

# ЧИСЕЛЬНІ МЕТОДИ

(для студентів факультету комп'ютерних наук  
та кібернетики, ОП «Системний аналіз»)

Київ — 2022

**УДК 519.6**  
**ББК 22.19я73**

## **Автори**

Голубєва К.М., Кашпур О.Ф., Ключин Д.А.

## **Рецензенти**

Доктор фіз.-мат. наук, професор Номіровський Д. А.

Доктор фіз.-мат. наук, професор Семенов В. В

Рекомендовано до друку вченою радою факультету комп'ютерних наук та кібернетики Київського національного університету імені Тараса Шевченка (протокол № 4 від 17 листопада 2021 року)

Чисельні методи (для студентів факультету комп'ютерних наук та кібернетики, ОП «Системний аналіз»): навчальний посібник / Голубєва К.М., Кашпур О.Ф., Ключин Д.А. – Київ: 2022. – 145 с.

ISBN

У навчальному посібнику «Чисельні методи» розглядаються питання теорії похибок, наближеного розв'язання нелінійних рівнянь та їх систем, проблеми на власні значення, знаходження розв'язків систем лінійних алгебраїчних рівнянь, інтерполяції, чисельного інтегрування, чисельного диференціювання, наближене розв'язання задачі Коші. Зміст посібника відповідає навчальній програмі бакалаврів факультету комп'ютерних наук та кібернетики, які навчаються за освітньою програмою «Системний аналіз».

# 1. Елементи теорії похибок

## Основні означення

Величина, яка характеризує точність результату, називається *похибкою*. Основні типи похибок:

1) *неусувні похибки* – пов’язані із неточностями вхідних даних (похибки приладів, наявність констант, невідповідність математичної моделі, тощо);

2) *похибки методу* – з’являються при застосуванні наближених методів замість точних;

3) *похибки обчислень* – виникають внаслідок заокруглень при виконанні математичних операцій в ЕОМ, також під час введення та виведення даних в ЕОМ;

4) *повна похибка* – сума всіх похибок, які виникають при розв’язанні конкретної задачі.

Якщо похибка, яка була зроблена на перших кроках обчислень, на подальших кроках не збільшується або залишається того самого порядку, то обчислювальний процес називається *стійким* по відношенню до початкової похибки; якщо ця похибка зростає на кожному подальшому кроці, то процес обчислень називається *нестійким*.

*Зауваження.* Для запобігання зростання обчислювальної похибки обчислення проводять починаючи з найменших по модулю значень.

**Приклад.** На гіпотетичній «десятковій» ЕОМ з мантисою довжиною 4 знаходять суму чисел від найменшого до найбільшого та в зворотному напрямку від найбільшого до найменшого:

$$S = 0,2764 + 0,3944 + 1,475 + 26,46 + 1364.$$

В якому випадку обчислювальна похибка буде меншою?

*Розв’язок.* Знайдемо суму  $\tilde{S}$  від найменшого до найбільшого:

$$\tilde{S}_1 = 0,2764 + 0,3944 = 0,6708 \approx 0,671;$$

$$\tilde{S}_2 = 0,671 + 1,475 = 2,146 \approx 2,15;$$

$$\tilde{S}_3 = 2,15 + 26,46 = 28,61 \approx 29;$$

$$\tilde{S}_4 = 29 + 1364 = 1393;$$

$$\tilde{S} \approx 1393.$$

Знайдемо суму  $\bar{S}$  від найбільшого до найменшого:

$$\bar{S}_1 = 1364 + 26,46 \approx 1364 + 26 = 1390;$$

$$\bar{S}_2 = 1390 + 1,475 \approx 1390 + 1 = 1391;$$

$$\bar{S}_3 = 1391 + 0,3944 \approx 1391 + 0 = 1391;$$

$$\bar{S}_4 = 1391 + 0,2764 \approx 1391 + 0 = 1391;$$

$$\bar{S} \approx 1391.$$

Знайдемо точне значення суми (будемо вважати, що мантиса не обмежена 4 розрядами):

$$S = 0,2764 + 0,3944 + 1,475 + 26,46 + 1364 = 1392,6058 \approx 1393.$$

Отже, похибка менша при додаванні від найменших чисел до найбільших.

Нехай  $x$  – точне значення деякої величини,  $x^*$  – її відоме наближене значення.

