

Математичний практикум для курсу лінійної алгебри, ІІ семестр

January 2026

Тут має бути зібрано задачі математичного практикуму з лінійної алгебри для студентів-інформатиків, що навчаються на І курсі, у 2 семестрі.

Задачі з програмування (комп'ютерний практикум) до курсу зібрано в окремих colab-блокнотах.

ЛА-МП-1. Матриці

1.1. Обчисліть лінійну комбінацію векторів $5a - 3b + 2c$, якщо $a = (1, -1, 0)$, $b = (3, 5, -1)$, $c = (2, 2, 3)$.

1.2. Знайдіть α, β , якщо $a = (\alpha, 3)$, $b = (\beta, \alpha)$ і $2a - b = (2, 4)$.

1.3. Розв'яжіть систему матричних рівнянь

$$1) \begin{cases} X + Y = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}; \\ 2X + 3Y = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \end{cases} \quad 2) \begin{cases} 2X - Y = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}; \\ X + 3Y = \begin{pmatrix} 7 & 4 \\ -4 & 0 \end{pmatrix}. \end{cases}$$

1.4. Дайте відповіді на запитання:

1. Скільки існує квадратних матриць порядку n , таких, що в кожному рядку і кожному стовпчику міститься рівно одна одиниця, а всі інші – нулі?

2. Скільки існує діагональних матриць порядку n над полем \mathbb{Z}_p ?

3. Чи обов'язково сума двох верхньотрикутних матриць є верхньотрикутною матрицею?

4. У якому випадку сума верхньотрикутної та нижньотрикутної матриці є діагональною матрицею?

5. Скільки існує матриць порядку n над полем \mathbb{Z}_2 : 1) усього; 2) симетричних; 3) верхньотрикутних; 4) скалярних; 5) діагональних?

1.5. Потренуйтесь множити матриці:

$$\begin{array}{ll} 1) \begin{pmatrix} 3 & -2 \\ 5 & -4 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 3 & 4 \\ 2 & 5 \end{pmatrix}; & 3) \begin{pmatrix} 1 & -2 \\ 3 & -4 \end{pmatrix}^3; \\ 2) \begin{pmatrix} 1 & -3 & 2 \\ 3 & -4 & 1 \\ 2 & -5 & 3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 2 & 5 & 6 \\ 1 & 2 & 5 \\ 1 & 3 & 2 \end{pmatrix}; & 4) \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^3. \end{array}$$

1.6. Обчисліть значення многочлена $f(x) = x^3 - 3x + 2$ від матриці A , тобто обчисліть значення виразу $f(A) = A^3 - 3A + 2I$.

$$1) A = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{pmatrix}; \quad 2) A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

1.7. Нехай $a = (1, 2)$, $b = (3, 4)$.

1) запишіть лінійну комбінацію векторів $2a - 3b$ як добуток матриці на вектор, обчисліть цю лінійну комбінацію двома способами.

2) зробіть те саме для лінійної комбінації векторів $3a - b$.

1.8. Виконайте множення матриць “стовпчиками”.

$$1) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}; \quad 2) \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

1.9. Виконайте множення матриць “рядками”.

$$1) (1 \ 2 \ 3) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad 2) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{pmatrix}.$$

1.10. Знайдіть добуток матриць чотирма способами. Який найзручніший?

$$1) \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 3 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 5 & -2 \\ -4 & 3 \end{pmatrix};$$

$$2) \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 3 & 1 \end{pmatrix};$$

$$3) \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & -4 & -3 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix};$$

$$4) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}.$$

1.11. Доведіть, що коли стовпчик $n \times 1$ помножити на рядок $1 \times m$, то усі стовпці отриманої матриці будуть пропорційні між собою, а також усі рядки будуть пропорційні.

