

сигналу $U_{\text{вх}} > 0$ закривається транзистор $VT2$ і відкривається $VT1$, пропускаючи частину напруги $+E_1$ до виходу, забезпечуючи $U_{\text{вих}} > 0$.

Зменшення ж напруги сигналу $U_{\text{вх}} < 0$ закриває $VT1$ і відкриває $VT2$, пропускаючи до виходу частину напруги $-E_2$ і створюючи саме тим $U_{\text{вих}} < 0$.

Отже, вихідний сигнал змінюється навколо нульової вихідної напруги $U_{\text{вих}} = 0$.

Недоліком повторювача (рис. 7.11) є режим C . Тому доки $U_{\text{вх}}$ не перевищить $0,7$ В, транзистори не відкриваються, тобто від амплітуди сигналу віднімається $0,7$ В.

Для усунення цього недоліку входи транзисторів зміщують прямою напругою діодів (рис. 7.12). Це зміщення створюється на діодах $VD1$ та $VD2$, пряма напруга ($0,7$ В) яких додається до $U_{\text{вх}}$. Ця напруга виводить транзистори на межу відкриття без зменшення вхідного сигналу, як у схемі (рис. 7.11).

7.3. Каскади на операційних підсилювачах

7.3.1. Приймач струму

Приймач струму, схема якого наведена на рис. 7.13, наближається до ідеального і є базовим каскадом багатьох пристроїв на операційних підсилювачах (ОП).

Живлення входів забезпечується тим, що неінвертуючий вхід підключений до нульової шини, а інвертуючий – через резистор від'ємного зворотного зв'язку R_{33} до виходу. Ця схема живлення входів є найбільш розповсюдженою для більшості каскадів на ОП.

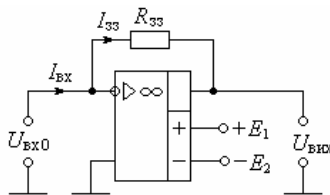


Рис. 7.13. Приймач струму

Критерієм ідеального приймача струму є нехтовно малий вхідний опір

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}0}}{I_{\text{вх}}} \rightarrow 0. \quad (7.19)$$

Покажемо це.

Оскільки вхідний опір входів саме ОП нескінченно великий, то вхідний струм $I_{\text{вх}}$ цілком тече по колу R_{33} :

$$I_{\text{вх}} = I_{33}. \quad (7.20)$$

Тоді вихідна напруга в будь-якому каскаді, який охоплений колом R_{33} , визначається як

$$U_{\text{вих}} = I_{33} R_{33}. \quad (7.21)$$

З формул (7.19) та (7.21) маємо

$$U_{\text{вих}} = I_{\text{вх}} R_{33}. \quad (7.22)$$

Підставляючи (7.22) в (7.19), одержуємо

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}0}}{U_{\text{вих}}} R_{33}. \quad (7.23)$$

Власний коефіцієнт підсилення ОП визначається як

$$K_0 = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}0}} \quad (7.24)$$

і становить $10^5 \dots 10^6$.

На підставі (7.23) та (7.24) остаточно маємо

$$R_{\text{вх}} = \frac{R_{33}}{K_0}, \quad (7.25)$$

звідки видно, що вхідний опір $R_{\text{вх}}$ приймача струму дуже малий і, наприклад, при $R_{33} = 10 \text{ кОм}$ і $K_0 = 10^5$ становить усього $R_{\text{вх}} = 0,1 \text{ Ом}$.

Отже, розглядаючи приймач струму, приходимо до наступних висновків:

- вхідний опір приймача струму малий, через що потенціали інвертуючого та неінвертуючого входів є близькими і тому напруга між ними $U_{\text{вх}0}$ не перевищує сотень мікрвольт і якщо, наприклад, $K_0 = 10^5$ і $U_{\text{вих}} = 15 \text{ В}$, то з (7.24) маємо $U_{\text{вх}0} = 150 \text{ мкВ}$, тобто $U_{\text{вх}0} \rightarrow 0$;

- попередній пункт визначає, що від'ємний ЗЗ вирівнює потенціали інвертуючого та неінвертуючого входів;

- приймач струму підсилює різницю потенціалів $U_{\text{вх}}$ між інвертуючим та неінвертуючим входами, перетворюючи вхідний струм $I_{\text{вх}}$ у вихідну напругу $U_{\text{вих}}$ (7.21).

