

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВНУТРІШНІХ СПРАВ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

навчальної дисципліни
«Основи електрики та електроніки, електричні
вимірювання та їх стандартизація»
обов'язкових компонент
освітньо-професійної програми
освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

***272 Авіаційний транспорт
(Оператор безпілотних літальних апаратів)***

за темою № 19 - Підсилювачі. Операційний підсилювач

Кременчук 2023

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 30.08.2023 № 7

СХВАЛЕНО

Методичною радою
Кременчуцького льотного коледжу
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 28.08.2023 № 1

ПОГОДЖЕНО

Секцією Науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 29.08.2023 № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 28.08.2023р № 1

Розробник: викладач циклової комісії Авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., доцент, спеціаліст вищої категорії, Юрко О.О.

Рецензенти:

1. К.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання Шмельов Ю.М.
2. Заступник директора з ОЛР, командир авіаційного загону ТОВ «ЕЙР ТАУРУС» Гетьман Ю.Ю.

План лекції:

1. Загальні відомості про підсилювачі та їх класифікація.
2. Основні параметри і характеристики підсилювачів.
3. Принципи побудови підсилювачів.
4. Основні режими (класи) роботи підсилювачів.
5. Кола зміщення підсилюючих каскадів.
6. Операційний підсилювач.

Рекомендована література (основна, допоміжна), інформаційні ресурси в Інтернеті

Основна:

1. Болюх В. Ф., Данько В. Г., Гончаров Є. В. Основи електротехніки, електроніки та мікропроцесорної техніки. Харків: Планета-Прінт, 2019. 248 с.
2. Васильєва Л. Д., Медведенко Б. І., Якименко Ю. І. Напівпровідникові прилади: Підручник. Київ: ІВЦ Видавництво "Політехніка", 2003. 338 с.
3. Кармазін В.В., Семенець В.В. Курс загальної фізики. Навчальний посібник для вищих навчальних закладів. Київ: Кондор, 2016. 786 с.
4. Коваль Ю. О., Гринченко Л. В., Милютченко І. О., Рибін О. І. Основи теорії кіл. Ч. 1. Харків: Компанія СМІТ, 2008. 432 с.
5. Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: Теорія і практикум: навч. посіб. Київ: Каравела, 2004. 432 с.
6. Лавренова Д. Л., Хлистов В. М. Основи метрології та електричних вимірювань: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 133 с.

Допоміжна:

1. Андріяшик М. В., Вербицький Б. І., Король А.М. Курс фізики. Київ: Фламенко, 2008. 530 с.
2. Готра З. Ю., Лопатинський І. Є., Лукіянець Б. А., Микитюк З. М., Петрович І. В. Фізичні основи електронної техніки: Підручник. Львів: Видавництво "Бескид Бит", 2004. 880 с.
3. Гумен Б. М., Гуржій А. М., Співак В. М. Основи теорії електричних кіл: у 3 кн. Київ: Вища шк., 2003.
4. Дмитрієва В. Ф. Фізика: Навч. посіб, Київ: Техніка, 2008. 648 с.

Інформаційні ресурси в Інтернеті

1. <https://www.youtube.com/channel/UCWfhBu4fAt126ZbxREz3IBw>

Текст лекції

1. Загальні відомості про підсилювачі та їх класифікація

Електронним підсилювачем називається пристрій, призначений для посилення потужності електричного сигналу без спотворення його форми і частоти (для лінійного підсилювача).

Необхідність у підсилювачі виникає тоді, коли потужність джерела сигналу менша від потужності навантаження. У такому разі, послідовно з навантаженням вмикають зовнішнє джерело живлення і підсилюючий елемент *ПЕ*. Джерело сигналу діє не безпосередньо на навантаження, а на вхід *ПЕ* і, змінюючи провідність останнього, забезпечує пропорційні вхідному сигналу зміни струму у колі навантаження. В результаті у навантаженні виділяється необхідна величина потужності за рахунок енергії джерела живлення.

Загальна структурна схема підсилювача наведена на рис. 1.