**Абсолютною похибкою** числа  $x^*$  називається величина  $\Delta(x^*)$ , що задовольняє умові

$$\Delta(x^*) \geq |x - x^*|. \quad (1)$$

В цьому випадку число  $x$  можна подати у вигляді

$$x = x^* \pm \Delta(x^*). \quad (2)$$

**Відносною похибкою** числа  $x^*$  називається величина  $\delta(x^*)$ , що задовольняє умові

$$\delta(x^*) \geq \left| \frac{x - x^*}{x^*} \right|. \quad (3)$$

Відносну похибку часто виражають у відсотках.

*Зауваження.* Відносна похибка краще характеризує точність результату.

**Значущими цифрами** числа називаються всі цифри в його запису, починаючи з першої ненульової зліва.

Значуща цифра називається *правильною*, якщо абсолютна похибка числа не перевищує половини одиниці розряду, що відповідає цій цифрі, в протилежному випадку її називають *сумнівною*.

**Приклад.** Визначити, яка рівність точніша  $2/21 = 0,095$  або  $\sqrt{22} = 4,69$ .

*Розв'язок.* Враховуючи, що  $2/21 \approx 0,095238$ ,  $\sqrt{22} \approx 4,690416$ , введемо позначення  $x_1 = 0,095238$ ,  $x_1^* = 0,095$ ,  $x_2 = 4,690416$ ,  $x_2^* = 4,69$ . Для того щоб визначити, яка рівність точніша, порівняємо відносні похибки чисел:

$$\delta(x_1^*) = \left| \frac{0,095238 - 0,095}{0,095} \right| \cdot 100\% \approx 0,25\%;$$

$$\delta(x_2^*) = \left| \frac{4,690416 - 4,69}{4,69} \right| \cdot 100\% \approx 0,009\%.$$

Отже, рівність  $\sqrt{22} = 4,69$  точніша.

**Приклад.** Визначити значущі цифри числа 0,001230.

*Розв'язок.* Значущими будуть всі цифри, починаючи з одиниці: 1, 2, 3, 0.

**Приклад.** Визначити значущі цифри числа 123000.

*Розв'язок.* Значущими будуть всі цифри, починаючи з одиниці: 1, 2, 3, 0, 0, 0.

**Приклад.** Записати число 123000, якщо в ньому а) три, б) дві значущі цифри.

*Розв'язок.* Якщо в цілій частині числа є не значущі цифри, то число заокруглюють до останньої значущої та записують за допомогою порядку: а)  $123 \times 10^3$ , б)  $12 \times 10^4$ .

**Приклад.** Визначити правильні цифри числа 0,001230, якщо його абсолютна похибка  $10^{-4}$ .

*Розв'язок.* Позначимо  $x^* = 0,001230$ ,  $\Delta(x^*) = 10^{-4}$ . Будемо перевіряти значущі цифри за означенням:

«1»:  $10^{-4} \leq 0,5 \times 10^{-3} \Rightarrow$  цифра «1» – правильна;

«2»:  $10^{-4} > 0,5 \times 10^{-4} \Rightarrow$  цифра «2» – сумнівна.

Всі подальші цифри обудуть сумнівними (які стоять праворуч від сумнівної цифри). Отже, цифра «1» – правильна.

**Приклад.** Якою буде похибка, якщо число  $\pi$  наблизити числом 3,14?

*Розв'язок.* Знайдемо абсолютну і відносну похибки, для цього візьмемо число  $\pi$  з більшою кількістю значень:  $\pi \approx 3,14159$ .

$$\Delta(\pi^*) = |3,14 - 3,14159| = 0,00159,$$

$$\delta(\pi^*) = \frac{0,00159}{3,14} \cdot 100\% = 0,05\%.$$

Отже, абсолютна похибка дорівнює  $1,59 \times 10^{-3}$ , відносна – 0,05%.

## Пряма задача теорії похибок

В деякій області  $G \in \mathbb{R}^n$  розглядають неперервно диференційовану функцію  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Необхідно обчислити значення функції в точці  $(x_1, x_2, \dots, x_n) \in G$ , але відомі лише наближені значення  $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) \in G$ . Обчислимо наближене значення  $y^* = f(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$  та оцінимо його похибку.

Оцінку **абсолютної похибки функції** обчислюють за формулою:

$$\Delta(y^*) \leq \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| \Delta(x_i^*), \quad (4)$$

тоді **відносну похибку функції** можна знайти:

$$\delta(y^*) = \frac{\Delta(y^*)}{|y^*|} \leq \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| \Delta(x_i^*) / |f(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)|. \quad (5)$$

**Приклад.** Для заданої функції  $f(x, y, z) = \frac{x^2 z}{y^3}$  оцінити похибку обчислення, якщо  $x = 0,15 \pm 0,005$ ,  $y = 2,13 \pm 0,01$ ,  $z = 1,14 \pm 0,007$ .