7.3.2. Інвертуючий підсилювач напруги

Для підсилення напруги необхідно перетворити її на струм та підвести його до входу приймача струму (рис. 7.13). Це перетворення в схемі інвертуючого підсилювача (рис. 7.14) здійснює резистор $R1$. Резистор $R2$ здійснює від'ємний зворотний зв'язок, метою якого є зменшення коефіцієнта підсилення від K_0 до необхідної величини

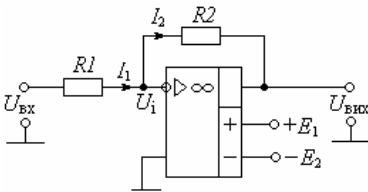


Рис. 7.14. Інвертуючий підсилювач

$$K_U = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}}. \quad (7.26)$$

Для пояснення цього зменшення визначимо K_U . Знаходимо струми

$$I_1 = \frac{U_{\text{вх}} - U_i}{R_1}; \quad (7.27)$$

$$I_2 = \frac{-U_{\text{вих}} - U_i}{R_2}. \quad (7.28)$$

Оскільки від'ємний зворотний зв'язок вирівнює потенціали входів ОП,

то інвертуючий вхід є віртуальною землею, тобто

$$U_i = 0. \quad (7.29)$$

Тоді

$$I_1 = \frac{U_{\text{вх}}}{R_1}; \quad (7.30)$$

$$I_2 = -\frac{U_{\text{вих}}}{R_2}. \quad (7.31)$$

Знак “-“ у (7.31) віддзеркалює те, що сигнал потрапляє до інвертуючого входу, через що знаки вхідної напруги $U_{\text{вх}}$ та вихідної $U_{\text{вих}}$ протилежні, тобто інвертуючий підсилювач обертає фазу вхідного сигналу на 180° .

Оскільки вхідні опори саме входів ОП нескінченно великі, то вони ніколи не обтікаються струмами. Тоді вхідний струм I_1 може текти тільки по колу зворотного зв'язку R_2 , тобто

$$I_1 = I_2. \quad (7.32)$$

З формул (7.26) та (7.30) ... (7.32) одержуємо вираз для коефіцієнта підсилення інвертуючого підсилювача

$$K_i = -\frac{R_2}{R_1}. \quad (7.33)$$

Знак “-“ вказує на протилежність фаз $U_{\text{вх}}$ та $U_{\text{вих}}$, тобто $U_{\text{вих}} = -K_i U_{\text{вх}}$.

Отже, коефіцієнт підсилення інвертуючого підсилювача однозначно визначається співвідношенням опорів резистора зворотного зв'язку R_2 та резистора на вході R_1 . Вибором опору R_2 забезпечують необхідне підсилення.

Щодо опору R_1 , то йому дорівнює вхідний опір. Тому R_1 не може бути надмірно малим. Через це необхідний коефіцієнт підсилення забезпечують переважно вибором опору R_2 .

Інвертуючий підсилювач може сприймати сигнали як безпосередньо по гальванічному колу, так і через конденсатор.

7.3.3. Неінвертуючий підсилювач напруги

У *неінвертуючому підсилювачі*, схема якого наведена на рис. 7.15, сигнал потрапляє до неінвертуючого входу. Тому фази $U_{\text{вх}}$ та $U_{\text{вих}}$ співпадають.

Для визначення коефіцієнта підсилення, зважаючи на те, що від'ємний ЗЗ вирівнює потенціали входів ОП, скористуємось рівністю $U_i = U_{\text{вх}}$. Напруга U_i є вихідною напругою подільника R_2 ; R_1 і тому

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{вих}} \frac{R_1}{R_1 + R_2}. \quad (7.34)$$

