

Лабораторна робота № 5

ОПЕРАЦІЙНИЙ ПІДСИЛЮВАЧ

Мета роботи: вивчення способів використання операційних підсилювачів і дослідження їх характеристик.

Теоретичні відомості

Операційний підсилювач (ОП) – багатокаскадний підсилювач постійного струму (ППС) з диференціальним входом, що має великий коефіцієнт підсилення, високий вхідний і малий вихідний опори.

Операційні підсилювачі має один вихід і два входи: інвертуючий (позначається кружечком «о») і неінвертуючий. При подачі сигналу на інвертується вхід вихідний сигнал буде зміщений по фазі на 180° відносно вхідного (полярність вихідного сигналу протилежна вхідному) – це так зване інвертуюче включення ОП. При неінвертуючому включенні ОП сигнал подається на неінвертуючий вхід, вихідний сигнал збігається по фазі з вхідним сигналом.

ОП виконується у вигляді інтегральної мікросхеми та є одним з основних елементів аналогової схемотехніки, на основі якого можна створювати найрізноманітніші електронні пристрої: підсилювачі (рис.2.1,2.2), суматори (рис.2.3,2.4), активні фільтри (рис.2.5, 2.6), інтегратори, диференціатора, генератори та ін.

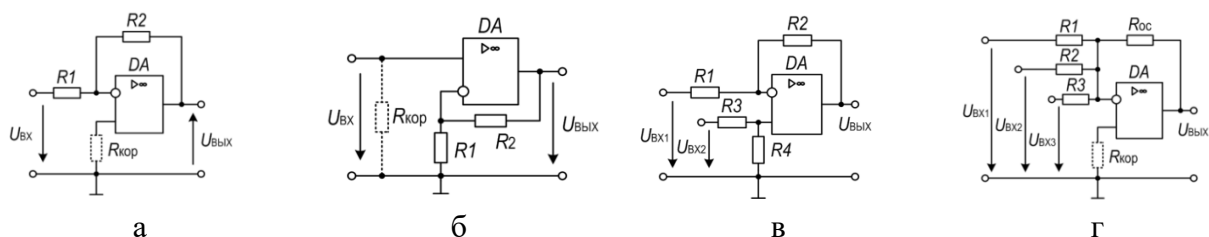


Рис.5.1 – Інвертуючий підсилювач на ОП (а), неінвертуючий підсилювач на ОП (б), диференціальний підсилювач (в), інвертуючий суматор (г)

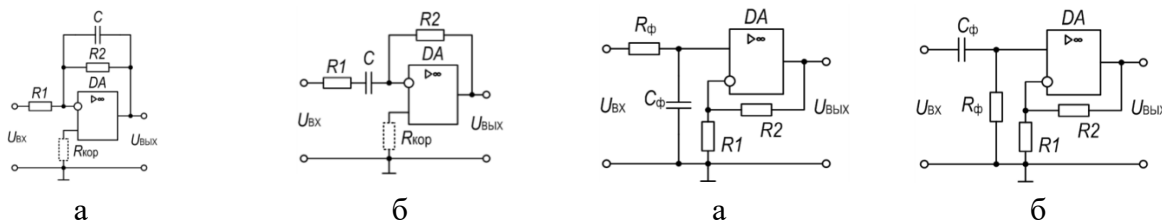


Рис.5.2 Активні фільтри з інвертуючим включенням ОП: а - ФНЧ; б - ФВЧ

Рис.5.3 Активні фільтри з неінвертуючим включенням ОП: а - ФНЧ; б - ФВЧ

На практиці при виборі ОП і розрахунку побудованих на їх основі схем керуються основними параметрами, які наводяться в довідниках:

– коефіцієнт підсилення по напрузі K_{U0} характеризує здатність ОП посилювати диференціальний сигнал, що подається на його входи (зазвичай $10^3 \dots 10^6$);

