

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»

## **МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до самостійної роботи

з дисципліни

### **„СХЕМОТЕХНІКА АНАЛОГОВИХ І ЦИФРОВИХ ПРИСТРОЇВ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ“**

#### **ЧАСТИНА ПЕРША**

для студентів спеціальностей

175 „Інформаційно-вимірювальні технології“,  
освітня програма: „Інформаційні системи моніторингу і контролю“;

176 „Мікро- та наносистемна техніка“,  
освітня програма: „Мікро- та наноелектронні прилади і пристрої“  
першого (бакалаврського) рівня вищої освіти  
денної й заочної форм навчання

Методичні вказівки до самостійної роботи з дисципліни „Схемотехніка аналогових і цифрових пристроїв обробки сигналів“. Частина перша. Для студентів спеціальностей: 175 „Інформаційно-вимірювальні технології“, освітня програма: „Інформаційні системи моніторингу і контролю“; 176 „Мікро- та наносистемна техніка“, освітня програма: „Мікро- та нанoeлектронні прилади і пристрої“ першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної й заочної форм навчання / Укл.: Ніна НАГОРНА. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2025. – 33 с.

Укладач: Ніна НАГОРНА, ст. викладач,  
Рецензент: Валентин ПОГОСОВ, проф., д-р фіз.-мат. наук  
Відповідальний за випуск: Андрій КОРОТУН, канд. фіз.-мат. наук,  
професор

Затверджено  
на засіданні кафедри  
інформаційної безпеки та  
наноелектроніки

Протокол № 5  
від “ 22 ” січня 2025 р.

Рекомендовано до видання  
НМК ФІБЕК  
Протокол № 7  
від “ 24 ” лютого 2025 р.

## ЗМІСТ

Частина перша	
1 Загальні методичні вказівки.....	4
1.1 Мета самостійної роботи студента.....	4
1.2 Організація самостійної роботи студента.....	4
1.3 Розподіл навчального часу за видами навчання дисципліни „Схемотехніка аналогових і цифрових пристроїв обробки сигналів“.....	4
2 Самостійна робота № 1 ”Розрахунок підсилювальних каскадів на ОП”.....	5
2.1 Теоретичні відомості та вихідні дані.....	5
2.2 Вказівки до виконання роботи.....	9
3 Самостійна робота № 2 ”Розрахунок кола компенсації похибки вихідної напруги підсилювача на ОП”.....	12
3.1 Приклади виконання розрахунків та вихідні дані.....	12
3.2 Завдання.....	16
4 Самостійна робота № 3 ”Розрахунок безтрансформаторного двотактового підсилювача потужності”.....	17
4.1 Методика розрахунку безтрансформаторного двотактового підсилювача потужності.....	17
4.2 Завдання.....	21
5 Самостійна робота № 4 ”Автоматизоване дослідження динамічних властивостей підсилювачів”.....	24
5.1 Завдання.....	24
5.2 Формулювання задач.....	24
6 Перелік запитань, що виносяться на модульний контроль.....	28
6.1 Перший модульний контроль.....	28
6.2 Другий модульний контроль.....	29
Рекомендована література.....	31
Додаток А. Ряди номінальних ємностей і резисторів згідно згідно ДСТУ 2382-94.....	32
Частина 2	

## 1 ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

### 1.1 Мета самостійної роботи студента

Самостійна робота дозволяє розвинути у студента самостійність мислення, сформувати навички самостійного вирішування проблем, що виникають при розробці цифрової апаратури.

Самостійна робота студента також сприяє поглибленню знань з проектування пристроїв цифрової електроніки та оволодінню методик розробки типових функціональних вузлів.

### 1.2 Організація самостійної роботи студента

Завдання на самостійну роботу видаються лектором дисципліни „Схемотехніка аналогових і цифрових пристроїв обробки сигналів“ з розрахунку по два завдання на кожний півсеместр. Кожне виконане завдання перевіряється викладачем і оцінюється відповідною сумою балів. У першому півсеместрі виконуються завдання за темою ”Підсилювальні каскади на ОП”, у другому – за темами ”Підсилювачі потужності” та ”Динамічні властивості підсилювачів”.

### 1.3 Розподіл навчального часу за видами навчання дисципліни „Схемотехніка аналогових і цифрових пристроїв обробки сигналів“

Розподіл навчального часу за видами навчання приведений в табл. 1.1.

Таблиця 1.1- Розподіл навчального часу за видами навчання у шостому та сьомому семестрах

Форма навчання	Курс	Семестр	Лекції (год.)	Лаборат. роб. (год.)	Практ. зан.(год.)	Усього (кредит/ год.)	Сам. роб. студента (год)
Денна	3	6	28	14	14	4,5/135	79
	4	7	30	14	14	4,0/120	62

За навчальним планом формою контролю у 6 семестрі є залік, у 7 семестрі – іспит.

## 2 САМОСТІЙНА РОБОТА № 1

### ”РОЗРАХУНОК ПІДСИЛЮВАЛЬНИХ КАСКАДІВ НА ОП”

**Мета роботи** - набуття навиків розрахунку та аналізу підсилювальних каскадів на операційних підсилювачах.

#### 2.1 Теоретичні відомості та вихідні дані

##### 2.1.1 Вихідні дані

Вихідними даними для розрахунку є:

- тип та схема підсилювального каскаду;
- величини опорів деяких резисторів схеми каскаду;
- напрямки протікання струмів у гілках каскаду та величини деяких з них;
- величини деяких напруг на входах і виході каскаду або його коефіцієнта підсилення за напругою  $K_U$ ;
- тип ОП і типова схема його вмикання.

Варіанти вихідних даних наведені в табл. 2.1, 2.2. Розрахункові схеми – на рис. 2.1, 2.2, 2.3.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для розрахунку інвертувального суматора або підсилювача на ОП

Параметр	Один. вим.	№ варіанта									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_1$	кОм	1,0	x	x	1,1	—	—	1,3	—	2,0	1,1
$R_2$		1,5	3,0	—	—	1,2	x	—	1,0	—	—
$R_3$		1,1	30	75	33	x	x	240	x	x	33
$R_4$		2,0	1,0	6,2	2,2	x	2,4	x	x	x	2,2
$U_1$	В	1,5	0,15	x	x	—	—	x	—	-0,05	x
$U_2$		-2,5	-0,25	—	—	x	0,01	—	x	—	—
$U_3$		x	x	x	x	-5,0	x	-1,2	-2,2	x	x
$I_1$	мА	x	x	x	0,2	—	—	0,005	—	x	0,2
$I_2$		x	x	—	—	x	x	—	x	—	—
$I_3$		x	x	x	x	x	0,05	x	0,02	x	x
$I_4$		x	0,25	1,0	x	-2,5	x	-1,0	-0,01	0,55	x
$K_U$		—	—	-50	x	-100	-120	x	x	-110	x

Знаком “—” в таблиці 2.1 позначені відсутні для даного варіанта параметри.

## Продовження таблиці 2.1

Параметр	Один. вим.	№ варіанта									
		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$R_1$	кОм	x	1,0	x	x	x	2,0	—	1,1	—	x
$R_2$		1,2	—	x	1,6	—	3,2	1,1	1,3	x	—
$R_3$		1,1	x	x	x	x	1,0	x	1,4	x	x
$R_4$		1,4	x	x	1,1	2,2	x	0,6	x	x	x
$U_1$	В	0,06	-0,04	-0,01	0,02	-0,05	0,01	—	0,01	—	-0,05
$U_2$		-0,04	—	-0,02	0,05	—	-0,03	x	0,03	0,01	—
$U_3$		x	x	5,0	-2,4	x	x	5,0	x	x	1,8
$I_1$	мА	0,5	x	-0,2	0,1	-0,3	x	—	x	—	-0,2
$I_2$		x	—	-0,1	x	—	x	-0,2	x	x	—
$I_3$		x	x	x	x	x	x	x	x	0,08	x
$I_4$		x	1,2	1,1	x	x	2,0	x	-1,3	-0,2	1,0
$K_U$		—	-100	—	—	-50	—	x	—	-20	x