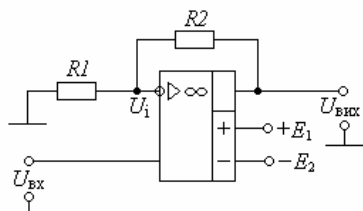


Рис. 7.15. Неінвертуючий підсилювач постійного струму

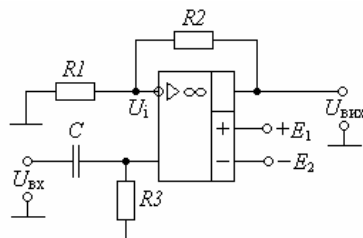


Рис. 7.16. Неінвертуючий підсилювач змінного струму

З формул (7.33) та (7.34) знаходимо коефіцієнт підсилення неінвертуючого підсилювача

$$K_{\text{н}} = \frac{R_2}{R_1} + 1. \quad (7.35)$$

Зіставляючи (7.33) та (7.35), бачимо, що $K_{\text{н}}$ більше за K_{i} на одиницю. Для великих коефіцієнтів підсилення ($K_{\text{i}} \gg 1$) це не має значення, а на малі K_{i} одиниця впливає суттєво.

Щодо вхідного опору, то він значний і дорівнює власному опору входу ОП, тобто є досить великим.

Слід звернути особливу увагу на те, що неінвертуючий вхід не має живлення і тому його треба підключати до джерела сигналу тільки по гальванічному колу.

Якщо треба подавати $U_{\text{вх}}$ через конденсатор C , то в схемі має бути резистор R_3 , який забезпечує гальванічне коло неінвертуючого входу (рис. 7.16).

7.3.4. Повторювач напруги

Повторювач має коефіцієнт підсилення напруги

$$K_{\text{п}} = 1. \quad (7.36)$$

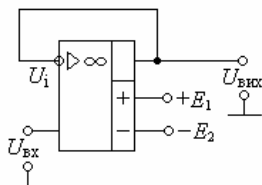


Рис. 7.17. Повторювач

Зіставляючи (7.36) з (7.35), виявляємо, що рівність (7.36) досягається за умов

$$R_2 = 0; R_1 \rightarrow \infty, \quad (7.37)$$

тобто, для одержання повторювача слід у неінвертуючому підсилювачі закортити R_2 та вилучити R_1 (рис. 7.17).

Повторювач працює наступним чином.

Від'ємний ЗЗ вирівнює потенціали інвертуючого U_i та неінвертуючого $U_{\text{вх}}$ входів, тобто забезпечує рівність

$$U_i = U_{\text{вх}}. \quad (7.38)$$

Оскільки $U_{\text{вих}}$ та U_i закорочені, то

$$U_{\text{вих}} = U_i. \quad (7.39)$$

Зі співвідношень (7.38) та (7.39) видно, що вхідна й вихідна напруги збігаються:

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}}, \quad (7.40)$$

звідки

$$K_{\text{п}} = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} = 1, \quad (7.41)$$

тобто коефіцієнт передавання повторювача дорівнює 1.

Повторювач має великий вхідний опір і малий вихідний і тому повторює вхідну напругу, але з підсиленням потужності.

Оскільки вхідне коло повторювача цілком перейняте з неінвертуючого підсилювача, то все щодо змінного струму, слід виконувати за схемою (рис. 7.16).

7.3.5. Інвертуючий суматор

Інвертуючий суматор, схема якого наведена на рис. 7.18, у загальному випадку складає струми. Ця здатність зумовлена нехтовно малим опором приймача струму (див. рис. 7.13), на якому здійснений суматор.

Оскільки сума вхідних струмів повністю тече по колу ЗЗ, то

$$I_{\text{ЗЗ}} = I_1 + I_2 + \dots + I_n. \quad (7.42)$$

Вихідна напруга становить

$$U_{\text{вих}} = -(I_1 + I_2 + \dots + I_n) R_{\text{ЗЗ}}. \quad (7.43)$$

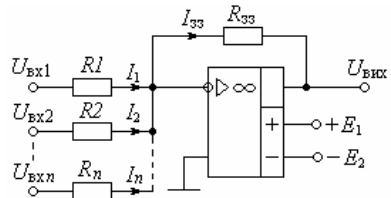


Рис. 7.18. Інвертуючий суматор

Струми (7.42) визначаються як

$$I_1 = \frac{U_{\text{вх}1}}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U_{\text{вх}2}}{R_2}; \quad \dots; \quad I_n = \frac{U_{\text{вх}n}}{R_n}. \quad (7.44)$$

З формул (7.42) – (7.44) визначаємо вихідну напругу

$$U_{\text{вих}} = - \left(\frac{U_{\text{вх}1}}{R_1} + \frac{U_{\text{вх}2}}{R_2} + \dots + \frac{U_{\text{вх}n}}{R_n} \right) R_{\text{ЗЗ}}. \quad (7.45)$$

З останнього співвідношення видно, що суматор складає напруги (7.45) $U_{\text{вх}1} \dots U_{\text{вх}n}$ зі своїми масштабними коефіцієнтами, які визначаються

опорами $R_1 \dots R_n$. Наприклад, при $U_{\text{вх1}} = U_{\text{вх2}}$ та $R_2 = 2R_1$ внесок напруги $U_{\text{вх2}}$ у вихідний сигнал буде вдвічі меншим за $U_{\text{вх1}}$. Вираз у дужках (7.45) носить назву *зваженої суми*.