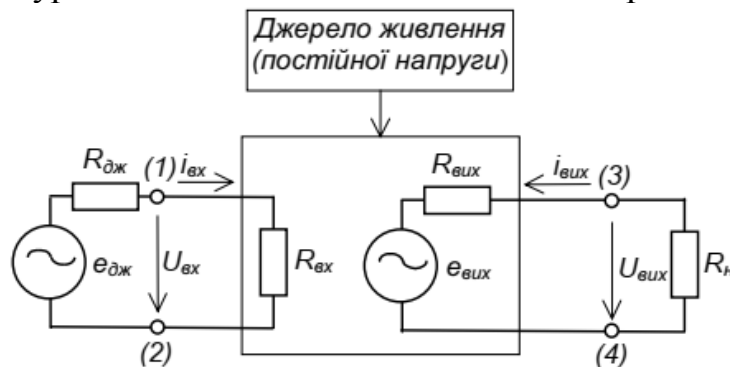


Рисунок 1 - Структурна схема підсилювача

Вхідний сигнал від керуючого джерела енергії $e_{дж}$ (джерела вхідного сигналу) подається на вхідні клеми (1)-(2) підсилювача через внутрішній опір джерела $R_{дж}$. Потужність джерела вхідного сигналу виділяється на вхідному опорі підсилювача $R_{вх}$. Навантаження підмикається до клем (3)-(4). Вхідний малопотужний сигнал керує кількістю енергії, що подається у навантаження від джерела живлення значно більшої потужності (підсилювальні властивості вихідного кола представлені за допомогою додаткової електрорушійної сили $e_{вих}$). Таким чином, завдяки використанню *ПЕ* і зовнішнього джерела живлення стає можливим підсилення малопотужного вхідного сигналу.

Підсилювачі класифікуються за такими ознаками:

- 1) призначення;
- 2) частота сигналу, що підсилюється;
- 3) форма сигналу;
- 4) характер зміни з часом сигналу, що підсилюється.

Усі ці ознаки накладають специфічні вимоги до побудови конкретних схем підсилювачів.

За призначенням підсилювачі поділяються на підсилювачі напруги, струму та потужності.

У підсилювача напруги $R_{дж} \ll R_{вх}, R_{вих} < R_{н}$.

У підсилювача струму $R_{дж} \gg R_{вх}; R_{вих} \gg R_{н}$.

У підсилювача потужності $R_{дж} = R_{вх} R_{вих} = R_n$, за рахунок чого забезпечується максимальна потужність як у вхідному, так і у вихідному колах (узгоджений за потужністю режим роботи).

За частотою підсилювачі поділяються на підсилювачі низької частоти (від одного герца до десятків кілогерц), середньої частоти (від десятків кілогерц до мегагерца) та високої частоти (більше за мегагерц).

За смугою частот робочого діапазону бувають широкосмугові підсилювачі й вибіркові (забезпечують підсилення у дуже вузькому діапазоні частот, в ідеалі - сигналів однієї частоти).

За формою сигналу, що підсилюється, вони поділяються на підсилювачі гармонічних та імпульсних сигналів.

За характером зміни вхідного сигналу з часом бувають підсилювачі постійного та змінного струму.

Найпростіший вузол, що забезпечує підсилення електричного сигналу, називається підсилюючим каскадом.

За видом зв'язку між джерелом сигналу, каскадами та навантаженням підсилювачі поділяються на підсилювачі з безпосереднім, резистивним, оптронним, резистивно-ємнісним, трансформаторним або резонансно-трансформаторним зв'язком.

Перші три види зв'язку можуть використовуватися у підсилювачах як постійного, так і змінного струму, решта - тільки у підсилювачах змінного струму.

2. Основні параметри і характеристики підсилювачів

Підсилювальні властивості підсилювача оцінюються такими характеристиками:

1) коефіцієнт підсилення - для лінійного підсилювача це:

$$K_U = \frac{U_{вих}}{U_{вх}};$$

– за напругою

$$K_I = \frac{I_{вих}}{I_{вх}};$$

– за струмом

$$K_P = \frac{P_{вих}}{P_{вх}}.$$

– за потужністю

У загальному випадку величини K_U та K_I є комплексними. Тому

$$K = \frac{\dot{A}_{вих}}{\dot{A}_{вх}} = \frac{A_{вих} e^{j\varphi_{вих}}}{A_{вх} e^{j\varphi_{вх}}} = K e^{j(\varphi_{вих} - \varphi_{вх})} = K e^{j\varphi}$$

де K - модуль коефіцієнта підсилення;

$\varphi_{вих}$, $\varphi_{вх}$ - фази вихідного та вхідного сигналів;

φ - зсув фаз між вхідним та вихідним сигналами.

