

# Лабораторна робота 1. Моделювання операційного підсилювача та дослідження його експлуатаційних характеристик.

## **Основні експлуатаційні характеристики операційного підсилювача**

- Коефіцієнт підсилення диференційної напруги
- Коефіцієнт ослаблення синфазної складової –  $K_{осс} = 20 \lg(K_u/K_{сф})$ ,  $K_{сф}$  – коефіцієнт підсилення синфазної напруги
- Найбільше значення вихідної напруги, за якого можна знехтувати нелінійними спотвореннями
- Вхідний опір для диференційного сигналу на низькій частоті
- Вихідний опір
- Вхідна напруга зміщення нуля – диференційне зміщення входів потрібне для встановлення нульової напруги на виході
- Частота зрізу – визначається за АЧХ на рівні -3дБ
- Частота одиничного підсилення – відповідає рівню  $K_u=1$
- Швидкість зростання вихідної напруги – визначається при подачі сходинки напруги на вхід у схемі повторювача
- Час встановлення вихідного сигналу – визначається при подачі сходинки на вхід схеми повторювача як період між значеннями 0.1 та 0.9 стабільної вихідної напруги

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

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

## **Завдання 1. Дослідження архітектурної моделі операційного підсилювача**

Найбільш поширеною архітектурою операційного підсилювача є схема з 4-х каскадів на біполярних транзисторах. Така схема у спрощеному вигляді зображена на рис.1.

Перший каскад сформований транзисторами VT1, VT2. Він має диференційний вхід та диференційний вихід. Зміщення робочої точки транзисторів забезпечується зеркалом струму на транзисторах VT3, VT9.

Другим каскадом є диференційний підсилювач на транзисторах VT4, VT5. Його зміщення забезпечується джерелом струму на транзисторі VT6. Вихідний сигнал отримується з колектора VT5.

Третій каскад реалізований на р-п-р транзисторі VT7. Він забезпечує додаткове підсилення та зсув сталої складової напруги.

Чвертим каскадом є емітерний повторювач на транзисторі VT8. Його завданням є підсилення потужності та забезпечення малого вихідного опору ОП.

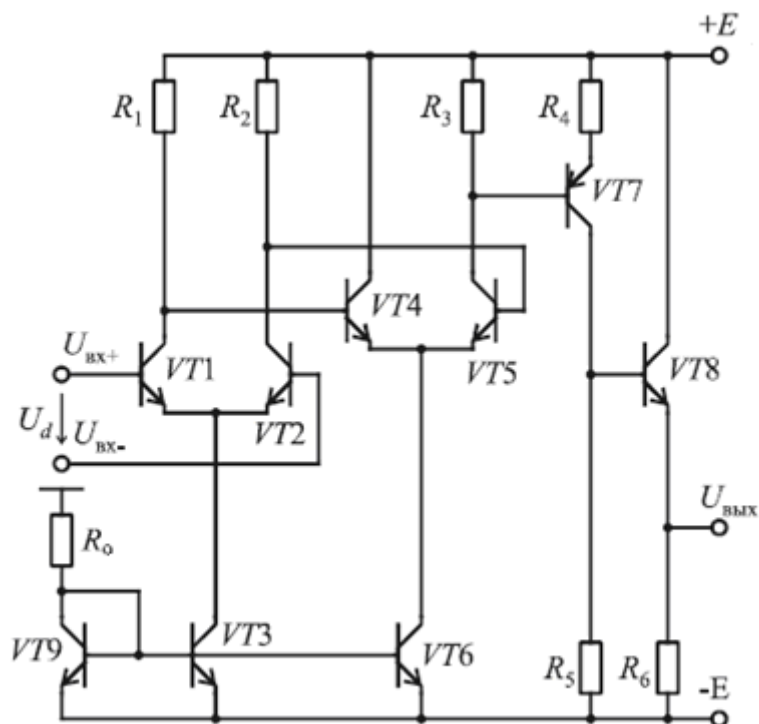


Рис.1

Для спрощення вважаємо, що  $\beta \gg 1$   $I_k \approx I_e$  для усіх транзисторів. Усі транзистори працюють у активному режимі, тож  $|U_{be}| \approx 0.7V$

Опір резистора, що забезпечує струм дзеркала струму:

$$R_0 = \frac{E - U_{be}}{I_0} = \frac{E - 0.7}{I_0}$$

Вхідний каскад вважаємо симетричним, тож струм дзеркала поділяється навпіл

$$I_{k1} = I_{k2} = I_0/2$$

А напруги на колекторах

$$U_{k1} = U_{k2} = R_1 I_{k1}$$

Транзистор VT6 утворений з 4-х транзисторів включених паралельно, тож

$$I_{k6} = 4I_0$$

Другий каскад також вважаємо симетричним

$$I_{k4} = I_{k5} = I_{k6}/2$$

$$U_{k5} = E - R_3 I_{k5}$$

$$U_{b5} = U_{k2}$$

$$U_{e5} = U_{k2} - U_{be} = U_{k2} - 0.7$$

Для транзистора VT7

$$U_{e7} = U_{k5} + 0.7$$

$$I_{k7} = I_{e7} = \frac{E - U_{e7}}{R4}$$

$$U_{k7} = -E + R_5 I_{k7}$$

Вихідна напруга

$$U_{вих} = U_{k7} - 0.7$$

### Завдання до виконання

1. Обрати параметри елементів схеми відповідно до варіанту
2. Розрахувати значення резистора  $R_0$  для забезпечення відповідного струму зміщення вхідного каскаду
3. Промодельовати отриману схему та визначити основні експлуатаційні характеристики, як зазначено у вступній частині
4. Транзистори (крім VT6) Q2N3904 Q2N2906, VT6 – 4 штуки Q2N2222

