

5. ПІДСИЛЮВАЧІ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИГНАЛІВ

Електронним підсилювачем називається пристрій, призначений для підсилення потужності електричного сигналу без спотворень його форми і частоти. Загальні теоретичні відомості про підсилювачі електричних сигналів наведені в [1, с.96-172].

Підсилювачі класифікують за такими ознаками:

1. Призначення.
2. Частота сигналу, що підсилюється.
3. Форма сигналу.
4. Характер зміни з часом сигналу, що підсилюється.

Підсилювальні властивості підсилювача оцінюються коефіцієнтами підсилення:

- для схеми СЕ: $K_U \square 1$, $K_I \square 1$, $K_P \square 1$;

- для схеми СК: $K_U \leq 1$, $K_I \square 1$, $K_P \square 1$;

- для схеми СБ: $K_U \square 1$, $K_I \leq 1$, $K_P \square 1$.

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

5.1. Однокаскадні підсилювачі

Основні формули та рівняння

Коефіцієнти підсилення каскаду:

• за напругою $K_U = \frac{U_{вих}}{U_{вх}}$;

• за струмом $K_I = \frac{I_{вих}}{I_{вх}}$;

• за потужністю $K_P = \frac{P_{вих}}{P_{вх}} = K_U K_I$.

Коефіцієнт підсилення виражений у децибелах:

$$K_{u_{дБ}} = 20 \lg K_U, \quad K_{i_{дБ}} = 20 \lg K_I, \quad K_{p_{дБ}} = 20 \lg K_P. \quad (5.1)$$

Зворотне перетворення:

$$K_U = 10^{\frac{K_{u_{дБ}}}{20}}, \quad K_I = 10^{\frac{K_{i_{дБ}}}{20}}, \quad K_P = 10^{\frac{K_{p_{дБ}}}{20}}. \quad (5.2)$$

Коефіцієнт підсилення за струмом:

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}, \quad (5.3)$$

де $\alpha = 0,9 \div 0,95$.

Коефіцієнт підсилення за напругою:

$$K_U = \frac{\alpha \cdot R_H}{R_E + R_B (1 - \alpha)}, \quad (5.4)$$

де R_H , R_E , R_B - відповідно опір навантаження, емітера і бази каскаду.

Вхідний опір каскаду:

$$R_{вх} = R_B + \frac{R_E}{1 - \alpha}. \quad (5.5)$$

Вихідний опір каскаду:

$$R_{вих} = R_K (1 - \alpha) + R_E \frac{\alpha \cdot R_K + R_{дж}}{R_E + R_B + R_{дж}}. \quad (5.6)$$

Коефіцієнт частотних спотворень підсилювального каскаду:

$$M = \frac{K_0}{K}, \quad (5.7)$$

де K_0 - коефіцієнт підсилення на середніх частотах; K - коефіцієнт підсилення на будь-якій частоті робочого діапазону.

Коефіцієнт підсилення транзисторного каскаду на середніх частотах:

$$K_0 = \frac{h_{21e} R_H}{R_{ex}}. \quad (5.8)$$

Напруга зміщення в транзисторному каскаді під час використання схеми емітерної температурної стабілізації:

$$U_{BE} = I_D R_{B2} - I_{E0} R_E, \quad (5.9)$$

де $I_D = \frac{E_K}{R_{B1} + R_{B2}}$ - постійний струм дільника в колі бази транзистора; I_{E0} - постійна складова струму емітера.

Для розрахунку параметрів дільника використовують такі спів-відношення:

$$R_{B1} = \frac{E_K - U_{B0}}{I_{B0} + I_D}, \quad (5.10)$$

$$R_{B2} = \frac{U_{B0}}{I_D}, \quad (5.11)$$

$$I_D = (2 \div 5) I_{B0}. \quad (5.12)$$

де U_{B0} , I_{B0} - відповідно вхідна напруга та струм каскаду, що визначають положення робочої точки на вхідній характеристиці транзистора.

Ємність конденсатора в колі емітера:

$$C \geq \frac{10}{2\pi f_H R_E}, \quad (5.13)$$

де f_H - нижня частота спектру підсилюваних коливань, Гц.

Для забезпечення стабільної роботи каскаду використовують зворотні зв'язки. Коефіцієнт підсилення каскаду зі зворотним зв'язком:

$$K_0^* = \frac{K_0}{1 \pm K_{33} K_0}, \quad (5.14)$$

де K_0 - коефіцієнт підсилення каскаду до введення зворотного зв'язку; K_{33} - коефіцієнт зворотного зв'язку; знак «+» - використовується при від'ємному зворотному зв'язку, а знак «-» - при додатному зворотному зв'язку.