## Продовження таблиці 2.1

Параметр	Один. вим.	№ варіанта									
		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$R_1$	кОм	1,1	x	x	1,4	—	1,0	x	—	1,5	—
$R_2$		x	—	—	x	2,2	0,6	—	1,2	1,8	x
$R_3$		x	x	75	x	22	1,4	x	x	10	22
$R_4$		2,4	x	6,2	2,2	x	x	1,0	x	8,0	4,0
$U_1$	В	-0,05	0,15	x	0,1	—	x	-0,06	—	x	x
$U_2$		-0,2	—	—	0,2	-0,03	x	—	x	x	x
$U_3$		2,0	-5,0	x	x	x	x	x	3,0	x	-4,0
$I_1$	мА	x	x	x	x	—	0,2	-0,3	—	0,2	—
$I_2$		-0,5	—	—	0,6	x	0,4	—	x	0,1	0,15
$I_3$		x	0,2	x	x	x	x	x	x	x	x
$I_4$		x	-2,0	1,0	0,8	1,0	-0,9	x	1,4	x	x
$K_U$		—	x	-50	—	x	—	-50	-70	—	-80

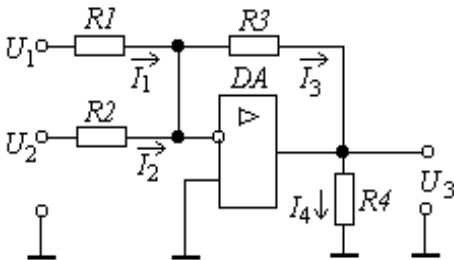


Рисунок 2.1 – Розрахункова схема інвертувального суматора на ОП

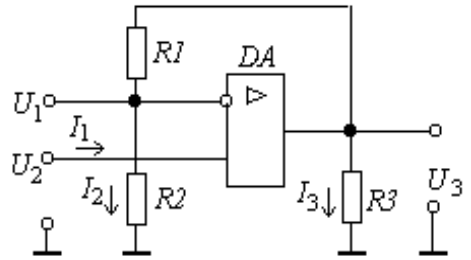


Рисунок 2.2 – Розрахункова схема неінвертувального підсилювача на ОП

Таблиця 2.2 – Вихідні дані для розрахунку неінвертувального суматора або підсилювача на ОП

Параметр	Один. вим.	№ варіанта									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_1$	кОМ	18	x	220	x	75	x	24	15	x	36
$R_2$		x	1,2	x	3,0	x	1,0	x	x	2,4	x
$R_3$		10	6,2	3,9	x	2,0	2,0	x	x	10	x
$U_1$	В	-0,3	x	0,044	x	0,15	x	0,3	x	x	x
$U_2$		x	-0,6	x	0,1	x	x	x	x	0,2	0,25
$U_3$		-4,8	-9,6	x	5,1	x	-1,25	x	9,0	3,2	x
$I_1$	мА	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
$I_2$		x	x	0,002	x	x	x	0,3	0,5	x	x
$I_3$		x	x	x	1,0	x	x	3,75	3,8	x	2,0
$K_U$		x	x	x	x	51	25	x	x	x	16

Знаком “—” в таблиці 2.2 позначені відсутні для даного варіанта параметри.

## Продовження таблиці 2.2

Параметр	Один. вим.	№ варіанта									
		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$R_1$	кОМ	x	x	x	x	10	22	10	x	x	8
$R_2$		x	x	2,0	x	2,8	x	x	3,2	3,0	x
$R_3$		10	1,2	x	4,0	x	2,6	3,2	6,0	x	1,4
$U_1$	В	x	x	-0,02	x	x	0,08	x	x	0,03	-0,01
$U_2$		x	-0,08	x	0,04	x	x	-0,1	x	x	x
$U_3$		10	x	-8,0	x	2,8	x	x	3,6	12	x
$I_1$	мА	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
$I_2$		0,08	-0,8	x	0,4	x	0,16	x	x	x	x
$I_3$		x	x	-1,0	x	1,6	x	-2,0	x	3,25	x
$K_U$		50	75	x	100	x	x	x	20	x	21

## Продовження таблиці 2.2

Параметр	Один. вим.	№ варіанта									
		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$R_1$	кОМ	x	36	x	x	22	x	16	24	x	x
$R_2$		x	x	x	2,4	x	3,4	x	x	x	2,0
$R_3$		4,0	x	x	x	6,0	1,6	x	4,6	2,0	x
$U_1$	В	x	x	0,04	x	x	x	-0,03	x	x	0,06
$U_2$		0,04	x	x	x	-0,02	x	x	0,06	x	x
$U_3$		9,6	8,0	x	-12	x	4,0	-5,25	x	8,6	10,2
$I_1$	мА	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
$I_2$		0,2	x	0,4	x	x	x	x	0,4	0,08	x
$I_3$		x	1,0	2,0	-1,2	-1,6	x	-1,8	x	x	2
$K_U$		x	101	x	50	x	20	x	x	78	x

### 2.1.2 Результати розрахунків

Необхідно визначити:

- величини параметрів, позначених в табл. 2.1 – 2.2 символом "X";
- вказати, чи правильно позначені на рис. 2.1 та рис. 2.2 напрямки протікання струмів;
- тип та потужність резисторів пристрою.

Також необхідно навести електричну принципову схему каскаду з вказанням заданих та отриманих за результатами розрахунку номінальних значень опорів, величин напруг і струмів, напрямків протікання струмів.

### 2.1.3 Вказівки до виконання роботи

Елементи схеми вибираються з урахуванням вимог стандартів до певних типів компонентів. Наприклад, резистори вибираються за номінальним значенням, найближчим до розрахункової величини опору, та за величиною потужності, що розсіюється в резисторі у робочому режимі. Конденсатори вибираються за номінальним значенням ємності, найближчим до розрахункової величини, та за величиною робочої напруги.

Номінальні значення опорів резисторів та ємностей конденсаторів відповідають стандартним рядам, що, як правило, є десятковими рядами геометричної прогресії зі знаменником  $q_N = \sqrt[N]{10}$ , де N- кількість значень ряду. Номінальне значення параметра, що відповідає конкретній позиції ряду (від 1 до N) обчислюється як  $a_i = b_0 q_N^{i-1}$ . Деякі ряди номінальних значень наведені у табл. 2.3. Так, для ряду E24:  $N = 24$ ;  $q_{24} = \sqrt[24]{10}$ ;  $a_0 = 1$ .

Число в індексі знаменника ряду відповідає кількості позицій ряду: так ряд E24 має 24 номінальних значення у проміжку від 1 до 10 (більша кількість при допустимому відхиленні  $\pm 5\%$  не потрібна)

Будь-яке номінальне значення ряду може бути помножене на множник  $10^m$ . Показник степеня  $m$  може дорівнювати: 9, 6, 3, 0, мінус 3, мінус 6, мінус 9, мінус 12.

Деякі найрозповсюдженіші типи резисторів, що виробляються для електронних пристроїв, наводяться в табл. 2.4.

Таблиця 2.3 – Ряди номінальних значень

Індекс ряду	Позиції ряду	Допустиме відхилення від номінальної величини, %
Е6	1,0; 1,5; 2,2; 3,3; 4,7; 6,8	± 20
Е12	1,0; 1,2; 1,5; 1,8; 2,2; 2,7; 3,3; 3,9; 4,7; 5,6; 6,8; 8,2	± 10
Е24	1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,5; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,7; 3,0; 3,3; 3,6; 3,9; 4,3; 4,7; 5,1; 5,6; 6,2; 6,8; 7,5; 8,2; 9,1	± 5

Таблиця 2.4 – Параметри резисторів

Тип резистора	Діапазон опорів	Номінальна потужність, Вт
МЛТ	1 Ом – 3,01 МОм	0,125
	1 Ом – 5,1 МОм	0,25; 0,5
	1 Ом – 10 МОм	1; 2
С2 - 33	1 Ом – 3 МОм	0,125
	1 Ом – 5,1 МОм	0,25
	0,1 Ом – 5,1 МОм	0,5
	1 Ом – 10 МОм	1
	1 Ом – 22 МОм	2

## 2.2 Приклад розрахунку інвертувального підсилювача на ОП

### 2.2.1 Вихідні дані:

$R_1 = 1 \text{ кОм}$ ;  $R_2$  – відсутнє;  $R_4 = 2 \text{ кОм}$ ;  $U_1 = 0,15 \text{ В}$ ;  $U_3 =$  мінус 3 В.

З аналізу вихідних даних видно, що ми маємо справу з інвертувальним підсилювачем, розрахункова схема даного інвертувального підсилювача на ОП наведена на рис. 2.3.