– вхідний опір $R_{вх0}$ – опір ОП по відношенню до вхідного сигналу. Розрізняють диференціальний вхідний опір $R_{вх\text{ диф}}$, тобто опір між двома вхідними виводами, і синфазний вхідний опір $R_{вх\text{ сінф}}$, тобто опір між об'єднаними вхідними виводами і загальним проводом. Зазвичай в довідниках наводиться значення тільки диференціального вхідного опору, яке в $10 \dots 100$ разів менше синфазного і становить ($10^4 \dots 10^{10}$) Ом;

– вихідний опір $R_{вих0}$ – внутрішній опір ОП, що розглядається по відношенню до навантаження як еквівалентне джерело ЕРС (близько 100 Ом);

– вхідна напруга зміщення $U_{зм}$ характеризує розбаланс і несиметрію вхідного диференціального каскаду ОП і чисельно дорівнює постійної напрузі, яку необхідно прикласти до входу ОП, щоб його вихідна напруга стало рівним нулю (як правило, (0,1 ... 10) мВ);

– вхідний струм $I_{вх ср}$ (середній вхідний струм зміщення) - струм на входах ОП, необхідний для роботи вхідного каскаду (менше 10 мкА);

– різниця вхідних струмів $\Delta I_{вх}$ (струм зсуву) – різниця вхідних струмів зміщення, яка з'являється внаслідок неоднакових коефіцієнтів передачі струму h_{21e} транзисторів вхідного каскаду ОП (менше 1 мкА);

– коефіцієнт ослаблення синфазного сигналу $K_{ос сф}$ характеризує здатність послаблювати синфазні (прикладені до двох входів одночасно) сигнали (зазвичай становить (50 ... 120) дБ).

– гранична частота F_{max} (або частота одиничного підсилення) – частота, на якій модуль коефіцієнта підсилення дорівнює 1 (зазвичай $(10^5 ... 10^7)$ Гц);

– максимальна швидкість наростання вихідної напруги $V_{U_{вих}} = \Delta U_{вих} / \Delta t$, для більшості ОП $\sim (0,1 ... 10)$ В / мкс.

При розрахунку схем на операційних підсилювачах виникає додаткова похибка, яка пов'язана з вибором значень опорів і ємностей зі стандартного ряду номінальних значень (E24, E96). Тому після вибору номіналів резисторів і ємностей необхідно оцінювати відносну похибку розрахунку, яка не повинна перевищувати 5%:

$$\delta_A = \left| 1 - \frac{A^{отр}}{A^{зд}} \right| \cdot 100\%$$

де $A^{зд}$, $A^{отр}$ – відповідно заданий за умовою і отримане в результаті розрахунків значення отриманої величини (коефіцієнта підсилення, опору, вихідної напруги, граничної частоти і т.п.).

Для визначення основних характеристик використовують наступні вимірювання (чисельні експерименти):

- Побудова амплітудно-частотної характеристики в діапазоні частот.
- Побудова епюри перехідного процесу при подачі на вхід сходящого напруги.
- Побудова перехідної характеристики для диференційного сигналу.
- Побудова перехідної характеристики для синфазного сигналу.

Інвертуючий підсилювач

Інвертуючий підсилювач реалізується шляхом інвертуючого включення ОП з паралельним негативним зворотним зв'язком по напрузі (рис.5.4).

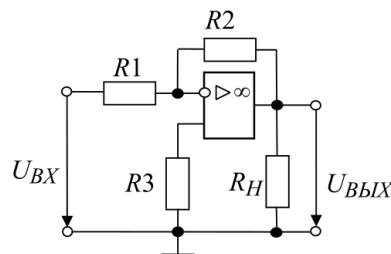


Рис.5.4

Вхідний сигнал $U_{вх}$ і сигнал зворотного зв'язку подаються на інвертуючий вхід. При цьому полярність вихідного сигналу $U_{вих}$ зворотна полярності $U_{вх}$

Якісно робота інвертуючого підсилювача визначається по його амплітудній характеристиці $U_{вих} = f(U_{вх})$ (рис. 5.5) і амплітудно-частотній характеристиці $K_U(f)$

(рис. 5.6). Амплітудна характеристика підсилювача, має явно виражені нелінійні ділянки I і III, та лінійний ділянку II.

