

Лекція 2. Прості підсилювальні каскади

2.1 Принцип побудови підсилювальних каскадів

Багато підсилювачів складаються з декількох каскадів, які здійснюють послідовне посилення сигналу. Основним елементом підсилювача є підсилювальний елемент (ПЕ), функцію якого виконує біполярний або польовий транзистор і резистор R (рис.2.1).

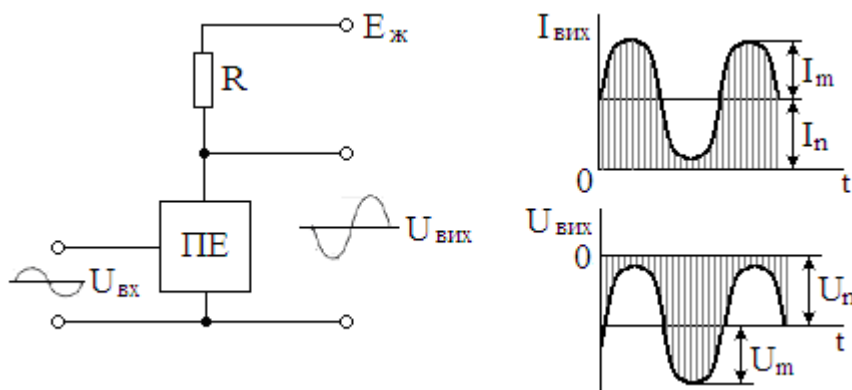


Рисунок 2.1 - Принцип побудови і часові діаграми роботи підсилювального каскаду

Разом з напругою електроживлення $E_{\text{ж}}$ ці елементи утворюють вихідне коло підсилювача. Посилюваний сигнал $U_{\text{вх}}$, прийнятий синусоїдальним, подається на вхід ПЕ. Вихідний сигнал знімається з виходу ПЕ або з резистора R . Зміна вихідного сигналу створюється в результаті зміни опору ПЕ і струму $I_{\text{вих}}$ у вихідному колі під впливом вхідної напруги.

Процес посилення ґрунтується на перетворенні енергії джерела постійної напруги $E_{\text{ж}}$ в енергію змінної напруги у вихідному колі за рахунок зміни опору ПЕ за законом, який задається вхідним сигналом.

Через використання для електроживлення джерела постійної напруги $E_{\text{ж}}$ струм i у вихідному колі підсилювача є односпрямованим. Амплітудні значення змінних I_m , U_m не перевищують постійних складових I_n , U_n , тобто $I_n > I_m$, $U_n \geq U_m$. Невиконання цих умов приведе до викривлення форми вихідного сигналу. Таким чином, для забезпечення роботи підсилювального кас-

каду при змінному входному сигналі в його вихідному колі повинні бути створені постійні складові струму I_n і напруги U_n .

Це завдання вирішують шляхом подачі у вхідне коло підсилювача крім посилюваного сигналу відповідної постійної напруги спокою $U_{\text{вх.сп.}}$ або струму спокою $I_{\text{вх.сп.}}$. Постійні складові струми й напруги характеризують електричний стан схеми при відсутності входного сигналу і визначають режим спокою підсилювача.

Підсилювальні властивості підсилювача ґрунтуються на наступному: при подачі на керований елемент напруги або струму входного сигналу змінюється опір керованого елемента, внаслідок чого в струмі вихідного кола створюється змінна частина. Показники підсилювальних каскадів залежать від способу включення транзистора, який виконує роль керованого елемента

Підсилювачем є подільник напруги живлення $E_{\text{ж}}$ (рис. 2.2), який складається з опору навантаження R_n і керованого опору R_k .

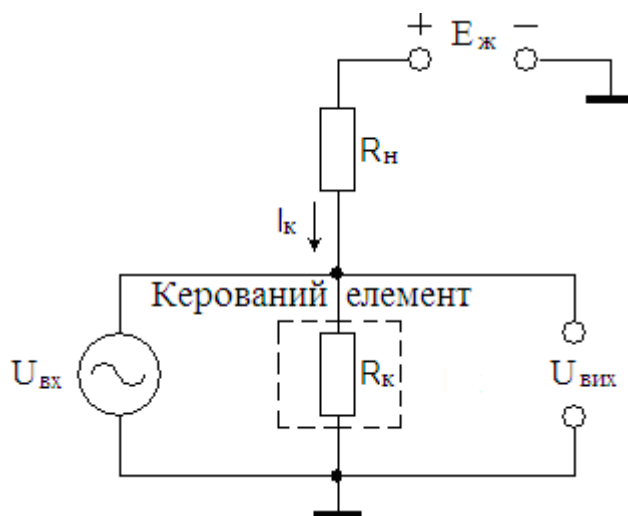


Рисунок 2.2 - Структурна схема підсилювача напруги

Вхідний сигнал $U_{\text{вх}}$ потрапляє до входу керованого опору R_k . Вихідний (підсилений) сигнал $U_{\text{вих}}$ знімається з виходу подільника і є часткою напруги живлення E_k , тобто:

$$U_{\text{вих}} = E_k \frac{R_k}{R_n + R_k}, \quad (2.1)$$

де R_k - керований опір, який змінюється під впливом входного сигналу $U_{\text{вх}}$.