У багатьох випадках коефіцієнт підсилення представляють у логарифмічних одиницях - децибелах (дБ):

$$K_U(\text{дБ}) = 20[\lg K_U]; K_I(\text{дБ}) = 20[\lg K_I]; K_P(\text{дБ}) = 10[\lg K_P];$$

2) вхідний опір за постійним або змінним (залежно від виду

підсилювача) струмом $R_{ax} = \frac{U_{ax}}{I_{ax}};$

3) вихідний опір підсилювача R_{eux} (опір між вихідними клемми підсилювача за вимкненого опору навантаження);

4) коефіцієнт корисної дії (к.к.д.) $\eta = \frac{P_{eux}}{P_{zag}},$ де P_{zag} - загальна потужність, що відбирається від джерела живлення.

Найважливішими характеристиками підсилювачів є амплітудна та амплітудно-частотна, наведені на рис. 2. та рис. 3 відповідно.

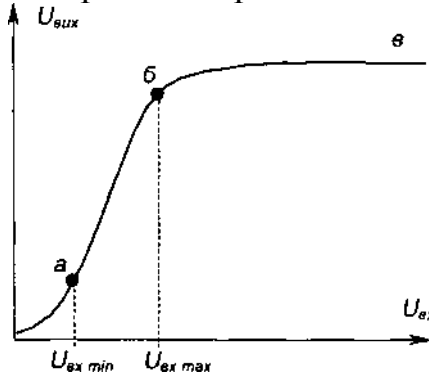


Рисунок 2 - Амплітудна характеристика $U_{vux} = f(U_{vx})$ підсилювача

Амплітудна характеристика являє собою залежність вихідної напруги від вхідної $U_{vux} = f(U_{vx})$. На рисунку позначено:

– *аб* - робоча ділянка, на якій пропорційним змінам вхідного сигналу відповідають пропорційні зміни вихідного;

– *бв* - режим насичення (тут із ростом вхідного сигналу ріст вихідного припиняється - підсилювач виходить із лінійного режиму);

$$D = \frac{U_{vx \max}}{U_{vx \min}}$$

– величина D називається динамічним діапазоном підсилювача.

– $(U_{vx \max} - U_{vx \min})$ - робочий діапазон вхідної напруги. Нелінійність характеристики при вхідних напругах, менших за $U_{vx \min}$ пояснюється наявністю шумових сигналів.

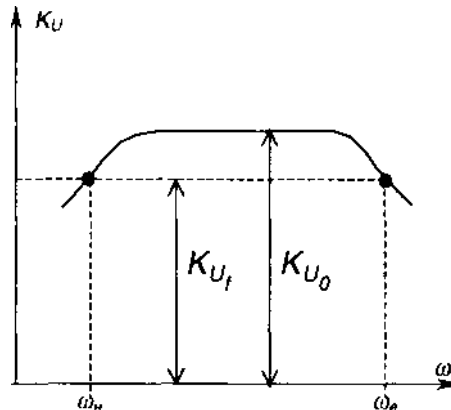


Рисунок 3 - Амплітудно-частотна характеристика $K_u = f(\omega)$ підсилювача

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) - це залежність коефіцієнта підсилення K_u від кругової частоти ω ($\omega=2\pi f$; f - частота сигналу, що підсилюється).

На рисунку позначено:

K_{U0} - найбільший коефіцієнт підсилення;

$K_{Uf} = \frac{K_{U0}}{\sqrt{2}}$ - рівень, за яким визначають робочий діапазон частот підсилюваного сигналу від ω_n до ω_v .

3. Принципи побудови підсилювачів

Як правило, підсилювачі складаються із декількох каскадів, що виконують послідовне підсилення сигналу. При цьому загальний коефіцієнт підсилення становить

$$K = K_1 K_2 \dots K_n.$$

Вхідні каскади та каскади попереднього підсилення виконуються, як правило, у вигляді підсилювачів напруги.

Вихідні каскади - кінцеві - зазвичай є підсилювачами потужності або струму.

Підсилювачі відрізняються один від одного кількістю каскадів, режимом роботи. Розглянемо загальні принципи побудови на прикладі підсилювача сигналів напруги змінного струму, показаного на рис. 4.