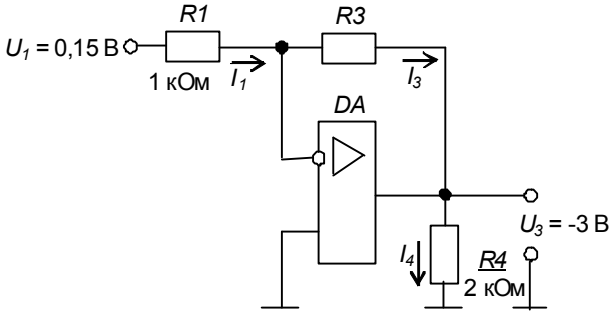


Рисунок 2.3 – Розрахункова схема інвертувального підсилювача на ОП

**2.2.2 Необхідно визначити:** опір резистора  $R_3$ ; значення струмів  $I_1$ ,  $I_3$ ,  $I_4$ ; коефіцієнт підсилення  $K_U$ ; правильність позначення на рис. 3.3 напрямків протікання струмів; тип та потужність резисторів каскаду.

### 2.2.3 Порядок розрахунку

При виконанні розрахунку слід вважати, що ОП є ідеальним, тому справедливі наступні припущення:

- коефіцієнт підсилення ОП нескінченний;
- вхідні струми ОП нульові;
- вихідний опір  $R_{\text{вихОП}} = 0$ ;
- при охопленні ОП негативним зворотним зв'язком за умови його знаходження в лінійному режимі (режимі підсилення, а не насичення) різниця потенціалів між входами ОП є нульовою.

$$\text{Для схеми підсилювача} \quad K_U = \frac{U_3}{U_1} = -\frac{R_3}{R_1} = \frac{-3}{0,15} = -20.$$

$$\text{Для схеми інвертувального підсилювача} \quad K_U = -\frac{R_3}{R_1}.$$

$$\text{Тоді} \quad R_3 = -K_U R_1 = -(-20) \cdot 1 = 20 \text{ кОм},$$

що є стандартним значенням за табл. 2.3.

Оскільки потенціал інвертувального входу ОП для схеми інвертувального підсилювача дорівнює нулю, то

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1} = \frac{0,15}{1 \cdot 10^3} = 0,15 \text{ мА},$$

і напрямок його протікання вказано вірно.

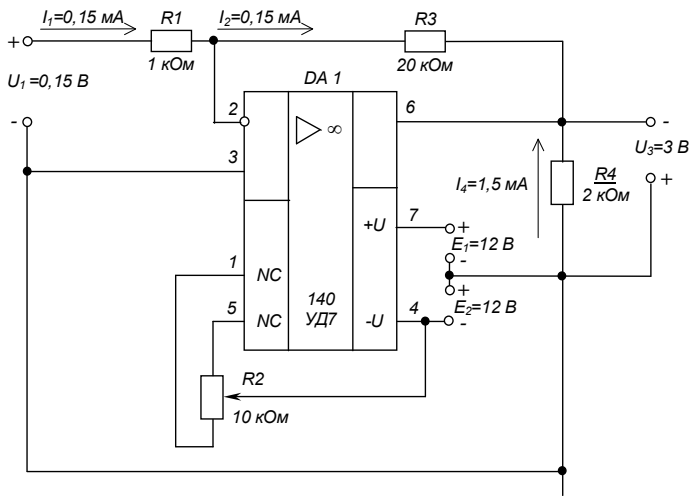
За першим законом Кірхгофа  $I_3 = I_1 = 0,15 \text{ мА}$  і напрямок його протікання на рис. 2.3 вказано вірно.

$$\text{За законом Ома } I_4 = \frac{U_3}{R_4} = \frac{-3}{2} = -1,5 \text{ мА},$$

і напрямок його протікання є зворотним до вказаного на рис. 2.3.

Електрична принципова схема інвертувального підсилювача з параметрами, отриманими за даними розрахунку і побудованого на ОП 140УД7, наведена на рис. 2.4.

Зауваження: оскільки підсилювач призначений для підсилення сигналу напруги постійного струму, то коригуючий конденсатор в схемі відсутній.



$K_{U33} = -20$

Рисунок 2.4 - Схема електрична принципова інвертувального підсилювача на ОП 140УД7

### 3 САМОСТІЙНА РОБОТА № 2 "РОЗРАХУНОК КОЛА КОМПЕНСАЦІЇ ПОХИБКИ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ ПІДСИЛЮВАЧА НА ОП"

**Мета роботи** - ознайомлення з призначенням кола компенсації похибки вихідної напруги підсилювача та набуття навиків розрахунку вказаного кола.

#### 3.1 Приклади виконання розрахунків та вихідні дані

**3.1.1 Завдання 1.** Розрахувати зовнішнє коло компенсації похибки вихідної напруги інвертувального підсилювача з параметрами, заданими в табл. 3.1. Схема підсилювача приведена на рис. 3.1.

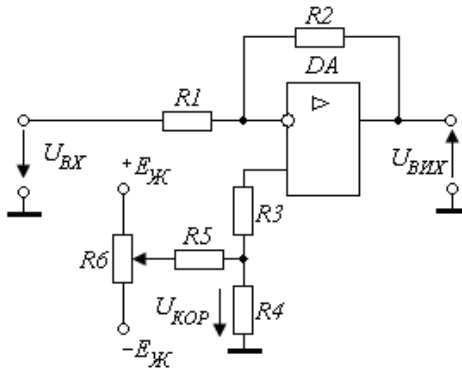


Рисунок 3.1 – Схема неінвертувального підсилювача з колами компенсації вихідної похибки

Приклад розрахунку.

*Задані параметри:*

$$R_1 = 1 \text{ кОм}; R_2 = 100 \text{ кОм}; DA - \text{K140УД16}; E_{Ж} = \pm 15 \text{ В.}$$

*Розв'язання.*

Для компенсації похибки, обумовленої протіканням струму  $I_{ВХ}$ , в коло неінвертувального входу вводиться резистор

$$R_{кор} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2) = 1 \cdot 100 / (1 + 100) = 0,99 \text{ кОм.}$$

Приймається  $R_{кор} = 1 \text{ кОм}$ .

Визначається максимальна сумарна похибка підсилювача.

За довідниковими даними

$$U_{3M} = \pm 6 \text{ мВ}; \quad \Delta I_{BX} = 500 \text{ нА}.$$

Максимальне значення похибки вхідної напруги (складова похибки від  $\Delta I_{BX}$  не залежить від співвідношення вхідних струмів) дорівнює

$$\begin{aligned} \Delta U_{BX \max} &= U_{3M} + \Delta I_{BX} R_1 R_2 / (R_1 + R_2) = \\ &= 6 \cdot 10^{-3} + 500 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot 10^3 = 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ В}. \end{aligned}$$

Сигнали, які присутні як на інвертувальному, так і на неінвертувальному входах, передаються на вихід з коефіцієнтом передачі

$$K_{U_{33}} = (R_1 + R_2) / R_1.$$

Тоді

$$\Delta U_{ВНХ \max} = K_{U_{33}} \Delta U_{BX \max} = [(1+100)/1] \cdot 6,5 \cdot 10^{-3} = 0,66 \text{ В}.$$

Теоретично підбором значення резистора  $R_{кор}$  можна компенсувати всі складові похибки вихідної напруги ОП. Проте через невизначеність величин і знаків  $\Delta I_{BX}$  і  $U_{3M}$  таке рішення не має практичного значення. Тому компенсація вихідної похибки  $\Delta U_{ВНХ \max}$  потребує введення в схему додаткових регулювальних елементів (рис. 3.1). В наведеній схемі резистор  $R_{кор} = R_3 + R_4$ . На резистор  $R_4$  від потенціометра  $R_6$ , підключеного до затискачів джерела живлення ОП, через обмежувальний резистор  $R_5$  задається додаткове зміщення. Абсолютна величина і знак цього зміщення вибираються з умови  $\Delta U_{ВНХ \max} = 0$ .

Опори резисторів вибираються з таких міркувань:

- щоб не порушувалася умова  $R_{кор} = R_3 + R_4$ , необхідно, щоб  $R_5 \gg R_4$ ;

- допустимий діапазон зміни напруги на резисторі  $R_4$  повинен бути більший максимальної напруги  $U_{3M}$ , тобто

$$U_{3M \max} \leq \Delta U_{кор} = E_{Ж} R_4 / (R_4 + R_5) \approx E_{Ж} R_4 / R_5;$$

- опір резистора  $R_6$  повинен задовольняти умові  $R_6 \ll R_5$ .