З формули (2.1) випливає наступне:

- в основу роботи підсилювача покладене те, що вхідний сигнал $U_{вх}$, не потрапляючи до виходу, керує через R_k коефіцієнтом передавання $\frac{R_k}{R_n + R_k}$ напруги живлення E_k і створює на виході свою копію;
- вихідна напруга $U_{вих}$ підсилювача завжди є часткою напруги живлення E_k ;
- вихідна напруга $U_{вих}$ не може бути більше за напругу живлення E_k ;
- якщо вибрати напругу живлення більшу за вхідну ($E_k > U_{вх}$), то можна одержати підсилення ($U_{вих} > U_{вх}$).

Якщо вибрати опір R_k малим ($R_k \ll R_n$), то рівняння (2.1) матиме наступний вигляд:

$$U_{вих} = E_k \frac{R_k}{R_n}. \quad (2.2)$$

Відносно R_k рівняння (2.2) першого степеня. Тому, якщо R_k змінюється під $U_{вх}$ за лінійним законом, то $U_{вих}$ повторює форму вхідного сигналу $U_{вх}$, який треба підсилити.

Як керований опір R_k використовують електровакуумні прилади (тріоди, тетроди, пентоди) та напівпровідникові прилади (транзистори).

2.2 Підсилювальний каскад на біполярному транзисторі

Одним із найпоширеніших підсилювальних каскадів на біполярних транзисторах є каскад із загальним емітером (ЗЕ). У цьому каскаді емітер є загальним електродом для вхідного й вихідного кіл.

Основними елементами схеми є джерело живлення E_k , керований елемент транзистор VT і резистор R_k . Ці елементи утворюють головне коло підсилювального каскаду, у якому за рахунок протікання керованого колекторного струму створюється посилена змінна напруга на виході схеми.

Схема найпростішого підсилювального каскаду на біполярному транзисторі представлена на рисунку 2.3.

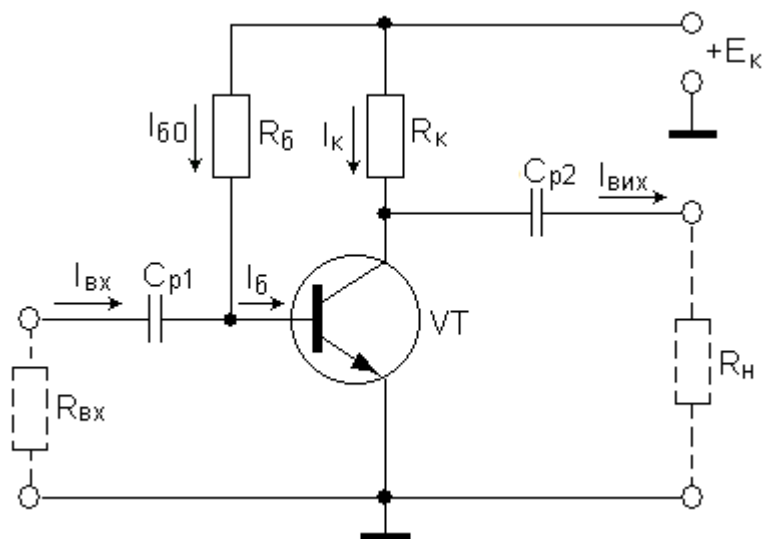


Рисунок 2.3 - Схема найпростішого підсилювального каскаду на біполярному транзисторі

Інші елементи виконують допоміжну роль. Конденсатори C_{p1} , C_{p2} є розділяючими. Конденсатор C_{p1} виключає шунтування вхідного кола каскаду колом джерела вхідного сигналу по постійному струму, що дозволяє виключити протікання постійного струму через джерело вхідного сигналу по колу ($E_k - R_6 - R_{vx}$) та забезпечити незалежність від внутрішнього опору цього джерела напруги в режимі спокою.

Функція конденсатора C_{p2} зводиться до пропущення в коло навантаження змінної складової напруги і затримці постійної складової.

Резистор R_6 задає режим спокою каскаду. Оскільки біполярний транзистор управляється струмом, струм спокою транзистора створюється завданням відповідної величини струму бази спокою I_{60} . Струм спокою забезпечується резистором R_6 по колу ($E_k - R_6 - \text{база VT} - \text{емітер VT} - \text{загальна шина}$).

Полярність джерела живлення E_k відповідає підсилювальному каскаду на транзисторі типу n-p-n. Для підсилювального каскаду із транзистором типу p-n-p полярність джерела E_k повинна бути протилежною.

Для колекторного кола підсилювального каскаду можна записати:

$$E_k = U_k + I_k R_k. \quad (2.3)$$

2.3 Підсилювальний каскад на польовому транзисторі

Підсилювальні каскади на польових транзисторах мають істотно більший вхідний опір у порівнянні з підсилювальними каскадами на біполярних транзисторах. З трьох можливих схем включення польових транзисторів (із загальним затвором, загальним витоком і загальним стоком) найбільш поширені підсилювальні каскади із загальним витоком (рис. 2.4), які являються аналогом каскадів із загальним емітером.

