

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

**до розрахункового завдання**

з навчальної дисципліни «Аналогова схемотехніка»

для студентів спеціальності

«Інформаційно-вимірювальні технології»

Затверджено  
редакційно-видавничою  
радою університету,  
протокол №1 от 13.02.2025

Харків  
НТУ «ХП»  
2025

Методичні вказівки до розрахункового завдання з навчальної дисципліни «Аналогова схемотехніка» для студентів спеціальності «Інформаційно-вимірювальні технології» / уклад. І.В. Григоренко, М.В. Трохін – Харків : НТУ «ХП». – 42 с.

Укладачі:           І.В. Григоренко  
                              М.В. Трохін

Рецензент           д.т.н. Плєснецов С.Ю.

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій і систем

## ВСТУП

Електроніка є універсальним і ефективним засобом вирішування самих різних проблем в області збору і обробки інформації, автоматичного керування і перетворення енергії. Знання в області електроніки стають необхідними все більш широкому колу фахівців. Сфера застосування електроніки постійно розширюється. Практично кожна достатньо складна технічна система оснащується електронними пристроями. Важко назвати технологічний процес, керування яким здійснювалося б без використання електроніки.

Предметом навчальної дисципліни «Аналогова схемотехніка» є фізичні принципи, що лежать в основі роботи приладів напівпровідникової мікроелектроніки, питання побудови аналогових електронних пристроїв на транзисторах та операційних підсилювачах; їх характеристики і розрахунків схем на їх основі. Науково-методичною основою дисципліни є загальна фізика, математика, теоретичні основи електротехніки, теорія електромагнітного поля, теорія роботи напівпровідників. Дисципліна «Аналогова схема-техніка» є не тільки однією з базових дисциплін для підготовки бакалаврів спеціальності «Інформаційно-вимірювальні технології», вона інтегрує знання, отримані студентами при вивченні загальнонаукових дисциплін і має на меті набуття студентами розуміння взаємозв'язку між фізичними закономірностями електронних процесів в твердих тілах з кінцевими експлуатаційними характеристиками аналогових електронних приладів.

Значну увагу під час вивчення дисципліни приділяється засвоєнню студентами теоретичних знань, набуття практичних навичок вирішення завдань розрахунку простих і складних електронних схем, розра-

хунку підсилювачів на базі транзисторів та операційних підсилювачів, оцінці якості функціонування електричних схем, набуттю практичних навичок моделювання та конструювання електронних схем різної складності і умінь працювати із засобами вимірювання електричних величин.

Дані методичні вказівки призначені для виконання розрахункового завдання з цієї дисципліни та складаються з двох частин. Перша частина містить теоретичну частину та індивідуальні завдання для студентів. Друга частина – це приклад виконання розрахункового завдання з курсу «Аналогова схемотехніка». У розрахунковому завданні передбачене проведення комп'ютерного моделювання у середовищі *Multisim* для перевірки отриманих теоретичних результатів.

*Multisim* дозволяє створити схему і емітувати поведінку електронної схеми за допомогою стандартного промислового симулятора *SPICE*. Це середовище має велику бібліотеку моделей різноманітних за призначенням аналогових і цифрових електронних компонентів і дозволяє складати і досліджувати принципові схеми практично необмеженої складності.

Виконання розрахункового завдання надає можливість закріпити теоретичні знання, отримані при прослуховуванні лекцій та поглибити практичні знання, отримані при виконанні лабораторного практикуму.

# 1. РОЗРАХУНКОВЕ ЗАВДАННЯ З КУРСУ «АНАЛОГОВА СХЕМОТЕХНІКА»

## ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ

### 1.1. Бюджет похибок вимірювальних підсилювачів

Похибки вимірювальних підсилювачів можна розділити на мультиплікативні (абсолютне значення яких пропорційне вхідному сигналу) і адитивні (абсолютне значення яких не залежить від вхідного сигналу). Мультиплікативні похибки характеризуються відносним значенням, а адитивні – зведеним. Межа відносної основної припустимої похибки (у відсотках) може бути визначена за формулою

$$\delta = \Delta/x = \left[ c + d \left( |x_H/x| - 1 \right) \right],$$

де  $x_H$  – номінальне значення величини;

$$c = 100(b + a/|x_H|),$$

$$d = 100a/|x_H|,$$

де  $a$  і  $b$  – позитивні числа, що не залежні від  $x$  і що визначають абсолютну основну припустиму похибку

$$\Delta = \pm(a + bx)$$

Значення  $c$  і  $d$  вибирають з ряду  $1 \cdot 10n; 1,5 \cdot 10n; 2 \cdot 10n; 2,5 \cdot 10n; 4 \cdot 10n; 5 \cdot 10n$  ( $n = 1, 0, -1, -2$  і т. і.).

Таким чином, перш ніж приступати до розрахунку, слід, виходячи із загальних вимог до точності всього пристрою, виділити складову похибки, що вноситься проєктованим підсилювачем і задати значення  $c$  і  $d$  (наприклад:  $0,2 / 0,1$ ). З рівняння для відносної похибки випливає, що у разі широкого динамічного діапазону вхідного сигналу особливу увагу слід приділяти зменшенню адитивної складової похибки.

Розглянемо основні джерела адитивної і мультиплікативної складових похибки пристроїв на операційних підсилювачах.

Мультиплікативна похибка обумовлена, в основному, чотирма чинниками:

- зміною коефіцієнта посилення операційного підсилювача (ОП) під дією температури, напруги живлення, механічних втручань, за рахунок старіння а також відхиленням дійсного значення коефіцієнта посилення від номінального, наведеного в довідниках (зазвичай, окрім типового значення, указують також мінімальне і максимальне);

- відхиленням реальних значень елементів схеми, які визначають коефіцієнт посилення підсилювача із зворотним зв'язком, від розрахункових;

- спрощенням моделі підсилювача за рахунок нехтування впливом вхідного і вихідного опорів підсилювача, опору джерела сигналу і опору навантаження.

- залежністю коефіцієнта посилення від частоти, для підсилювачів змінного струму

Як відомо вплив коефіцієнта посилення ОП на коефіцієнт посилення підсилювача з негативним зворотним зв'язком ослаблений в  $1 + \beta K_{\text{оп}} \gg 1$  разів, де  $\beta$  коефіцієнт зворотного зв'язку. Коефіцієнт посилення підсилювача з негативним зворотним зв'язком  $K_U \approx 1/\beta$ , тобто для підсилювача з коефіцієнтом посилення  $K_U = 100$ , побудованого на ОП з  $K_{\text{оп}} = 10^6$ , значення  $\beta K_U$  складе  $10^4$ , а відносна похибка коефіцієнта посилення підсилювача, навіть при 50 % відхиленні  $K_{\text{оп}}$  від номінального, складе 0,005 %.

Не дивлячись на те, що ця похибка може бути скоректована при початковому налаштуванні підсилювача, для прецизійних підсилювачів її необхідно враховувати оскільки коефіцієнт посилення ОП може змінювати своє значення в часі (старіння), при зміні температури, під дією ударів, вібрацій, короткочасних перевантажень, залишкових явищ від циклічних змін температури, при заміні ОП під час ремонту.

Точність різних пристроїв на ОП істотно залежить від точності і стабільності елементів (резисторів, конденсаторів) зовнішніх кіл, які визначають коефіцієнт перетворення.

У схемі існують елементи, для яких точність їх завдання, здавалося б, не відіграє істотної ролі. Проте, навіть якщо прецизійність прямо

не потрібна, точність елементів може дати істотний ефект, наприклад, в придушенні синфазних перешкод. Крім того, багато розрахункових формул справедливі при виконанні певних співвідношень між значеннями елементів зовнішніх кіл і їх також слід вибирати з певною точністю.

Елементи зазвичай специфіковані щодо точності, яка, як правило, визначає також температурну і часову залежність їх параметрів. Можна з великої кількості резисторів що мають допуск 20%- відібрати деяку кількість елементів, опір яких відрізняється від номінального значення не більше ніж на 1 %. Проте у елементів з кращою початковою точністю, як правило, решта параметрів також краща.

Не можна відбирати для роботи в прецизійній схемі елементи з потрібним значенням параметра, якщо цей тип елемента належить до класу з гіршими характеристиками, оскільки часова і температурна стабільність таких елементів відповідатимуть значенням для свого гіршого класу.

Елементи, що випускаються в даний час, мають допуски у відсотках від  $\pm 0,001$  до  $\pm 30$ .

Вхідний опір підсилювача утворює подільник напруги з опором джерела сигналу, тому коефіцієнт підсилення в порівнянні з розрахунковим значенням знижується. Найчастіше це не складає проблеми, оскільки вхідний опір ОП достатньо великий, проте деякі схемні рішення мають вхідний опір, сумірний з опором джерела сигналу і його вплив необхідно враховувати.

Вихідний опір підсилювача збільшується із зростанням частоти і може мати помітний вплив на коефіцієнт підсилення, оскільки, по перше, він складається з опором зворотного зв'язку, а по друге, утворює подільник напруги з опором навантаження.

Адитивні похибки схем на ОП обумовлені наявністю у реально-го операційного підсилювача напруги зсуву нуля, часового і температурного дрейфів зсуву, вхідного струму зсуву, вхідного струму зрушення, проходженням синфазного сигналу і впливом джерела живлення. При підсиленні малих сигналів великий вплив може мати і напруга шумів.

Визначимо похибку, обумовлену зсувом нуля підсилювача. Зсув нуля ОП проявляється в наявності постійної напруги на виході підсилювача за відсутності вхідної напруги.