Вхідний і вихідний опори підсилюючого каскаду зі зворотним зв'язком знаходяться аналогічно:

$$R_{BX.33} = \frac{R_{BX}}{1 \pm K_{33} K_0} \quad (5.15)$$

$$R_{ВИХ.33} = \frac{R_{ВИХ}}{1 \pm K_{33} K_0} \quad (5.16)$$

Задачі для самостійного розв'язку

1. На вході підсилювача наявний сигнал $U = 5$ мВ. Визначіть напругу на виході підсилювача, якщо коефіцієнт підсилення за напругою рівний $K_U = 20$ дБ.
2. Напруга на вході підсилювача $U_{BX} = 20$ мВ. Знайдіть потужність на виході підсилювача, якщо його опір навантаження $R_H = 250$ Ом, а коефіцієнт підсилення за напругою $K_U = 25$.
3. Коефіцієнт підсилення за потужністю підсилювача рівний $K_P = 2500$. Знайдіть коефіцієнт підсилення за напругою K_U , якщо коефіцієнт підсилення за струмом $K_I = 28$ дБ.
4. Знайдіть коефіцієнт підсилення підсилювача за потужністю K_P , якщо його коефіцієнт підсилення за напругою $K_U = 20$ дБ, за струмом $K_I = 10$.
5. Напруга на вході підсилювача $U_{BX} = 6$ мВ, коефіцієнт підсилення на середніх частотах $K_0 = 1000$. Знайдіть вихідну напругу на нижній граничній частоті $U_{ВИХ}$, якщо відомо, що коефіцієнт частотних спотворень $M_H = 1,2$.

6. Коефіцієнти підсилення підсилювача на середніх частотах $K_0 = 100$. Знайдіть коефіцієнт частотних спотворень на нижній і верхній граничних частотах, на яких коефіцієнти підсилення відповідно рівні $K_H = 105$, $K_B = 95$.
7. На верхній і нижній граничних частотах підсилення підсилювача за напругою становить відповідно $K_B = 30$ дБ, $K_H = 28$ дБ. Знайдіть коефіцієнти частотних спотворень M_B і M_H , якщо коефіцієнт підсилення підсилювача на середніх частотах $K_0 = 30$.
8. Знайдіть вхідний і вихідний опори підсилюючого каскаду при відомих значеннях опорів бази $R_B = 25$ кОм, колектора $R_K = 2$ кОм, емітера $R_E = 240$ Ом. Внутрішнім опором джерела живлення нехтувати.
9. У транзисторному підсилювальному каскаді коефіцієнт підсилення $K_U = 350$. Знайдіть коефіцієнт підсилення після введення додатного зворотного зв'язку, якщо коефіцієнт зворотного зв'язку рівний 0,015.
10. Після введення від'ємного зворотного зв'язку коефіцієнт підсилення підсилювача зміниться з 150 до 120. Знайдіть коефіцієнт зворотного зв'язку.
11. Підсилювач має наступні параметри: $K = 100$, $R_{BX} = 910$ Ом, $R_{ВНХ} = 2000$ Ом. Визначити його параметри, якщо використовується ВЗЗ з коефіцієнтом $K_{ЗЗ} = 0,0012$.

5.2. Багатокаскадні підсилювачі

Якщо один підсилюючий каскад не забезпечує потрібного рівня підсилення, то застосовують багатокаскадні підсилювачі. Структурну схему такого підсилювача зображено на рис. 5.1.

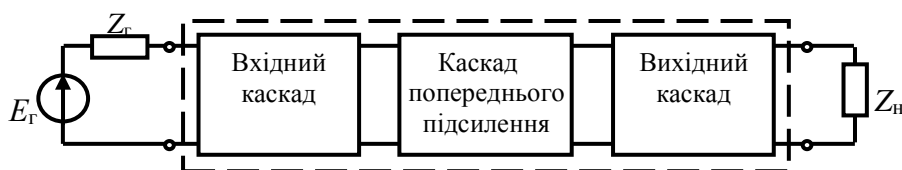


Рис. 5.1 - Структурна схема багатокаскадного підсилювача

Для розрахунку необхідно знати основні характеристики багатокаскадних підсилювачів змінного струму, принципи їх будови та дії. Процес розрахунку багатокаскадних підсилювачів здійснюється покаскадно від останнього каскаду до першого: спочатку розраховуються вхідні параметри кінцевого каскаду, які є вихідними для перед кінцевого (див рис. 5.1) і т.д. Загальні теоретичні відомості про багатокаскадні підсилювачі наведені в [8, с.131-140].