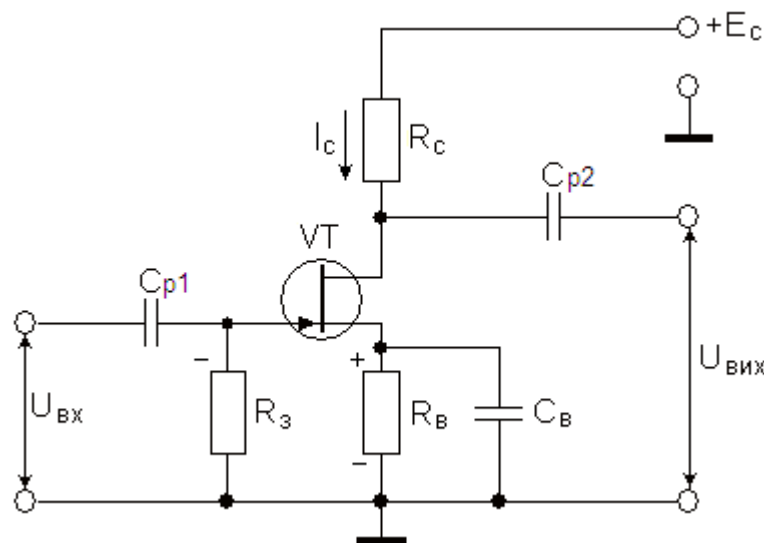


Рисунок 2.4 - Підсилювальний каскад, на польовому транзисторі з р-п затвором, із загальним витоком

Резистор R_c , за допомогою якого здійснюється посилення, включений в коло стоку і грає роль навантаження. У коло витоку включений резистор R_b , який створює необхідне падіння напруги U_3 , яка є напругою зсуву між затвором і витоком. Роздільний конденсатор C_{p1} не дає можливості постійному струму протікати через джерело вхідного сигналу. Через роздільний конденсатор C_{p2} постійна напруга не проходить до навантаження.

Резистори R_b , R_3 і конденсатор C_b утворюють ланку автоматичного зсуву. На R_b відбувається падіння напруги, зумовлене струмом стоку, яке передається на затвор через резистор R_3 , і визначає положення робочої точки, тобто режим роботи транзистора за постійним струмом транзистора. В режи-

мі змінного струму резистор R_B шунтований ємністю C_B , не порушуючи тим самим положення точки спокою, визначене в режимі за постійним струмом.

Вхідна напруга в підсилювальних каскадах на польових транзисторах з р-п затвором (рис. 2.4) прикладається між затвором і витоком, а на транзисторах з ізольованим затвором (рис. 2.5) – між затвором і підкладкою, яка зазвичай з'єднується з витоком (або із стоком).

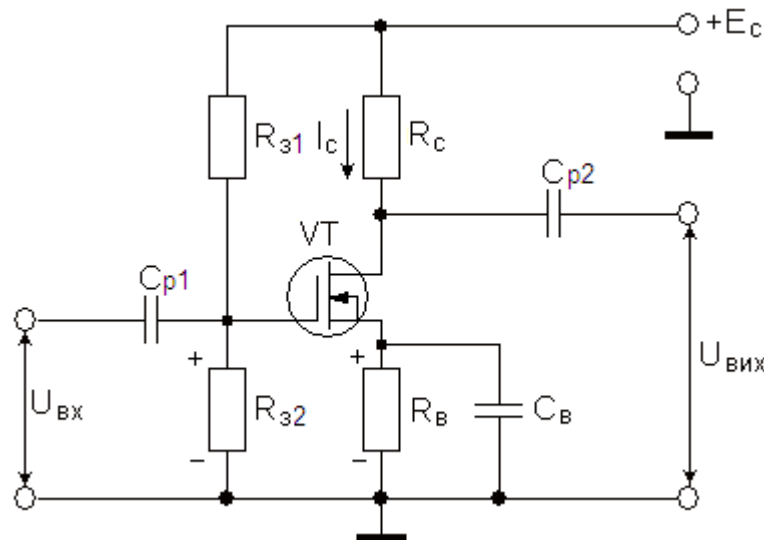


Рисунок 2.5 - Підсилювальний каскад, на польовому транзисторі з індукованим каналом, із загальним витоком

Вхідний струм для транзисторів з р-п затвором не перевищує 10^{-8} А, а для транзисторів з ізольованим затвором на декілька порядків менше. В каскадів на транзисторах з р-п затвором вхідний опір на низьких частотах складає десятки МОм, а у каскадів на МДН транзисторах досягає $10^{12} \dots 10^{15}$ Ом. Проте з підвищенням частоти вхідний опір істотно зменшується із-за протікання струмів перезарядки паразитних ємностей затвор-витік і затвор-стік.