Зсув нуля є результатом дії трьох чинників: власне напруги зсуву  $U_{ЗС}$ , вхідного струму підсилювача  $I_{ВХ}$  і різниці вхідних струмів  $\Delta I_{ВХ}$ .

Величина  $U_{ЗС}$  визначається в основному розкидом напруги емітерно-базових переходів вхідних транзисторів диференціального каскаду в підсилювачах на біполярних транзисторах або напруги затвор-витік в ОП з польовими транзисторами на входах. Ця напруга складає 0,1–5 мВ для підсилювачів загального призначення з біполярними транзисторами і 0,5 – 20 мВ з польовими транзисторами на вході.

Шляхом лазерної підгонки виробникам вдається зменшити зсув нуля до 10 мкВ (ОР27, ОР177, МАХ400М) у першого типу підсилювачів і до 100 мкВ (ОРА627В) у другого.

Подальше зниження зсуву нуля досягається застосуванням схем автоматичної компенсації зсуву нуля. Наприклад, ОП з перериванням мають типову напругу зсуву нуля менше 1 мкВ (ICL7650S, МАХ430).

Знизити  $U_{ЗС}$  можна підстроюванням за допомогою зовнішнього резистора, для підключення якого деякі операційні підсилювачі (наприклад, 140УД7, 140УД8) мають спеціальні виводи.

Постійні вхідні струми, протікаючи по резисторах зовнішніх кіл, підключених до входів ОП і по опорах джерел сигналів, створюють різницю падінь напруги  $\Delta U$ . Для зменшення цієї похибки слід вирівнювати значення еквівалентних опорів резисторів, підключених до інвертувального і неінвертувального входів і, по можливості, зменшувати їх номінальні значення.

Для зменшення похибки від синфазного сигналу слід використовувати ОП з максимальним значенням  $K_{ОСС}$  і схемні рішення, що забезпечують мінімум коефіцієнта передачі синфазного сигналу.

Якщо підсилювач працює з сигналами змінного струму, то при визначенні похибки від синфазного сигналу слід враховувати залежність  $K_{ОСС}$  від частоти. Ця залежність аналогічна залежності  $K_{ОП}$  від частоти; як правило, АЧХ для  $K_{ОСС}$  приводиться в довідкових матеріалах фірм виробників.

Урахування зсуву, викликаного зміною напруги живлення, необхідне при визначенні вимог до джерел живлення схем на ОП. Сюди входять вимоги до стабільності напруги живлення і до пульсацій його напруги.

Вимоги до пульсацій особливо важливі при живленні схеми від імпульсних джерел, що працюють на високій частоті, де коефіцієнт ослаблення впливу живлення  $K_{ВЖ}$  має значно гірші значення, ніж на постійному струмі.

Таким чином, для зменшення похибок зсуву застосовують прецизійні ОП, а також спеціальні схемні рішення (підсилювачі з періодичною корекцією зсуву, з додатковим бездрейфовим підсилювачем, з температурною компенсацією, схеми з покращеним значенням коефіцієнта ослаблення синфазної складової, з компенсацією вхідних струмів).

Окрім цього істотне значення має правильний вибір номінальних значень елементів схеми і вимог до їх точності, часової і температурної стабільності.

## **1.2. Послідовність виконання розрахунків**

### **Аналіз джерел адитивної похибки**

Адитивні похибки схем на ОП обумовлені наявністю у реальних операційних підсилювачів напруги зсуву нуля, часовим і температурним дрейфом зміщення, вхідним струмом зміщення, вхідним струмом зсуву, проходженням синфазного сигналу і впливом джерела живлення. При посиленні малих сигналів великий вплив може мати і напруга шумів.

Часовий дрейф напруги і вплив джерела живлення виділяються в додаткові похибки. Синфазний сигнал може бути відсутнім, а напругою шумів можна знехтувати, якщо сигнали досить великі.

Тоді вираз для адитивної складової похибки має вигляд

$$\gamma_{ад} = \gamma_{U_{зс}} + \gamma_{i_{вх}} + \gamma_{\Delta i_{вх}} + \gamma_{др}, \quad (1.1)$$

де  $\gamma_{U_{зс}}$  – похибка, обумовлена напругою зміщення операційного підсилювача

$$\gamma_{U_{\text{см}}} = \frac{U_{\text{зс}} \cdot (K+1)}{U_{\text{вх}} \cdot K}, \quad (1.2)$$

$K$  – статичний коефіцієнт підсилення ОП;

$\gamma_{i_{\text{вх}}}$  – похибка від вхідних струмів ОП, викликана різницею значень опорів, підключених до інвертувального і неінвертувального входів

$$\gamma_{i_{\text{вх}}} = \frac{i_{\text{вх}} \cdot \Delta R_e \cdot (K+1)}{U_{\text{вх}} \cdot K}, \quad (1.3)$$

$\gamma_{\Delta i_{\text{вх}}}$  – похибка, викликана різницею вхідних струмів

$$\gamma_{\Delta i_{\text{вх}}} = \frac{\Delta i_{\text{вх}} \cdot R_e \cdot (K+1)}{U_{\text{вх}} \cdot K}, \quad (1.4)$$

$\Delta R_e$  – абсолютне відхилення еквівалентного опору джерела сигналу;

$\gamma_{\text{др}}$  – похибка, викликана температурним дрейфом напруги зсуву

$$\gamma_{\text{др}} = \frac{\partial U_{\text{зс}}}{\partial T} \cdot \frac{\Delta T \cdot (K+1)}{U_{\text{вх}} \cdot K} \quad (1.5)$$

$\Delta T$  – абсолютне відхилення температури.

### **Аналіз джерел мультиплікативної похибки**

Мультиплікативна складова похибки обумовлена початковим розкидом і нестабільністю коефіцієнта посилення ОП, впливом опору джерела сигналу, неточністю резисторів, що визначають коефіцієнт підсилення і частотною залежністю коефіцієнта підсилення ОП.

Початковим розкидом і нестабільністю коефіцієнта підсилення ОП можна знехтувати, якщо в схемі використовуються повторювачі сигналу, отже для них дана похибка практично відсутня.

Частотна залежність коефіцієнта підсилення ОП не впливає на похибку, якщо схема працює на постійному струмі.

Вплив опору джерела сигналу можна істотно зменшити, підбираючи досить великі значення опорів, що підключаються до входу.

Похибка від початкового розкиду і нестабільності коефіцієнту підсилення ОП з внутрішньою корекцією АЧХ, заснованою на ефекті Міллера, можна визначити виразом

$$\delta_K^0 = \frac{\delta K}{1 + \beta K_0} \quad (1.6)$$

де  $K_0$  – номінальне паспортне значення коефіцієнта підсилення;

$\beta = \frac{1}{K_{33}}$  – коефіцієнт зворотного зв'язку;

$$K_{33} = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}}.$$

При нормальній температурі типові значення коефіцієнта підсилення дорівнює  $12 \cdot 10^6$ , а мінімальне –  $5 \cdot 10^6$ . Беручи в якості розрахункового значення середнє між типовими і мінімальним отримаємо  $K_{0\text{CP}} = 8,5 \cdot 10^6$ , а його абсолютні зміни становлять  $\Delta K = 3,5 \cdot 10^6$ , тобто зміни по відношенню до  $K_{0\text{CP}}$  становлять 42 %.  $\delta K = 42$  %.

Похибка від неточності виготовлення резисторів  $R_1$  і  $R_2$  при однаковому класі точності резисторів (що забезпечує рівність відносних температурних і часових нестабільностей) можна визначити для схеми інвертувального підсилювача як

$$\delta_K^R = \sqrt{(\delta_{R1}^2 + \delta_{R2}^2)} = 1,41 \cdot \delta R. \quad (1.7)$$

Похибка від нестабільності опору джерела сигналу

$$\delta_K^C = \frac{\delta_{Rc}}{1 + \frac{R_{\text{вх}}}{R_c}}. \quad (1.8)$$

Сумарна мультиплікативна похибка може бути визначена шляхом геометричного підсумовування всіх її складових, тобто

$$\delta_M = \sqrt{\left(\delta_K^0\right)^2 + \left(\delta_K^R\right)^2 + \left(\delta_K^C\right)^2}. \quad (1.9)$$

### Аналіз джерел додаткових похибок

Додаткову похибку, яка не повинна перевищувати основну, складають: часовий дрейф напруги зсуву і вплив джерела живлення.

Похибка від часового дрейфу:

$$\delta_B = \frac{\partial U_{зс}}{\partial t} \cdot \frac{(K+1) \cdot t}{K} \quad (1.10)$$

де  $\frac{\partial U_{зс}}{\partial t}$  – швидкість часового дрейфу напруги зсуву ОП,

$t$  – час роботи ОП без підстроювання нуля.

Визначимо максимальний час роботи підсилювача без підстроювання нуля. Для цього скористаємося виразом для похибки, обумовленої часовим дрейфом і значенням швидкості тимчасового дрейфу ОП

$$\frac{\partial U_{зс}}{\partial t} = 0,2 \text{ мкВ/місяц}$$

$$t \leq \frac{\delta_B \cdot K_{оп}}{(K_{оп} + 1) \cdot \frac{\partial U_{зс}}{\partial t}}$$

Похибка зміщення від зміни напруги живлення

$$\delta_{живл} = \frac{U_{живл} \cdot (K_{оп} + 1)}{U_{вх.н} \cdot K_{оп}} \cdot \delta U_{живл} \cdot K_{в.ж}. \quad (1.11)$$

де  $\delta U_{живл}$  – відносна зміна напруги живлення;

$K_{оп}$  – модуль коефіцієнта посилення підсилювача зі зворотним зв'язком

$$(K_{оп} \approx R_2/R_1),$$

де  $K_{в.ж}$  – коефіцієнт впливу джерела живлення ОП.