На основі вищенаведеного опір резистора  $R_4$  визначається з умови  $R_4 \approx 0,1 R_{кор}$ . З урахуванням того, що  $R_{кор} = R_3 + R_4$ , вибираються:

$$R_4 = 91 \text{ Ом}; R_3 = 910 \text{ Ом}.$$

Опір резистора  $R_5$  обирається з умови

$$U_{кор} = K_{зан} \Delta U_{BX \max} = E_{Ж} R_4 / (R_4 + R_5),$$

де  $K_{зан} = 1,5 \dots 2$  – коефіцієнт запасу;

$$R_5 = \frac{R_4 (E_{Ж} - K_{зан} \Delta U_{BX \max})}{K_{зан} \Delta U_{BX \max}} = \frac{0,091(15 - 2 \cdot 6,5 \cdot 10^{-3})}{2 \cdot 6,5 \cdot 10^{-3}} = 104,9 \text{ кОм}.$$

Вибирається  $R_5 = 110 \text{ кОм}$ .

Опір резистора  $R_6$  вибирається з умови  $I_{R6} \gg I_{R5}$  (умова незалежності вихідної напруги подільника від його навантаження).

Вважається  $I_{R6} = 10 I_{R5}$ , тоді

$$R_6 = R_5 / 10 = 110 / 10 = 11 \text{ кОм}.$$

Вибирається  $R_6 = 11 \text{ кОм}$ .

**3.1.2 Завдання 2.** Визначити мінімальну вхідну напругу, при якій похибка вихідної напруги підсилювача з попереднього завдання 1 при роботі у діапазоні температур  $\pm 60^\circ\text{C}$  не буде перевищувати  $\pm 5\%$ ; температурний коефіцієнт вхідного струму  $TK_{I_{BX}} = dI_{BX}/dT = 1,5 \text{ нА}/^\circ\text{C}$ .

*Розв'язання.* 2.1 Визначається максимальна температурна похибка вихідної напруги у припущенні, що схема була повністю збалансована при температурі  $0^{\circ}\text{C}$ . За довідниковими даними температурний коефіцієнт напруги зміщення

$$TK_{U_{3M}} = dU_{3M}/dT = 6 \cdot 10^{-6} \text{ В/}^{\circ}\text{C}.$$

Тоді

$$\begin{aligned} \frac{dU_{BIX}(\Delta T)}{dT} &= \frac{R_1 + R_2}{R_1} \frac{dU_{3M}}{dT} + R_2 \frac{dI_{BX}}{dT} = \\ &= [(1+100)/1] \cdot 6 \cdot 10^{-6} + 100 \cdot 10^3 \cdot 1,5 \cdot 10^{-9} = 7,56 \cdot 10^{-4} \text{ В/}^{\circ}\text{C}; \end{aligned}$$

$$\Delta U_{BIX}(\Delta T) = [dU_{BIX}(\Delta T)/dT] \Delta T = 7,56 \cdot 10^{-4} \cdot 60 \approx 0,045 \text{ В}.$$

2.2 Знаходиться зведена вхідна похибка

$$\Delta U'_{BX}(\Delta T) = \Delta U_{BIX}(\Delta T) R_1 / (R_1 + R_2) = 0,045 \cdot 1 / (1 + 100) = 4,46 \cdot 10^{-4} \text{ В}.$$

2.3 Вихідна напруга підсилювача дорівнює

$$U_{BIX} = (R_2 / R_1) [U_{BX} + \Delta U'_{BX}(\Delta T)].$$

Тоді, враховуючи, що згідно з умовою  $\Delta U'_{BX}(\Delta T)$  складає 5% від  $U_{BX \min}$ , можна знайти

$$U_{BX \min} = 20 \Delta U'_{BX}(\Delta T) = 20 \cdot 4,46 \cdot 10^{-4} = 8,92 \cdot 10^{-3} \text{ В}.$$

З наведеного прикладу випливає, що відносна похибка вихідної напруги, яка обумовлена температурною залежністю напруги  $U_{3M}$  і струму  $I_{BX}$ , зменшується із збільшенням абсолютного значення вхідної напруги підсилювача.

### 3.2 Завдання

Студенту необхідно виконати два завдання. Варіанти завдань приведені у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані

№ вар.	Тип підсилювача	$R_1$ , кОм	$R_2$ , кОм
1	544УД1А	4,3	120
2	544УД2А	2	56
3	К544УД1Б	5,1	100
4	К544УД2Б	9,1	150
5	К544УД2В	2	150
6	К551УД1А	1	100
7	К551УД1Б	2	200
8	К553УД1А	1	200
9	К553УД1В	5,1	100
10	К553УД2	4,3	200
11	574УД1А	1	20
12	574УД1Б	2	50
13	710УД1-1	2	100
14	740УД1А-1	1	75
15	К740УД3	1	100
16	740УД4-1	2	75
17	740УД5-1	2	20
18	153УД6	1	100
19	140УД14	4,3	200
20	КР140УД14Б	1	50
21	К1401УД2Б	2	100
22	140УД11	1	150
23	140УД12	2	200
24	153УД5А	2	100
25	140УД8Б	2,4	100
26	140УД20Б	1	100
27	К157УД4	1	56
28	К553УД3	3,3	100

## 4 САМОСТІЙНА РОБОТА № 3 "РОЗРАХУНОК БЕЗТРАНСФОРМАТОРНОГО ДВОТАКТОВОГО ПІДСИЛЮВАЧА ПОТУЖНОСТІ"

**Мета роботи** - розрахунок безтрансформаторного двотактового підсилювача потужності класу АВ з однополярним джерелом живленням з умови отримання заданої потужності  $P_H$  в заданому навантаженні  $R_H$  та при заданих допустимому значенні коефіцієнта нелінійних спотворень в процентах і діапазону робочих частот від  $f_H$  до  $f_B$ .

### 4.1 Методика розрахунку безтрансформаторного двотактового підсилювача потужності

#### 4.1.1 Схеми двотактових підсилювачів

Для отримання більших потужностей, високого ККД та більш ефективного використання транзисторів застосовують спеціальні двотактові підсилювачі, здатні працювати в енергетично більш вигідних режимах класів В і АВ.

Схеми двотактових підсилювачів потужності показані на рис. 4.1. Наявність двох джерел живлення в схемі рис. 4.1, а може визвати деякі незручності при використанні схеми. Для заміни двох джерел живлення одним послідовно з навантаженням вмикають розділовий конденсатор достатньо великої ємності  $C_p$ . По постійному струму транзистори схеми ввімкнені послідовно. Тому при ідентичних параметрах транзисторів постійна напруга на розділовому конденсаторі складає  $0,5 E_K$  і є джерелом живлення для транзистора  $VT_2$ .

В режимі АВ на базу транзисторів подається невелике зміщення  $U_{B0}$ , при якому робоча точка займає початкове положення О в нелінійній частині вхідних характеристик транзисторів, і по базам транзисторів у відсутності вхідного сигналу тече невеликий струм  $I_{B0} = (0,05...0,15)I_{Bm}$  (рис. 4.2).

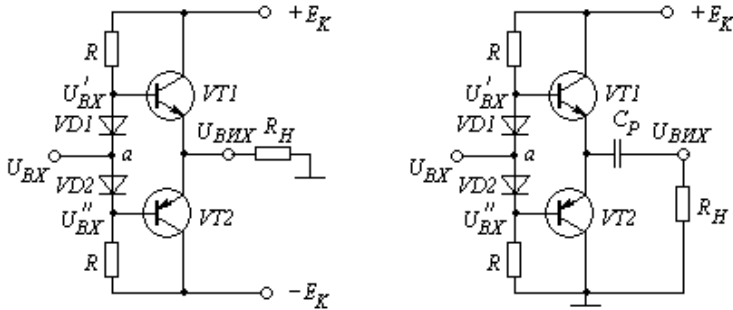


Рисунок 4.1 – Двотактові підсилювачі потужності: а – з двополярним живленням; б – з однополярним живленням

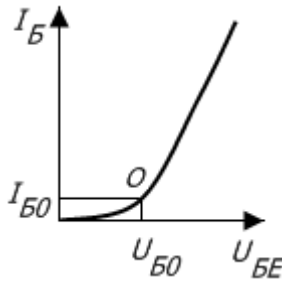


Рисунок 4.2 – Вибір положення робочої точки в режимі АВ

При розрахунку необхідно виконати наступні пункти.