Подача синусоїдального вхідного сигналу змінює по гармонійному закону значення струму стоку I_c згідно стік-затворним характеристикам транзисторів відносно вихідної точки. Зміни падіння напруги від струму I_c на резисторі R_c у багато разів перевершують напругу $U_{вх}$. Змінна складова цього падіння напруги через конденсатор C_{p2} поступає на вихід каскаду, як і в каскаді на біполярних транзисторах.

$$U_{\text{вих}} = E_c - I_c R_c \quad (2.4)$$

Зсув, який визначає положення вихідної робочої точки в каскадах на польових транзисторах має свої особливості на відміну від біполярних. В транзисторів з р-п затвором і з вбудованим каналом зсув може бути забезпечений за рахунок падіння напруги на опорі в колі витоку R_b від початкового струму I_{c0} , який протікає навіть при $U_{зв} = 0$. Для подачі потенціалу зсуву, відміченого знаком «мінус» у резистора R_b , до затвора досить підключити резистор R_z (рис. 2.4). Оскільки струм затвора в польових транзисторів малий, падіння напруги від цього струму на резисторі R_z практично дорівнює нулю (навіть якщо його опір складає десятки МОм), і можна вважати, що зсув $U_{зв} = I_c R_b$.

У польових транзисторів з індукованим каналом забезпечити зсув розглянутим способом не можна, тому що при $U_{зв} = 0$ вони замкнуті. Тому в каскадах на польових транзисторах з індукованими каналами напруга зсуву на затвор подається з дільника напруги на резисторах R_{z1} і R_{z2} , подібно до того, як це виконують в каскадах з біполярними транзисторами.

Температурні зміни струму стоку (а значить, і зсуви) у польових транзисторах у багато разів менше змін колекторного струму у біполярних транзисторів. Тому забезпечення необхідної температурної стабільності не викликає труднощів.

2.4 Диференціальний каскад

У електронній техніці часто потрібні підсилювачі сигналів, швидкість зміни яких дуже низька, наприклад з датчиків сигналів, що повільно змінюються, таких як термопара. Такі підсилювачі називають підсилювачами постійного струму. Найбільш поширеною схемою, на базі якої вони створюються, є диференціальний каскад (рис. 2.6).

У диференціальній схемі два входи, два виходи і два джерела живлення. Передбачимо, що параметри лівого і правого плечей схеми однакові.

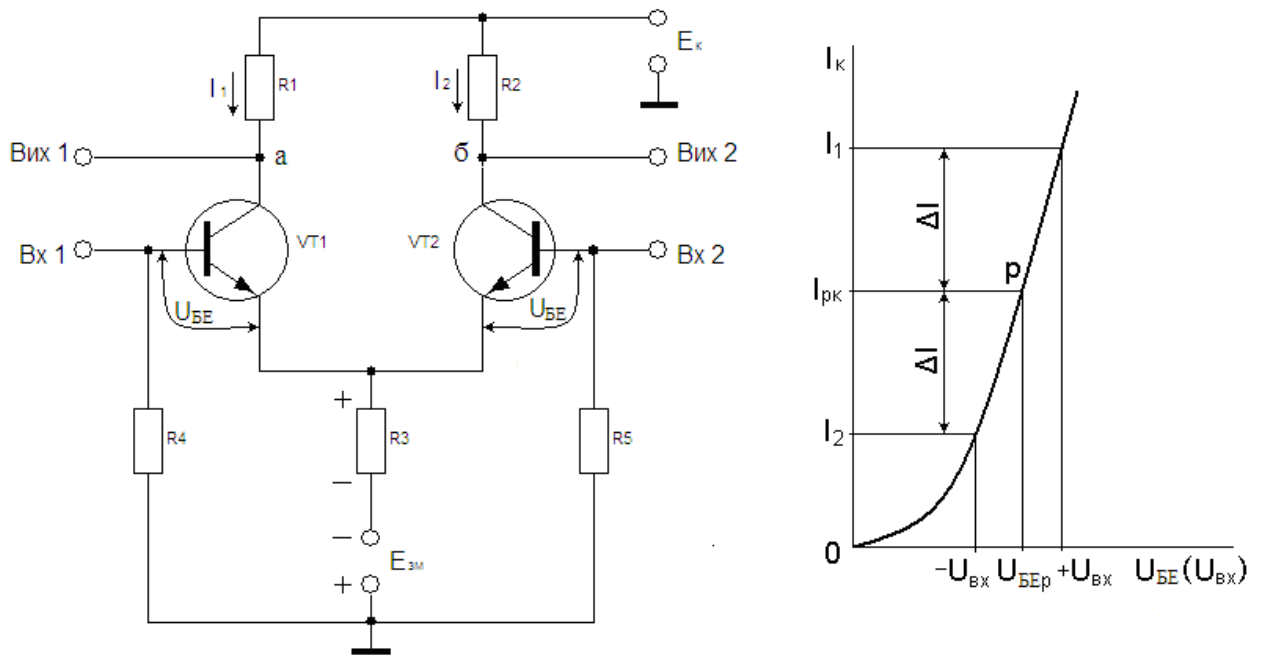


Рисунок 2.6 - Диференціальний підсилювальний каскад

Позитивний потенціал джерела живлення $E_{зм}$, який поступає через корпус і кола входних сигналів на бази обох транзисторів, відкриває їх в рівній мірі. Робочі точки **p** транзисторів VT1 і VT2 збігаються. Тому за відсутності входних сигналів під дією джерела живлення E_k по резисторах R1 і R2 протікають однакові колекторні струми $I_1 = I_2 = I_{кр}$. Оскільки $R1 = R2$ то ці струми створюють на них однакові падіння напруги, а значить, потенціали точок **a** і **б** однакові. Якщо опір навантаження включити між точками **a** і **б**, то вихідна напруга дорівнює нулю. Так можна виконати вимоги підсилювачів постійного струму про рівність нулю ($U_{вих}$ за відсутності сигналу $U_{ВХ}$). Такий стан схеми називають режимом спокою.