1.12. Виконайте дії для матриць $A = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}$, $B = \begin{pmatrix} 3 & 2 \\ 0 & -4 \end{pmatrix}$, $C = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$.

$$1) (A + B)^t - 2C;$$

$$2) 2A - B + C^t;$$

$$3) \frac{1}{2}(A + B - C);$$

$$4) C^t BC;$$

$$5) -A^3 + 3A + I;$$

$$6) B^2 + C^2.$$

1.13. Виконайте дії для матриць над полем \mathbb{Z}_2 :

$$1) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$2) \left(\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}^2 + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}^3 \right)$$

1.14. Як зміниться добуток матриць AB , якщо

- 1) переставити i -ті та j -ті рядки матриці A ;
- 2) до i -го рядка матриці A додати j -ий рядок;
- 3) переставити i -ті та j -ті стовпці матриці B ;
- 4) від i -го стовпчика матриці B відняти j -ий стовпчик?

1.15. Нехай A – матриця 2×2 .

1) на яку матрицю P треба помножити A , щоб у добутку PA рядки матриці A помінялися місцями;

2) на яку матрицю P треба помножити A , щоб у добутку AP стовпчики матриці A помінялися місцями?

1.16. На яку матрицю (і з якого боку) треба помножити матрицю A , щоб отримати

- 1) її перший рядок;
- 2) її перший стовпчик?

1.17. Знайдіть усі матриці, які переставні (комутують) з матрицею

$$1) \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix};$$

$$2) \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

1.18. Обчисліть в залежності від n :

$$1) \begin{pmatrix} \lambda & 1 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix}^n;$$

$$2) \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}^n;$$

1.19. Знайдіть усі степені квадратної матриці

$$H = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ & & \dots & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

1.20. Нехай A – довільна квадратна матриця. Доведіть, що

- 1) $A + A^t$, AA^t є симетричними матрицями;
- 2) $A - A^t$ є кососиметричною матрицею.

1.21. Доведіть, що кожну матрицю порядку 2 можна подати у вигляді суми симетричної і кососиметричної матриці. Чи можна узагальнити цей результат на матриці довільного порядку.

1.22. Доведіть, що коли матриця D діагональна, то для будь-якого многочлена $f(x)$, значення $f(D)$ також є діагональною матрицею.

1.23. Доведіть, що сума і добуток верхньотрикутних матриць також є верхньотрикутними.

1.24. Доведіть, що коли A – кососиметрична матриця, то степінь A^k є кососиметричною матрицею у випадку непарного k і симетричною матрицею, якщо k – парне.

1.25. Слід матриці. Слідом (trace) матриці $A = (a_{ij})$ називається сума її діагональних елементів $TrA = \sum_i a_{ii}$. Доведіть, що (у випадку коли має сенс про це говорити)

- 1) $Tr(A + B) = TrA + TrB$;
- 2) $Tr(AB) = Tr(BA)$.

1.26. Матричний члендж. Наведіть приклади таких матриць A, B, C, D, E, F порядку 2 з дійсними елементами, що

- 1) $A^2 = -I$;
- 2) $B^2 = O$, хоча $B \neq O$;
- 3) $CD = -DC$, при цьому $CD \neq O$;
- 4) $EF = O$, при цьому жодна з матриць E, F не має нульових елементів.

1.27. Матричні одиниці та скалярні матриці

Матричними одиницями називають матриці E_{ij} , в яких елемент з індексами (i, j) дорівнює 1, а всі інші – нулі.

1. Доведіть, що $E_{ij}E_{pq} = \begin{cases} E_{iq}, & j = p; \\ O, & \text{інакше.} \end{cases}$
2. Чому дорівнює добуток AE_{ij} для довільної матриці A ? А добуток $E_{ij}A$?
3. Нехай A – квадратна матриця і $AE_{ii} = E_{ii}A$ для всіх i . Доведіть, що A – діагональна.
4. Доведіть, що коли матриця переставна (комутує) з усіма матрицями того ж порядку, то вона є скалярною. Вказівка: розгляньте добутки матриці з матричними одиницями.

1.28. Обертовність трикутника. Нехай A – обертовна верхньотрикутна матриця порядку 2. Чи обов'язково A^{-1} також верхньотрикутна?

1.29. Добутки і симетрія. Доведіть, що

1. Добуток AB двох симетричних матриць A, B є симетричною матрицею тоді й лише тоді, коли ці матриці переставні (тобто $AB = BA$).
2. Добуток AB двох кососиметричних матриць A, B є симетричною матрицею тоді й лише тоді, коли $AB = -BA$.