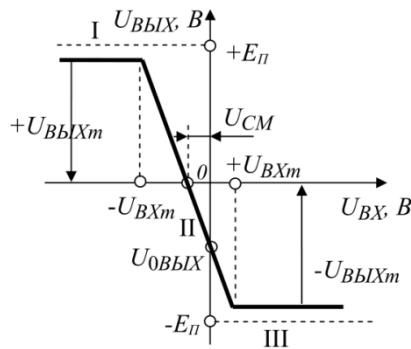


Рис. 5.5

В межах лінійної ділянки вихідна напруга пропорційна вхідній, при $U_{ВХ} > U_{ВХ max}$ підсилювач входить в насичення і вихідна напруга не змінюється при зміні вхідного сигналу. При відсутності вхідного сигналу $U_{ВХ} = 0$ вихідна напруга спокою $U_{0ВЫЛХ} \neq 0$ і визначає статичну погрішність ОП (напруга помилки $U_{пом}$). Вона обумовлена напругою зміщення $U_{зм}$, середнім вхідним струмом $I_{ВХ ср}$ і різницею вхідних струмів $\Delta I_{ВХ}$. Тому з метою зниження $U_{пом}$ від вхідних струмів рекомендується обирати

$$R3 = \frac{R1 \cdot R2}{R1 + R2} \quad (51)$$

При виконанні цієї умови вихідна напруга спокою:

$$U_{0ВЫЛХ} = \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) U_{зм} + \Delta I_{ВХ} R2 \quad (52)$$

Для встановлення «нуля» на виході підсилювача і зменшення похибки ОП, обумовленої вихідною напругою спокою, необхідна компенсація напруги зміщення $U_{зм}$. Практично напруга зміщення $U_{зм}$ компенсується або балансуванням вхідного каскаду ОП (для цих цілей в ОП є спеціальні виводи), або включенням напруги, що компенсує на один з входів ОП від спеціальної схеми балансування. Слід зазначити, що цей метод не гарантує «постійного нуля» на виході пристрою. Кращою гарантією отримання мінімальної напруги помилок $U_{пм}$ є правильний вибір типу ОП і виконання необхідних співвідношень резисторами схеми. При цьому бажано використовувати в пристрої резистори невеликих номіналів.

Коефіцієнт підсилення по напрузі інвертуючого підсилювача на основі ідеального ОП:

$$K_{U_{ін}} = \frac{U_{ВЫЛХ}}{U_{ВХ}} = -\frac{R2}{R1} \quad (53)$$

де знак «мінус» вказує інверсію вхідного сигналу.

Коефіцієнт підсилення по напрузі інвертуючого підсилювача на основі реального ОП:

$$K_{U_{ін}} = -\frac{K_U}{1 + \frac{R1}{R2} K_U} \quad (54)$$

При $K_U \gg 1$ вираз (24) перетворюється в (23).

Вхідний опір інвертуючого підсилювача на ОП:

$$R_{ВХ ін} \approx R1 \quad (55)$$

вихідний опір:

$$R_{ВЫЛХ ін} = \frac{R_{ВЫЛХ ОП}}{K_U} K_{U_{ін}} \quad (56)$$

З (54) випливає, що $R_{\text{вих ін}}$ знижується пропорційно зменшенню $K_{U \text{ ін}}$

Амплітудно-частотна характеристика $K_U(f)$ характеризує частотні властивості підсилювача. На рис.5.6 представлені логарифмічні амплітудно-частотні характеристики (ЛАЧХ) ОП $K_U(f)$ і інвертуючого підсилювача на ОП $K_{U \text{ ін}}(f)$ при певному значення K_U .

I

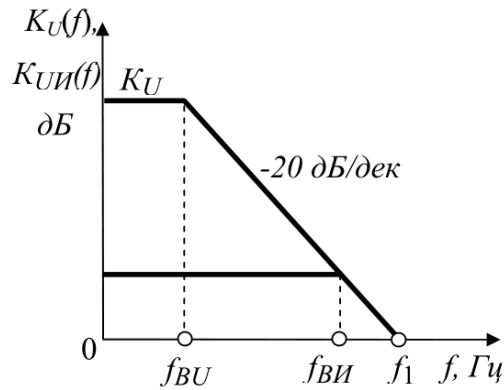


Рис.5.6

Смуга пропускання підсилювача $f_{\text{в ін}}$ на малому сигналі визначається як смугою одиничного підсилення так і коефіцієнтом підсилення з зворотним зв'язком:

$$f_{\text{в ін}} = \frac{f_1}{K_{U \text{ ін}}} \quad (57)$$

Завдання на лабораторну роботу

Лабораторна робота виконується індивідуально кожним студентом в відповідно до свого варіанта.