Якщо треба одержати *арифметичне* складання напруг, то згадані масштабні коефіцієнти мають дорівнювати одиниці. З цього слідує, що опори усіх резисторів мають бути однаковими:

$$R_1 = R_2 = \dots = R_n = R_{33} = R. \quad (7.46)$$

З формул (7.45) та (7.46) випливає, що в окремому випадку при однакових опорах усіх резисторів суматор складає вхідні напруги арифметично:

$$U_{\text{вих}} = -(U_{\text{вх1}} + U_{\text{вх2}} + \dots + U_{\text{вхn}}). \quad (7.47)$$

7.3.6. Схема складання-віднімання

Схема складання-віднімання, яка наведена на рис. 7.19, є узагальненням суматора (рис. 7.18).

Оскільки в схемі (рис. 7.19) використовуються диференційні входи ОП (інвертуючий та неінвертуючий), то внесок вхідних напруг цих входів у вихідну напругу буде з протилежними знаками.

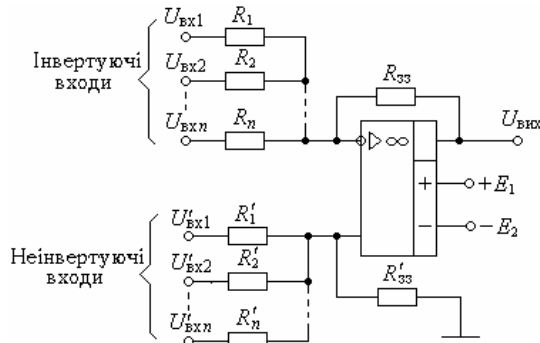


Рис. 7.19. Схема складання-віднімання

Щодо загальної формули для $U_{\text{вих}}$ за будь-яких опорів резисторів, то вона дуже громіздка. Тому обмежимося лише збалансованими коефіцієнтами інвертуючого та неінвертуючого підсилення, умовами яких є:

$$\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_m} \right) R_{33} = \left(\frac{1}{R'_1} + \frac{1}{R'_2} + \dots + \frac{1}{R'_n} \right) R'_{33}, \quad (7.48)$$

де m – число інвертуючих входів;

n – число неінвертуючих входів.

Тоді за аналогією з (7.45) визначимо вихідну напругу:

$$U_{\text{вих}} = - \left(\frac{U_{\text{вх}1}}{R_1} + \frac{U_{\text{вх}2}}{R_2} + \dots + \frac{U_{\text{вх}m}}{R_m} \right) R_{33} + \left(\frac{U'_{\text{вх}1}}{R'_1} + \frac{U'_{\text{вх}2}}{R'_2} + \dots + \frac{U'_{\text{вх}n}}{R'_n} \right) R'_{33}. \quad (7.49)$$

Як і для суматора (рис. 7.18), за аналогією з (7.46) при

$$\begin{aligned} R_1 = R_2 = \dots = R_m = R_{33} = R, \\ R'_1 = R'_2 = \dots = R'_n = R'_{33} = R' \end{aligned} \quad (7.50)$$

одержуємо вихідну напругу як наслідок арифметичного складання-віднімання вхідних сигналів:

$$U_{\text{вих}} = - (U_{\text{вх}1} + U_{\text{вх}2} + \dots + U_{\text{вх}m}) + (U'_{\text{вх}1} + U'_{\text{вх}2} + \dots + U'_{\text{вх}n}). \quad (7.51)$$

Примітка. Звертаємо особливу увагу на обов'язкову наявність резистора R_{33} , без якого складання-віднімання неможливе. На великий жаль у деяких виданнях його немає.