*Розв'язок.* Оскільки необхідно знайти похибку функції, значить задача пряма, скористаємось формулою (4), будемо враховувати, що відповідно до представлення (2) нам відомі аб-

солотні похибки аргументів та їх наближені значення.

$$\begin{aligned}\Delta(f^*) &\leq \left| \frac{2x^*z^*}{(y^*)^3} \right| \Delta(x^*) + \left| -\frac{3(x^*)^2z^*}{(y^*)^4} \right| \Delta(y^*) + \left| \frac{(x^*)^2}{(y^*)^3} \right| \Delta(z^*) = \\ &= \frac{2 \cdot 0,15 \cdot 1,14}{2,13^3} \cdot 0,005 + \frac{3 \cdot 0,15^2 \cdot 1,14}{2,13^4} \cdot 0,01 + \frac{0,15^2}{2,13^3} \cdot 0,007 \approx \\ &\approx 0,00023063 \approx 2,3 \times 10^{-4}.\end{aligned}$$

Знайдемо відносну похибку функції за формулою (5), для цього спочатку знайдемо наближене значення функції:

$$f(x^*, y^*, z^*) = \frac{(x^*)^2 z^*}{(y^*)^3} = \frac{0,15^2 \cdot 1,14}{2,13^3} \approx 0,00265429,$$

$$\delta(f^*) = \frac{0,00023063}{0,00265429} \cdot 100\% \approx 8,7\%.$$

Отже,  $\Delta(f^*) \approx 2,3 \times 10^{-4}$ , а  $\delta(f^*) \approx 8,7\%$ .

**Приклад. Похибка логарифма.** Розглянемо функцію  $y = f(x) = \ln x$  та знайдемо її абсолютну похибку:

$$\Delta(y^*) \leq \left| \frac{df}{dx} \right| \Delta(x^*) = \left| \frac{1}{x^*} \right| \cdot \Delta(x^*) = \delta(x^*); \quad (6)$$

відносна похибка логарифма:

$$\delta(y^*) \leq \frac{\delta(x^*)}{|\ln x^*|}.$$

**Приклад. Похибка степеня.** Розглянемо функцію піднесення в степінь  $y = f(x) = x^m$  та знайдемо її абсолютну похибку:

$$\Delta(y^*) \leq \left| \frac{df}{dx} \right| \Delta(x^*) = |m \cdot (x^*)^{m-1}| \cdot \Delta(x^*);$$

відносна похибка степеня:

$$\delta(y^*) \leq \frac{|m \cdot (x^*)^{m-1}| \cdot \Delta(x^*)}{|(x^*)^m|} = m \cdot \delta(x^*). \quad (7)$$

**Приклад. Похибка кореня.** Розглянемо функцію  $y = f(x) = \sqrt[m]{x}$ , абсолютна похибка кореня:

$$\Delta(y^*) \leq \left| \frac{df}{dx} \right| \Delta(x^*) = \left| \frac{1}{m \cdot \sqrt[m]{(x^*)^{m-1}}} \right| \cdot \Delta(x^*);$$

відносна похибка кореня:

$$\delta(y^*) \leq \frac{\Delta(x^*)}{|m \cdot \sqrt[m]{(x^*)^{m-1}}|} \div |\sqrt[m]{x^*}| = \frac{\delta(x^*)}{m}. \quad (8)$$

## Похибки арифметичних операцій

За допомогою формул (4) та (5) визначимо похибки результатів основних математичних операцій. Будемо розглядати найпростіші випадки, покладемо,  $x_1 > x_2 > 0$ ;  $m \in \mathbb{N}$ .

**Похибка суми.** Розглянемо  $y = f(x_1, x_2) = x_1 + x_2$ , абсолютна похибка суми:

$$\Delta(y^*) \leq \Delta(x_1^*) + \Delta(x_2^*); \quad (9)$$

відносна похибка суми:

$$\begin{aligned} \delta(y^*) &\leq \frac{\Delta(x_1^*) + \Delta(x_2^*)}{|x_1^* + x_2^*|} = \frac{\Delta(x_1^*) \cdot |x_1^*|}{|x_1^* + x_2^*| \cdot |x_1^*|} + \frac{\Delta(x_2^*) \cdot |x_2^*|}{|x_1^* + x_2^*| \cdot |x_2^*|} = \\ &= \left| \frac{x_1^*}{x_1^* + x_2^*} \right| \delta(x_1^*) + \left| \frac{x_2^*}{x_1^* + x_2^*} \right| \delta(x_2^*). \end{aligned}$$