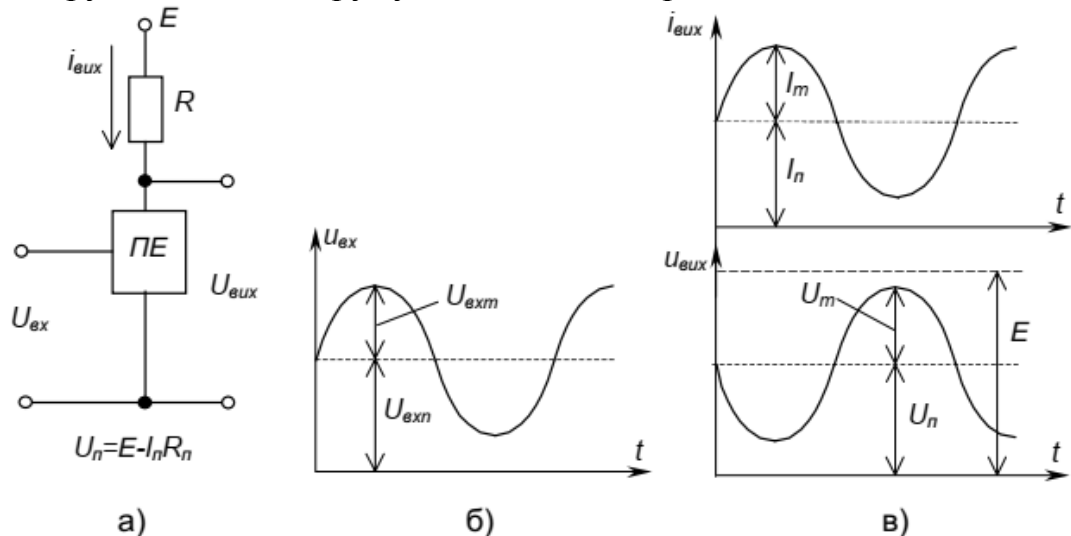


Рисунок 4 - Структурна схема підсилювача напруги змінного струму (а) та часові діаграми його вхідного (б) і вихідного (в) сигналів

Основним елементом підсилювача є *ПЕ* (біполярний або польовий транзистор), що разом із резистором R та джерелом живлення постійного струму E утворюють головне вихідне коло підсилювача.

Принцип підсилення полягає у перетворенні енергії джерела постійної напруги E в енергію змінного вихідного сигналу шляхом зміни провідності *ПЕ* за законом, зумовленим формою вхідного сигналу.

Оскільки вихідне коло підсилювача живиться постійною напругою, у ньому може протікати струм лише однієї полярності. Для забезпечення отримання підсиленого сигналу змінного струму необхідно задати його на

фоні постійного сигналу зміщення U_n , як це показано на рис. 5.4,в. При цьому для нормальної роботи підсилювача амплітудні значення вихідних напруги та струму повинні бути меншими за постійні рівні напруги та струму $U_m < U_n$; $I_m < I_n$ (постійного струму зміщення).

Постійні рівні струму та напруги у вихідному колі задаються подачею постійного рівня входної напруги $U_{вх n} > U_{вх m}$; ($I_{вх n} > I_{вх m}$).

Режим роботи підсилювача за постійним струмом називається режимом спокою. Він характеризується струмом спокою та напругою спокою вихідного кола. Щоб задати режим спокою, використовують спеціальні схеми зміщення напруги.

Вихідна напруга $U_{вих}$ подається на навантаження, яким зазвичай є наступний каскад підсилення. За такої побудови підсилювача його навантаженням (корисним) є не резистор R , а вхідний опір наступного каскаду підсилення, на який подається напруга $U_{вих}$.

4. Основні режими (класи) роботи підсилювачів

Режим спокою (режим роботи за постійним струмом) характеризує клас роботи підсилюючого каскаду. Ним визначаються призначення, к.к.д., ступінь нелінійних спотворень (порушення пропорційності вхідного і вихідного сигналів) та інші параметри каскаду.

Найбільш широко застосовують три класи, які називають - А, В і С.