### **1.3. Варіанти для виконання індивідуального завдання**

Варіант для виконання індивідуального завдання обирається виходячи з номеру відповідно до журналу академічної групи.

#### **Варіант 1**

- а) Діапазон вимірюваних температур від  $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$  з абсолютною похибкою  $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- б) Вихідна напруга підсилювача – 1,5 В.
- в) Матеріал термоопору – мідь.

#### **Варіант 2**

- а) Діапазон вимірюваних температур від  $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$  з абсолютною похибкою  $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- б) Вихідна напруга підсилювача – 4,0 В.
- в) Матеріал термоопору – платина.

#### **Варіант 3**

- а) Діапазон вимірюваних температур від  $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$  з абсолютною похибкою  $\pm 0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- б) Вихідна напруга підсилювача – 1,5 В.
- в) Матеріал термоопору – мідь.

#### **Варіант 4**

- а) Діапазон вимірюваних температур від  $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+92\text{ }^{\circ}\text{C}$  з абсолютною похибкою  $\pm 0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- б) Вихідна напруга підсилювача – 1,5 В.
- в) Матеріал термоопору – напівпровідник.

#### **Варіант 5**

- а) Діапазон вимірюваних температур від  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$  з абсолютною похибкою  $\pm 0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- б) Вихідна напруга підсилювача – 1,0 В.
- в) Матеріал термоопору – мідь.

#### **Варіант 6**

- а) Діапазон вимірюваних температур від  $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$  з абсолютною похибкою  $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- б) Вихідна напруга підсилювача – 2,0 В.

в) Матеріал термоопору – напівпровідник.

#### **Варіант 7**

а) Діапазон вимірюваних температур від  $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$  з абсолютною похибкою  $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

б) Вихідна напруга підсилювача – 2,4 В

в) Матеріал термоопору – платина.

#### **Варіант 8**

а) Діапазон вимірюваних температур від  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$  з абсолютною похибкою  $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

б) Вихідна напруга підсилювача – 2,5 В

в) Матеріал термоопору – мідь.

#### **Варіант 9**

а) Діапазон вимірюваних температур від  $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$  з абсолютною похибкою  $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

б) Вихідна напруга підсилювача – 1,5 В

в) Матеріал термоопору – напівпровідник.

#### **Варіант 10**

а) Діапазон вимірюваних температур від  $+6\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$  з абсолютною похибкою  $\pm 0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

б) Вихідна напруга підсилювача – 1,0 В

в) Матеріал термоопору – мідь.

#### **Варіант 11**

а) Діапазон вимірюваних температур від  $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+65\text{ }^{\circ}\text{C}$  з абсолютною похибкою  $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

б) Вихідна напруга підсилювача – 1,5 В.

в) Матеріал термоопору – платина.

#### **Варіант 12**

а) Діапазон вимірюваних температур від  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+75\text{ }^{\circ}\text{C}$  з абсолютною похибкою  $\pm 0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

б) Вихідна напруга підсилювача – 2,5 В.

в) Матеріал термоопору – мідь.

#### **Варіант 13**

а) Діапазон вимірюваних температур від  $+6\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$  з абсолютною похибкою  $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

- б) Вихідна напруга підсилювача – 1,0 В
- в) Матеріал термоопору – напівпровідник.

#### **Варіант 14**

- а) Діапазон вимірюваних температур від  $+4^{\circ}\text{C}$  до  $+90^{\circ}\text{C}$  з абсолютною похибкою  $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$ .
- б) Вихідна напруга підсилювача – 1,8 В.
- в) Матеріал термоопору – мідь.

#### **Варіант 15**

- а) Діапазон вимірюваних температур від  $+6^{\circ}\text{C}$  до  $+95^{\circ}\text{C}$  з абсолютною похибкою  $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$ .
- б) Вихідна напруга підсилювача – 5,0 В
- в) Матеріал термоопору – мідь.

#### **Варіант 16**

- а) Діапазон вимірюваних температур від  $+2^{\circ}\text{C}$  до  $+95^{\circ}\text{C}$  з абсолютною похибкою  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ .
- в) Вихідна напруга підсилювача – 4,5 В
- б) Матеріал термоопору – платина.

#### **Варіант 17**

- а) Діапазон вимірюваних температур від  $+3^{\circ}\text{C}$  до  $+95^{\circ}\text{C}$  з абсолютною похибкою  $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$ .
- б) Вихідна напруга підсилювача – 3,0 В.
- в) Матеріал термоопору – напівпровідник.

#### **Варіант 18**

- а) Діапазон вимірюваних температур від  $+4^{\circ}\text{C}$  до  $+75^{\circ}\text{C}$  з абсолютною похибкою  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ .
- б) Вихідна напруга підсилювача – 1,5 В.
- в) Матеріал термоопору – мідь.

#### **Варіант 19**

- а) Діапазон вимірюваних температур від  $+6^{\circ}\text{C}$  до  $+60^{\circ}\text{C}$  з абсолютною похибкою  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ .
- б) Вихідна напруга підсилювача – 5,5 В.
- в) Матеріал термоопору – мідь.

### **Варіант 20**

- а) Діапазон вимірюваних температур від  $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+95\text{ }^{\circ}\text{C}$  з абсолютною похибкою  $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- б) Вихідна напруга підсилювача – 1,5 В.
- в) Матеріал термоопору – напівпровідник.

### **Варіант 21**

- а) Діапазон вимірюваних температур від  $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$  з абсолютною похибкою  $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- б) Вихідна напруга підсилювача – 2,5 В
- в) Матеріал термоопору – платина.

### **Варіант 22**

- а) Діапазон вимірюваних температур від  $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$  з абсолютною похибкою  $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- б) Вихідна напруга підсилювача – 4,5 В.
- в) Матеріал термоопору – мідь.

### **Варіант 23**

- а) Діапазон вимірюваних температур від  $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+75\text{ }^{\circ}\text{C}$  з абсолютною похибкою  $\pm 0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- б) Вихідна напруга підсилювача – 2,5 В.
- в) Матеріал термоопору – напівпровідник.

### **Варіант 24**

- а) Діапазон вимірюваних температур від  $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$  з абсолютною похибкою  $\pm 0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- б) Вихідна напруга підсилювача – 1,0 В.
- в) Матеріал термоопору – мідь.

### **Варіант 25**

- а) Діапазон вимірюваних температур від  $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$  з абсолютною похибкою  $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- б) Вихідна напруга підсилювача – 1,5 В
- в) Матеріал термоопору – напівпровідник.

### **Варіант 26**

- а) Діапазон вимірюваних температур від  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$  з абсолютною похибкою  $\pm 0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- б) Вихідна напруга підсилювача – 2,0 В.

в) Матеріал термоопору – платина.

#### 1.4. Зміст розрахункового завдання

У ході курсового проектування необхідно, відповідно до технічного завдання розробити пристрій на операційних підсилювачах, який виконує перетворення вимірювальних сигналів.

Для цього слід:

- на підставі технічного завдання сформулювати технічні вимоги до пристрою (вхідний опір, підсилення, ослаблення синфазного сигналу та ін.);
- провести аналіз варіантів вирішення завдання і дати обґрунтування варіанту, що забезпечує виконання вимог ТЗ;
- виконати аналіз джерел похибок пристрою і зробити розподіл похибок за складовими;
- привести розрахункові співвідношення для визначення параметрів елементів, що входять у пристрій;
- виходячи з значень складових похибки, визначити вимоги до параметрів операційного підсилювача (ОП) і навісним елементам;
- виконати розрахунок елементів і сформулювати вимоги до їх точності і стабільності (тобто вибрати тип резисторів і номінальні значення);
- у разі неможливості забезпечення необхідних параметрів, виділити елементи настройки;
- перевірити методом комп'ютерного моделювання відповідність розробленого пристрою вимогам технічного завдання, привести результати моделювання;
- у записці привести схему і перелік елементів;
- зробити висновки про отримані результати.

Обсяг пояснювальної записки 15 – 20 сторінок формату А4. Поля усі 20 мм. Оформлення відповідно до вимог ЄСКД. Набір тексту шрифтом *Times New Roman*, розмір шрифту 14 пт., Інтервал полуторний. Текстовий редактор *Word*. Схеми і рисунки виконувати в *Multisim* або *Visio*.

## 2. ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКІВ

Розробити підсилювач для виміру температури мідним термометром опору в діапазоні  $(0 - 100) ^\circ\text{C}$ . Опір термометра  $10 \pm 0,1$  Ом. Вихідна напруга підсилювача – 1,0 В. Наведена похибка перетворювача  $\leq 0,1$  %.

### 2.1 Терморезистори

Терморезистором називають провідник або напівпровідник з великим температурним коефіцієнтом опору, що перебуває в теплообміні з навколишнім середовищем.

Принцип дії даних перетворювачів заснований на властивості провідників і напівпровідників змінювати свій електричний опір при зміні температури.