**Похибка різниці.** Розглянемо  $y = f(x_1, x_2) = x_1 - x_2$ , абсолютна похибка різниці:

$$\Delta(y^*) \leq \Delta(x_1^*) + \Delta(x_2^*); \quad (10)$$

відносна похибка різниці:

$$\begin{aligned} \delta(y^*) &\leq \frac{\Delta(x_1^*) + \Delta(x_2^*)}{|x_1^* - x_2^*|} = \frac{\Delta(x_1^*) \cdot |x_1^*|}{|x_1^* - x_2^*| \cdot |x_1^*|} + \frac{\Delta(x_2^*) \cdot |x_2^*|}{|x_1^* - x_2^*| \cdot |x_2^*|} = \\ &= \left| \frac{x_1^*}{x_1^* - x_2^*} \right| \delta(x_1^*) + \left| \frac{x_2^*}{x_1^* - x_2^*} \right| \delta(x_2^*). \end{aligned}$$

**Похибка добутку.** Розглянемо  $y = f(x_1, x_2) = x_1 \times x_2$ , абсолютна похибка добутку:

$$\Delta(y^*) \leq |x_2^*| \cdot \Delta(x_1^*) + |x_1^*| \cdot \Delta(x_2^*);$$

відносна похибка добутку:

$$\delta(y^*) \leq \frac{|x_2^*| \cdot \Delta(x_1^*) + |x_1^*| \cdot \Delta(x_2^*)}{|x_1^* \cdot x_2^*|} = \delta(x_1^*) + \delta(x_2^*). \quad (11)$$



**Похибка частки.** Розглянемо  $y = f(x_1, x_2) = x_1 \div x_2$ , абсолютна похибка частки:

$$\Delta(y^*) \leq \left| \frac{1}{x_2^*} \right| \Delta(x_1^*) + \left| \frac{-x_1^*}{(x_2^*)^2} \right| \Delta(x_2^*) = \frac{|x_2^*| \cdot \Delta(x_1^*) + |x_1^*| \cdot \Delta(x_2^*)}{(x_2^*)^2};$$

відносна похибка частки:

$$\delta(y^*) \leq \frac{|x_2^*| \Delta(x_1^*) + |x_1^*| \Delta(x_2^*)}{(x_2^*)^2} \div \left| \frac{x_1^*}{x_2^*} \right| = \delta(x_1^*) + \delta(x_2^*). \quad (12)$$

*Зауваження.* При розв'язанні задач можуть використовуватися формули похибок математичних операцій (9) - (8), решта формул на практиці не використовуються.

## Обернена задача теорії похибок

Обернена задача теорії похибок формулюється таким чином: з якою точністю потрібно задати значення відомих аргументів  $x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*$  функції  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , щоб похибка значення функції  $f(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$  не перевищувала заданої величини  $\varepsilon$ ?

**Функція однієї змінної.** Для функції однієї змінної вигляду  $y = f(x)$  абсолютну похибку можна обчислити за формулою

$$\Delta(x^*) = \frac{\Delta(y^*)}{|f'(x^*)|} \leq \frac{\varepsilon}{|f'(x^*)|}. \quad (13)$$

**Функція багатьох змінних.** Для функції декількох змінних  $y = f(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$  для розв'язання оберненої задачі існує такі підходи.

**1) Принцип рівних впливів.** В основі цього підходу лежить припущення про рівність доданків  $\left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| \Delta(x_i^*)$ ,  $i = \overline{1, n}$  між собою. Тоді абсолютні похибки аргументів можна визначити за формулою:

$$\Delta(x_i^*) = \frac{\Delta(y^*)}{n \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right|}, \quad \text{де } i = \overline{1, n}. \quad (14)$$

2) *Рівні абсолютні похибки.* Якщо вважати абсолютні похибки аргументів рівними, то їх можна знайти таким чином:

$$\Delta(x_1^*) = \Delta(x_2^*) = \dots = \Delta(x_n^*) = \frac{\Delta(y^*)}{\left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \right| + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial x_n} \right|}. \quad (15)$$

**Приклад.** Знайти абсолютні та відносні похибки аргументів, які дають змогу обчислити з 4 правильними значущими цифрами значення функції  $f(x_1, x_2, x_3) = \frac{x_1 + x_2^2}{x_3}$ , де  $x_1^* = 2, 10415$ ,  $x_2^* = 1, 93521$ ,  $x_3^* = 0, 84542$ .