Якщо нехтувати базовими струмами, то по резистору R3 протікає сума струмів $I_1 + I_2$, що створює на ньому падіння напруги. Напруга, яка задає вихідні робочі точки транзисторів, визначатиметься різницею $E_{зм}$ і напруги на R3:

$$U_{BEр} = E_{зм} - (I_1 + I_2)R3 \quad (2.5)$$

Таке включення R3 створює послідовний негативний зворотний зв'язок по струму, стабілізуючи вихідні робочі точки транзисторів. Будь-які одночасні зміни, наприклад, збільшення струмів I_1 і I_2 , напруга джерела живлення,

яка виникає під дією змін, температури і так далі, викличуть збільшення падіння напруги на $R3$ і таке зменшення U_{BE} , яке прагне повернути (понизити) колекторні струми до вихідного значення, тобто стабілізувати їх сумарне значення: $I_1 + I_2 = \text{const}$.

Так само диференціальний каскад реагує на синфазний сигнал і перешкоду, тобто вхідні сигнали, які одночасно (без зрушення фаз) і однаково ($U_{\text{вх1}} = U_{\text{вх2}}$) діють на обидва входи, прагнучи одночасно змінити I_1 і I_2 . Зворотний зв'язок тим вище, чим більше $R3$.

Абсолютно інакше реагує диференціальний каскад, якщо сигнали на входах каскаду протифазні (наприклад $U_{\text{вх1}} = +U_{\text{вх}}$, а $U_{\text{вх2}} = -U_{\text{вх}}$). В цьому випадку (рис. 2.8) струм I_1 зростає на ΔI , а I_2 зменшиться на ΔI , але їх сума залишиться незмінною.

Тому зворотний зв'язок не прагне зменшити зміну струмів і кожне плече поводить як звичайна схема ЗЕ, тобто потенціал точки **а** і $U_{\text{вих1}}$ знизяться, а потенціал точки **б** і $U_{\text{вих2}}$ підвищаться. Каскад реагує лише на різницю вхідних сигналів, чому і називається диференціальним.

Розглянемо ще один випадок, коли напруга $U_{\text{вх}}$ діє лише на один з входів, наприклад $U_{\text{вх1}} > 0$, а $U_{\text{вх2}} = 0$. У перший момент струм I_1 зростає на ΔI , а I_2 залишається незмінним, при цьому зростає і сума струмів $(I_1 + \Delta I) + I_2$, але зворотний зв'язок приведе до того, що струм першого транзистора стане рівним $I_1 + \Delta I / 2$, а струм другого: $I_2 - \Delta I / 2$. І в цьому випадку потенціал точки **а** знизиться, а точки **б** підвищиться, але зміни $U_{\text{вих}}$ будуть в 2 рази менше, ніж у попередньому випадку.

Зазвичай підсилювачі постійного струму мають декілька каскадів, причому диференціальний каскад є першим і у нього використовується лише один вихід. Якщо прийняти, що використовується вихід 2, то подача позитивного сигналу на вхід 1 наводить до збільшення вихідного сигналу, а подача позитивного сигналу на вхід 2 – до зменшення. Тому вхід 1 називають прямим, або неінвертуючим а вхід 2 – зворотним, або що інвертуючим.

2.5 Зворотні зв'язки у підсилювачах

Зворотним зв'язком (ЗЗ) у підсилювачах називають відношення вихідного сигналу до вхідного. На рисунку 2.7 зображена структурна схема підсилювача з чотирьохполюсником зворотного зв'язку. Підсилювач характеризується коефіцієнтом підсилення K , а коло зворотного зв'язку характеризується коефіцієнтом передачі B . Коефіцієнти K і B - коефіцієнт передавання підсилювача Π без зворотного зв'язку.

Якщо чотириполюсник ЗЗ має коефіцієнт передавання B , то вихідна напруга визначиться як зазначені у вигляді комплексних значень.

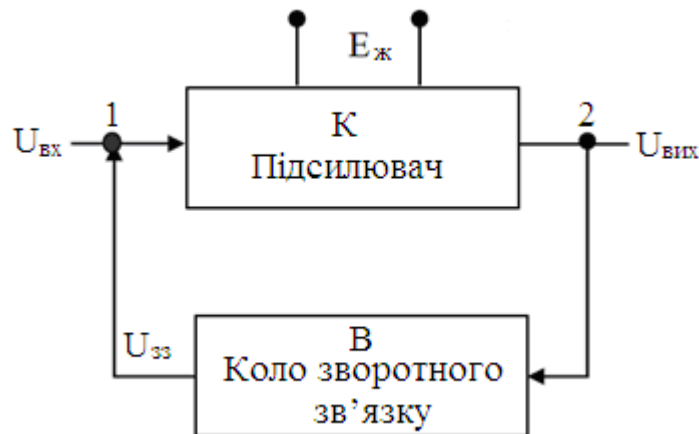


Рисунок 2.7 – Структурна схема підсилювача з зворотним зв'язком

У підсилювачах зворотний зв'язок використовується для поліпшення якісних показників: підвищення стабільності режиму, стабілізації коефіцієнта підсилення, зменшення спотворень тощо.

