

# Операційні підсилювачі

## Загальні відомості

Операційний підсилювач (ОП) – це підсилювач постійного струму (ППС), що має високий коефіцієнт підсилення, два входи (так званий диференційний вхід) і один вихід. Зазвичай ОП будують як ППС з безпосередніми зв'язками між каскадами, з диференційним входом і біполярним відносно амплітуди підсилюваного сигналу виходом. Це забезпечує нульові потенціали на вході виході ОП за відсутності вхідного сигналу. Тому такі підсилювачі легко з'єднувати послідовно, а також охоплювати зворотними зв'язками.

За своєю структурою ОП бувають три- або двокаскадні.

За трикаскадною схемою будувались ОП у інтегральному виконанні першого покоління. Перший диференційний каскад у них працює в режимі мікрострумів, забезпечуючи тим самим високий вхідний опір. Другий диференційний каскад забезпечує підсилення напруги. Третій каскад, вихідний, виконується як двотактний з СК і забезпечує підсилення потужності, а також низький вихідний опір.

ОП другого покоління будуються за двокаскадною схемою. Це стало можливим із зростанням рівня інтегральної технології. При цьому, перший каскад забезпечує і високий вхідний опір, і великий коефіцієнт підсилення за напругою. Другий каскад є підсилювачем потужності.

Свою назву ці підсилювачі одержали у зв'язку з тим, що спочатку вони використовувались для моделювання математичних операцій (множення, додавання, віднімання, диференціювання, інтегрування та ін.) в аналогових обчислювальних машинах (АОМ).

Із розвитком інтегральної техніки області використання ОП значно розширились. Нині вони використовуються в основному як високоякісні підсилювачі напруги при побудові будь-яких електронних пристроїв. А АОМ тим часом були витіснені цифровими обчислювальними машинами.

Поширеному застосуванню ОП сприяють їхні високі параметри. Це великий коефіцієнт підсилення за напругою, що становить  $K_U = (10^4-10^6)$ ; високий вхідний опір кожного з входів –  $R_{вх} > 400$  кОм; низький вихідний опір  $R_{вих} < 100$  Ом; досить широкий частотний діапазон – від нуля до одиниць мегагерц.

Як лінійні підсилювачі у десятки тисяч разів реальні ОП не застосовують, бо їхній коефіцієнт підсилення (як і інші параметри) – величина вкрай нестабільна (наприклад, під дією температури).

Умовне позначення ОП наведено на рис. 1,а (на рис. 1,б,в надано умовні позначення, прийняті у деяких зарубіжних країнах).

Вхід, на який подано  $U_I$  називається інвертуючим, а  $U_H$  – неінвертуючим.

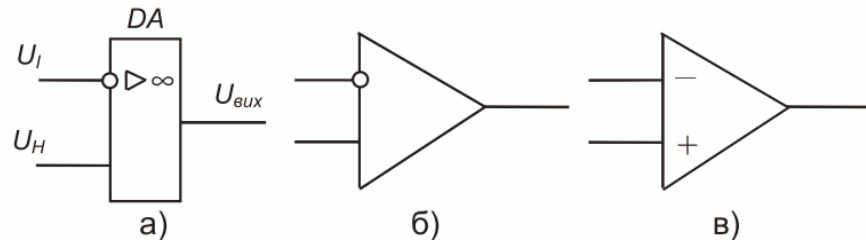


Рис.1 Умовні позначення ОП

Якщо сигнал подати на неінвертуючий вхід, то зміни вихідного сигналу співпадають за знаком (фазою) із змінами вхідного. Якщо сигнал подати на інвертуючий вхід, то зміни вихідного сигналу матимуть протилежний знак (фазу) щодо змін вхідного. Інвертуючий вхід використовують для охоплення ОП зовнішніми НЗЗ, а неінвертуючий – ПЗЗ.

Коротко розглянемо деякі характерні принципові схеми ОП. ОП типу 153УД1 (рис. 2) має трикаскадну структуру.