При роботі підсилювача у режимі класу А точку спокою P , якій відповідають струми вибирають посередині вихідної динамічної характеристики за постійним струмом, як показано на рис. 5 (транзистор увімкнений за схемою з СЕ).

a_1 b_1 - ділянка активного режиму роботи транзистора, де нелінійні спотворення мінімальні; к.к.д. $\eta = 0,25 \dots 0,3$, бо в режимі спокою споживається значна потужність. Тому клас А застосовують переважно у каскадах попереднього підсилення.

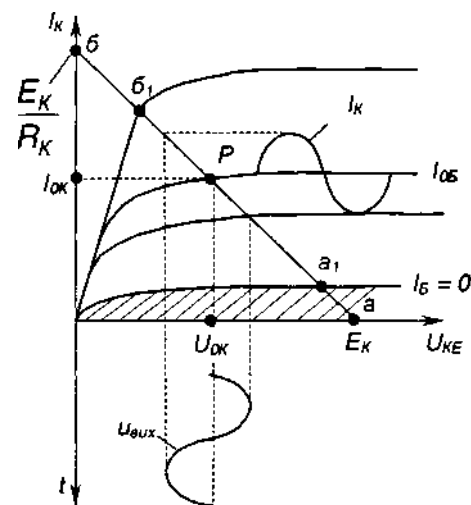


Рисунок 5 - Вихідна динамічна характеристика підсилювача в режимі класу А

Якщо підсилювач працює у режимі класу В, точка спокою вибирається на межі між активним режимом та режимом відтинання: її положення приблизно відповідає точці a_1 на рис. 6. У цьому режимі нелінійні спотворення великі, а к.к.д. $\eta = 0,6 \dots 0,7$.

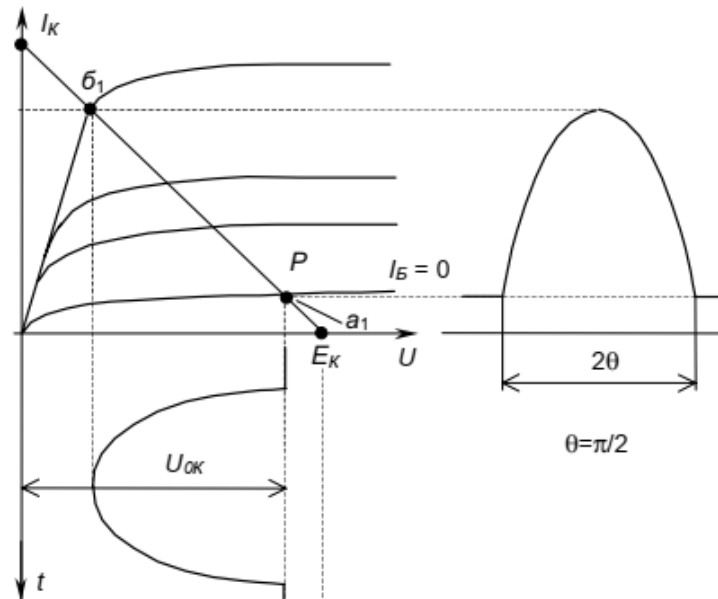


Рисунок 6 – Вихідна динамічна характеристика підсилювача в режимах класів В і С

При роботі підсилювача в режимі класу С точка спокою P лежить на ділянці відтинання a_1a . Кут відтинання $\theta = \pi/2$, $\eta = 0,85$.

Класи В і С застосовують при побудові підсилювачів потужності, причому підсилення позитивної та негативної півхвиль сигналу забезпечується у даному випадку окремими найпростішими каскадами, що разом являють собою єдиний каскад підсилення змінного струму. Клас АВ є проміжним між класами А і В: має менші викривлення сигналу, ніж клас В, у якому вони зумовлені нелінійністю початкової ділянки вхідної характеристики транзистора, але економічніший, ніж клас А.

5. Кола зміщення підсилюючих каскадів

Як було зазначено, щоб задати режим спокою каскаду, на його вхід необхідно подати певне значення постійної напруги, що має назву напруги зміщення, а кола, які забезпечують подачу цієї напруги, називаються колами зміщення (робоча точка P зміщується з положення, що відповідає $I_B=0$ у положення, обумовлене класом).

Існує два способи задання початкової напруги: фіксованим струмом або фіксованою напругою.

