний опір та високу навантажувальну здатність за струмом.

З розвитком інтегральної технології ОП стали виготовляти двокаскадними без підсилювача напруги.

Для полегшення виділення змінного сигналу на виході ОП живлення схеми виконують двополярним як послідовне з'єднання двох джерел з заземленою середньою точкою. Таке двополюсне джерело напруги називають **розщепленим** джерелом (*split power supply*). Джерело має три виводи з потенціалами:

- $+E$  (на схемах електрод з таким потенціалом позначають символами  $+E, V_{S+}, V_{DD}, V_{CC}, +V_{CC}$  залежно від типу елементної бази ОП),
- $0$  (земля, ground),
- $-E$  (на схемах електрод з таким потенціалом позначають символами  $-E, V_{S-}, V_{SS}, V_{EE}, -V_{CC}$  залежно від типу елементної бази ОП).

Вивід джерела живлення з нульовим потенціалом безпосередньо до електродів ОП зазвичай не підключається, але, як правило, є сигнальною землею і використовується для створення зворотного зв'язку. Часто замість двополярного джерела використовують більш просте однополярне, а загальна точка створюється штучно або поєднується з негативною шиною живлення. ОП здатні працювати в широкому діапазоні напруги джерел живлення з типовими значеннями для ОП загального застосування від  $\pm 1,5$  (В) до  $\pm 18$  (В) при розщепленому живленні.

На виході ОП потенціал може приймати додатні та від'ємні значення залежно від вхідних сигналів. Надходження вхідного сигналу  $u_{вх+}$  на прямий вхід спричинює приріст вихідного сигналу, який співпадає за фазою (знаком) із приростом вхідного. Якщо сигнал  $u_{вх-}$  подати на інвертуючий вхід, то зміни вихідного сигналу матимуть протилежний знак (фазу) щодо до змін вхідного. Вихідна напруга  $u_{вих}$  зв'язана з напругами на входах ОП співвідношенням (11.1), але не може перевищувати напругу живлення ОП:

$$u_{вих} = K_{UOP} \cdot (u_{вх+} - u_{вх-}), \quad (11.1)$$

де  $u_{вих}$  – напруга на виході ОП,  $u_{вх+}$  – напруга на неінвертуючому вході ОП,  $u_{вх-}$  – напруга на інвертуючому вході ОП,  $K_{UOP}$  – коефіцієнт підсилення за напругою ОП з розімкненою ланкою зворотного зв'язку. Усі напруги відраховуються відносно точки схеми ОП з нульовим потенціалом.



### ПРИКЛАД 11.1.

Диференціальний підсилювач у вхідному каскаді ОП підсилює різницю напруг між двома входами. Рівняння для вихідного сигналу (11.1):

$$u_{\text{вих}} = K_{U_{\text{ОП}}} \cdot (u_{\text{вх}+} - u_{\text{вх}-}),$$

Тому кожен з вхідних сигналів впливає на вихідну напругу в протилежних напрямках. Розглянемо наступну таблицю вхідних і вихідних напруг для операційного підсилювача з коефіцієнтом підсилення за напругою  $K_{U_{\text{ОП}}} = 10^5$  і розщепленим живленням  $E = \mp 15(\text{В})$ .

Таблиця

$V_+$ , мкВ	0	1	10	50	150	500	0	0	0	0	1	10	-50	500
$V_-$ , мкВ	0	0	0	0	0	0	10	50	150	500	1	-10	-10	-10
$V_{\text{out}}$ , В	0	0,1	1	5	15	15	-1	-5	-15	-15	0	2	-4	15

Збільшення позитивного значення сигналу на прямому вході спричинює збільшення вихідного сигналу, а на інверсному вході – зменшує вихідний сигнал. Аналогічно, зменшення негативної напруги на прямому вході зменшує вихідний сигнал, а зменшення негативної напруги на інверсному вході – збільшує вихідний сигнал. Саме через такий зв'язок між вхідними і вихідними сигналами прямий вхід називають неінвертуючий, а інверсний – інвертуючим.