*Розв'язок.* Оскільки задається точність функції, а необхідно знайти точність аргументів, то це обернена задача. В задачі три аргументи – функція багатьох змінних, припустимо, що діє принцип рівних впливів і скористаємось формулою (14).

Функція задається 4 правильними цифрами, знайдемо її наближене значення, щоб знайти кількість правильних цифр в числі після коми.

$$f(x_1^*, x_2^*, x_3^*) = \frac{x_1^* + (x_2^*)^2}{x_3^*} = \frac{2, 10415 + 1, 93521^2}{0, 84542} \approx 6, 9187.$$

В числі три правильні цифри після коми, тому за означенням  $\Delta(f^*) \leq 0, 5 \times 10^{-3}$ .

$$\Delta(x_1^*) = \frac{\Delta(f^*)}{3 \left| \frac{1}{x_3^*} \right|} = \frac{0, 5 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot \frac{1}{0, 84542}} \approx 1, 409 \times 10^{-4};$$

$$\delta(x_1^*) = \frac{\Delta(x_1^*)}{|x_1^*|} \cdot 100\% = \frac{1, 409 \cdot 10^{-4}}{2, 10415} \cdot 100\% \approx 0, 0067\%;$$

$$\Delta(x_2^*) = \frac{\Delta(f^*)}{3 \left| \frac{2x_2^*}{x_3^*} \right|} = \frac{0, 5 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot \frac{2 \cdot 1, 93521}{0, 84542}} \approx 3, 641 \times 10^{-5};$$

$$\delta(x_2^*) = \frac{\Delta(x_2^*)}{|x_2^*|} \cdot 100\% = \frac{3, 641 \cdot 10^{-5}}{1, 93521} \cdot 100\% \approx 0, 0019\%;$$

$$\Delta(x_3^*) = \frac{\Delta(f^*)}{3 \left| -\frac{x_1 + x_2^2}{(x_3^*)^2} \right|} = \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot \frac{2,10415 + 1,93521^2}{0,84542^2}} \approx 2,037 \cdot 10^{-5};$$

$$\delta(x_3^*) = \frac{\Delta(x_3^*)}{|x_3^*|} \cdot 100\% = \frac{2,037 \cdot 10^{-5}}{0,84542} \cdot 100\% \approx 0,0024\%.$$

**Приклад.** Якою кількістю правильних значущих цифр необхідно задати аргументи, щоб обчислити з 3 правильними значущими цифрами значення функції  $f(x, y, z) = \frac{x^2}{y} + 3z$ , де  $x^* = 2,37208$ ,  $y^* = 4,02301$ ,  $z^* = 1,56172$ ?

*Розв'язок.* Оскільки задається точність функції, а необхідно знайти точність аргументів, то це обернена задача. В задачі три аргументи – функція багатьох змінних. Оскільки значення аргументів одного порядку, скористаємось формулою (15), її точності буде достатньо для визначення правильних цифр.

Функція задається 3 правильними цифрами, знайдемо її наближене значення, щоб знайти кількість правильних цифр в числі після коми.

$$f(x, y, z) = \frac{x^2}{y} + 3z = \frac{2,37208^2}{4,02301} + 3 \cdot 1,56172 \approx 6,084.$$

В числі дві правильні цифри після коми, тому за означенням  $\Delta(f^*) \leq 0,5 \times 10^{-2}$ .

$$\begin{aligned} \Delta(x^*) = \Delta(y^*) = \Delta(z^*) &= \frac{\Delta(f^*)}{\left| \frac{2x^*}{y^*} \right| + \left| -\frac{(x^*)^2}{(y^*)^2} \right| + 3} = \\ &= \frac{0,5 \cdot 10^{-2}}{\frac{2 \cdot 2,37208}{4,02301} + \frac{2,37208^2}{4,02301^2} + 3} \approx 0,11 \times 10^{-2}; \end{aligned}$$

Визначимо правильні цифри аргументів:

$0,11 \times 10^{-2} \leq 0,5 \times 10^{-2} \Rightarrow$  дві цифри після коми правильні.

Отже, аргументи необхідно задати 3 правильними значущими цифрами (2 правильними цифрами після коми).