**4.1.2** Визначити максимальну потужність розсіювання на колекторі транзистора одного плеча підсилювача

$$P_{K \max} = 2P_H / \pi^2.$$

**4.1.3** Знайти максимальний колекторний струм транзистора одного плеча

$$I_{K \max} = \sqrt{2P_H / R_H}.$$

**4.1.4** Визначити напругу джерела живлення з формули

$$I_{K \max} = 0,5E_K / R_H.$$

**4.1.5** Враховуючи отриманні значення  $P_{K \max}$ ,  $I_{K \max}$ , а також умову  $U_{K m} \approx 0,5E_K < U_{K \text{дон}}$ , по довіднику вибрати транзистори, що складають комплементарну пару.

**4.1.6** Знайти необхідну межу частоту коефіцієнта передачі струму  $\alpha$  з умови  $f_\alpha > (2 \dots 4 f_B)(1 + h_{21\text{э}})$  і порівняти з аналогічним параметром вибраного транзистора.

Межова частота  $f_\alpha$  - це частота, на якій модуль  $|\dot{\alpha}|$  падає у  $\sqrt{2}$  разів по відношенню до низькочастотного коефіцієнта передачі  $\alpha_0$ . У відповідності зі стандартами  $f_\alpha$  позначається як  $f_{h21b}$ .

При необхідності можна скористатися співвідношенням

$$f_\beta = f_\alpha (1 - \alpha_0) = f_\alpha / (\beta_0 + 1),$$

де  $f_\beta$  - межова частота коефіцієнта  $\dot{\beta}$ , на якій модуль  $|\dot{\beta}|$  падає у  $\sqrt{2}$  разів по відношенню до низькочастотного коефіцієнта передачі  $\beta_0$ .

Ще одне співвідношення, корисне для практичних розрахунків: при  $f_T / f_\beta \geq 3$  можна записати  $f_T = \beta_0 f_\beta = \alpha_0 f_\alpha$ , де  $f_T$  - це гранична частота коефіцієнта передачі струму транзистора в схемі із спільним емітером, на якій  $|\dot{\beta}| = 1$ .

При необхідності слід підібрати інші типи транзисторів.

**4.1.7** Побудувати на координатній площині сім'ї вихідних характеристик вибраного транзистора (рис. 4.3) динамічну навантажувальну пряму, що відсікає на вісі абсцис  $0,5E_K$ , а на вісі ординат  $I_{K \max}$ . Визначити значення  $U_{3АЛ}$  і  $I_{K m}$ , що відповідають границі нелінійної і лінійної частин вихідних характеристик.

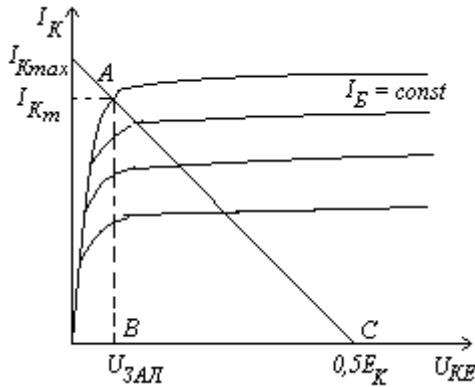


Рисунок 4.3 – Побудова навантажувальної прямої

**4.1.8** Знайти реальну потужність у навантаженні, що відповідає площині трикутника ABC на рис. 4.3:

$$P_H = 0,5(0,5E_K - U_{3АЛ})I_{K,m}.$$

**4.1.9** Визначити потужність, що відбирається каскадом від джерела живлення

$$P_0 = 2 \cdot 0,5 \cdot E_K I_{K,сер} = E_K I_{K,m} / \pi.$$

**4.1.10** Знайти ККД каскаду  $\eta = P_H / P_0$ .

**4.1.11** З використанням вихідної характеристики транзистора визначити струм  $I_{E,m}$ , що відповідає максимальній амплітуді колекторного струму  $I_{K,m} \approx I_{E,m}$ . По вхідній характеристиці  $I_B(U_{BE})$  знайти напругу  $U_{BE,m}$ .

**4.1.12** По вхідній характеристиці транзистора визначити усереднений вхідний опір  $R_{вх,сер} = 1/tg\alpha$  транзистора, обумовлений нелінійністю вхідної характеристики транзистора. Для цього

необхідно провести пряму лінію через нуль в точку  $I_{Bm}$  під кутом  $\alpha$  до вісі абсцис.

**4.1.13** Знайти глибину ЗЗ при максимальній амплітуді вхідного сигналу

$$F = \frac{U_{BE m} + I_{E m} R_H}{U_{BE m}} = 1 + \frac{I_{E m} R_H}{U_{BE m}}.$$

**4.1.14** Визначити вхідний опір плеча каскаду

$$R_{BX33} = F R_{BX\text{сер}}.$$

**4.1.15** Знайти вхідну потужність каскаду

$$P_{BX} = \frac{1}{2} U_{Bm} I_{Bm} = \frac{1}{2} (U_{BE m} + I_{E m} R_H) I_{Bm}.$$

**4.1.16** Знайти коефіцієнт підсилення за потужністю

$$K_P = P_H / P_{BX}.$$

**4.1.17** Визначити опір резистора  $R$

$$R = \frac{E_K}{U'_{BXm}} R_{BX33} - R_{BX33} = R_{BX33} \left( \frac{E_K}{U_{BE m} + I_{E m} R_H} - 1 \right).$$

**4.1.18** Визначити ємність конденсатора  $C_P$  з формули

$$C_P = \frac{1}{\omega_H (R_{ВИХ\text{ЕП}} + R_H)},$$

де вихідний опір емітерного повторювача

$$R_{ВИХ\text{ЕП}} = r_E + \frac{r_B + R_\Gamma}{1 + h_{21\beta}}.$$

Вибрати номінал ємності за стандартом у сторону більших значень.

## 4.2 Завдання

Розрахуйте безтрансформаторний двотактовий підсилювач потужності класу АВ з однополярним джерелом живлення. Вихідні дані приведені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані для розрахунку параметрів підсилювача

№ вар.	Тип приладу	Параметри транзисторів						$P_H$ , Вт	$R_H$ , Ом	$f_H$ , Гц
		Тип провідності	$P_{к max}$ , Вт	$I_{к max}$ , mA	$h_{21э}$	$U_{KE max}$ , В	$f_{эp}$ , МГц			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	2Т214А-1 КТ215А-1	p-n-p n-p-n	0,05 0,05	50 50	$\geq 20$ 20	100 80	5 5	0,0	10000	20
2	2Т214Б-1 КТ215Б-1	p-n-p n-p-n	0,05 0,05	50 50	30...90 30...90	80 80	5 5	0,028	14500	70
3	2Т214В-1 КТ215В-1	p-n-p n-p-n	0,05 0,05	50 50	40...120 40...120	80 60	5 5	0,007	2700	40
4	2Т214Г-1 КТ215Г-1	p-n-p n-p-n	0,05 0,05	50 50	40...120 40...120	60 60	5 5	0,0065	18000	50
5	2Т214Д-1 КТ215Д-1	p-n-p n-p-n	0,05 0,025	50 40	$\geq 80$ 80...240	30 30	5 5	0,0065	10000	40
6	2Т214Е-1 КТ215Е-1	p-n-p n-p-n	0,05 0,025	50 40	$\geq 40$ 40	30 20	5 5	0,0016	8300	60
11	КТ361А КТ315А	p-n-p n-p-n	0,15 0,25	50 150	20...90 30...120	25 25	250 250	0,183	460	60
12	КТ361Б КТ315Б	p-n-p n-p-n	0,15 0,25	50 150	50...350 50...350	20 20	250 250	0,172	185	60
13	КТ361В КТ315В	p-n-p n-p-n	0,15 0,25	50 150	40...160 30...120	40 40	250 250	0,185	270	40
14	КТ361Г КТ315Г	p-n-p n-p-n	0,15 0,25	50 150	50...350 50...350	35 35	250 250	0,183	460	40
16	КТ361Е КТ315Е	p-n-p n-p-n	0,15 0,25	50 150	50...350 50...350	35 35	250 250	0,53	377	40
17	КТ502А КТ503А	p-n-p n-p-n	0,35 0,35	150 150	40...120 40...120	25 25	5 5	0,025	180	20
18	КТ502Б КТ503Б	p-n-p n-p-n	0,35 0,35	150 150	80...240 40...120	25 25	5 5	0,032	315	70
19	КТ502В КТ503В	p-n-p n-p-n	0,35 0,35	150 150	40...120 40...120	25 25	5 5	0,5	12	40
20	КТ502Г КТ503Г	p-n-p n-p-n	0,35 0,35	150 150	40...120 40...120	25 25	5 5	0,65	18	50