Потенціал на виході ОП має дорівнювати нулеві у разі відсутності сигналу на вході. Стан, коли  $u_{\text{вх}} = 0 \Rightarrow u_{\text{вих}} = 0$ , називають **балансом** ОП. Збалансовані ОП легко з'єднувати послідовно і охоплювати зворотними зв'язками. Для забезпечення відсутності дрейфу нуля сучасні ОП мають спеціальні виводи для підключення схеми балансування (**корекції нуля**).

**Умовні позначення та умовно-графічні позначення** операційних підсилювачів на схемах такі самі як **позначення стандартних інтегральних схем**. Хоча для наочності операційні підсилювачі традиційно зображують також спрощено у формі трикутника без конкретизації будови (рис. 11.2,а). Таке умовне зображення має п'ять виводів, які зображують електроди, що необхідні для функціонування будь-якого ОП:

- $V_+$  (+ IN) – прямиий вхід ОП,
- $V_-$  (- IN) – інвертуючий вхід ОП,
- $V_{out}$  (OUT) – вихід ОП,
- $V_{S+}$  – вивід, що приєднується до плюса розщепленого джерела живлення,
- $V_{S-}$  – вивід, що приєднується до мінусу розщепленого джерела живлення.

Іншим спрощеним зображенням ОП є прямокутник ІС без додаткових полів (рис. 11.2,б)). Корпуси операційних підсилювачів досить різноманітні, з різною кількістю виводів. За потреби усі виводи мікросхеми показують на додаткових вертикальних полях умовного зображення. Так на рис. 11.2, в-д) показані призначення виводів мікросхем, що містять один, два і чотири ОП в одному корпусі.