## Розв'язання задач

Процес розв'язання задач з теорії похибки умовно можна поділити на етапи:

I) побудова математичної моделі (перехід від опису постановки задачі до математичних символів);

II) визначення типу задачі (пряма чи обернена)

– якщо задача пряма:

1) за можливістю використовуються найпростіші формули похибок основних математичних операцій (9)–(12);

2) якщо в задачі функція містить різні типи операцій, то найчастіше використання формул (9)–(12) є недоцільним, отже використовують формули (4)–(5);

– якщо задача обернена, то необхідно визначити кількість змінних:

1) якщо змінна одна, то використовується формула (13);

2) якщо змінних дві і більше, то необхідно обрати підхід до розв'язання задачі (принцип рівних впливів або рівність абсолютних похибок):

а) за можливістю використовуються найпростіші формули похибок основних математичних операцій (9)–(8);

б) якщо формули (9)–(8) використати неможливо, то застосовують формули (14) або (15) в залежності від обраного принципу;

III) формулювання результатів відповідно до початкової постановки задачі.

**Приклад.** Сторона квадрата дорівнює 2 м. З якою точністю потрібно її виміряти, щоб похибка обчислення площі квадрата не перевищує  $1 \text{ см}^2$ ?

*Розв'язок.* Введемо позначення:  $a$  – сторона квадрата,  $S$  – його площа,  $S = a^2$ ,  $a = 2 \text{ м} = 200 \text{ см}$ ,  $\Delta(S^*) = 1 \text{ см}^2$ . Оскільки задається точність функції, а необхідно знайти точність аргументів, то задача обернена. Оскільки аргумент один, то

використаємо формулу (13).

$$\Delta(a^*) = \frac{\Delta(S^*)}{|2 \cdot a^*|} = \frac{1}{2 \cdot 200} = 2,5 \times 10^{-3};$$

$$\delta(a^*) = \frac{\Delta(a^*)}{|a^*|} \cdot 100\% = \frac{2,5 \cdot 10^{-3}}{200} \cdot 100\% = 0,00125\%$$

Отже, абсолютна похибка дорівнює  $2,5 \times 10^{-3}$ , а відносна  $-0,00125\%$ .

**Приклад.** Висота і радіус основи циліндра виміряно з точністю  $0,5\%$ . Чому дорівнює відносна похибка в разі обчислення об'єму циліндра, якщо  $\pi^* = 3,14$ ?

*Розв'язок.* Введемо позначення:  $h$  – висота циліндра,  $r$  – радіус основи,  $V$  – його площа,  $V = \pi h r^2$ ,  $\delta(h^*) = \delta(r^*) = 0,5\%$ . Оскільки задається точність аргументів, а необхідно знайти точність функції, то задача пряма. Оскільки необхідно знайти лише відносну похибку, а в функції операція множення, то зручно використати формулу (11), для цього знайдемо відносну похибку числа  $\pi$ :

$$\delta(\pi^*) = \left| \frac{\pi - \pi^*}{\pi^*} \right| = \frac{3,14159 - 3,14}{3,14} \cdot 100\% = 0,05\%;$$

$$\delta(V^*) = \delta(\pi^*) + \delta(h^*) + 2\delta(r^*) = 0,05 + 0,05 + 2 \cdot 0,05 = 1,55\%.$$

Отже, відносна похибка об'єму  $-1,55\%$ .

**Приклад.** Нехай числа задані 10 правильними значущими цифрами:  $\sqrt{2,01} \approx 1,417744688$  та  $\sqrt{2} \approx 1,414213562$ . Скільки правильних значущих цифр має число  $\sqrt{2,01} - \sqrt{2}$ ?

*Розв'язок.* Для зручності введемо позначення  $x_1 = \sqrt{2,01}$ ,  $x_1^* = 1,417744688$ ,  $x_2 = \sqrt{2}$ ,  $x_2^* = 1,414213562$ ,  $x = \sqrt{2,01} - \sqrt{2}$ . Оскільки задаються значення аргументів, а необхідно оцінити функцію, то задача пряма.

Для визначення правильних цифр в числі  $x^*$  за означенням необхідно мати його абсолютну похибку та саме число:

$$x^* = x_1^* - x_2^* = 1,417744688 - 1,414213562 = 0,003531126.$$

Знайдемо абсолютні похибки  $x_1^*$  та  $x_2^*$  з умови, що вони задаються 10 правильними цифрами:

$$\Delta(x_1^*) \leq 0,5 \times 10^{-9}; \quad \Delta(x_2^*) \leq 0,5 \times 10^{-9},$$

тоді використавши абсолютні похибки аргументів за формулою (10) знайдемо абсолютну формулу функції:

$$\Delta(x^*) \leq \Delta(x_1^*) + \Delta(x_2^*) = 10^{-9}.$$

Визначимо правильні цифри числа  $x^* = 0,003531126$ :

«6»:  $10^{-9} > 0,5 \times 10^{-9} \Rightarrow$  цифра «6» – сумнівна;

«2»:  $10^{-9} \leq 0,5 \times 10^{-8} \Rightarrow$  цифра «2» – правильна.