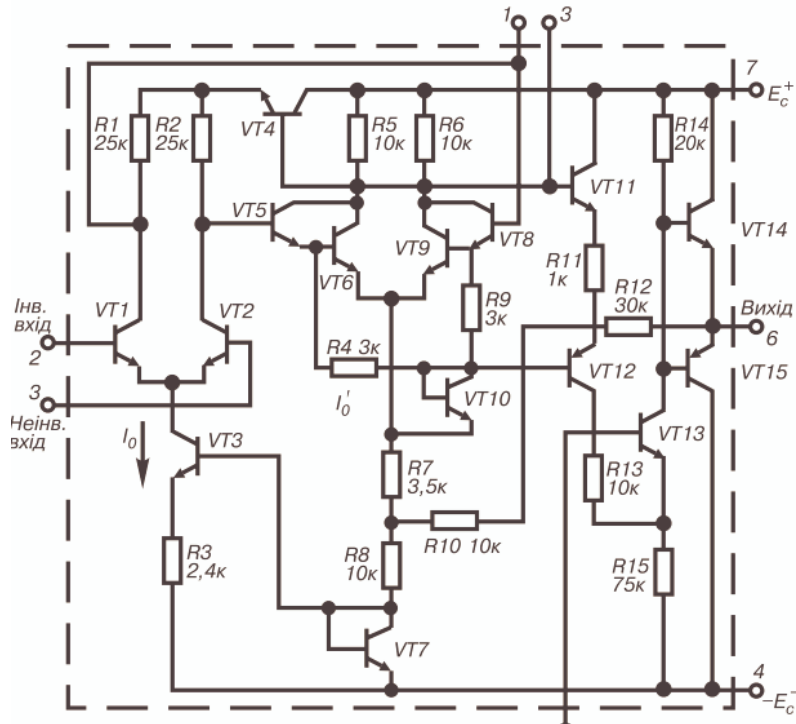


Рис. 2 ОП типу 153УД1

Перший диференційний каскад побудований на транзисторах  $VT1$ ,  $VT2$  з джерелом струму на транзисторі  $VT3$ . Другий – на складених транзисторах  $VT5$ ,  $VT6$  і  $VT8$ ,  $VT9$  (для забезпечення великого коефіцієнта підсилення за напругою).

Вихідний двотактний каскад утворюють  $VT14$  і  $VT15$ . Інші елементи забезпечують стабільне живлення першого каскаду і узгодження другого з вихідним (зверніть увагу: без кола на схемах позначають транзистори, що не мають власного корпусу безкорпусні).

Схемотехніка цього підсилювача багато у чому повторює схемотехніку ППС на дискретних елементах.

Особливістю інтегральної схемотехніки у даному разі є застосування в якості джерела струму  $I_0$  для вхідного диференційного каскаду так званого “струмового дзеркала”, побудованого на транзисторах  $VT3, VT7$ . Суть його роботи полягає у тому, що за однакових параметрів транзисторів (а при виконанні на одному кристалі у одному технологічному циклі вони дуже подібні) струм колектора  $VT3$  наслідує – “віддзеркалює” – струм колектора  $VT7$ : напруга з  $VT7$  у діодному вмиканні задає струм бази  $VT3$ , що працює у режимі генератора струму. При цьому нестабільність  $I_0$  визначається нестабільністю контактної різниці потенціалів емітерного переходу  $VT7$ . Задаючи відповідним чином величини опору резисторів, увімкнених послідовно з  $VT7$ , і напругу живлення каскаду, забезпечують стабілізацію режиму  $VT7$ , а отже і  $VT3$ .