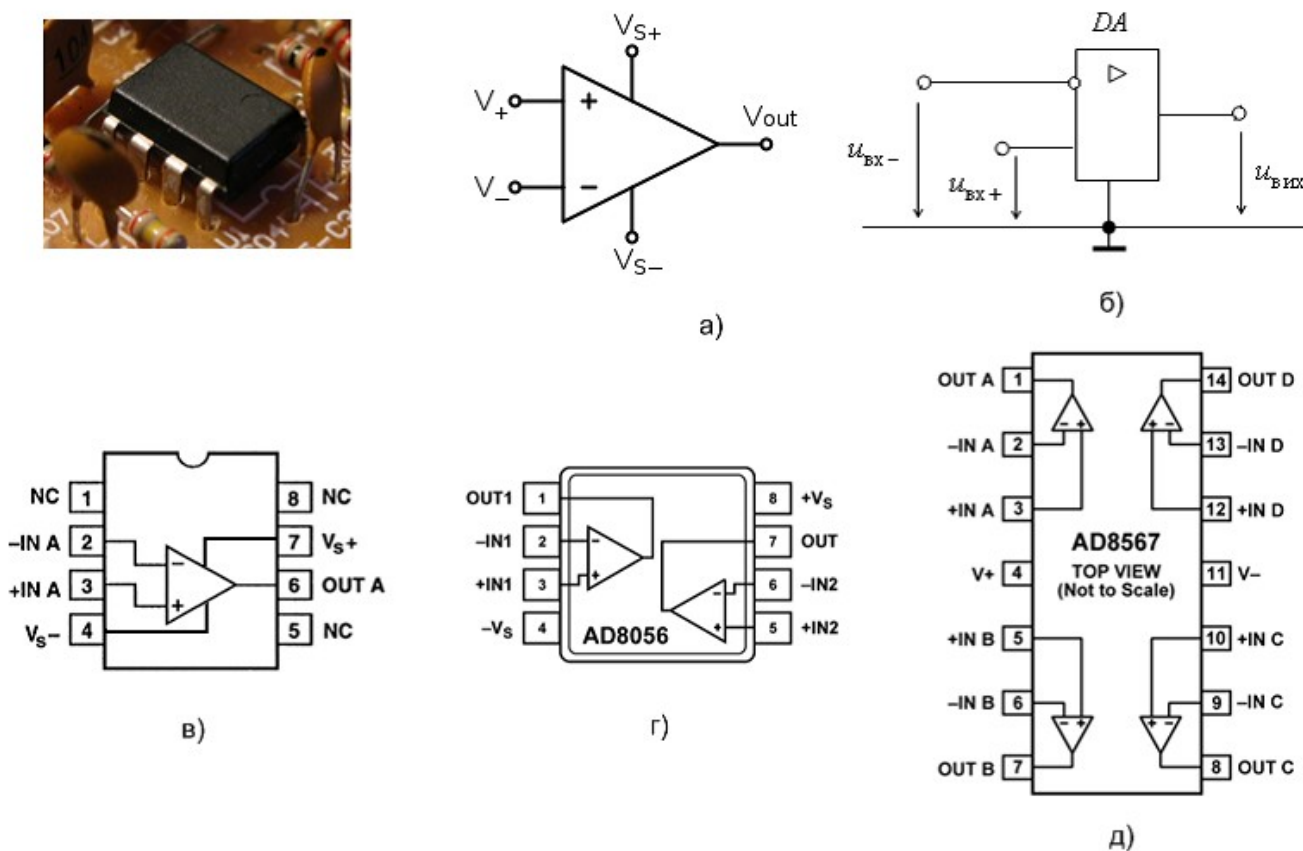


Рис. 11.2 – Умовні позначення ОП на схемах: спрощені (а), (б); з зазначенням функціонального призначення виводів ІС – одноканального ОП AD8005 (в), двоканального ОП AD8056 (г) та чотирьоканального ОП AD8567 (д)



На рис. 11.3 показана схема увімкнення ОП КР140УД7 зі схемою балансування на потенціометрі  $R$ .

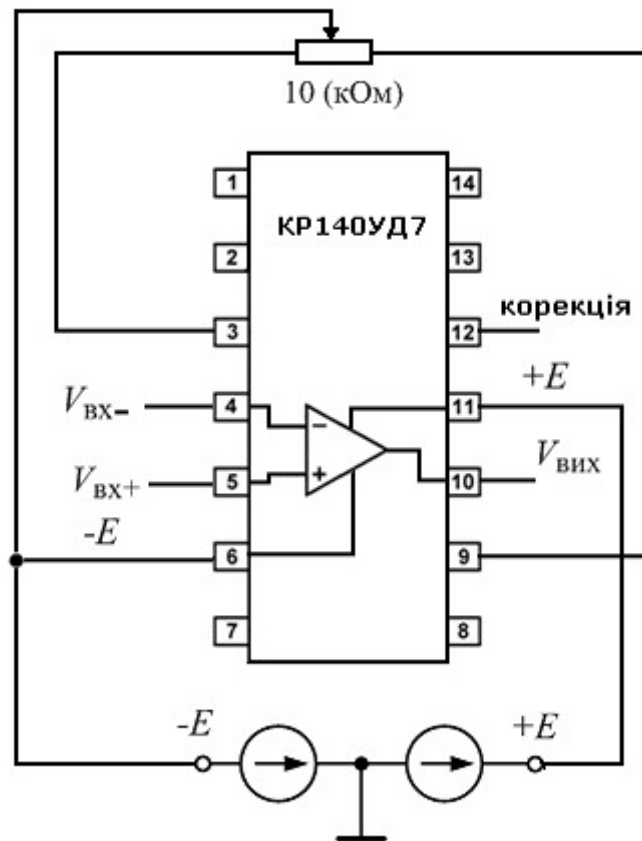


Рисунок 11.3 – Схема вмикання ОП КР140УД7

Призначення виводів:

- 1,2,7,8,13,14 – вільні;
- 3,9 – балансування;
- 4 – вхід інвертуючий;
- 5 – вхід неінвертуючий;
- 6 – напруга живлення  $-E$  (В);
- 10 – вихід;
- 11 – напруга живлення  $+E$  (В);
- 12 – корекція нуля.