Всі подальші цифри також будуть правильними (які стоять ліворуч від правильної цифри).

Отже, цифра «3», «5», «3», «1», «2» – правильні.

**Приклад.** З якою кількістю правильних цифр потрібно взяти вільний член квадратного рівняння  $x^2 - 2x + \lg 2 = 0$ , щоб отримати корені рівняння з 4 правильними значущими цифрами?

*Розв'язок.* Введемо позначення:  $z = \lg 2 \approx 0,301029996$  – вільний член квадратного рівняння,  $x = 1 + \sqrt{1 - \lg 2} \approx 1,836$  – один з коренів рівняння, який будемо розглядати (для іншого розв'язок будується аналогічно). Оскільки задається точність кореня (функції  $x$ ), а необхідно оцінити точність  $\lg 2$  (аргумента  $z$ ), то задача обернена з одною змінною. Тому застосуємо формулу (13), для якої за означенням правильної цифри знайдемо абсолютну похибку функції:  $\Delta(x^*) \leq 0,5 \times 10^{-3}$  (корінь задається 4 правильними цифрами, 3 з них після коми).

$$\Delta(z^*) = \Delta(x^*) \div \frac{1}{2\sqrt{1 - z^*}} = 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot \sqrt{1 - 0,3} \approx 0,8 \times 10^{-3}.$$

Абсолютну похибку знайшли з низькою точністю, оскільки в задачі вона потрібна для знаходження правильних цифр числа  $\lg 2 \approx 0,301029996$ :

«1»:  $0,8 \times 10^{-3} > 0,5 \times 10^{-3} \Rightarrow$  цифра «1» – сумнівна;

«0»:  $0,8 \times 10^{-3} \leq 0,5 \times 10^{-2} \Rightarrow$  цифра «0» – правильна і всі значущі зліва.

Отже, для обчислення першого кореня з 4 значущими цифрами, необхідно взяти  $\lg 2$  з 2 правильними цифрами після коми.

## Задачі для самостійного розв'язання

1. Нехай  $x^* = 17,124$ ,  $\Delta(x^*) = 0,04$ . Скільки правильних значущих цифр має число  $x^*$ ?
2. Нехай  $x^* = 3,153276$ ,  $\Delta(x^*) = 0,6 \times 10^{-3}$ . Скільки правильних значущих цифр має число  $x^*$ ?
3. Нехай  $x^* = 0,027045$ ,  $\Delta(x^*) = 0,008$ . Скільки правильних значущих цифр має число  $x^*$ ?
4. Нехай  $x^* = 0,368125$ ,  $\Delta(x^*) = 0,021$ . Скільки правильних значущих цифр має число  $x^*$ ?
5. Знайти абсолютну та відносну похибки після заокруглення до трьох значущих цифр числа  $-0,1725$ .
6. Знайти абсолютну та відносну похибки після заокруглення до двох значущих цифр числа  $1,2485$ .
7. Знайти абсолютну та відносну похибки після заокруглення до чотирьох значущих цифр числа  $73,568$ .
8. Знайти абсолютну та відносну похибки після заокруглення до чотирьох значущих цифр числа  $2031,51$ .
9. Визначити правильні значущі цифри числа  $37,153$ , якщо його відносна похибка  $10\%$ .
10. Визначити правильні значущі цифри в числі  $2,9372$ , якщо його відносна похибка  $0,1\%$ .
11. Визначити правильні значущі цифри в числі  $28710$ , якщо його відносна похибка  $1\%$ .
12. Визначити правильні значущі цифри в числі  $826,3$ , якщо його відносна похибка  $0,05\%$ .
13. З якою кількістю правильних значущих цифр необхідно взяти число  $e$  (основа натурального логарифму), щоб похибка не перевищувала  $0,05\%$ ?
14. З якою кількістю правильних значущих цифр необхідно взяти універсальну газову сталу  $R$ , щоб похибка не перевищувала  $0,1\%$ ?
15. Якою буде похибка, якщо число  $g$  (прискорення вільного падіння) наблизити числом  $9,81$ ?
16. Якою буде похибка, якщо швидкість світла  $c$  наблизити

числом  $3 \times 10^8$ ?