#### 2.1.1 Мідні термоперетворювачі опору

Мідні термоперетворювачі опору (МТО) застосовуються для тривалого виміру температури в інтервалі від  $-200$  до  $+200$   $^\circ\text{C}$ . До переваг міді як матеріалу для чутливих елементів варто віднести дешевизну, можливість одержання в чистому виді, гарну технологічність, лінійність залежності опору  $R_t$  від температури  $t$ . Статична характеристика перетворення в МТО описується рівнянням :

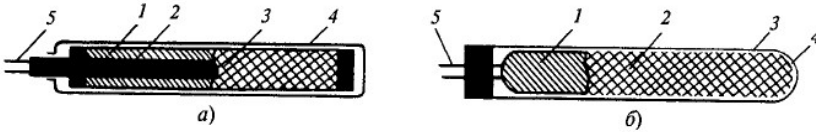
$$R_t = R_0(1 + \alpha * t),$$

де  $\alpha$  – температурний коефіцієнт, дорівнює  $0,00428$   $^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $R_0$  – опір МТО при  $0$   $^\circ\text{C}$ .

Лінійність статичної характеристики є перевагою міді, а її недоліком – здатність інтенсивно окислюватися, що обмежує діапазон застосування МТО температурою  $200$   $^\circ\text{C}$  и вимагає покриття ізоляцією дроту чутливого елемента. Дріт може покриватися або емаллю, або кремнійорганічною ізоляцією. Чутливий елемент мідного термоперетворювача опору складається з мідного ізольованого дроту діаметром  $0,1$  мм, намотаного на каркас (рис. 2.1, а).

Намотування повинно бути безіндуктивним, тобто індуктивний опір чутливого елемента (ЧЕ) термоперетворювача опору повинен бути

мінімальним. Це пов'язане з тим, що ЧЕ містить велику кількість витків мідного дроту й при звичайному намотуванні буде мати значну індуктивність.



а - з каркасним намотуванням: 1 - намотування; 2 - каркас; 3 - шар лаку; 4 - захисна оболонка; 5 - виводи;

б - з бескаркасної намотуванням: 1 - намотування; 2 - фторопластова оболонка; 3 - захисна оболонка; 4 - ізолюючий порошок; 5 - виводи

Рисунок 2.1 – Чутливі елементи мідних термопреобразователей:

Оскільки вторинні прилади для термометрів опору (автоматичні мости) мають вимірювальні схеми, що харчуються електричним змінним струмом, індуктивний опір одного із плечей (у цьому випадку ЧЕ) буде впливати на режим зрівноважування. Для забезпечення безіндуктивності звичайно виконується біфілярне намотування – намотування вдвічі складеним дротом. Поверхня намотування покривається шаром лаку. До кінців дроту припаюються мідні виводи діаметром 1...1,5 мм. ЧЕ міститься в металеву захисну оболонку, засипану ізолюючим порошком і герметизується. Чутливі елементи можуть бути бескаркасними (рис. 2.1, б). Вони виготовляються з мідного дроту діаметром 0,08 мм безіндуктивним намотуванням. Окремі шари скріплені ласий, а потім весь ЧЕ обернуть фторопластовою плівкою. ЧЕ міститься у тонкостінній металевій оболонці, що засипається ізолюючим порошком і герметизується.

Недоліком міді, як матеріалу для термоперетворювачів опору, є також малий питомий опір, тому для виготовлення ЧЕ потрібно багато дроту, що збільшує розміри ЧЕ й погіршує динамічні властивості термометрів опору (ТО).

Залежність відносного опору від температури для міді вказується в градирувальній табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Градууювальна таблиця для мідного термометра опору ТСМ 10М

$t, ^\circ\text{C}$	$R, \text{Om}$
0	10,000
5	10,213
10	10,426
15	10,639
20	10,852
25	11,065
30	11,278
35	11,492
40	11,705
45	11,918
50	12,131
55	12,344
60	12,557
65	12,770
70	12,983
75	13,196
80	13,409
85	13,622
90	13,835
95	14,048
100	14,262

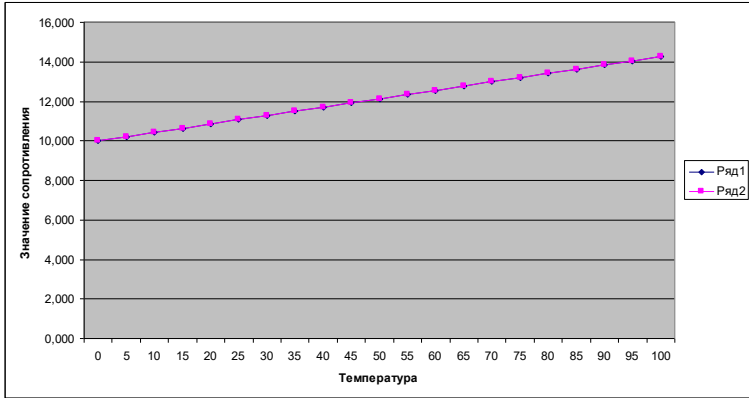


Рисунок 2.2 – Залежність опору від температури ( $t^{\circ}\text{C}$ ,  $R$  Ом)

## 2.2 Вибір схеми вимірювального пристрою

Для рішення поставленого завдання скористаємося мостовою схемою включення мідного ТО, що буде джерелом вхідного сигналу для операційного підсилювача (рис. 2.1).

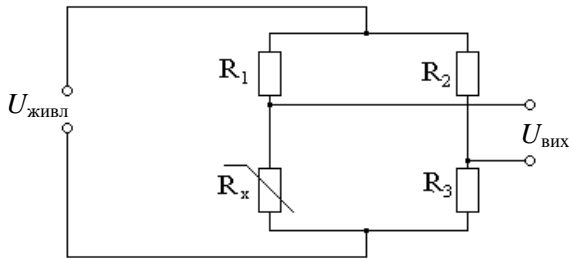


Рисунок 2.3 – Міст опорів

Обираємо опори номіналами  $R_1 = R_2 = R_3 = 10$  Ом. При заданому  $R_x = 10$  Ом.

Вихідна напруга даного моста розраховується згідно формулі:

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{живл}} \left( \frac{R_x}{(R_x + R1)} - \frac{R3}{(R3 + R2)} \right) \quad (2.1)$$

Напрягу живлення мосту приймаємо рівною 0,5 В.

При  $t = 0^{\circ}\text{C}$ ,  $R = 10 \text{ Ом}$ .

$$U_{\text{вих}} = 0,5 \cdot \left( \frac{10}{(10 + 10)} - \frac{10}{(10 + 10)} \right) = 0 \text{ В.}$$

При  $t = 100^{\circ}\text{C}$ ,  $R = 14,262 \text{ Ом}$ .

$$U_{\text{вих}} = 0,5 \cdot \left( \frac{14,262}{(14,262 + 10)} - \frac{10}{(10 + 10)} \right) = 0,0439 \text{ В.}$$

З урахуванням похибки  $\Delta R = \pm 0,1 \text{ Ом}$

При  $t = 0^{\circ}\text{C}$ ,  $R = 10,1 \text{ Ом}$ .

$$U_{\text{вих}} = 0,5 \cdot \left( \frac{10,1}{(10,1 + 10)} - \frac{10}{(10 + 10)} \right) = 0,0012 \text{ В.}$$

При  $t = 0^{\circ}\text{C}$ ,  $R = 9,9 \text{ Ом}$ .

$$U_{\text{вих}} = 0,5 \cdot \left( \frac{9,9}{(9,9 + 10)} - \frac{10}{(10 + 10)} \right) = -0,0012 \text{ В.}$$

При  $t = 100^{\circ}\text{C}$ ,  $R = 14,162 \text{ Ом}$ .

$$U_{\text{вих}} = 0,5 \cdot \left( \frac{14,162}{(14,162 + 10)} - \frac{10}{(10 + 10)} \right) = 0,043 \text{ В.}$$

При  $t = 100^{\circ}\text{C}$ ,  $R = 14,362 \text{ Ом}$ .

$$U_{\text{вих}} = 0,5 \cdot \left( \frac{14,362}{(14,362 + 10)} - \frac{10}{(10 + 10)} \right) = 0,0447 \text{ В.}$$

### 2.3 Вибір схеми підсилювального каскаду

Виходячи з того, що нам необхідно забезпечити високий вхідний опір, будуємо схему диференціального підсилювача.

Диференціальний підсилювач – це пристрій з диференціальним входом. Підсилювач будується так, що він підсилює тільки різницю напруг, що подані на його входи ( $U_{ВХ2} - U_{ВХ1}$ ) і не реагує на синфазну вхідну напругу.

Зазвичай диференціальний підсилювач служить першим каскадом вимірювальної або перетворювальної схеми, де основною вимогою є точність. У багатьох випадках вхідний сигнал подається на вимірювальний підсилювач з мостової схеми або датчика, що перетворюють неелектричну величину в аналоговий електричний сигнал, при цьому корисний сигнал надходить на вхід підсилювача на тлі значного синфазного сигналу.

Диференціальний підсилювач на одному операційному підсилювачі.

На рис. 2.4 наведено схему простого і найдешевшого вимірювального підсилювача.

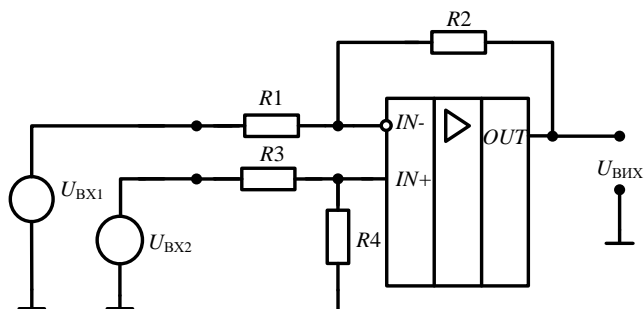


Рисунок 2.4 – Диференціальний підсилювач на одному ОП

Резистори  $R3$  і  $R4$  діють як подільник напруги для неінвертувального входу операційного підсилювача (ОП). Завдяки зворотному зв'язку через резистори  $R1$  і  $R2$  і дуже великому внутрішньому коефіці-

енту посилення ОП напруга на інвертувальному вході підсилювача підтримується такою, що дорівнює напрузі на неінвертувальному вході.