Незважаючи на те, що простіше розглядати операційний підсилювач як чорний ящик з характеристиками ідеального ОП, важливо також мати уявлення про **внутрішню структуру ОП** і принципи його роботи, так як при проектуванні пристроїв з використанням ОП можуть виникнути проблеми,

зумовлені обмеженнями його схемотехніки. Для прикладу розглянемо [структуру одного з перших інтегральних ОП на біполярних транзисторах  \$\mu A741\$](#) , що був створений у 1968 році.

Принципові схеми реальних операційних підсилювачів наведені в довідниках, але, як правило, у практичних застосуваннях можна користуватися мікросхемою ОП як окремим напівпровідниковим приладом, не цікавлячись її будовою.

Проаналізуємо властивості ідеального операційного підсилювача, який є фізичною абстракцією, тобто не може реально існувати, проте дозволяє суттєво спростити розгляд роботи схем, до складу яких входять реальні ОП. Принцип дії ОП описується формулою (11.1). Властивості **ідеального операційного підсилювача**:

1. Нескінченно великий коефіцієнт підсилення за напругою для всього частотного діапазону:

$$K_{U\text{оп}} \rightarrow \infty. \quad (11.2)$$

2. Нескінченно великий вхідний опір обох входів ОП:

$$R_{\text{вх}} \rightarrow \infty. \quad (11.3)$$

Іншими словами, струм, що протікає через ці входи, дорівнює нулю:

$$i_{\text{вх}} = 0. \quad (11.4)$$

3. Нульовий вихідний опір ОП:

$$R_{\text{вих}} = 0. \quad (11.5)$$

4. Нескінченно велика швидкість наростання напруги на виході ОП (у виразі (11.1) відсутні будь-які часові затримки).

5. Смуга пропускання: від постійного струму до нескінченності.

З вищезазначених характеристик ідеального ОП виходить найважливіша властивість ідеального ОП, охопленого ланкою від'ємного зворотного зв'язку: **ідеальний ОП, охоплений негативним зворотним зв'язком, підтримує однакову напругу на своїх входах**:

$$u_{\text{вх}+} - u_{\text{вх}-} = 0. \quad (11.6)$$

Це пояснюється просто. У разі порушення співвідношення (11.6) диференціальна напруга підсилюється ОП з  $K_{U\text{оп}} \rightarrow \infty$  і передається через

ланку ВЗЗ, що зменшує існуючу різницю. І так до тих пір, поки рівність (11.6) не буде виконано.

**Реальні операційні підсилювачі** характеризуються **параметрами** і **характеристиками**. Параметри сучасних реальних операційних підсилювачів наближаються до вищезазначених параметрів ідеального ОП. До основних параметрів ОП належать: коефіцієнт підсилення, напруга живлення  $\pm E(B)$ , коефіцієнт послаблення синфазного сигналу, вхідний струм, смуга пропускання, напруга зміщення  $u_{зм}$ , час встановлення, температурний діапазон та інші.

– **Коефіцієнти підсилення** мають типові значення  $K_{UOP} = 10^5 - 10^6$  на постійному струмі;

– **Вхідні опори** (не менші від 400 кОм) забезпечують типові значення вхідного струму  $i_{вх} = 10^{-9} - 10^{-12} (A)$ . Це накладає обмеження на максимальні значення опорів в ланцюгах зворотного зв'язку, а також на можливість узгодження за напругою з джерелом сигналу. Деякі ОП мають на вході додаткові ланцюги для захисту входу від надмірної напруги: ці ланцюги можуть значно погіршити вхідний опір. Тому деякі ОП випускаються в захищеній і незахищеній версіях;

– Ненульовий вихідний опір не має великого значення, оскільки наявність зворотного зв'язку ефективно зменшує вихідний опір каскаду на ОП;