Залежно від способу одержання сигналу розрізняють:

- зворотний зв'язок за напругою, коли сигнал зворотного зв'язку пропорційний напрузі вихідного кола;
- зворотний зв'язок за струмом, коли сигнал зворотного зв'язку пропорційний струму вихідного кола;
- комбінований зворотного зв'язку, коли сигнал ЗЗ пропорційний як напрузі, так і струму вихідного кола.

За способом введення у вхідне коло сигналу зворотного зв'язку розрізняють:

- послідовну схему введення зворотного зв'язку, коли напруга сигналу зворотного зв'язку складається із вхідною напругою;
- паралельну схему введення зворотного зв'язку, коли струм кола зворотного зв'язку складається з струмом вхідного сигналу;
- змішану схему введення зворотного зв'язку, коли із вхідним сигналом складається струм і напруга кола зворотного зв'язку.

Зворотний зв'язок називають негативним, якщо він зменшує коефіцієнт підсилення (фази $U_{\text{вх}}$ та $U_{\text{зз}}$ протилежні і ЗЗ зменшує напругу вузлів 1 і 2)

Зворотний зв'язок називають позитивним, якщо коефіцієнт підсилення зростає (фази $U_{\text{вх}}$ та $U_{\text{зз}}$ збігаються і результуюча напруга на вході підсилювача зростає в порівнянні з $U_{\text{вх}}$),

Для кількісної оцінки ступеня впливу кола ЗЗ використовують коефіцієнт зворотного зв'язку, який показує яка частина вхідного сигналу, надходить на вхід підсилювача.

Не слід протиставляти корисність позитивного та негативного ЗЗ. Кожний з них має своє призначення. Наперед зазначимо, що негативний ЗЗ використовується переважно в підсилювачах, а позитивний - в генераторах.

Визначимо коефіцієнт передавання підсилювача зі зворотним зв'язком.

З рисунку 2.7 видно, що на вході підсилювача діє сума сигналів $U_{\text{вх}} + U_{\text{зз}}$. Тоді вихідна напруга становить

$$U_{\text{вих}} = K (U_{\text{вх}} + U_{\text{зз}}). \quad (2.6)$$

де K - коефіцієнт передавання підсилювача без зворотного зв'язку.

Якщо чотириполюсник ЗЗ має коефіцієнт передавання B , то вихідна напруга визначиться як

$$U_{\text{вих}} = K(U_{\text{вх}} + BU_{\text{вих}}). \quad (2.7)$$

Вирішуючи (2.7) відносно $U_{\text{вих}}$, знаходимо коефіцієнт передавання підсилювача з зворотним зв'язком:

$$K_{\text{зз}} = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{K}{1 - BK}. \quad (2.8)$$

Знаменник 1 – ВК називається глибиною зворотного зв'язку, а ВК – петльовим підсиленням.

Зворотний зв'язок, для якого $ВК < 0$, є негативним. Тоді з (2.8) видно, що $K_{зз} < K$, тобто негативний ЗЗ зменшує коефіцієнт підсилення. Це зменшення не є недоліком, яким воно було на початку становлення радіоелектроніки. Зараз у багатьох випадках виникає необхідність зменшити підсилення, що й досягається негативним ЗЗ. Крім того, негативний ЗЗ покращує основні показники підсилювача.

Зворотний зв'язок, для якого $ВК > 0$, є позитивним. Тоді з (2.8) видно, що $K_{зз} > K$, тобто позитивний ЗЗ збільшує коефіцієнт підсилення і при $ВК = +1$ перетворює його у нескінченність. Це означає, що при $U_{вх} = 0$ вихідна напруга $U_{вих} \neq 0$, тобто є вихідний сигнал при відсутності вхідного. Це спостерігається в автогенераторах і наявність позитивного ЗЗ є необхідною умовою для їхнього самозбудження.

Забезпечення позитивного або негативного ЗЗ здійснюється полярністю включення чотириполюсника зворотного зв'язку.

Види зворотного зв'язку:

- паралельний по входу і виходу;
- послідовний по входу і виходу;
- паралельний по входу і послідовний по виходу;
- послідовний по входу і паралельний по виходу.

Схема підсилювача з **паралельним зворотним зв'язком по входу і виходу** наведена на рисунку 2.8.

Підсилювач охоплений зворотним зв'язком за напругою $U_{вих}$ через чотириполюсник ЗЗ, вихід якого підключений паралельно до входу підсилювача. Тому на вході здійснюється зворотний зв'язок також за напругою.

Позначення на схемі:

U_c - напруга, яку треба підсилити;

R_i - опір джерела напруги U_c ;

R_n - опір навантаження.