Відношення  $R2 / R1$  визначає коефіцієнт передачі підсилювача. Коли  $R1 / R2 = R3 / R4$ , посилення диференціального сигналу набагато більше за посилення синфазного сигналу, і коефіцієнт ослаблення синфазної напруги ( $K_{\text{ОСС}}$ ) буде максимальним. Зазвичай  $R1 = R3$  та  $R2 = R4$ .

Диференціальний коефіцієнт посилення:

$$K_U = \frac{U_{\text{ВИХ}}}{U_{\text{ВХ2}} - U_{\text{ВХ1}}} = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{K_{\text{ОП}}}}, \quad (2.2)$$

де  $K_{\text{ОП}}$  – коефіцієнт підсилення ОП.

При великому значенні КОП знаменник у виразі (2.3) прямує до одиниці і для більшості застосувань можна використовувати спрощений вираз для коефіцієнта підсилення

$$K_U = \frac{R_2}{R_1}. \quad (2.3)$$

Для одержання заданого значення напруги 1 В сигнал з вимірювального моста необхідно підсилити в  $K_{\text{ЗЗ}} = \frac{U_{\text{ВИХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{1}{0,0439} = 22,77 \approx 23$  раз, тому обираємо резистори зі стандартних рядів  $E192$  та  $E24$  виходячи з наступного співвідношення, справедливого для диференціального підсилювача:

$$K_U = \frac{R2}{R1} \quad (2.4)$$

$$K_U = \frac{909}{39,7} = 22,7 \approx 23.$$

Зі стандартного ряду опорів вибираємо резистори моделей:

$R1, R3$  –  $CPF039700R00CER36$  – 39,7 кОм (2шт);

$R2, R4$  –  $CPF909000R00CER36$  – 909 кОм (2шт).

## 2.4 Визначення параметрів операційного посилення

Похибка усього пристрою не повинна перевищувати 0,1 % за технічним завданням. Розділимо її на адитивну й мультиплікативну складові:

$$\gamma_{\text{Ад}} = 0,05 \%,$$

$$\delta_{\text{М}} = 0,05 \%.$$

Мультиплікативна складова містить три складові тому обране значення 0,05 % поділимо на три  $\delta_{\text{К}}^0 = \delta_{\text{К}}^{\text{R}} = \delta_{\text{К}}^{\text{Рдж}} = 0,017 \%$ .

Адитивна складова містить чотири складові тому обране значення 0,05 % поділимо на чотири

$$\gamma_{U_{\text{sc}}} = \gamma_{i_{\text{bx}}} = \gamma_{\Delta i_{\text{bx}}} = \gamma_{\text{др}} = 0,0125 \%,$$

Надалі розподіл похибок по складовим може бути скоректовано.

### 2.4.1 Розрахунок параметрів ОП виходячи з розподілу мультиплікативних складових похибок

Похибка від початкового розкиду й нестабільності коефіцієнта підсилення ОП визначається за формулою (1.6):

$$\delta_{\text{К}}^0 = \frac{\delta \text{К}}{1 + \beta \text{К}_0},$$

Визначимо з цієї формули значення  $\text{К}_0$  – номінальне паспортне значення коефіцієнта підсилення ОП.

$$\text{К}_0 = \frac{\left( \frac{\delta \text{К}}{\delta_{\text{К}}^0} - 1 \right)}{\beta},$$

$$\beta = \frac{1}{\text{К}_{33}} = \frac{1}{23} = 0,043 \text{ – коефіцієнт зворотного зв'язку;}$$

$$\delta \text{К} = 42 \%.$$

$$K_0 = \frac{\left(\frac{42}{0,017} - 1\right)}{0,043} = 57432.$$

Отже, паспортний коефіцієнт підсилення повинен бути більше або дорівнювати 57432.

На коефіцієнт підсилення підсилювача будуть впливати резистори  $R_1$  і  $R_2$ , тому необхідно врахувати їхню точність і визначити вимоги. Похибка від неточності виготовлення резисторів  $R_1$  і  $R_2$  при однаковій точності резисторів (що забезпечує рівність відносних температурних і часових нестабільностей) можна визначити для схеми диференційного підсилювача як

$$\delta_K^R = \sqrt{(\delta_{R_1}^2 + \delta_{R_2}^2)} = 1,41 \cdot \delta R = 0,017 \% .$$

Похибку від неточності резисторів

$$\delta_{R_1} = \delta_{R_2} = \frac{\delta_{R_i}}{2} = \frac{0,017}{1,41} = 0,012 \% .$$

Похибка від нестабільності опору джерела сигналу визначається за формулою (1.8)

$$\delta_K^{R_{дж}} = \frac{\delta_{R_{дж}}}{1 + \frac{R_{вх}}{R_{дж}}} = 0,017 \% .$$

Нестабільність коефіцієнта перетворення, пов'язана із зміною опору джерела співвідношенням:

$$\Delta K = \frac{\partial K}{\partial R_{дж}} \cdot \Delta R_{дж}, \text{ звідси } \frac{\Delta K}{K} = \frac{\partial K}{\partial R_{дж}} \cdot \frac{\Delta R_{дж}}{K} .$$

$$\frac{\partial K}{\partial R_{дж}} = \frac{R_{вх}}{(R_{вх} + R_{дж})^2} .$$

$$\delta_K^{R_{дж}} = \frac{\Delta R_{дж} \cdot R_{вх} \cdot (R_{дж} + R_{вх})}{(R_{дж} + R_{вх})^2 \cdot R_{вх}} = \frac{\Delta R_{дж}}{R_{вх} + R_{дж}} .$$

З цього обчислимо значення вхідного опору підсилювального

$$\text{каскаду: } R_{\text{вх}} = \frac{\Delta R_{\text{ДЖ}}}{\delta_K^{R_{\text{ДЖ}}}} - R_{\text{ДЖ}}.$$

Обчислимо значення еквівалентного опору джерела сигналу  $R_{\text{ДЖ}}$  (мостова схема) та значення зміни цього опору  $\Delta R_{\text{ДЖ}}$  відносно точок вимірювальної діагоналі моста, використовуючи значення опорів мостової схеми (приймаємо значення блоку живлення мостової схеми рівним нулю).

$$R_{\text{авmin}} = \frac{(R_1 + R_x) \cdot (R_2 + R_3)}{(R_1 + R_x) + (R_2 + R_3)} = \frac{(10 + 10) \cdot (10 + 10)}{(10 + 10) + (10 + 10)} = 10 \text{ Ом}.$$

$$R_{\text{авmax}} = \frac{(R_1 + R_x) \cdot (R_2 + R_3)}{(R_1 + R_x) + (R_2 + R_3)} = \frac{(10 + 14,262) \cdot (10 + 10)}{(10 + 14,262) + (10 + 10)} = 10,96 \text{ Ом}$$

$$\Delta R_{\text{ДЖ}} = R_{\text{авmax}} - R_{\text{авmin}}.$$

$$\Delta R_{\text{ДЖ}} = 10,96 - 10 = 0,96 \text{ Ом}.$$

$$R_{\text{вх}} = \frac{0,96}{0,00017} - 10 = 5,65 \text{ кОм}.$$

Тому що  $R_{\text{вх}}$  для обраної схеми диференціального підсилювача визначається співвідношенням:

$$R_{\text{вх}} = R_1 + R_3 = 39,7 + 39,7 = 79,4 \text{ кОм}.$$

#### 2.4.2 Розрахунок параметрів ОП виходячи з розподілу адитивних складових похибок

$\gamma_{U_{\text{зс}}}$  – похибка, що обумовлена напругою зміщення операційного підсилювача визначається за формулою (1.2). Знаючи значення  $\gamma_{U_{\text{зс}}} = 0,0125 \%$  визначимо значення напруги зсуву ОП:

$$U_{зс} = \frac{U_{вх} \cdot K \cdot \gamma_{U_{зс}}}{(K+1) \cdot 100 \%},$$

$$U_{зс} = \frac{0,0439 \cdot 57432 \cdot 0,0125}{(57432+1) \cdot 100 \%} = 5,49 \text{ мкВ.}$$

$K$  – статичний коефіцієнт підсилення ОП, дорівнює 57432.