Загальний коефіцієнт підсилення при цьому становить:

$$K = K_1 K_2 \dots K_n, \text{ або } K_{дб} = K_{дб_1} + K_{дб_2} + \dots K_{дб_n} \quad (5.17)$$

Коефіцієнт частотних спотворень багатокаскадного підсилювача:

$$M = M_1 M_2 \dots M_n, \text{ або } M_{дб} = M_{дб_1} + M_{дб_2} + \dots M_{дб_n} \quad (5.18)$$

Задачі для самостійного розв'язку

12. Відомо, що підсилення за напругою трикаскадного підсилювача рівне 10000. Визначіть коефіцієнт підсилення другого каскаду, якщо підсилення першого каскаду становить 40дБ, а третього – 20дБ.
13. Коефіцієнт підсилення окремих каскадів підсилювача становить 20, 30, 10. Визначіть загальний коефіцієнт підсилення підсилювача. Переведіть отриманий результат у децибели.
14. На виході двокаскадного підсилювача є напруга 2В. Знайдіть напругу на вході кожного каскаду, якщо підсилення першого каскаду $K_{U1} = 40$ дБ, а другого - $K_{U2} = 20$ дБ.
15. Коефіцієнт частотних спотворень двокаскадного підсилювача на верхній граничній частоті $M_B = 3$ дБ. Знайдіть напругу на виході першого каскаду на верхній граничній частоті $U_{вих.В}$, якщо

напруга на вході на всіх частотах $U_{BX} = 20\text{мВ}$, коефіцієнт підсилення першого каскаду на середніх частотах $K_{01}=15$, а коефіцієнт частотних спотворень другого каскаду $M_{62} = 1,8\text{дБ}$.

16. Двокаскадний підсилювач, що має коефіцієнти підсилення окремих каскадів за напругою $K_1 = 200$, $K_2 = 150$ охоплений від'ємним зворотним зв'язком. Знайдіть коефіцієнт підсилення підсилювача, якщо коефіцієнт від'ємного зворотного зв'язку (ВЗЗ) рівний $K_{33} = 0,01$.
17. У двокаскадному підсилювачі після введення від'ємного зворотного зв'язку (ВЗЗ) з коефіцієнтом $K_{33} = 0,01$ підсилення зменшилося до $K^* = 80\text{дБ}$. Знайдіть коефіцієнт підсилення першого каскаду без впливу ВЗЗ, якщо коефіцієнт підсилення другого каскаду до введення ВЗЗ був рівний $K = 20\text{дБ}$.

5.3. Підсилювачі постійного струму

Операційний підсилювач (ОП) – це підсилювач постійного струму, що має високий коефіцієнт підсилення, два входи (прямий та інверсний) і один вихід. Загальні теоретичні відомості про операційні підсилювачі наведені в [1, с.153-172].

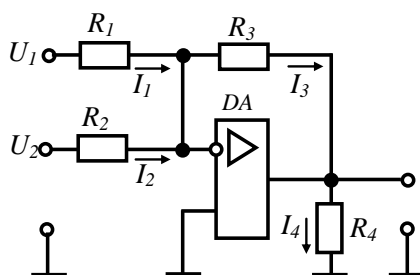


Рис. 5.2 - Розрахункова схема двовходового інвертуючого суматора на ОП

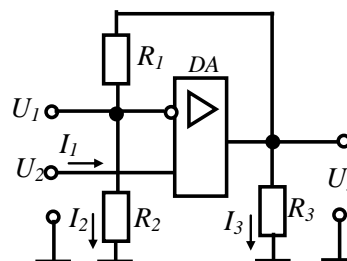


Рис. 5.3 - Розрахункова схема неінвертуючого підсилювача на ОП

Для розрахунку параметрів схеми неінвертуючого ОП використовують такі основні формули (рис. 5.3): за $U_H = U_{BX}$, вхідний струм $I_{BX} = 0$, тому що $R_{BX.OP} = \infty$.

Оскільки $U_0 = 0$, то $U_{R1} = U_{BX}$, а $U_{BX} / R_1 = I_{33}$.

З іншого боку $I_{33} = \frac{U_{ВИХ}}{R_{33} + R_1}$.