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
21	КТ502Д КТ503Д	p-n-p n-p-n	0,35 0,35	150 150	40...120 40...120	25 25	5 5	0,70	16	40
22	КТ502Е КТ503Е	p-n-p n-p-n	0,35 0,35	150 150	40...120 40...120	25 25	5 5	0,75	14	60
23	КТ814А КТ815А	p-n-p n-p-n	3 3	1500 1500	$\geq 40$ $\geq 40$	25 25	3 3	5,80	18	40
24	КТ814Б КТ815Б	p-n-p n-p-n	3 3	1500 1500	$\geq 40$ $\geq 40$	40 40	3 3	6,80	14,5	80
25	КТ814В КТ815В	p-n-p n-p-n	3 3	1500 1500	$\geq 40$ $\geq 40$	60 60	3 3	7,20	12	40
26	КТ814Г КТ815Г	p-n-p n-p-n	3 3	1500 1500	$\geq 30$ $\geq 30$	80 80	3 3	4,69	21	40
27	КТ818А КТ819А	p-n-p n-p-n	60 60	10000 10000	$\geq 15$ $\geq 15$	40 40	3 3	15,6	2,6	60
28	КТ818Б КТ819Б	p-n-p n-p-n	60 60	10000 10000	$\geq 20$ $\geq 20$	50 50	3 3	20,0	7	70
29	КТ818В КТ819В	p-n-p n-p-n	60 60	10000 10000	$\geq 15$ $\geq 15$	70 70	3 3	0,5	12	40

## 5 САМОСТІЙНА РОБОТА № 4 "АВТОМАТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПІДСИЛЮВАЧІВ"

**Мета роботи** – розв’язання заданих задач за допомогою машинного одноваріантного або багатоваріантного аналізу.

### 5.1 Завдання

Розв’яжіть задачу. Номер задачі виберіть з табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Номери задач для розв’язку

№ вар.	№ задачі	№ вар.	№ задачі	№ вар.	№ задачі
1, 16	1	6, 21	6	11, 26	3
2, 17	2	7, 22	7	12, 27	4
3, 18	3	8, 23	8	13, 28	5
4, 19	4	9, 24	1	14, 29	6
5, 20	5	10, 25	2	15, 30	7

### 5.2 Формулювання задач

**5.2.1 Задача 1.** З використанням програми схемотехнічного аналізу визначити верхню граничну частоту  $f_B$  смуги пропускання інвертувального підсилювача (рис. 5.1) при  $R_1 = R_2 = 10$  кОм,  $C_1 = C_2 = 0$ . ОП типу К140УД7 (аналог LM741). На частоті  $f_B$  модуль коефіцієнта передачі напруги падає на 3 дБ щодо низькочастотного значення  $|K_{UH}| = R_1 / R_2 = 1$  (0 дБ). Знайти фазовий зсув  $\varphi_{K_{UB}}$  на цій частоті.

**5.2.2 Задача 2.** Визначити час установлення  $t_{уст}$  перехідного процесу підсилювача (рис. 5.1), при якому вихідна напруга входить в зону помилки, що дорівнює  $\pm 0,1$  % сталої вихідної напруги  $u_{вих}(\infty)$ . Початкові дані: ОП типу К140УД7 (аналог LM741),  $R_1 = R_2 = 100$  кОм,  $C_1 = C_2 = 0$ , до входу прикладений стрибкоподібний вплив

амплітудою  $U_{BX} = -0,1 \text{ В}$ ,  $u_{BX}(t) = U_{BX}1(t)$ , де  $1(t)$  – одинична ступінчаста функція;  $u_{ВНХ}(\infty) = -(R_1/R_2)U_{BX}$ .

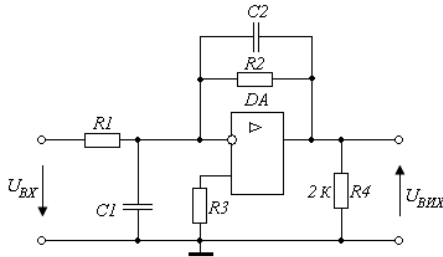


Рисунок 5.1 – Інвертувальний підсилювач

**5.2.3 Задача 3.** Розрахувати АЧХ і ФЧХ передавальної функції петлевого підсилення  $T_U(jf)$  інвертувального повторювача напруги (рис. 5.2, а) при  $C_1 = C_2 = 0$ ;  $R_1 = R_2 = 10 \text{ кОм}$ ;  $R_3 = 0$ ;  $R_4 = 5 \text{ кОм}$ ;  $R_5 = 2 \text{ кОм}$ . Тип ОП: К140УД7 (аналог LM741). Визначити частоту зрізу  $f_{3P}$ , на якій  $|T_U(jf)| = 1$ , і запас стійкості по фазі  $\Delta\varphi_{T_U} = 360^\circ - |\Delta\varphi_{T_U}(f_{3P})|$ . Для розрахунку характеристик функції петлевого підсилення повторювача потрібно відключити вивід резистора від виходу і вважати його входом; вхід повторювача підключити до спільної шини. Перетворена схема представлена на рис 5.2, б, для якої  $T_U = U_{ВНХ}/U_{BX}$ .

**5.2.4 Задача 4.** Даний інвертувальний повторювач напруги (рис. 5.2, а)

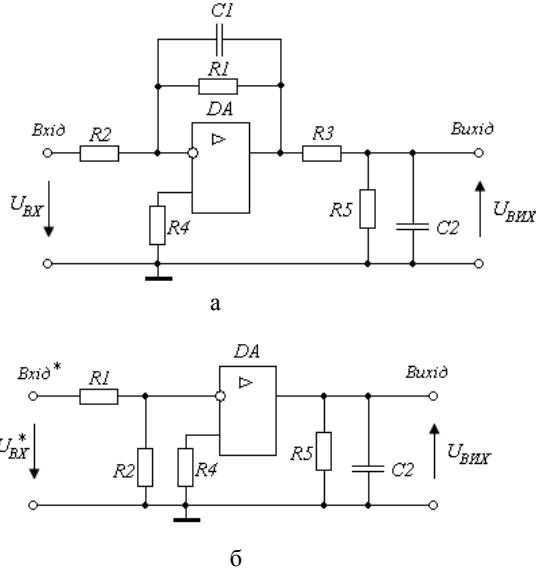
Вихідні дані: ОП 140 УД1 (аналог LM741);  $C_1 = 0$ ;  $R_1 = R_2 = 10 \text{ кОм}$ ;  $R_3 = 0$ ;  $R_4 = 5 \text{ кОм}$ ;  $R_5 = 2 \text{ кОм}$ .

За допомогою багатоваріантного аналізу визначити ємність навантаження  $C_2$  (рис. 5.2,б), при якій повторювач знаходиться на межі стійкості, тобто запас по фазі  $\Delta\varphi_{T_U} = 360^\circ - |\Delta\varphi_{T_U}(f_{3P})| \approx 0$ . Методичні рекомендації до розв'язання задачі 4 даються в задачі 3.

**5.2.5 Задача 5.** Даний інвертувальний повторювач напруги (рис. 5.2, а).

Вихідні дані відповідають задачі 4.

Використовуючи багатоваріантний аналіз, визначити допустиму ємність навантаження, при якій запас стійкості по фазі  $\Delta\varphi_{T_U} = 28\dots30^\circ$ , тобто  $\varphi(f_{3P}) = -330\dots-332^\circ$ .



а - інвертувальний повторювач напруги;  
б - схема для визначення петлевого підсилення

Рисунок 5.2 – Інвертувальний повторювач напруги і схема для визначення петлевого підсилення

**5.2.6 Задача 6.** Розрахувати перехідний процес інвертувального повторювача напруги (рис. 5.2, а) при  $R_1 = R_2 = 10 \text{ кОм}$ ;  $R_3 = 0$ ;  $R_4 = 5 \text{ кОм}$ ;  $R_5 = 2 \text{ кОм}$ ;  $C_1 = 0$ ;  $C_2 = 0,003 \text{ мкФ}$ . Визначити амплітуду найбільшого (першого) викиду  $U_{ВВХ ml}$  і час установлення  $t_{уст}$  перехідного процесу при вході в 1%-ну зону помилки щодо усталеного значення вихідної напруги  $U_{ВВХ\infty} = -\left(\frac{R_2}{R_1}\right)U_{BX}$ . Вхідний сигнал є практично ступінчастою напругою (з дуже коротким

фронтом) амплітудою  $U_{BX} = -0,1$  В. Тип ОП: К140УД7 (аналог LM741).