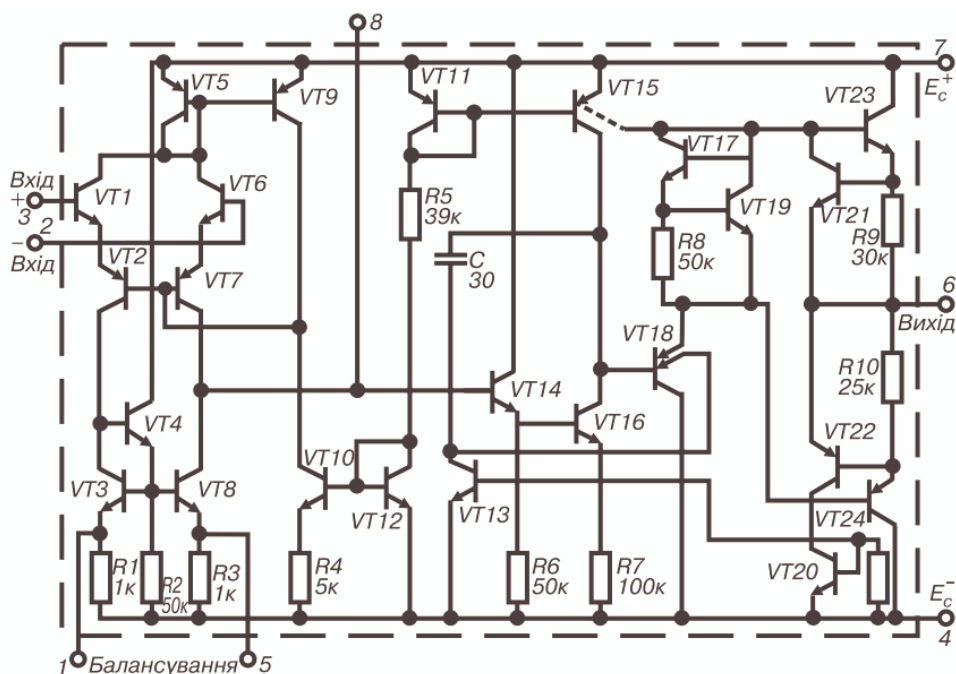


Рис. 3 ОП типу 140УД7

Типовим представником ОП другого покоління є ОП типу 140УД7 (рис. 3). Він двокаскадний, має складний вхідний диференційний каскад на  $VT1- VT4$  і  $VT6- VT8$  з вмиканням транзисторів за схемою СК-СБ-СЕ. Вхідні емітерні повторювачі (каскади з СК) на  $VT1, VT6$  працюють у режимі мікрострумів, забезпечуючи тим самим великий вхідний опір ОП. Вони є джерелом сигналу для каскадів з СБ на  $VT2, VT7$ , що їхніми колекторними навантаженнями є динамічні навантаження – джерела струму на  $VT3, VT8$  (як відомо, з боку колектора, через незначний нахил статичних вихідних ВАХ, транзистор має опір у сотні кілоом, а реально можливі опори резисторів у інтегральному виконанні сягають лише десятків кілоом).

Оскільки значення коефіцієнта підсилення за напругою пропорційне опору колекторного навантаження, це дозволяє отримати підсилення у декілька сотень разів вже у першому каскаді.

Вихідний каскад на транзисторах  $VT23$ ,  $VT24$  працює у режимі класу АВ. Захист каскаду від перевантажень забезпечують транзистори  $VT21$  і  $VT22$ , що, вмикаючись напругою датчиків струму  $R_9$ ,  $R_{10}$  (якщо вона перевищує приблизно 0,6 В), шунтують емітерні переходи транзисторів  $VT23$  і  $VT24$ . Решта елементів забезпечує додаткове підсилення та узгодження диференційного каскаду з вихідним. Особливістю ОП 140УД8 (рис. 4.) є те, що для забезпечення підвищеного входного опору у якості входних транзисторів  $VT2$  і  $VT5$  використано польові транзистори.

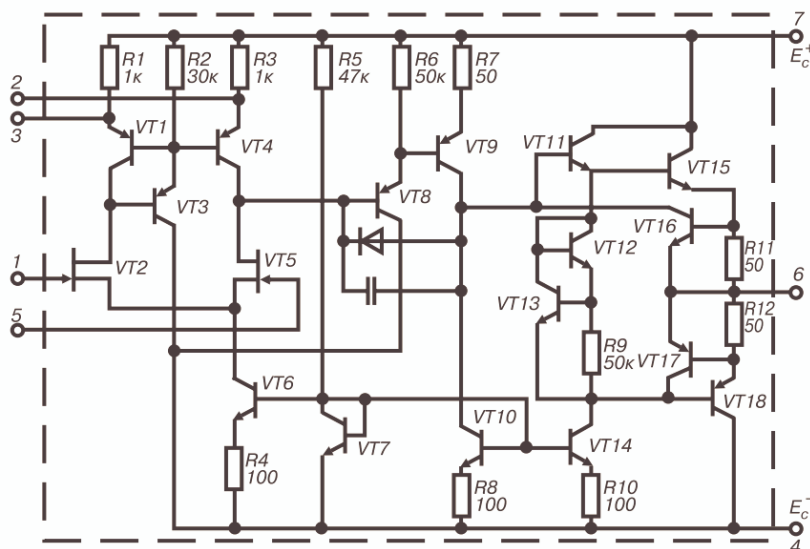


Рис. 4 ОП типу 140УД8

Слід зазначити, що номенклатура сучасних ОП надзвичайно широка. Це необхідно для забезпечення конкретних специфічних потреб розробників електронних пристроїв. На рис. 5 наведена типова схема вмикання ОП типу 140УД7.