– Ненульова напруга між входами ОП (**напруга зміщення**) в активному стані. Типові значення  $u_{зм} = 10^{-3} - 10^{-6} (B)$ . Реальний ОП можна розглядати як ідеальний ОП, у якого всередині послідовно з одним з входів включений генератор напруги з ЕРС  $E_{зм} = u_{зм}$ . Напруга зміщення – це дуже важливий параметр, який обмежує точність ОП, наприклад, при порівнянні двох напруг;

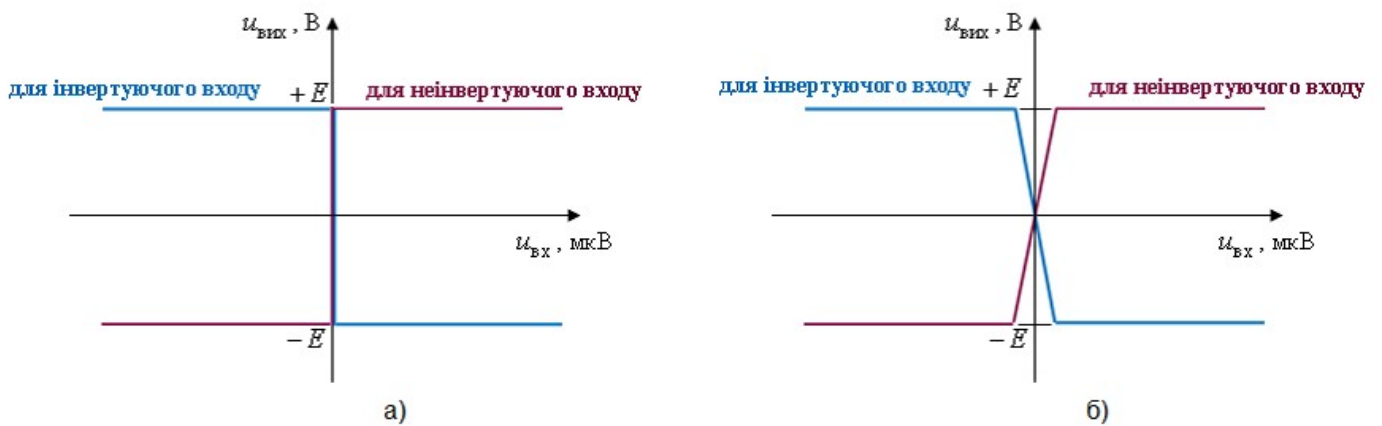
– Ненульове посилення синфазного сигналу. Якщо на обидва входи ідеального ОП подати одну і ту саму напругу, то вихідний сигнал має дорівнювати нулеві. Однак, у реальних ОП значення вхідної синфазного напруги має деякий вплив на вихідну напругу. Цей вплив кількісно оцінюють **коефіцієнтом послаблення синфазного сигналу** ( $CMRR$  – Common Mode

Rejection Ratio), який визначається як відношення коефіцієнта підсилення диференціального сигналу до коефіцієнта підсилення синфазного сигналу

$$CMRR = (U_{\text{вих диф}} / U_{\text{вх диф}}) / (U_{\text{вих синф}} / U_{\text{вх синф}}). \text{ Типові значення: } CMRR = 10^4 - 10^6;$$

- Обмежена смуга пропускання. Будь-який підсилювач має скінчену смугу пропускання з типовим значенням у десятки-сотні МГц. Більшість ОП мають внутрішню частотну корекцію;
- Ненульова вхідна ємність утворює паразитний фільтр нижніх частот;
- Ненульова затримка сигналу. Даний параметр, зв'язаний з обмеженням смуги пропускання, може погіршити дію ВЗЗ при підвищенні робочих частот;
- та інші.

Найважливішими характеристиками операційного підсилювача є його **передавальні характеристики**  $u_{\text{вих}} = f(u_{\text{вх}})$ , які зображені на рис. 11.4.