### Варіанти

№	E, В	$I_0$ , мА	$R_1$ ,кОм	$R_2$ ,кОм	$R_3$ ,кОм	$R_4$ ,кОм	$R_5$ ,кОм	$R_6$ ,кОм
1	15	0.5	20	20	3	2.3	15.7	3
2	12	0.5	20	20	3	2.3	15.7	3
3	10	0.4	20	20	3	2.3	15.7	3
4	18	0.6	20	20	3	2.3	15.7	3
5	10	0.5	20	20	3	2.3	15.7	3
6	20	1	20	20	3	2.3	15.7	3
7	15	0.6	20	20	3	2.3	15.7	3
8	12	0.4	20	20	3	2.3	15.7	3
9	15	0.5	20	20	3	2.3	15.7	3
10	18	0.7	20	20	3	2.3	15.7	3

## Завдання 2. Дослідження макромоделі 1-го рівня операційного підсилювача

Макромодель першого рівня є лінійною низькочастотною та враховує вхідний, вихідний опір, та частотну характеристику до першого полюса. Схема заміщення моделі показана на рис. 2.

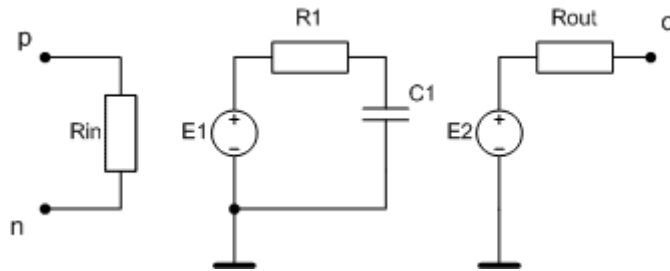


Рис. 2.

Тут:

Rin - вхідний опір ОП

E1 - кероване джерело напруги, що моделює статичний коефіцієнт підсилення  $K_0$

R1, C1 - елементи, що забезпечують перший полюс АЧХ

E2 - кероване джерело - повторювач

Rout - вихідний опір

Частотна характеристика ОП моделюється фільтром нижніх частот та схематично показана на рис. 3.

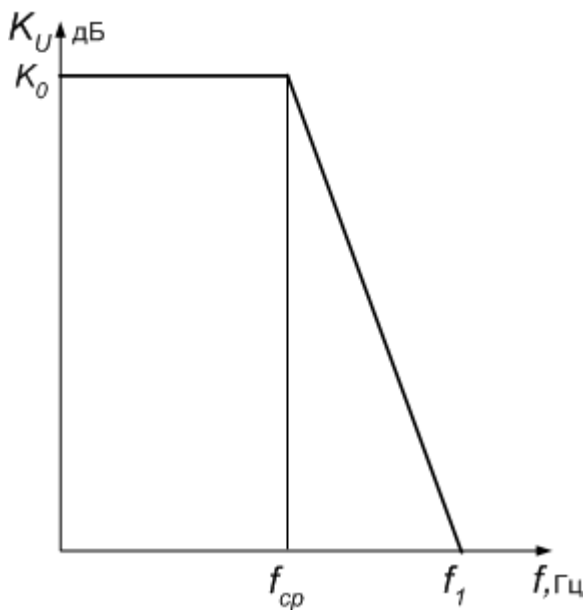


Рис. 3.

$$f_{cp} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}$$

$$f_{cp} = \frac{f_1}{K_0}$$

### Завдання до виконання

1. Отримати параметри моделі відповідно до варіанту
2. Скласти макромодель першого рівня відповідно до вказаних характеристик
3. Промодельовати отриману схему та визначити основні експлуатаційні характеристики, як зазначено у вступній частині

### Варіанти

№	Ко, 1e3	F1, МГц	Rin, 1e6	Rout
1	50	2	100	10
2	40	0.8	50	20
3	50	1	20	50
4	80	2	10	100
5	40	0.75	100	10
6	120	2	50	20
7	50	0.4	20	50
8	40	1	10	100
9	40	4	100	10
10	80	0.4	50	20

### Завдання 3. Дослідження впливу зворотнього зв'язку операційного підсилювача на експлуатаційні характеристики

Від'ємний зворотній зв'язок операційного підсилювача використовують для регулювання його експлуатаційних характеристик. На рис.4 показані дві схеми ЗЗ – за напругою (а) та за струмом (б).