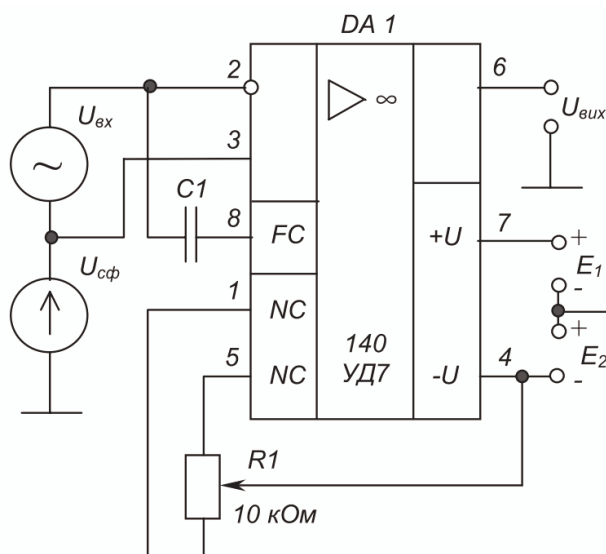


Рис. 5 – Схема вмикання ОП типу 140УД7

Диференційний вхідний сигнал  $U_{вх}$  подається між виводами 2 (інвертуючий вхід) і 3 (неінвертуючий вхід).  $U_{сф}$  – синфазний сигнал. Навантаження підмикається до виводу 6. Живлення забезпечується двополярним джерелом напруги  $E_1, E_2$ , що підмикається між виводами 7, 4 і нульовою точкою.

Нульовий вихідний сигнал при  $U_{вх} = 0$  забезпечується резистором  $R_1$ , підімкненим до входів балансування (корекції нуля) 1 і 5. Це дозволяє виключити вплив несиметрії схеми ОП, що виникає за рахунок неідеальної подібності його елементів.

Конденсатор  $C_1$  забезпечує корекцію амплітудно-частотної характеристики (АЧХ).

Схеми вмикання ОП і параметри коригуючих ланцюгів наводяться у довідкових матеріалах.

Найважливішими характеристиками ОП є вихідні амплітудні (передатні) характеристики  $U_{вих} = f(U_{вх})$ , зображені на рис. 6.

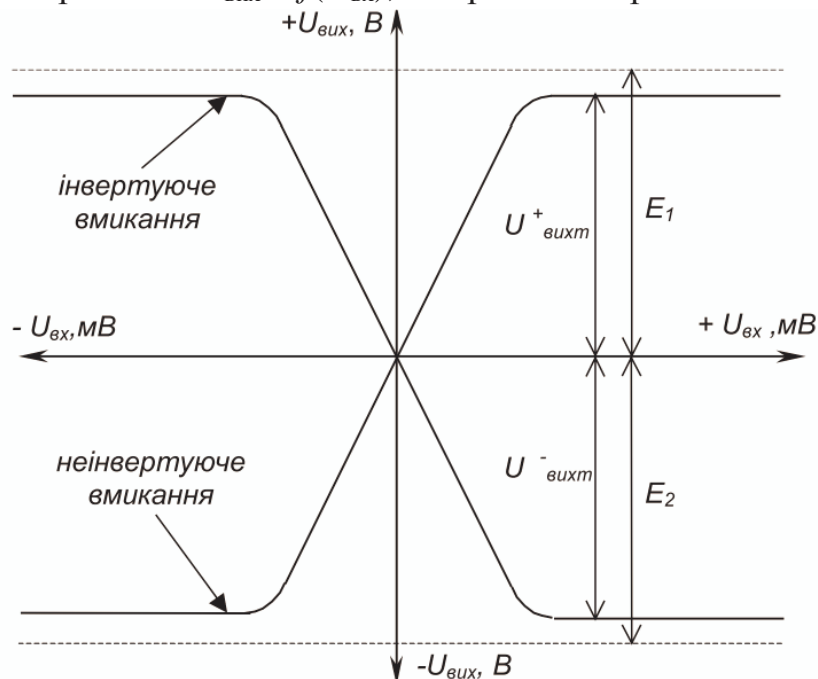


Рис. 6 Передатні характеристики ОП

Знімають ці характеристики, подаючи сигнал на один із входів і з'єднуючи інший з нульовою точкою.

Кожна вихідна характеристика має горизонтальні та скісну ділянки. Горизонтальні ділянки відповідають режимам повністю відкритого чи закритого транзистора вихідного каскаду (режимам насичення ОП). При зміні напруги вхідного сигналу на цих ділянках вихідна напруга підсилювача залишається незмінною і визначається напругами  $U^+_{вихт}$  або  $U^-_{вихт}$ , близькими до напруги джерел живлення  $E_1$  та  $E_2$ .