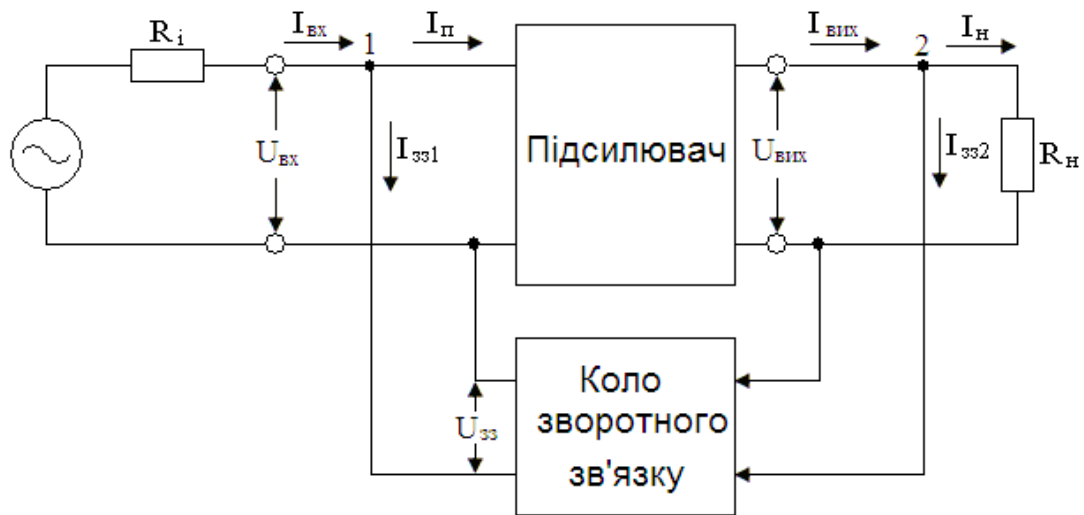


Рисунок 2.8 – Схема підсилювача з паралельним зворотним зв'язком за напругою

Визначимо вхідний $R_{\text{вх}}$ та вихідний $R_{\text{вих}}$ опори підсилювача з ЗЗ за напругою на вході й виході. У цій схемі можна здійснити ЗЗ, якщо на вході і виході немає короткого замикання, тобто $R_i > 0$ та $R_H > 0$.

Вхідний опір для схеми підсилювача (рис. 2.8) становить

$$R_{\text{вх ЗЗ}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{I_{\text{ВХ}}}, \quad (2.9)$$

Оскільки ЗЗ негативний, то він створює струм I_{331} , який витікає з вузла 1. Тоді за законом Кірхгофа маємо

$$I_{\text{ВХ}} = I_{\Pi} + I_{331}. \quad (2.10)$$

Підставляючи (2.10) у (2.9), одержуємо

$$R_{\text{вх ЗЗ}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{I_{\Pi} + I_{331}}, \quad (2.11)$$

де I_{Π} вхідний струм підсилювача без зворотного зв'язку.

Знайдемо вхідний опір підсилювача без зворотного зв'язку (рис. 2.9).

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{I_{\Pi}}. \quad (2.12)$$

Зіставляючи (2.11) та (2.12) переконуємося в тому, що $R_{\text{вх.ЗЗ}} < R_{\text{вх}}$.

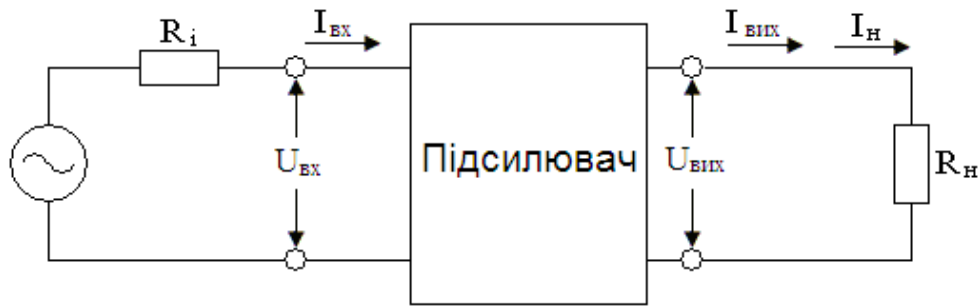


Рисунок 2.9 - Схема підсилювача без зворотного зв'язку

Паралельний негативний зворотний зв'язок зменшує вхідний опір підсилювача.

Аналогічно визначимо вихідний опір підсилювача з зворотним зв'язком (рис 2.8):

$$R_{\text{вих 33}} = \frac{U_{\text{вих}}}{I_{\text{вих}}} = \frac{U_{\text{вих}}}{I_{\text{н}} + I_{\text{332}}}. \quad (2.13)$$

Для підсилювача без зворотного зв'язку (рис. 2.9) маємо

$$R_{\text{вих}} = \frac{U_{\text{вих}}}{I_{\text{вих}}} = \frac{U_{\text{вих}}}{I_{\text{н}}}. \quad (2.14)$$

З формул (2.13) та (2.14) випливає, що $R_{\text{вих.33}} < R_{\text{вих}}$.

Паралельний негативний зв'язок зменшує вихідний опір підсилювача.