Перший спосіб реалізується за допомогою двох схем. Одну з них зображено на рис. 7 (вважаємо джерело вхідного сигналу умовно закороченим). У цій схемі напруга зміщення задається допоміжним джерелом напруги $E_{зм}$, яке разом з опором R_B утворює коло зміщення.

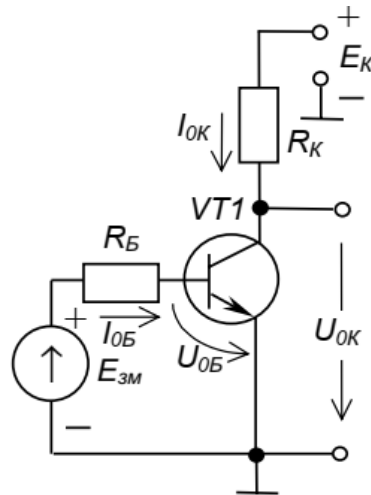


Рисунок 7 – Зміщення допоміжним джерелом напруги

Параметри кола зміщення розраховують за допомогою вихідної динамічної характеристики транзистора за постійним струмом, показаної на рис. 8,б.

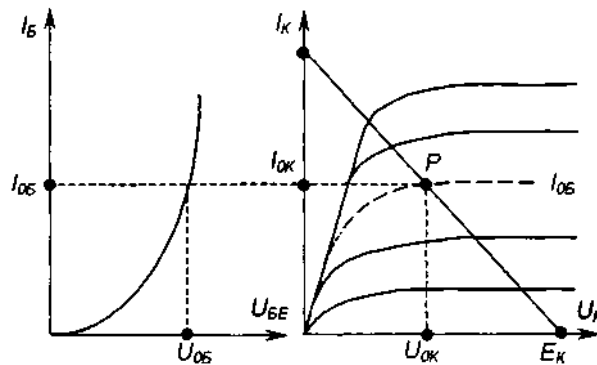


Рисунок 8 - Динамічні характеристики транзистора за постійним струмом: а - вхідна, б - вихідна

Клас режиму роботи підсилювача визначає положення точки спокою P , а отже, значення $I_{0К}$, $U_{0К}$, $I_{0Б}$.

Знайшовши величину $I_{0Б}$ і користуючись вхідною характеристикою транзистора (рис. 8,а), визначають $U_{0Б}$. Після цього знаходять $R_Б$:

$$R_Б = \frac{E_{зм} - U_{0Б}}{I_{0Б}}.$$

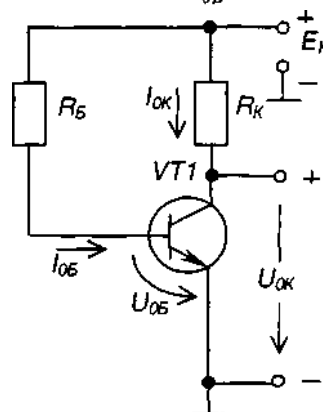


Рисунок 9 - Зміщення за одного джерела напруги

Схему зміщення фіксованим струмом бази за наявності одного джерела напруги зображено на рис. 9. Режим спокою забезпечується напругою джерела E_K і опором R_B :

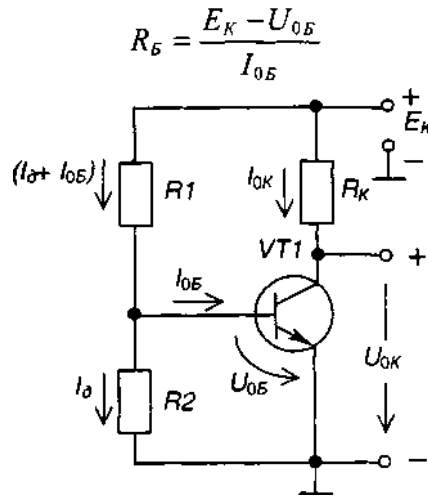


Рисунок 10 - Зміщення фіксованою напругою

Спосіб задання зміщення фіксованою напругою реалізується ділянкою напруги, як показано на рис. 10 - резистори R_1 і R_2 . Для розрахунку параметрів ділянки використовують такі співвідношення:

$$R_1 = \frac{E_K - U_{0Б}}{I_{0Б} + I_0};$$

$$R_2 = \frac{U_{0Б}}{I_0};$$

$$I_0 = (2 \div 5)I_{0Б}.$$

Остання схема знайшла найширше використання при побудові підсилюючих каскадів.