Коефіцієнт підсилення визначається за скісними ділянками:

$$K_{UOP} = \frac{\Delta U_{вих}}{\Delta U_{вх}}$$

Великі його значення дозволяють за умови охоплення ОП глибоким неготовним зворотнім зв'язком НЗЗ одержати схеми з властивостями, що залежать лише від параметрів ланцюга НЗЗ

Стан, за якого  $U_{вих} = 0$  при  $U_{вх} = 0$ , називається *балансом ОП*. Однак для реальних ОП умови балансу не виконуються (є *розбаланс*).

Напруга  $U_{зм0}$ , за якої  $U_{вих} = 0$ , має назву *вхідної напруги зміщення нуля*. Вона визначає напругу, що необхідно подати на вхід підсилювача для створення балансу.

Передатні характеристики ОП за наявності розбалансу наведені на рис. 7.

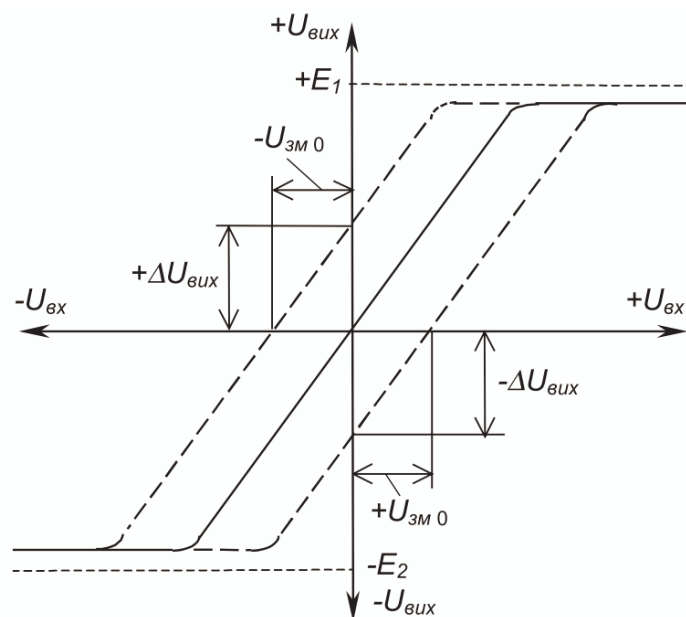


Рис. 7 – Передатні характеристики ОП за наявності розбалансу

Корекція розбалансу виконується коригуючими ланцюгами або, за відсутності таких у ОП деяких типів, подачею на вхід напруги, що дорівнює  $U_{зм0}$  і протилежна за знаком.

Вхідний опір, вхідний струм зміщення, максимальні вхідні диференціальна та синфазна напруги є основними вхідними параметрами ОП.

При необхідності захисту від перенапруг між входами ОП вмикають зустрічно-паралельно два діоди або стабілітрони.

Вихідними параметрами ОП є вихідний опір, максимальна вихідна напруга та струм.

Частотні характеристики ОП визначають з його АЧХ, зображеної на рис. 8. Вона має спадний характер за високих частот, починаючи від частоти зрізу  $f_{зр}$ .

$f_{в}$  – верхня межа частотного діапазону. За цієї частоти:

$$K_U = \frac{K_{UOP}}{\sqrt{2}}$$

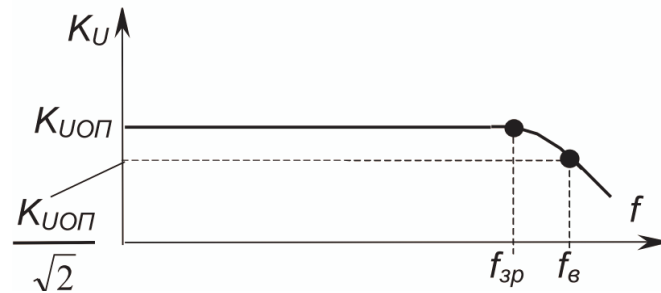


Рис. 8 Амплітудно-частотної характеристики ОП

Діапазон частот  $(0 - f_v)$  має назву смуги частот ОП.

Широке практичне використання ОП в аналогових пристроях зумовлене, головним чином, застосуванням у їхніх схемах різного роду зовнішніх НЗЗ, чому сприяє велике значення коефіцієнта підсилення  $K_{UOP}$ , високий вхідний та малий вихідний опори. Висока якість параметрів сучасних ОП дозволяє, зокрема, без внесення помітної похибки при розрахунку схем, вважати ОП за ідеальний!