**Рисунок 11.4 – Передавальні характеристики операційного підсилювача: ідеального (а), реального (б)**

Щоб зняти передавальні характеристики, потрібно по черзі подавати сигнал на один із входів ОП за умови з'єднання іншого входу з нульовою точкою. Дві характеристики відображають передавання значень вхідної напруги з інвертуючого і неінвертуючого входів на вихід ОП. Кожна характеристика складається з трьох ділянок. Дві горизонтальні ділянки кожної з характеристик відповідають режимам повністю відкритого (насиченого) чи закритого транзистора вихідного каскаду ОП (ЕП). При змінах вхідного сигналу на цих ділянках вихідна напруга залишається незмінною і має значення,

близькі до напруг джерел живлення  $\pm E(B)$ . Третя ділянка кожної характеристики є вертикальною для ідеального ОП (рис. 11.4,а)) і має нахил для реального ОП (рис. 11.4,б)). У реальних ОП нахил лінійних ділянок залежить від значення коефіцієнта підсилення  $K_{UOP} = \Delta u_{вих} / \Delta u_{вх}$ . Зважаючи на великі значення  $K_{UOP}$ , скісна ділянка передавальної характеристики реального ОП обмежена дуже малими значеннями вхідних напруг.

Характеристики збалансованого ОП проходять через нуль. Якщо передавальні характеристики реальних ОП дещо зміщені праворуч чи ліворуч від балансного стану внаслідок розкиду параметрів елементів і температурного дрейфу, то слід відновити збалансований стан і компенсувати напругу зміщення.

Операційні підсилювачі **як окремі компоненти електричних схем** без зовнішніх ланцюгів зворотного зв'язку майже не застосовують в якості підсилювачів через неможливість керувати підсиленням, сильну залежність коефіцієнта підсилення від частоти сигналу і температури. Важливими є застосування ОП в якості:

- **компараторів** для порівняння сигналів, що надходять на прямий та інверсний входи,
- **перетворювачів** змінного сигналу на послідовність прямокутних імпульсів.

Для практичних застосувань на виході ОП сигнал буде приймати значення  $+E(B)$ , якщо вхідний сигнал на прямому вході більш позитивний, ніж на інверсному, і значення  $-E(B)$ , якщо це не так. Тому ОП є корисним як пристрій для порівняння двох напруг зі зміною стану вихідної напруги, коли напруга на одному із входів перебільшує іншу за величиною. Можна використати світлодіод в якості індикатора стану ОП. На рис. 11.5 зображена схема порівняння вхідного сигналу  $u_{вх}$  на інверсному вході ОП з еталонним вхідним сигналом на прямому вході, що задається потенціометром. Якщо вхідний сигнал менший від еталонного, то вихідна напруга сягає максимального значення  $u_{вих} \approx +E$  і світлодіод загоряється. Як тільки сигнал

на інверсному вході перевищує еталонну напругу, світлодіод вимикається, а напруга на виході приймає мінімальне значення  $-E$  (В). Схему можна використовувати для практичних застосувань, порівнюючи напругу з будь-якого вимірювального приладу з еталонною і вмикаючи замість світлодіода реле або інший прилад. В пристроях силової електроніки компараторні увімкнення ОП використовують для реєстрації моментів переходу напруги через нуль (опорна напруга дорівнює нулеві) і називають відповідні компаратори **нуль-органами**.