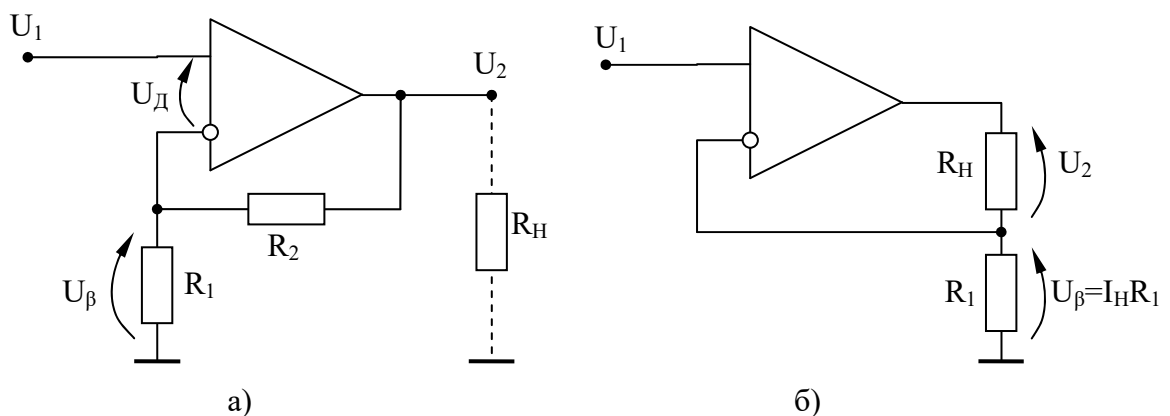


Рис. 4.

Для схеми (а) 
$$U_{\beta} = U_2 \cdot \frac{R1}{R1 + R2} = U_2 \cdot \beta, \text{ де } \beta < 1.$$

Для схеми (б) 
$$U_{\beta} = I_H \cdot R1$$

Коефіцієнт підсилення схеми з 33

$$K_U^{OC} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{U_2}{U_D + U_{\beta}} = \frac{U_2}{\frac{U_2}{K_U} + U_2 \cdot \beta} = \frac{K_U}{1 + K_U \cdot \beta} = \frac{K_U}{F}$$

Тут  $U_D$  – падіння напруги на вході ОП,  $\beta$  – коефіцієнт 33,  $F$  – глибина 33.

Для великих значень глибини 33

$$K_U^{OC} = \frac{1}{\beta} = \frac{R1 + R2}{R1}$$

Вхідний опір схеми з 33

$$R_{BX}^{OY} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{U_D + U_{\beta}}{I_1} = \frac{U_D + U_D \cdot \beta \cdot K_U}{I_1} = \frac{U_D}{I_1} (1 + \beta \cdot K_U) = R_D \cdot F$$

$$R_D = \frac{U_D}{I_1} - \text{вхідний диференційний опір (паспортна величина)}$$

Вихідний опір схеми з 33

$$R_{BIX}^{OC} = \frac{U_{2XX}}{I_{2K3}} = \frac{U_1 \cdot K_U^{OC}}{\frac{U_D \cdot K_U}{R_{BIX}^{OY}}} = \frac{U_1 \cdot \frac{K_U}{F} \cdot R_{BIX}^{OY}}{U_1 \cdot K_U} = \frac{R_{BIX}^{OY}}{F} \rightarrow 0$$

для схеми із 33 за струмом (б)

$$R_{BIX}^{OC} = \frac{U_{2XX}}{I_{2K3}} = \frac{U_D \cdot K_U}{\frac{U_D}{R_1}} = R_1 \cdot K_U \rightarrow \infty$$

Частотна характеристика схеми з 33

$$K_U(j\omega) = \frac{K_0}{1 + j\omega\tau},$$

$$\tau = \frac{1}{\omega_{cp}}$$

$$K_U^{OC}(j\omega) = \frac{K_0}{1 + \beta K_0} \frac{1}{1 + j\omega \frac{\tau}{1 + \beta K_0}} = \frac{K_0^{OC}}{1 + j\omega\tau^{OC}}$$

$$\omega_{cp}^{OC} = \omega_{cp} (1 + \beta K_0)$$

## Завдання до виконання

1. Обрати операційний підсилювач відповідно до номеру варіанту
2. Отримати його модель з бібліотеки
3. Побудувати схему із зворотнім зв'язком за напругою
4. Промодельювати схему та визначити основні експлуатаційні характеристики, як зазначено у вступній частині для значень глибини зворотнього зв'язку  
 $F = 1, 10, 100, 1000$

## Варіанти

№	
1	ALD1701
2	LF411
3	ALD1702
4	LM324
5	ALD1703
6	LM118
7	ALD1704
8	LM124
9	K140UD8
10	K154UD2

## Рекомендована література

1. Пейтон А. Джо, Волш В. Аналоговая электроника на операционных усилителях. М. : БИНОМ, 1994. 352 с.
2. Титце У. Полупроводниковая схемотехника : в 2 т.: пер. с англ. / У. Титце, К. Шенк. М. : Додеко — XXI, 2008. Т. 1. 832 с.; Т. 2. 942 с.
3. Фолкенберри Л. Применение операционных усилителей и линейных ИС : пер. с англ. / Л. Фолкенберри. М. : Мир, 1985. 572 с.