$\gamma_{i_{вх}}$  – похибка від вхідних струмів ОП, викликана різницею значень опорів, підключених до інвертувального і неінвертувального входів визначається за формулою (1.3). Знаючи значення  $\gamma_{i_{вх}} = 0,0125$  визначимо значення вхідного струму ОП:

$$i_{вх} = \frac{\gamma_{i_{вх}} \cdot U_{вх} \cdot K}{\Delta R_e \cdot (K+1) \cdot 100 \%},$$

де  $\Delta R_e = \Delta R_{дж} = 0,96$  Ом – абсолютне відхилення еквівалентного опору джерела сигналу;

$$i_{вх} = \frac{0,0125 \cdot 0,0439 \cdot 57432}{0,96 \cdot (57432+1) \cdot 100 \%} = 5,7 \text{ мкА.}$$

$\gamma_{\Delta i_{вх}}$  – похибка, викликана різницею вхідних струмів ОП визначається за формулою (1.4). Знаючи значення  $\gamma_{\Delta i_{вх}} = 0,0125$  % визначимо значення різниці вхідних струмів ОП:

$$\Delta i_{вх} = \frac{\gamma_{i_{вх}} \cdot U_{вх} \cdot K}{R_e \cdot (K+1) \cdot 100 \%},$$

$$\Delta i_{вх} = \frac{0,0125 \cdot 0,0439 \cdot 57432}{5,65 \cdot 10^3 \cdot (57432+1) \cdot 100 \%} = 0,97 \text{ нА.}$$

$\gamma_{др}$  – похибка, викликана температурним дрейфом напруги зсуву визначається за формулою (1.5). Знаючи значення  $\gamma_{др} = 0,0125$  % ви-

значимо значення температурного дрейфу ОП:

$\Delta T$  – абсолютне відхилення температури приймаємо рівним  $5^{\circ}\text{C}$ .

$$\frac{\partial U_{\text{зс}}}{\partial T} \leq \gamma_{\text{ДР}} \frac{U_{\text{ВХ}} \cdot K}{\Delta T \cdot (K + 1) \cdot 100 \%} = 0,0125 \cdot \frac{0,0439 \cdot 57432}{5 \cdot (57432 + 1) \cdot 100 \%} = 1,1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{В}}{\text{C}^{\circ}}$$

Виходячи з розрахованих параметрів, можна висунути основні вимоги до операційного підсилювача:

коефіцієнт підсилення  $> 57432$ ;

$U_{\text{зс}} \leq 5,49 \text{ мкВ}$ ;

$i_{\text{ВХ}} \leq 5,7 \text{ мкА}$ ;

$\Delta i_{\text{ВХ}} \leq 0,97 \text{ нА}$ ;

Даним вимогам задовольняє операційний підсилювач фірми Analog Device ОР 177 (рис 2.5), що має наступні характеристики:

коефіцієнт підсилення - 1200000;

$U_{\text{зс}} = 10 \text{ мкВ}$ ;

$i_{\text{ВХ}} = 2,4 \text{ нА}$ ;

$\Delta i_{\text{ВХ}} = 0,5 \text{ нА}$ ;

Часовий дрейф напруги зсуву:  $\Delta U_{\text{зс}}/t = 0,2 \text{ мкВ} / \text{мес}$  ;

Температурний дрейф напруги зсуву:  $\partial U_{\text{зс}}/\partial T = 0,9 \text{ мкВ} / \text{C}^{\circ}$  .

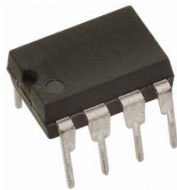


Рисунок 2.5 – ОП ОР 177G

## 2.5 Перевірка відповідності пристрою вимогам технічного завдання

Комп'ютерне моделювання виконуємо з використанням програмного пакета *Electronics Workbench (Demo version)*.

Джерело опорної напруги 0,5 В и високої точності важко підібрати, тому будемо використовувати джерело *AD 780 Analog Device* з вихідною напругою 0,5 В.