6. Операційний підсилювач

Операційний підсилювач (ОП) - це 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 і виході ОП за відсутності вхідного сигналу. Тому такі підсилювачі легко з'єднувати послідовно, а також охоплювати зворотними зв'язками.

Поширеному застосуванню ОП сприяють їхні високі параметри. Це великий коефіцієнт підсилення за напругою, що становить $K = (10^4 \dots 10^6)$; 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.

За ними ОП для багатьох застосувань наближаються до ідеального підсилювача, що має:

- 1) $K \rightarrow \infty$;
- 2) два симетричних входи з $R_{вх} \rightarrow \infty$;
- 3) $R_{вих} \rightarrow 0$;

4) безкінечний діапазон частот підсилюваного сигналу.

Умовне позначення ОП наведене на рис. 9.1,а (на рис. 9.1,б,в надано умовні позначення, прийняті у деяких зарубіжних країнах).

Вхід, на який подано U називається інвертуючим, а U_H - неінвертуючим.

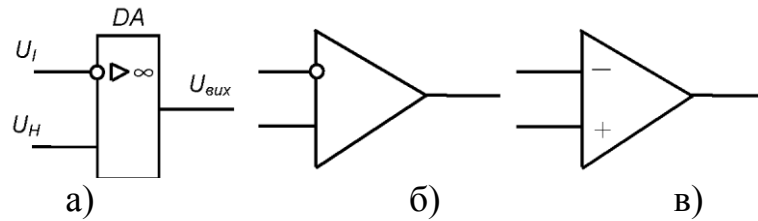


Рисунок 9.1 – Умовні позначення ОП

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..

Найважливішими характеристиками ОП є вихідні амплітудні (передатні) характеристики – $U_{вих} = f(U_{вх})$, зображені на рис. 11.

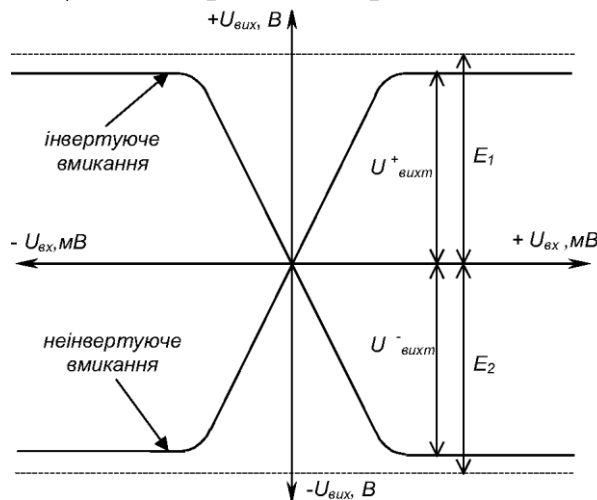


Рисунок 11 – Передатні характеристики ОП

Коефіцієнт підсилення визначається за скісними ділянками:

$$K_{ОП} = \frac{\Delta U_{вих}}{\Delta U_{вх}}.$$

Великі його значення дозволяють за умови охоплення ОП глибоким НЗЗ одержати схеми з властивостями, що залежать лише від параметрів ланцюга НЗЗ, бо при $K \rightarrow \infty$ $K_{33} \rightarrow 1/\chi$ - залежить лише від параметрів ланцюга НЗЗ (і фактично не залежить від підсилювача)

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_0 , за якої $U_{вих} = 0$, має назву вхідної напруги зміщення нуля. Вона визначає напругу, що необхідно подати на вхід підсилювача для створення балансу.

Корекція розбалансу виконується коригуючими ланцюгами.

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

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

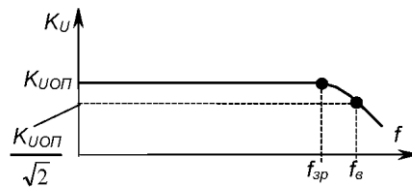


Рисунок 12 – АЧХ ОП

Частотні характеристики ОП визначають з його АЧХ, зображеної на рис. 12. Вона має спадний характер за високих частот, починаючи від частоти зрізу $f_{зр}$. $f_{в}$ - верхня межа частотного діапазону. За цієї частоти:

$$K_U = \frac{K_{Uоп}}{\sqrt{2}}.$$

Діапазон частот $(0 \dots f_{в})$ має назву смуги частот ОП.