**5.2.7 Задача 7.** Розрахувати перехідний процес інвертувального повторювача напруги (рис. 5.2, а) при  $R_1 = R_2 = 10$  кОм;  $R_3 = 0,1$  кОм;  $C_1 = 0$ ;  $R_4 = 5$  кОм;  $C_2 = 0.001$  мкФ. Тип ОП: К140УД7 (аналог LM741). Визначити амплітуду найбільшого (першого) викиду  $U_{\text{вих}m1}$  і час установлення  $t_{\text{уст}}$  перехідного процесу при вході в 5%-ну зону помилки щодо сталого значення вихідної напруги

$U_{\text{ВВХ}\infty} = -\left(\frac{R_2}{R_1}\right)U_{\text{ВХ}}$ . Вхідний сигнал є практично ступінчастою

напругою (з дуже коротким фронтом) амплітудою  $U_{\text{ВХ}} = -0,1$  В. Визначити ємність конденсатора частотної корекції  $C_1$ , при якій перехідний процес в схемі повторювача носить монотонний характер (не має коливань). При багатоваріантному аналізі  $C_1$  варіювати в межах 10...300 пФ.

**5.2.8 Задача 8.** Проводячи багатоваріантний розрахунок АЧХ, визначити опір резистора  $R_2$  схеми вирішувального повторювача (рис. 5.3), при якому верхня гранична частота смуги пропускання пристрою  $f_B = 30$  кГц. На цій частоті модуль коефіцієнта передачі падає на 3 дБ щодо низькочастотного значення. Вихідні дані: ОП типу К140УД7 (аналог LM741);  $R_1 = 1$  МОм;  $R_3 = R_6 = 10$  кОм;  $R_4 = R_5 = 100$  кОм. Опір резистора  $R_2$  варіювати в межах 100...500 кОм.

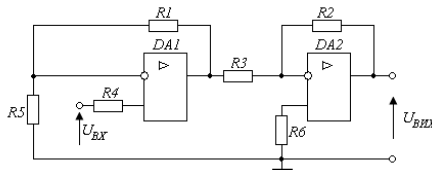


Рисунок 5.3 – Вирішувальний підсилювач

## **6 ПЕРЕЛІК ЗАПИТАНЬ, ЯКІ ВІНОСЯТЬСЯ НА МОДУЛЬНИЙ КОНТРОЛЬ**

### **6.1 Перший модульний контроль**

1. Аналогові схеми, їхні особливості. Особливості проєктування АІС.
2. Основні та спеціальні аналогові функції, еталони.
3. Схема інвертувального ввімкнення ОП.
4. Схема неінвертувального ввімкнення ОП. Схема диференціального ввімкнення ОП.
5. Зворотний зв'язок в підсилювачах. Зворотний зв'язок за напругою і за струмом.
6. Зворотний зв'язок в підсилювачах. Послідовний і паралельний зворотний зв'язок. Позитивний і негативний ЗЗ.
7. Точнісні параметри ОП: диференціальний коефіцієнт підсилення за напругою, коефіцієнт ослаблення синфазного сигналу, напруга зміщення нуля, різниця вхідних струмів, коефіцієнт подавлення нестабільності живлення, коефіцієнти температурних дрейфів, шумові параметри.
8. Схема заміщення реального ОП для малих сигналів. Вхідний і вихідний опори схеми неінвертувального підсилювача.
9. Експлуатаційні параметри ОП.
10. Внутрішня схемотехніка ОП. Диференційний підсилювач.
11. Режими роботи диференційного підсилювача при синфазному вхідному сигналі та при диференціальному вхідному сигналі.
12. Схеми струмових дзеркал: віддзеркалювач струму, подвійний віддзеркалювач струму.
13. Частотні властивості диференційного підсилювача. Ефект Міллера. Каскодна схема.
14. Підсилювачі потужності. Особливості вихідних каскадів. Параметри вихідних каскадів.
15. Двотактний вихідний каскад класу В на комплементарних транзисторах. Двотактний вихідний каскад класу АВ на комплементарних транзисторах.
16. Операційні підсилювачі загального призначення. Схема і принцип роботи ОП К140УД7.
17. Способи внутрішньої частотної корекції ОП. Зовнішня частотна корекція.

## 6.2 Другий модульний контроль

1. Схеми захисту ОП від: КЗ на виході, підвищення вхідної синфазної напруги до недопустимого рівня, підвищеної диференціальної напруги на вході, перенапруги на виході.
2. Схеми підвищення вихідного струму підсилювача на ОП.
3. Схема підвищення вихідної напруги підсилювача на ОП.
4. Схеми підвищення швидкодії ОП: схема з фазовипереджуючим зв'язком, схеми з каскадним з'єднанням ОП.
5. Однополярне живлення ОП. Схеми підключення джерела зміщення. Схема з утворенням зміщення за допомогою дільника, її недоліки. Схема з блокуючим конденсатором.
6. Однополярне живлення ОП. Схема з введеною штучною нульовою точкою.
7. Розширення динамічного діапазону підсилювачів з однополярним живленням. Моделі ОП з повним розмахом вихідного сигналу ("rail-to-rail").
8. Розширення динамічного діапазону підсилювачів з однополярним живленням. Схеми вхідних диференційних каскадів ОП з повним розмахом синфазних вхідних сигналів.
9. Ширококутні підсилювачі, області використання. Вимоги до ОП в схемах ширококутних підсилювачів.
10. Ширококутні підсилювачі зі струмовим негативним ЗЗ. Спрощена схема ОП зі струмовим НЗЗ, принцип її роботи.
11. Еквівалентна схема заміщення неінвертувального ЗЗС-підсилювача для малого сигналу. Незалежність керування ширини смуги пропускання і коефіцієнта підсилення ЗЗС-підсилювача. Особливості операційних підсилювачів із ЗЗН і ЗЗС.
12. Підвищення частотних властивостей підсилювачів за допомогою індуктивності.
13. Вимірювальні підсилювачі, їх задачі, області використання. Вимоги до параметрів ВП.
14. Вимірювальний підсилювач на одному ОП.
15. Вимірювальний підсилювач на двох ОП.
16. Вимірювальний підсилювач на трьох ОП.
17. Використання вимірювальних підсилювачів. Джерело струму, кероване напругою. Підсилювач змінної напруги.
18. Функціональні пристрої на ОП. Схема суматора на ОП.

19. Функціональні пристрої на ОП. Схеми логарифмічних підсилювачів.
20. Функціональні пристрої на ОП. Експоненціальний підсилювач. Схема перемножувача.
21. Функціональні пристрої на ОП. Аналоговий інтегратор. Диференціатор.
22. Активні електричні фільтри на ОП. Класифікація фільтрів. ФНЧ, передаточна функція ФНЧ. ФВЧ. Смугові фільтри, смугоподавляючі фільтри. Реалізація фільтрів на ОП.
23. Генератори сигналів на ОП. Релаксаційні генератори: регенеративний компаратор (тригер Шмітта), автоколивальні мультивібратори, одновібратори.
24. Генератори прямокутної та трикутної форм, RC-генератор синусоїдальних коливань, функціональні генератори.
25. Аналогові перемножувачі. Перемножувач з керуємим опором каналу польового транзистора. Перемножувач на базі керуємих джерел струму.
26. Аналогові компаратори. Компаратори на основі ОП. Компаратор для порівняння різнополярних напруг. Компаратор для порівняння однополярних напруг.
27. Компаратор з роботою ОП в лінійному режимі. Спеціалізовані компаратори. Компаратор К554СА2.
28. Типова схема інтегрального стабілізатора напруги. Стабілізатор різнополярних напруг, типова схема його ввімкнення.
29. Стабілізатор з малим падінням напруги (LDO-стабілізатор).
30. Стійкість лінійних стабілізаторів напруги. Параметри лінійних стабілізаторів напруги.
31. Джерела опорної напруги (ДОН). ДОН на стабілітронах. ДОН на біполярних транзисторах.
32. ДОН з послідовним регулюючим елементом. ДОН з паралельним регулюючим елементом.

## РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. **Коваленко, О.Є.**, Комп'ютерна схемотехніка. Частина 2. Навч. посіб. [Текст] / О.Є. Коваленко, С.М. Волошин, Б.С. Гусев, Є.В. Нікітенко, В.В. Матієвський. - К.: НУБіП України, 2023.- 331 с.
2. **Бойко, В.І.** Аналогова схемотехніка та імпульсні пристрої: Підручник. [Текст] / В.І. Бойко, А.М. Гуржій, В.Я. Жуйков та ін.- К.: Вища шк., 2004. - 366 с.
3. **Прищеп, М.М.** Мікроелектроніка: В 3 ч. Ч. 2. Елементи мікросхемо техніки. Навч. посіб. [Текст] / М.М. Прищеп, В.П. Погребняк. За ред. М.М. Прищепи. – К.: Вища шк., 2006. – 503 с.
4. **Колонтаєвський, Ю.П.** Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум. Навч. посіб. [Текст] / Ю.П. Колонтаєвський, А.Г. Сосков. За ред А.Г. Соскова. - К.: Каравела, 2003. – 368 с.
5. **Бабич, М.П.** Комп'ютерна схемотехніка: Навч. посіб. [Текст] / М.П. Бабич, І.А. Жуков. – К.: ”МК-Прес”, 2004. – 412 с.

## Додаток А

### Ряди номінальних ємностей і резисторів згідно ДСТУ 2382-94

**А.1** Величини номінальних ємностей і резисторів залежно від призначення і конструктивних особливостей повинні вибиратися по одному з вказаних нижче рядів.

**А.2** Величини номінальних ємностей електролітичних алюмінієвих конденсаторів повинні вибиратися з ряду: 0,5; 1; 2; 4; 5; 10; 20; 30; 50; 100; 200; 300; 500; 1000; 2000; 5000.

**А.3** Величини номінальних ємностей (від 0,1 мкФ і вище) конденсаторів з паперовим і плівковим діелектриком в прямокутних корпусах повинні вибиратися з ряду: 0,1; 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 6; 8; 10; 20; 40; 60; 100; 200; 400; 600; 800; 1000.

**А.4** Величини номінальних ємностей конденсаторів і резисторів з допустимим відхиленням  $\pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$  і більше (за винятком конденсаторів, вказаних в пп. А.2 і А.3) повинні відповідати числам, приведеним нижче в позначенні рядів Е24 і Е6, і числам, отриманим шляхом множення цих чисел на 10.

**А.5** Позначення рядів:

Е24 (допустиме відхилення  $\pm 5\%$ ) - 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,5; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,7; 3,0; 3,3; 3,6; 3,9; 4,3; 4,7; 5,1; 5,6; 6,2; 6,8; 7,5; 8,2; 9,1.

Е6 (допустиме відхилення  $\pm 20\%$ ) - 1,0; 1,5; 2,2; 3,3; 4,7; 6,8.

Додаток А використовується для вибору номінальних величин конденсаторів і резисторів після їх розрахунку.

Наприклад, в результаті розрахунку величини колекторного опору виходить, що  $R_K = 1396$  Ом. Але в технічну документацію на проєктований виріб має бути внесене значення цього опору, вибране відповідно до вимог ряду Е24 або Е6, тобто або  $R_K = 1,3$  кОм, або  $R_K = 1,5$  кОм. Вибір того або іншого значення опору вирішується інженером, який розробляє цей пристрій.

Аналогічно вирішується питання і з вибором потрібних величин ємності конденсатора. Наприклад, в результаті розрахунку виходить значення ємності конденсатора коливального контуру передавача  $C = 4500$  пФ. Це означає, що в технічну документацію має бути внесене значення  $C = 4300$  пФ або  $C = 4700$  пФ.

Таблиця А.1 – Номінальні опори по рядам Е3, Е6, Е12, Е24

Індекс ряду	Числові коефіцієнти, що помножуються на будь-яке число, кратне 10
Е3	1,0; 2,2; 4,7
Е6	1,0; 1,5; 2,4; 3,3; 4,7; 6,8
Е12	1,0; 1,2; 1,5; 1,8; 2,2; 2,7; 3,3; 3,9; 4,7; 5,6; 6,8; 8,2
Е24	1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,5; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,7; 3,0; 3,3; 3,6; 3,9; 4,3; 4,7; 5,1; 5,6; 6,2; 6,8; 7,5; 8,2; 9,1
Е48	1,00; 1,05; 1,10; 1,15; 1,21; 1,27; 1,33; 1,40; 1,47; 1,54; 1,62; 1,69; 1,78; 1,87; 1,96; 2,05; 2,15; 2,26; 2,37; 2,49; 2,61; 2,74; 2,87; 3,01; 3,16; 3,32; 3,48; 3,65; 3,83; 4,02; 4,22; 4,42; 4,64; 4,87; 5,11; 5,36; 5,62; 5,90; 6,19; 6,49; 6,81; 7,15; 7,50; 7,87; 8,25; 8,66; 9,09; 9,53;
Е96	1,00; 1,02; 1,05; 1,07; 1,10; 1,13; 1,15; 1,18; 1,21; 1,24; 1,27; 1,30; 1,33; 1,37; 1,40; 1,43; 1,47; 1,50; 1,54; 1,58; 1,62; 1,65; 1,69; 1,74; 1,78; 1,82; 1,87; 1,91; 1,96; 2,00; 2,05; 2,10; 2,15; 2,21; 2,26; 2,32; 2,37; 2,43; 2,49; 2,55; 2,61; 2,67; 2,74; 2,80; 2,87; 2,94; 3,01; 3,09; 3,16; 3,24; 3,32; 3,40; 3,48; 3,57; 3,65; 3,74; 3,83; 3,92; 4,02; 4,12; 4,22; 4,32; 4,42; 4,53; 4,64; 4,75; 4,87; 4,99; 5,11; 5,23; 5,36; 5,49; 5,62; 5,76; 5,90; 6,04; 6,19; 6,34; 6,49; 6,65; 6,81; 6,98; 7,15; 7,32; 7,50; 7,68; 7,87; 8,06; 8,25; 8,45; 8,66; 8,87; 9,09; 9,31; 9,53; 9,76;
Е192	1,00; 1,01; 1,02; 1,04; 1,05; 1,06; 1,07; 1,09; 1,10; 1,11; 1,13; 1,14; 1,15; 1,17; 1,18; 1,20; 1,21; 1,23; 1,24; 1,26; 1,27; 1,29; 1,30; 1,32; 1,33; 1,35; 1,37; 1,38; 1,40; 1,42; 1,43; 1,45; 1,47; 1,49; 1,50; 1,52; 1,54; 1,56; 1,58; 1,60; 1,62; 1,64; 1,65; 1,67; 1,69; 1,72; 1,74; 1,76; 1,78; 1,80; 1,82; 1,84; 1,87; 1,89; 1,91; 1,93; 1,96; 1,98; 2,00; 2,03; 2,05; 2,08; 2,10; 2,13; 2,15; 2,18; 2,21; 2,23; 2,26; 2,29; 2,32; 2,34; 2,37; 2,40; 2,43; 2,46; 2,49; 2,52; 2,55; 2,58; 2,61; 2,64; 2,67; 2,71; 2,74; 2,77; 2,80; 2,84; 2,87; 2,91; 2,94; 2,98; 3,01; 3,05; 3,09; 3,12; 3,16; 3,20; 3,24; 3,28; 3,32; 3,36; 3,40; 3,44; 3,48; 3,52; 3,57; 3,61; 3,65; 3,70; 3,74; 3,79; 3,83; 3,88; 3,92; 3,97; 4,02; 4,07; 4,12; 4,17; 4,22; 4,27; 4,32; 4,37; 4,42; 4,48; 4,53; 4,59; 4,64; 4,70; 4,75; 4,81; 4,87; 4,93; 4,99; 5,05; 5,11; 5,17; 5,23; 5,30; 5,36; 5,42; 5,49; 5,56; 5,62; 5,69; 5,76; 5,83; 5,90; 5,97; 6,04; 6,12; 6,19; 6,26; 6,34; 6,42; 6,49; 6,57; 6,65; 6,73; 6,81; 6,90; 6,98; 7,06; 7,15; 7,23; 7,32; 7,41; 7,50; 7,59; 7,68; 7,77; 7,87; 7,96; 8,06; 8,16; 8,25; 8,35; 8,45; 8,56; 8,66; 8,76; 8,87; 8,98; 9,09; 9,20; 9,31; 9,42; 9,53; 9,65; 9,76; 9,88