7.3.7. Неінвертуючий суматор

Неінвертуючий суматор, схема якого наведена на рис. 7.20, є варіантом схеми складання-віднімання (рис. 7.19).

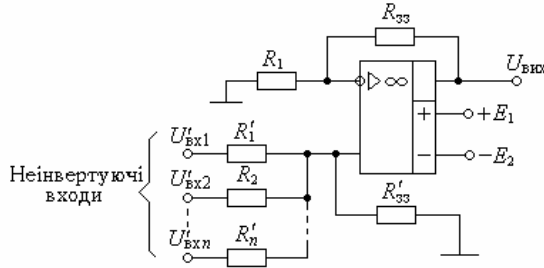


Рис. 7.20. Неінвертуючий суматор

Неінвертуючий вхід забезпечує складання вхідних напруг, а коло інвертуючого входу визначає коефіцієнт підсилення $\left(\frac{R_{33}}{R_1} + 1 \right)$. Зважаючи на це, з формули (7.49) знаходимо вихідну напругу для схеми (рис. 7.20):

$$U_{\text{вих}} = \left(\frac{U_{\text{вх}1}}{R_1} + \frac{U_{\text{вх}2}}{R_2} + \dots + \frac{U_{\text{вх}n}}{R_n} \right) R_{33} * \left(\frac{R_{33}}{R_1} + 1 \right). \quad (7.52)$$

Для складання напруг з підсиленням потрібне дотримання рівності

$$R'_1 = R'_2 = \dots = R'_n = R'_{33}, \quad (7.53)$$

підставлення якої в (7.52) визначає вихідну напругу як алгебраїчну суму вхідних напруг

$$U_{\text{вих}} = (U_{\text{вх1}} + U_{\text{вх2}} + \dots + U_{\text{вхn}}) * \left(\frac{R_{33}}{R_1} + 1 \right). \quad (7.54)$$

Врешті-решт для чисто арифметичного складання вхідних напруг потрібно забезпечити одиничне підсилення, яке досягається за умов (7.37).

Зважаючи на (7.37), одержуємо вихідну напругу як суму вхідних напруг:

$$U_{\text{вих}} = (U_{\text{вх1}} + U_{\text{вх2}} + \dots + U_{\text{вхn}}). \quad (7.55)$$

7.3.8. Інтегратор

Інтегратором, схема якого наведена на рис. 7.21, є підсилювач на ОП, в колі ЗЗ якого включений конденсатор C .

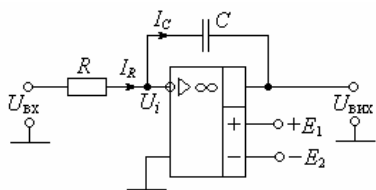


Рис. 7.21. Інвертуючий інтегратор

Інтегратор має вихідну напругу $U_{\text{вих}}$, яка пропорційна інтегралу від вхідної $U_{\text{вх}}$. Знайдемо $U_{\text{вих}}$.

Як завжди маємо рівність

$$I_R = I_C. \quad (7.56)$$

Оскільки інвертуючий вхід є віртуальною землею ($U_i = 0$), то вхідний струм становить

$$I_R = \frac{U_{\text{вх}}}{R}, \quad (7.57)$$

а вихідна напруга цілком прикладена до конденсатора і тому вона зв'язана зі струмом співвідношенням

$$U_{\text{вих}} = -\frac{1}{C} \int I_C dt. \quad (7.58)$$

На підставі (7.56) – (7.58) переконуємось у тому, що вхідна напруга є інтегралом від вхідної:

$$U_{\text{вих}} = -\frac{1}{RC} \int U_{\text{вх}} dt. \quad (7.59)$$

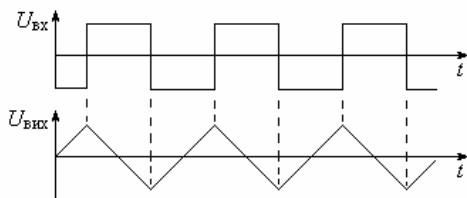


Рис. 7.22. Часова діаграма роботи інвертуючого інтегратора

Щодо використання інтегратора, то одним із багатьох прикладів є формувач напруги трикутної форми (рис. 7.22), яка в межах напівперіоду змінюється лінійно.

Інтегратор також є фільтром нижніх частот. Ці приклади не вичерпують використання інтегратора.