Розглянемо деякі приклади електронних пристроїв на ОП.

Інвертуючий підсилювач, схему якого зображено на рис. 13, змінює знак вихідного сигналу відносно вхідного. Він створюється введенням паралельного НЗЗ за допомогою резистора $R_{зз}$ на інвертуючий вхід ОП - на цей вхід подається частина вихідного сигналу з дільника $R_{зз}$, R_1

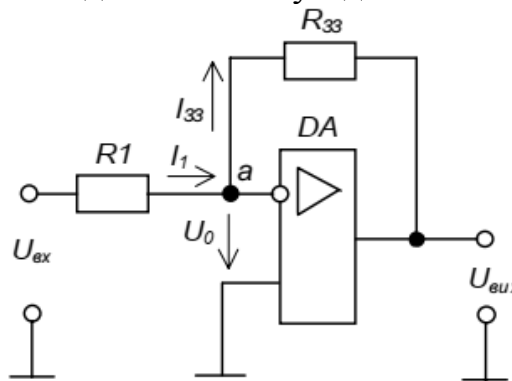


Рисунок 13 – Інвертуючий підсилювач на ОП

Вважаючи ОП за ідеальний, коефіцієнт підсилення схеми

$$K_{Uзз} = \frac{U_{вих}}{U_{вх}} = -\frac{R_{зз}}{R_1}.$$

Отже, $K_{Uзз}$ залежить лише від співвідношення опорів резисторів дільника НЗЗ. Знак «-» вказує на інверсію вхідного сигналу.

Вхідний опір схеми дорівнює величині R_1

Неінвертуючий підсилювач, схема якого зображена на рис. 14, можна отримати, якщо ввести послідовний НЗЗ за напругою на інвертуючий вхід, а вхідний сигнал подати на неінвертуючий вхід ОП.

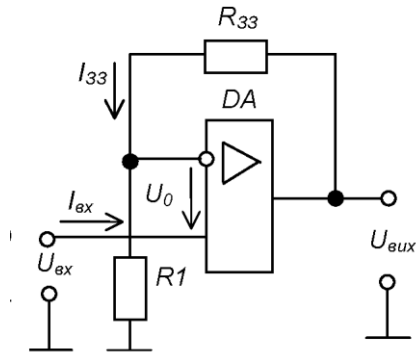


Рисунок 14 – Неінвертуючий підсилювач на ОП
Коефіцієнт підсилення неінвертуючого підсилювача

$$K_{U33} = \frac{U_{вих}}{U_{вх}} = 1 + \frac{R_{33}}{R_1}.$$

Якщо $R_{33}=0$, а $R_1 \rightarrow \infty$, одержимо неінвертуючий повторювач, схему якого зображено на рис. 15.

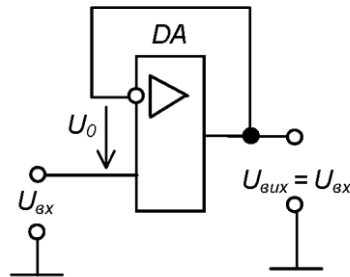


Рисунок 15 – Повторювач напруги на ОП

Неінвертуючий та інвертуючий підсилювачі широко використовуються як високостабільні підсилювачі різного призначення. Причому, неінвертуючий має великий вхідний опір (теоретично - нескінченний) і використовується для підсилення сигналів джерел із високим вихідним опором.

Інвертуючий суматор

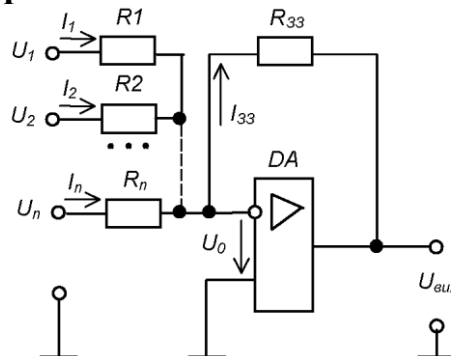


Рисунок 9.9 - Інвертуючий суматор

$$U_{вих} = -\left(\frac{R_{33}}{R_1}U_1 + \frac{R_{33}}{R_2}U_2 + \dots + \frac{R_{33}}{R_n}U_n\right).$$