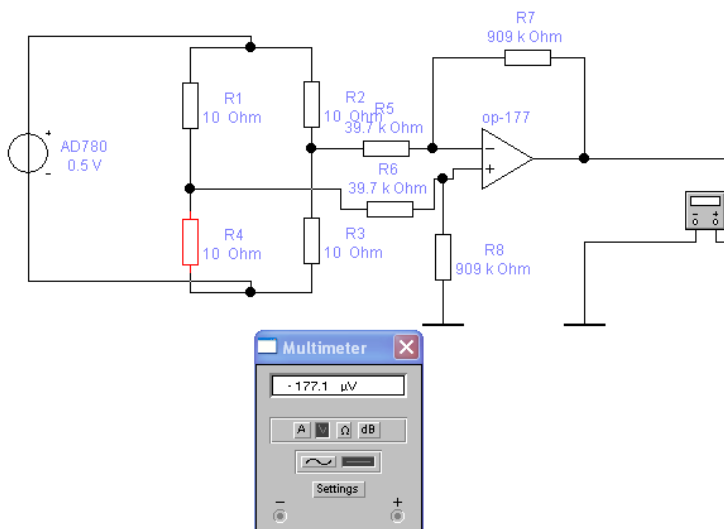


Рисунок 2.6 –  $R_x = 10 \text{ Ом}$

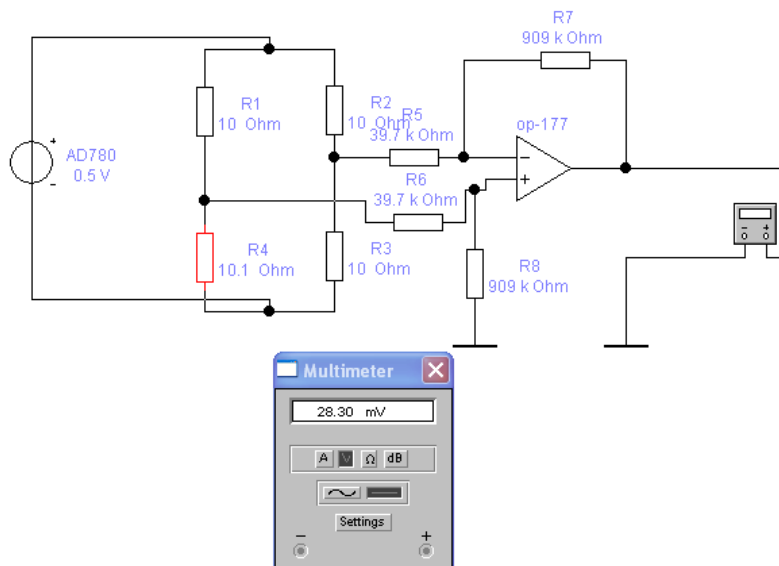


Рисунок 2.7 –  $R_x = (10 + 0,1) \text{ Ом}$

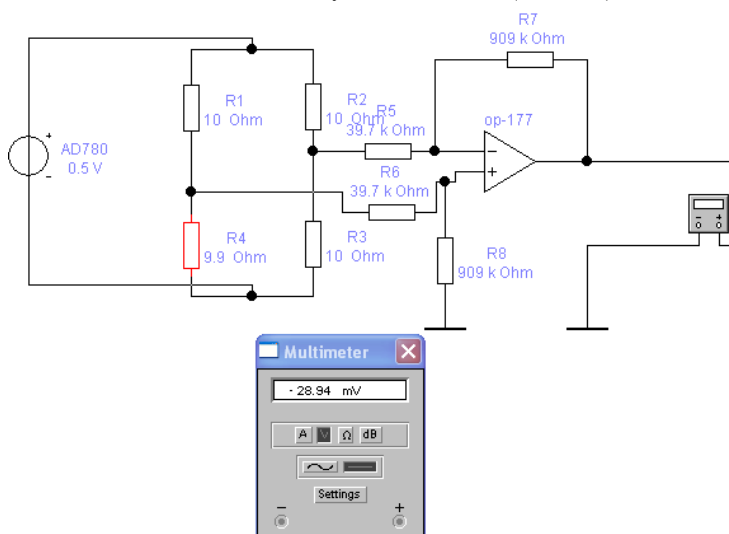


Рисунок 2.8 –  $R_x = (10 - 0,1) \text{ Ом}$

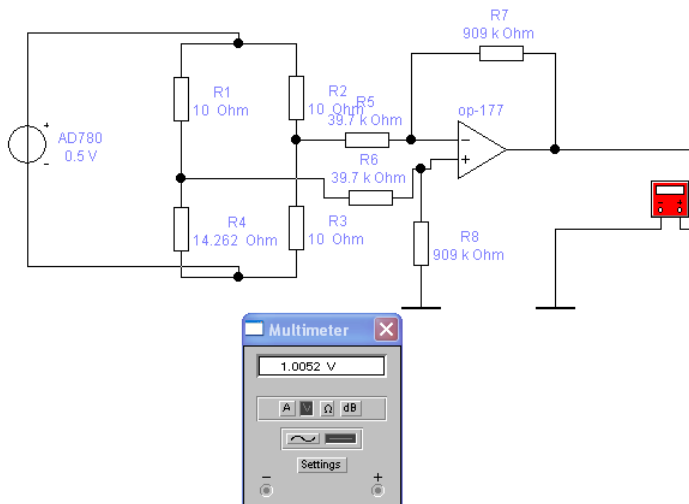


Рисунок 2.9 –  $R_x = 14,262 \text{ Ом}$

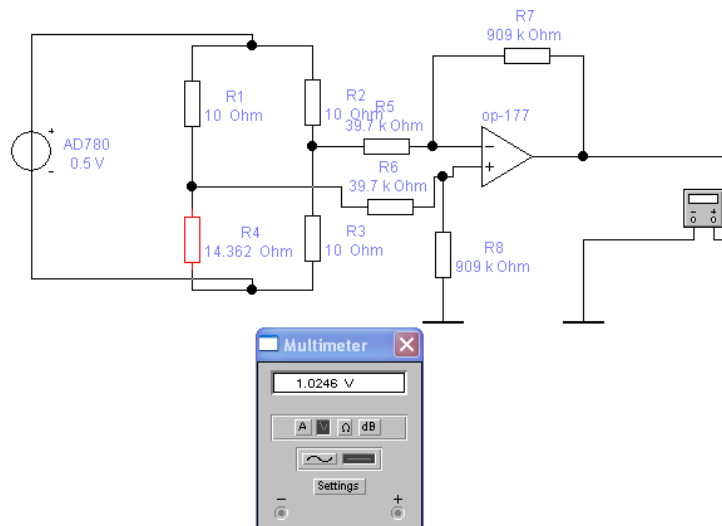
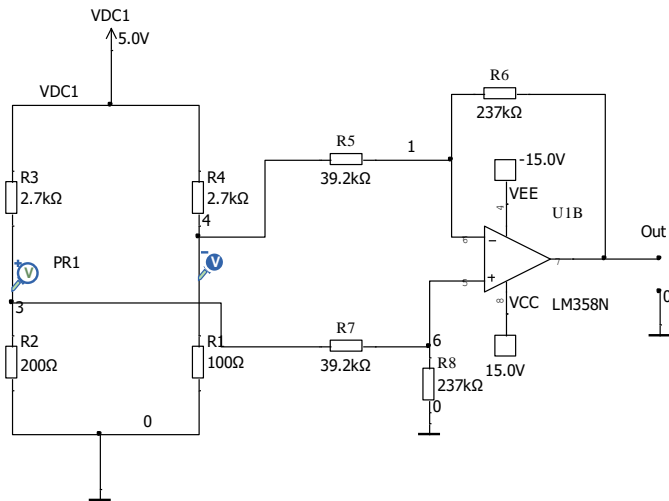
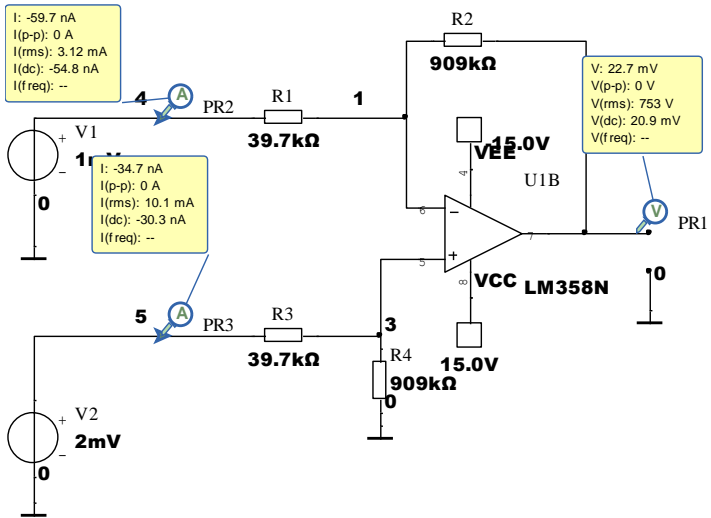


Рисунок 2.10 –  $R_x = (14,262 + 0,1) \text{ Ом}$

Приклади схемних реалізацій завдання вимірювання температури терморезистором у програмі *Multisim*.

Приклад підсилювача з ПТ 100, вихід 1 В.



## ВИМОГИ ДО ЗНАНЬ ТА УМІНЬ СТУДЕНТІВ

В результаті виконання розрахункового завдання студенти повинні:

- знати фізичні основи роботи, характеристики, параметри і еквівалентні схеми електронних пристроїв на основі операційних підсилювачів, їх призначення, класифікацію, маркування, основні конструкторсько-технологічні та експлуатаційні параметри, типи, схемо-технічні рішення електронних пристроїв;
- вміти використовувати електронні прилади для побудови електронних пристроїв, виконувати їх проектну компоновку;
- бути ознайомленим з новітніми досягненнями в галузі виробництва і використання мікроелектронних елементів;
- освоїти програму *Multisim* і її використання для створення і аналізу принципів електричних схем різних пристроїв.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Чинков В. М. Основи метрології та вимірювальної техніки. – Харків : НТУ «ХПІ», 2005. – 524 с.
- 2 Давиденко О. П., Григоренко І. В., Мигущенко Р. П. Електроніка у вимірювальній техніці. Видавничий центр НТУ «ХПІ», Харків.– 2015, 428 с..
- 3 Давиденко О. П., Григоренко І. В., Мигущенко Р. П. Основи електроніки: навчальний посібник. Видавництво «Підручник» НТУ «ХПІ», Харків.– 2013, 448 с.
- 4 Медяний Л. П. Аналогова схемотехніка – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 177 с.
- 5 Воробйова О.М., Іванченко В.Д. Основи схемотехніки: Підручник. – Одеса : Фенікс, 2009 – 388 с.
- 6 Бойко В.І., Гуржій А.М., Жуйков В.Я. Аналогова схемотехніка та імпульсні пристрої: Підручник. – Київ : Вища шк., 2004 – 366 с.

## ЗМІСТ

Вступ.....	3
1. Розрахункове завдання з курсу «Аналогова схемотехніка».....	5
1.1. Бюджет похибок вимірювальних підсилювачів.....	5
1.2. Послідовність виконання розрахунків.....	9
1.3. Варіанти для виконання індивідуального завдання.....	13
1.4. Зміст розрахункового завдання .....	17
2. Приклад виконання розрахунків.....	18
2.1. Терморезистори.....	18
2.2 Вибір схеми вимірювального пристрою.....	21
2.3 Вибір схеми підсилювального каскаду.....	23
2.4 Визначення параметрів операційного посилення.....	25
2.5 Перевірка відповідності пристрою вимогам технічного завдання....	30
Вимоги до знань та умінь студентів.....	34
Список літератури.....	35
Зміст.....	36

Додаток А

Таблиця А1 – Типові ряди значень резисторів в межах однієї декади в стандарті ІЕС63\*

E6	10	15	22	33	47	68	–	–	–	–	–	–	–
E12	10	12	15	18	22	27	33	39	47	56	68	82	82
E24	10	11	12	13	15	16	18	20	22	24	27	30	30
	33	36	39	43	47	51	56	62	68	75	82	91	91
	100	102	105	107	110	113	115	118	121	124	127	130	130
	133	137	140	143	147	150	154	158	162	165	169	174	174
	178	182	187	191	196	200	205	210	215	221	226	232	232
E48	237	243	249	255	261	267	274	280	287	294	301	309	309
E96	316	324	332	340	348	357	365	374	383	392	402	412	412
	422	432	442	453	464	475	487	499	511	523	536	549	549
	562	576	590	604	619	634	649	665	681	698	715	732	732
	750	768	787	806	825	845	866	887	909	931	953	976	976
	100	101	102	104	105	106	107	109	110	111	113	114	115
	117	118	119	120	121	123	124	126	127	129	130	132	132
	133	135	137	138	140	142	143	145	147	149	150	152	154
	156	158	160	162	164	165	167	169	172	174	176	176	176
	178	180	182	184	187	189	191	193	196	198	200	203	205
	208	210	213	215	218	221	223	226	229	232	234	234	234
	237	240	243	246	249	252	255	258	261	264	267	271	274
	277	280	284	287	291	294	298	301	305	309	312	312	312
E192	316	320	324	328	332	336	340	344	348	352	357	361	365
	370	374	379	383	388	392	397	402	407	412	417	417	417
	422	427	432	437	442	448	453	459	464	470	475	481	487
	493	499	505	511	517	523	530	536	542	549	556	556	556
	562	569	576	583	590	597	604	612	619	626	634	642	649
	657	665	673	681	690	698	706	715	723	732	741	741	741
	750	759	768	777	787	796	806	816	825	835	845	856	866
	876	887	898	909	920	931	942	953	965	976	988	988	988

\* ІЕС (МЭК) – Міжнародна електротехнічна комісія.

Додаток Б

Параметри операційних підсилювачів

Таблиця Б 1 – Універсальні операційні підсилювачі (загального призначення)

Тип ОП	П а р а м е т р												
	$U_{ж}$ В	$K_{оп}$ дБ	$U_{зс}$ мВ	$I_{вх}$	$\Delta I_{вх}$	$K_{оос}$ дБ	$K_{вж}$ дБ	$f_l$ МГц	$U_{гвх}$ в/мкс	$R_{вх}$ Ом	$R_{внх}$ Ом	$I_{внх}$ мА	$I_{ж}$ мА
LM124	±1,5–16	110	1	20нА	2нА	85	100	1	1	10 <sup>6</sup>	100	50	1,5
LM1458	±18	104	5	200нА	80нА	90	96	1	0,5	10 <sup>6</sup>	–	45	3
LMC6022	5–15	120	1	40фА	10фА	83	83	0,35	0,11	10 <sup>12</sup>	1000	22	0,14
LMC6035	2–15	120	0,5	20фА	10фА	93	97	1,4	1,5	10 <sup>13</sup>	150	8	0,6
LMV951	0,8–3	110	1,5	32нА	0,2нА	77	92	2,7	1,4	–	100	35	0,4
MAX4130	2,7–6,5	108	3,5	50нА	15нА	90	100	10	4	5×10 <sup>5</sup>	0,1	50	1
MAX9914	1,8–5,5	85	0,2	1пА	1пА	80	85	1	0,5	10 <sup>9</sup>	–	2	0,02
NE532	3–32	100	2	45нА	3нА	85	100	1	0,3	–	–	40	1
SM72501	2,7–12	120	0,2	0,2пА	0,04пА	130	98	2,5	0,9	–	25	40	1
TL083	±15	115	3	30пА	5пА	86	86	3	13	10 <sup>12</sup>	200	20	1,4
TL084	±15	115	3	0,2нА	0,1нА	86	86	4	16	10 <sup>12</sup>	500	50	2,5
TLC251	1,4–15	115	1	0,6пА	0,1пА	85	95	2	6	–	–	5	1