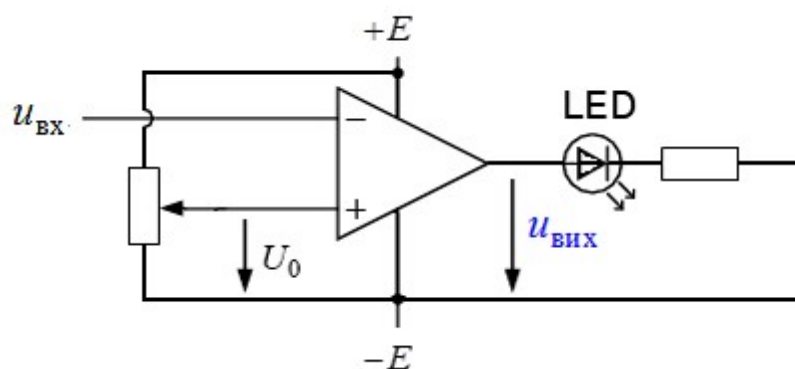
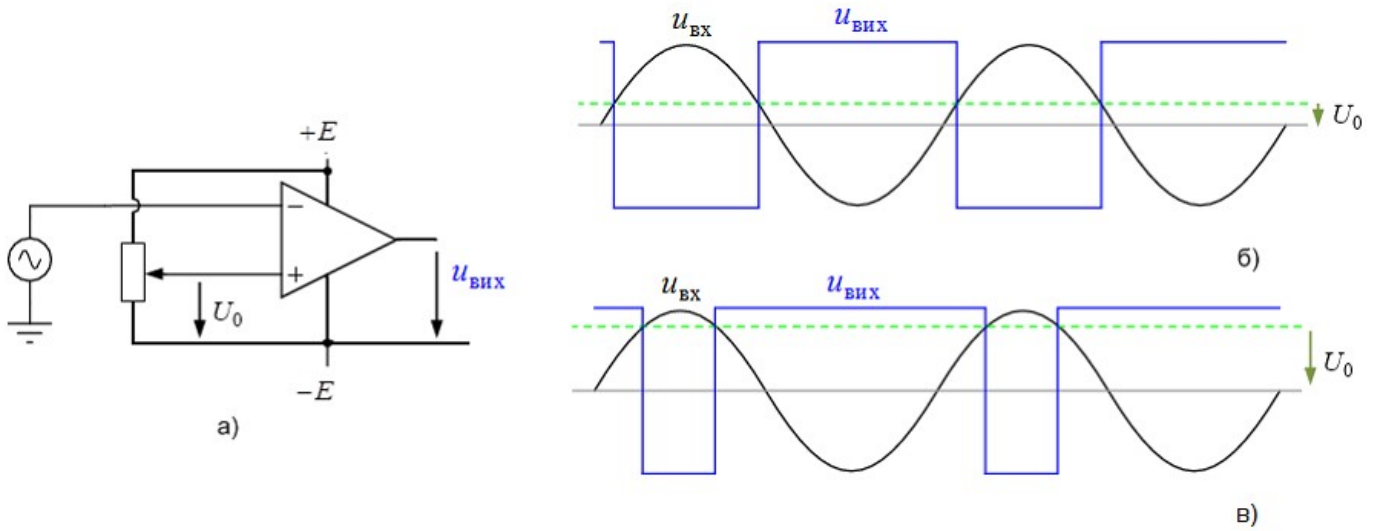


Рисунок 11.5 – Схема компаратора на ОП

Іншим практичним застосуванням операційного підсилювача як окремого компонента є отримання послідовності імпульсів із змінної напруги. На рис. 11.6,а) зображена схема з ОП, на прямий вхід якого подається постійна еталонна напруга з потенціометра, а на інверсний синусоїдна напруга. На виході ОП отримуємо напругу у вигляді меандру (рис. 11.6,б)). Змінюючи рівень еталонної напруги за допомогою потенціометра, можна змінювати щільність імпульсів (рис. 11.6,в)). Вочевидь змінна напруга на інверсному вході може бути будь-якої форми (трикутна, меандр, пилкоподібна або будь-який інший вид хвилі), щоб схема виконувала ті самі функції. Такі схеми дуже корисні, наприклад, для здійснення широтно-імпульсної модуляції (PWM, *pulse-width modulation*) змінних сигналів відповідно до керуючого сигналу на прямому вході ОП.





**Рисунок 11.6 – Перетворювач змінної напруги на послідовність імпульсів:  
схема (а), часові діаграми вхідної  $u_{\text{ВХ}}$  і вихідної напруг  $u_{\text{ВНХ}}$  для двох значень  
еталонної напруги  $U_0$  (б), (в)**