**17.** Визначити, яка рівність точніша:  $6/7 = 0,857$  або  $\sqrt{4,8} = 2,19$ .

**18.** Визначити, яка рівність точніша:  $17/19 = 0,895$  або  $\sqrt{52} = 7,21$ .

**19.** Визначити, яка рівність точніша:  $49/13 = 3,77$  або  $\sqrt{14} = 3,74$ .

**20.** Визначити, яка рівність точніша:  $2/9 = 0,22$  або  $\sqrt{0,05} = 0,22$ .

**21.** Знайти похибки при наближеному обчисленні функції  $f(x, y, z) = \frac{x + y^2}{z}$ , якщо  $x = 3,15$ ,  $y = 0,831$ ,  $z = 1,123$  і всі значущі цифри вхідних даних є правильними.

**22.** Знайти похибки при наближеному обчисленні функції  $f(x, y, z) = \frac{\sqrt{x} + y}{z^2}$ , якщо  $x = 4 \pm 0,1$ ,  $y = 3 \pm 0,05$ ,  $z = 1 \pm 0,08$ .

**23.** Знайти похибки при наближеному обчисленні функції  $f(x, y) = \ln x + y^2$ , якщо  $x = 0,925$ ,  $y = 1,123$  і відомо, що аргументи мають дві правильні цифри.

**24.** Знайти похибки при наближеному обчисленні функції  $f(x, y, z) = \ln \frac{xy}{z}$ , якщо  $x = 2,34 \pm 0,02$ ,  $y = 1,25 \pm 0,02$ ,  $z = 3,05 \pm 0,02$ .

**25.** При знаходженні найменшого кореня квадратного рівняння  $x^2 - 140x + 1 = 0$  можна використати одну з формул:  $x = 70 - \sqrt{4899}$  або  $x = \frac{1}{70 + \sqrt{4899}}$ . Яка з формул дає більш точний результат і на скільки, якщо при обчисленні використовувати 4 значущі цифри після коми?

**26.** З якою кількістю правильних значущих цифр потрібно взяти  $\sqrt{3,02}$  та  $\sqrt{3}$ , щоб обчислити  $\sqrt{3,02} - \sqrt{3}$  з трьома правильними значущими цифрами?

**27.** У п'ятизначних логарифмічних таблицях наведено значення логарифмів із точністю до  $\varepsilon = 0,5 \times 10^{-6}$ . Оцінити можливу похибку в разі визначення числа за його логарифмом, якщо саме число лежить у межах між 300 та 400.

**28.** Відомо, що гіперболічний синус та гіперболічний ко-



синус числа 3 можна записати:  $\operatorname{ch} 3 = \frac{e^3 + e^{-3}}{2} \approx 10,067$ ,  
 $\operatorname{sh} 3 = \frac{e^3 - e^{-3}}{2} \approx 10,018$ , де всі цифри правильні. Оцінити похибки при визначенні  $e^{-3}$  через гіперболічні синус та косинус:  $e^{-3} = \frac{1}{\operatorname{ch} 3 + \operatorname{sh} 3}$ .

**29.** Знайти абсолютну похибку визначення кута  $60^\circ$  за п'ятизначними таблицями синусів (в таблицях наведені синуси з 5 правильними значущими цифрами).

**30.** З якою точністю необхідно обчислити  $\sin \frac{\pi}{8}$ , щоб відносна похибка обчислення коренів рівняння  $x^2 - 2x + \sin \frac{\pi}{8} = 0$  не перевищувала  $10^{-3}$ ?

**31.** Корені рівняння  $x^2 - 2 \operatorname{tg} 2 \cdot x + e = 0$  необхідно обчислити з трьома правильними цифрами. Скільки правильних значущих цифр треба взяти для  $\operatorname{tg} 2$  і  $e$ ?

**32.** Яка відносна похибка обчислення площі сектора кола радіусом  $R = 21,53 \pm 0,005$  см, кута  $\alpha = 137^\circ(25 \pm 1)'$ , якщо число  $\pi$  взято з чотирма правильними знаками? Обчислити цю площу.

**33.** Катет прямокутного трикутника дорівнює  $a = 21,12 \pm 0,01$  см, а його гіпотенуза  $c = 37,51 \pm 0,01$  см. Обчислити синус кута, протилежного до катета  $a$  та оцінити похибки результату.

**34.** Чому дорівнює відносна похибка в разі обчислення об'єму правильної чотирикутної піраміди, якщо висота піраміди виміряна з точністю 0,5%, а сторона основи дорівнює  $25 \text{ см} \pm 1 \text{ см}$ ?

**35.** З якою відносною похибкою необхідно виміряти сторони паралелограма, який лежить в основі піраміди, та висоту піраміди, щоб похибка обчислення об'єму піраміди не перевищувала 5%, якщо похибка значення синуса кута між сторонами паралелограма не перевищує 0,5%?