Таблиця Б 2 – Прецизійні операційні підсилювачі

Тип ОП	П а р а м е т р											
	$U_{ж}$ В	$K_{оп}$ дБ	$U_{зс}$ мкВ	$I_{вх}$	$\Delta I_{вх}$	$K_{осс}$ дБ	$K_{вж}$ дБ	$f_l$ МГц	$U_{звж}$ В/мкс	$R_{вх}$ Ом	$I_{вх}$ мА	$I_{ж}$ мА
AD648	$\pm 15$	120	300	3пА	2пА	82	100	1	1,8	$10^{12}$	200	15
AD706	$\pm 5-8$	120	1	1,5пА	0,5пА	130	130	2	2,5	$10^{12}$	-	10
ICL7652	$\pm 2,5-8$	135	5	30пА	10пА	120	120	0,45	0,6	$6 \times 10^5$	-	2
LMР7731	1,8-5,5	90	9	1нА	1нА	120	129	20	2,4	$4 \times 10^4$	20	30
LTC1052	$\pm 5-8$	82	0,5	30пА	1пА	140	150	1,2	4	$10^{12}$	20	6
LTC1100	$\pm 5-8$	120	1	10пА	2,5	115	120	1,2	0,6	$10^{12}$	500	20
MAX4238	2,7-5,5	125	0,1	2пА	1пА	140	140	1	0,35	$1,5 \times 10^6$	100	40
OP177	$\pm 15$	140	10	1,2нА	0,3нА	140	125	0,6	0,3	$2 \times 10^{11}$	60	10
OP193	$\pm 1,7-18$	115	75	15нА	2нА	100	100	0,035	0,015	$10^6$	40	25
OP27	$\pm 3-18$	125	10	10нА	5нА	125	120	8	2,8	$6 \times 10^6$	70	20
OP290	$\pm 1,5-15$	115	125	4нА	0,1нА	120	120	0,02	0,012	$3 \times 10^6$	800	5
ТС7650	$\pm 5-8$	120	1	1,5пА	0,5пА	130	130	2	2,5	$10^{12}$	100	10

Таблиця Б 3 – Мікро потужні операційні підсилювачі

Тип ОП	П а р а м е т р												
	U <sub>ж</sub> В	K <sub>оп</sub> дБ	U <sub>зс</sub> мВ	I <sub>вх</sub>	ΔI <sub>вх</sub>	K <sub>осс</sub> дБ	K <sub>вж</sub> дБ	f <sub>л</sub> МГц	U <sub>звих</sub> в/АКС	R <sub>вх</sub> Ом	R <sub>ввих</sub> Ом	I <sub>ввих</sub> мА	I <sub>ж</sub> мА
AD648	±4,5–18	120	0,3	10пА	5пА	82	82	1	1,8	10 <sup>12</sup>	1000	15	0,4
AD8541	2,7–5,5	114	1	4пА	0,1пА	45	76	1	0,75	10 <sup>10</sup>	100	30	0,045
LMS6041	4,5–15	130	3	4пА	2пА	75	90	0,075	0,02	10 <sup>11</sup>	100	15	0,02
LMS6061	4,5–15	130	0,1	10фА	5фА	85	85	0,1	0,035	10 <sup>13</sup>	110	10	0,02
LT1635	±5	110	0,3	2нА	0,2нА	110	100	0,05	0,045	2,5×10 <sup>7</sup>	100	20	0,15
MAX4036	1,4–3,6	120	0,2	1пА	0,3пА	70	82	0,01	0,0004	2,5×10 <sup>10</sup>	120	0,25	0,001
MAX4040	2,4–5,5	95	0,2	2нА	0,5нА	94	85	0,1	0,04	4,5×10 <sup>7</sup>	50	1	0,01
MAX4289	1–5,5	90	0,2	5нА	0,5нА	85	75	0,017	0,006	5×10 <sup>6</sup>	300	20	0,02
MAX480	±0,8–18	120	0,02	1нА	0,2	130	100	0,02	0,01	3×10 <sup>7</sup>	150	1	0,01
MCP606	2,5–5,5	120	0,25	1пА	1пА	90	93	0,155	0,08	10 <sup>13</sup>	200	17	0,025
OP90	1,6–36	115	0,1	4нА	1нА	120	120	0,02	12	3×10 <sup>7</sup>	–	–	0,02
ORA244	±1,1–18	106	0,7	10нА	1нА	98	106	0,4	0,1	10 <sup>6</sup>	500	12	0,04
TL061	±5–15	100	3	30пА	5пА	86	95	2	3,5	10 <sup>12</sup>	1000	20	0,2

Таблиця Б 4 – Потужні операційні підсилювачі

Тип ОП	П а р а м е т р												
	U <sub>ж</sub> В	K <sub>оп</sub> дБ	U <sub>зс</sub> мВ	I <sub>вх</sub> нА	ΔI <sub>вх</sub> нА	K <sub>осс</sub> дБ	K <sub>вж</sub> дБ	f <sub>л</sub>	U <sub>вих</sub> в/мкс	R <sub>вх</sub> Ом	R <sub>вих</sub> Ом	I <sub>вих</sub> А	I <sub>ж</sub> мА
L165V	±6-18	80	2	200	20	70	60	3	8	5×10 <sup>5</sup>	-	3,0	60
L272	4-28	50	15	300	50	75	70	0,35	1	5×10 <sup>5</sup>	0,3	1,0	12
LM675	16-60	90	1	200	50	90	90	5,5	8	-	-	3,0	50
LMH6672	±2,5-6,5	75	0,1	8000	2000	100	90	90	135	-	100	0,2	8
MP240	±100	96	1	0,1	0,05	92	-	1,8	14	10 <sup>14</sup>	0,2	20,0	20
OPA541	±10-35	97	2	4пА	1пА	113	120	2	10	10 <sup>12</sup>	0,25	5,0	20
OPA544	±10-35	100	1	0,015	0,01	106	100	1,4	8	10 <sup>12</sup>	0,5	2,0	12
OPA548	±4-30	98	2	100	5	95	90	1	10	10 <sup>7</sup>	-	3,0	17
OPA551	±4-30	126	1	0,02	0,003	102	110	3	15	10 <sup>13</sup>	5	0,2	10
OPA567	7,5	125	0,5	0,002	0,001	100	100	1,2	1,2	10 <sup>13</sup>	0,5	2,0	7
PA96	300	114	1	0,2	0,05	92	114	20	250	10 <sup>11</sup>	10	1,5	8
PA119	±15-40	111	5	0,01	0,005	100	86	100	900	10 <sup>11</sup>	1,2	2,0	100

Таблиця Б 5 – Швидкодіючі операційні підсилювачі

Тип ОП	П а р а м е т р												
	$U_{ж}$ В	$K_{оп}$ дБ	$U_{зс}$ мВ	$I_{ex}$	$\Delta I_{ex}$	$K_{осс}$ дБ	$K_{вж}$ дБ	$f_l$	$U_{вих}$ В/МКС	$R_{вих}$ Ом	$R_{вих}$ Ом	$I_{вих}$ мА	$I_{ж}$ мА
ОРА637	$\pm 4,5-18$	120	0,04	5пА	1пА	116	120	80	135	$10^{13}$	55	45	7
ОРА654	$\pm 18$	115	0,1	3пА	2пА	76	82	700	750	$10^{12}$	800	200	38
LM7372	9-36	85	2	2,7мкА	0,1мкА	93	90	120	3000	$3 \times 10^6$	15	150	13
AD8007	$\pm 2,5-6$	$G \leq 10$	0,5	4мкА	0,4мкА	59	64	650	1000	$4 \times 10^6$	10	50	9
AD8041	$\pm 5$	95	2	1,2мкА	0,2мкА	80	80	160	160	$1,6 \times 10^5$	10	50	5,2
AD8055	$\pm 5$	70	5	400нА	100нА	82	70	300	1400	$10^7$	25	60	5
HA2539	$\pm 15$	90	8	20мкА	6мкА	72	70	600	600	$10^4$	30	50	18
HA5190	$\pm 15$	85	3	5мкА	1мкА	95	100	150	200	$10^4$	30	50	20
LM6171	$\pm 5-15$	90	1,5	1мкА	0,03мкА	110	95	100	3600	$4 \times 10^7$	14	100	2,5
LMH6628	$\pm 5$	63	5	5мкА	0,3мкА	62	70	300	550	$2 \times 10^5$	0,1	85	9
LMH6682	$\pm 5$	65	1,1	5мкА	0,05мкА	110	80	190	940	$4 \times 10^6$	0,02	90	6,5
LT1190	$\pm 3-5$	80	3	0,5мкА	0,2мкА	58	68	50	450	$1,3 \times 10^5$	50	50	29
LTC6252	2,5-5	95	0,35	100нА	30нА	105	70	280	720	$7 \times 10^3$	10	90	3

Навчальне видання

**Методичні вказівки до розрахункового завдання  
з навчальної дисципліни «Аналогова схемотехніка»  
для студентів спеціальності «Інформаційно-вимірювальні  
технології»**

Укладачі: ГРИГОРЕНКО Ігор Володимирович  
ТРОХІН Михайло Вікторович

Відповідальний за випуск В.М. Балєв  
Роботу до видання рекомендував О.В. Пугановський

В авторській редакції

План 2025 р., поз. 141

Підп. до друку 13.02.2025 р. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Папір офсет. Друк ризографічний. Ум. друк. арк. 2,0.  
Обл.вид.арк. Наклад 50 прим. Замовлення №

---

Видавничий центр НТУ «ХП».

вул. Кирпичова, 2, м. Харків 61002

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5478 від 21.08.2017 р.

Електронна версія

---