1.1. Попереднє завдання.

1.1.1. Вивчити розділ курсу, присвячений операційним підсилювачам, зміст даної лабораторної роботи. Підготувати відповіді на всі контрольні питання.

1.1.2. Накреслити принципові електричні схеми підсилювачів.

1.1.3.Виполніть наступні розрахунки:

1.1.3.1. Розрахунки для інвертуючого підсилювача:

– Визначити опір резистора R_2 в колі зворотного зв'язку для визначення заданого коефіцієнта підсилення по напрузі $K_{U \text{ ін}}$.

– Визначити вхідний $R_{\text{вх ін}}$ і $R_{\text{вих ін}}$ вихідний опора, вихідну напругу спокою $U_{\text{ових}}$

– Визначити смугу пропускання $f_{\text{в ін}}$.

Таблиця 1 Варіанти завдань

Тип схеми	Параметри схеми	Варіанти																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Інвертуючий підсилювач	R_1 , кОм	5	5	5	5	5	5	5	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	R_3 , кОм	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	$K_{U \text{ ін}}$	22	20	18	16	14	12	10	8	20	18	16	14	12	10	8	6	4

1.2. Експериментальна частина

1.2.1. Завантажити програму MS.exe. Зібрати схему інвертуючого підсилювача, ввести відповідні значення параметрів схеми згідно варіанту, джерел живлення і джерел вхідних сигналів. Опір навантаження у всіх експериментах прийняти рівним 10 кОм.

1.2.2. Дослідження інвертуючого підсилювача

1.2.2.1. Зняти і побудувати амплітудну характеристику $U_{\text{вих}} = f(U_{\text{вх}})$, підсилювача на постійному струмі при двополярного вхідного сигналу. Визначити з характеристик

$$U_{\text{вих}}^+, \quad U_{\text{вих}}^-, \quad K_U = \frac{\Delta U_{\text{вих}}}{\Delta U_{\text{вх}}}, \quad U_{0\text{вих}}, \quad U_{\text{зм}} = \frac{U_{0\text{вих}}}{K_U}$$

1.2.2.2. Зняти і побудувати амплітудно-частотну характеристику $K_{U_{\text{ін}}}(f)$.

1.2.2.3. Визначити по амплітудно-частотній характеристиці $K_{U_{\text{ін}}}(f)$, смугу пропускання $f_{\text{в ін}}$ підсилювача (за рівнем $0,7 \cdot K_{U_{\text{ін}}}(0)$), частоту одиничного підсилення ОП $f_{1 \text{ ін}}$.

Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Попереднє завдання. Принципова електрична схема, що досліджувалася. Розрахункові формули і результати розрахунків, характеристики і часові діаграми.
3. Експериментальна частина. Схема електрична принципова «Експериментальної установки», результати вимірювань і осцилограми до п. 1.2.2.
4. Обробка результатів експерименту. Амплітудні (передавальні) характеристики. Розрахункові формули і результати розрахунків. Амплітудно-частотні характеристики.

Контрольні питання

1. Що таке інвертуючий і неінвертуючий входи ОП?
2. Який зворотний зв'язок використовується в інвертуючому і неінвертуючому підсилювачах, виконаних на ОП?
3. Як розрахувати коефіцієнти підсилення для інвертуючого і неінвертуючого підсилювачів?
4. Як визначити експериментально коефіцієнт підсилення підсилювача?
5. Які параметри ОП обумовлюють відміну вихідної напруги спокою підсилювача від нуля?
6. Як зміниться коефіцієнт підсилення підсилювача на ОП при зменшенні опору R_2 ?