Знайдемо вхідний та вихідний опори підсилювача з паралельним зворотним негативним зв'язком.

$$R_{\text{вх 33}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх 33}}}. \quad (2.15)$$

$I_{\text{вх.33}}$ - вхідний струм підсилювача з зворотним зв'язком, який в $(1 + BK)$ разів більший за вхідний струм $I_{\text{вх}}$ без зворотного зв'язку, тобто

$$I_{\text{вх 33}} = I_{\text{вх}} (1 + BK). \quad (2.16)$$

Підставляючи (2.15) в (2.16), одержуємо

$$R_{\text{вх 33}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}} (1 + BK)}, \quad (2.17)$$

Аналогічним чином знаходимо

$$R_{\text{ВХ } 33} = \frac{R_{\text{ВХ}}}{1 + BK}. \quad (2.18)$$

Таким чином, зворотний зв'язок зменшує вхідний та вихідний опори підсилювача в глибину зворотного зв'язку $(1+BK)$ разів.

Схема підсилювача з **послідовним зворотним зв'язком по входу й виходу** наведена на рисунку 2.10.

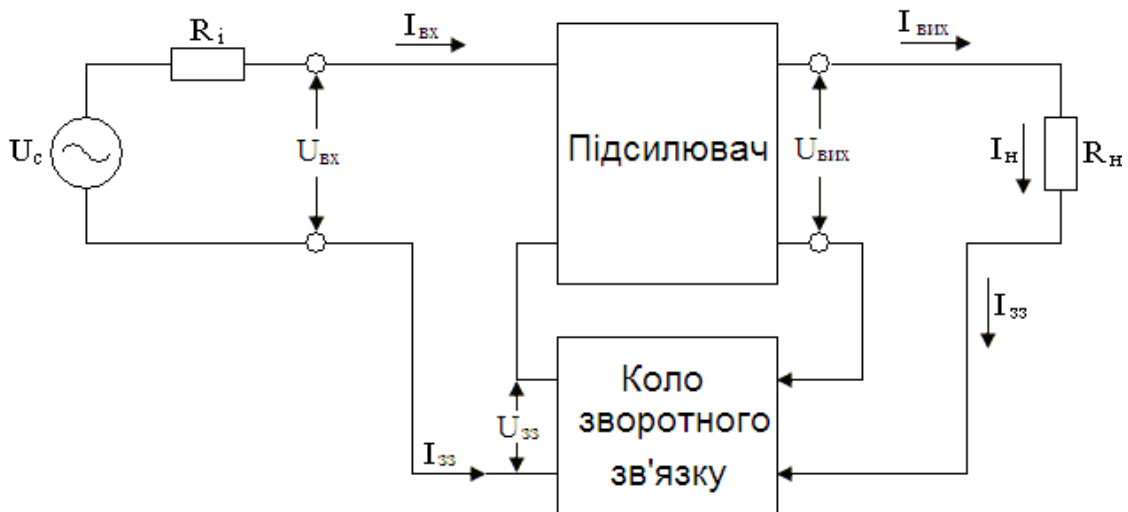


Рисунок 2.10 – Схема підсилювача з послідовним зворотним зв'язком за струмом

Вхідний опір підсилювача визначиться як

$$R_{\text{ВХ } 33} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{I_{\text{ВХ}}}. \quad (2.19)$$

Оскільки зворотний зв'язок негативний, то струми $I_{\text{ВХ } 33}$ та I_{33} протилежні, через що

$$I_{\text{ВХ}} = I_{\text{ВХ } 33} - I_{33} \quad (2.20)$$

Підставляючи (6.20) у (2.19), одержуємо

$$R_{\text{ВХ } 33} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{I_{\text{ВХ } 33} - I_{33}}. \quad (2.21)$$

З формули (2.21) випливає, що послідовний негативний зворотний зв'язок зменшує вхідний струм, через що вхідний опір підсилювача зростає.

Вихідний струм є наслідком підсилення вхідного струму в K разів: $I_{\text{вих}} = KI_{\text{вх}}$. Оскільки негативний зворотний зв'язок зменшує $I_{\text{вх}}$ (2.20), то $I_{\text{вих}}$ також зменшується, через що зростає $R_{\text{вих}}$.

Знайдемо вхідний та вихідний опори підсилювача з послідовним негативним зворотним зв'язком.

$$R_{\text{вх} \text{ зз}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх} \text{ зз}}}. \quad (2.22)$$

Тут $I_{\text{вх.зз}}$ - вхідний струм підсилювача з зворотним зв'язком, який в $(1 + BK)$ разів менший за вхідний струм $I_{\text{вх}}$ без зворотного зв'язку, тобто

$$I_{\text{вх}} = \frac{I_{\text{вх}}}{1 + BK}. \quad (2.23)$$

Підставляючи (2.23) в (2.22), одержуємо

$$R_{\text{вх} \text{ зз}} = R_{\text{вх}} (1 + BK). \quad (2.24)$$

Аналогічними діями знаходимо вихідний опір

$$R_{\text{вих} \text{ зз}} = R_{\text{вих}} (1 + BK). \quad (2.25)$$

Тут $R_{\text{вх}}$ та $R_{\text{вих}}$ - відповідно вхідний та вихідний опори підсилювача без зворотного зв'язку.

Послідовний негативний зворотний зв'язок збільшує вхідний та вихідний опори підсилювача в глибину зворотного зв'язку в $(1 + BK)$ разів.