Отже, $\frac{U_{ВИХ}}{R_1} = \frac{U_{ВИХ}}{R_{33} + R_1}$, звідки $U_{ВИХ} = U_{BX} \left(1 + \frac{R_{33}}{R_1}\right)$ (5.19)

Тоді коефіцієнт підсилення неінвертуючого підсилювача

$$K_{U33} = \frac{U_{ВИХ}}{U_{BX}} = 1 + \frac{R_{33}}{R_1} \quad (5.20)$$

Для розрахунку параметрів схеми інвертуючого ОП використовують такі основні формули: за першим законом Кірхгофа для вузла a маємо:

$$I_1 = I_{33} \quad (5.21)$$

тобто,

$$\frac{U_{BX}}{R_1} = -\frac{U_{ВИХ}}{R_{33}} \quad (5.22)$$

ОП, забезпечуючи рівність $U_0 = 0$, створює на виході таку напругу, щоб відвести струм I_1 через резистор R_{33} .

Тоді

$$K_{U33} = \frac{U_{ВИХ}}{U_{BX}} = -\frac{R_{33}}{R_1} \quad (5.23)$$

Отже, K_{U33} залежить лише від співвідношення опорів резисторів дільника НЗЗ. Знак «-» вказує на інверсію вхідного сигналу. Вхідний опір схеми дорівнює величині R_1 .

Задачі для самостійного розв'язку

19. Визначте значення опору резистора R_2 та значення і напрямку струму I_{R_2} , що протікає через нього (рис. 5.4).
20. Визначте значення опору резистора R_3 та значення і напрямку струму I_{R_3} , що протікає через нього (рис. 5.5).
21. Визначте значення опору резистора R_1 та значення і напрямку струму I_{R_1} , що протікає через нього (рис. 5.6).
22. Визначте значення опору резистора R_1 , значення струмів I_{Bx} та I_{33} та напрямки їх протікання (рис. 5.7).
23. Визначте значення опору резистора R_2 , значення струмів I_{Bx} та I_{33} та напрямки їх протікання (рис. 5.8).
24. Визначте значення вихідної напруги інтегратора через 0,01с після подачі вхідної напруги (рис. 5.9).

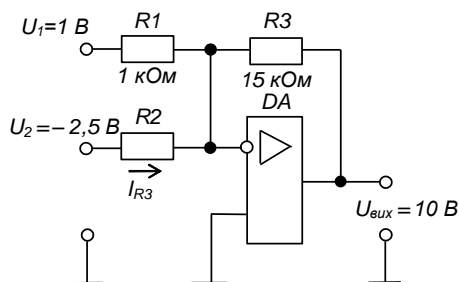


Рис. 5.4 – До задачі № 19

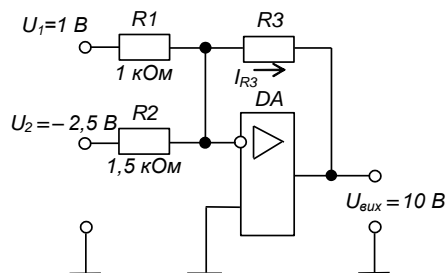


Рис. 5.5 – До задачі № 20

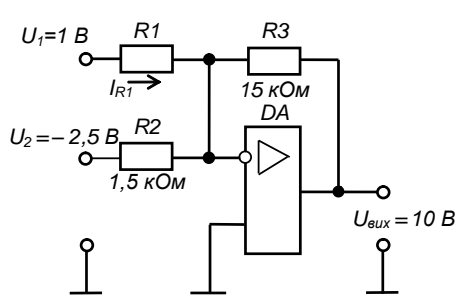


Рис. 5.6 – До задачі № 21

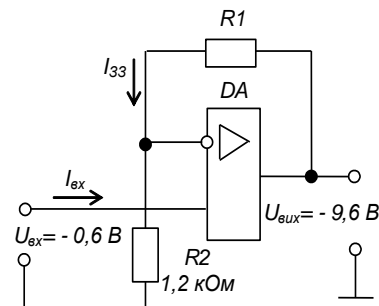


Рис. 5.7 – До задачі № 22

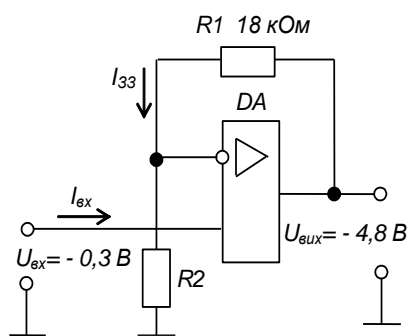


Рис. 5.8 – До задачі № 23

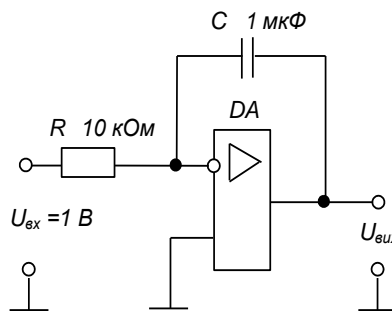


Рис. 5.9 – До задачі № 24