1.30. Стовпчик на рядок. Нехай u, v – вектори стовпчики однакової довжини і $H = uv^t$. Доведіть, що $H^2 = \lambda H$ для деякого λ .

ЛА-МП-2. Системи лінійних рівнянь

2.1. Розв'яжіть системи методом Гаусса виключення змінних

$$1) \begin{cases} x_1 + x_2 + 2x_3 = -1; \\ 2x_1 - x_2 + 2x_3 = -4; \\ 4x_1 + x_2 + 4x_3 = -2. \end{cases}$$

$$2) \begin{cases} 3x_1 + 2x_2 + 2x_3 = 5; \\ 2x_1 + 3x_2 + x_3 = 1; \\ 2x_1 + x_2 + 3x_3 = 11. \end{cases}$$

$$3) \begin{cases} x_1 + 2x_2 + 3x_3 - 2x_4 = 6; \\ 2x_1 - x_2 - 2x_3 - 3x_4 = 8; \\ 3x_1 + 2x_2 - x_3 + 2x_4 = 4; \\ 2x_1 - 3x_2 + 2x_3 + x_4 = -8. \end{cases}$$

$$4) \begin{cases} 2x_1 + 5x_2 + 4x_3 + x_4 = 20; \\ x_1 + 3x_2 + 2x_3 + x_4 = 11; \\ 2x_1 + 10x_2 + 9x_3 + 7x_4 = 40; \\ 3x_1 + 8x_2 + 9x_3 + 2x_4 = 37. \end{cases}$$

2.2. Розв'яжіть системи над скінченим полем

$$1) \begin{cases} 2x_1 + x_2 - x_3 = 1; \\ x_1 + 2x_2 + x_3 = 2; \\ -x_1 + x_2 - x_3 = -1 \end{cases} \quad \mathbb{Z}_5;$$

$$3) \begin{cases} x_1 + x_2 + x_3 = 1; \\ x_1 + x_3 = 1; \\ x_2 + x_3 = 1 \end{cases} \quad \mathbb{Z}_2;$$

$$2) \begin{cases} 3x_1 + 2x_2 + 5x_3 = 1; \\ 2x_1 + 5x_2 + 3x_3 = 3; \\ 5x_1 + 3x_2 + 2x_3 = 4. \end{cases} \quad \mathbb{Z}_{17};$$

$$4) \begin{cases} x_2 + x_3 = 0; \\ x_1 + x_3 = 1; \\ x_1 + x_2 = 0. \end{cases} \quad \mathbb{Z}_2.$$

2.3. Розв'яжіть системи, задані матрицями (розширеними матрицями)

$$1) \begin{pmatrix} 1 & 3 & 2 \\ 2 & -1 & 3 \\ 3 & -5 & 4 \\ 1 & 17 & 4 \end{pmatrix};$$

$$2) \begin{pmatrix} 3 & 5 & 2 \\ 4 & 7 & 5 \\ 1 & 1 & -4 \\ 2 & 9 & 6 \end{pmatrix};$$

$$3) \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 2 & -2 & 3 \\ 1 & 1 & 4 & 4 & 9 \\ 1 & -1 & 8 & -8 & 27 \\ 1 & 1 & 16 & 16 & 81 \end{pmatrix};$$

$$4) \begin{pmatrix} 3 & 4 & -5 & 7 \\ 2 & -3 & 3 & -2 \\ 4 & 11 & -13 & 16 \\ 7 & -2 & 1 & 3 \end{pmatrix};$$

$$5) \begin{pmatrix} 1 & 3 & 3 & 2 & 6 \\ 1 & -1 & -2 & 0 & -3 \\ 1 & 11 & 7 & 6 & 18 \end{pmatrix};$$

$$6) \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & -3 & -1 \\ 2 & 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 3 \\ 1 & 2 & -3 & 1 \end{array} \right)$$

$$7) \left(\begin{array}{ccc|c} 2 & -1 & 3 & 3 \\ 3 & 1 & -5 & 0 \\ 4 & -1 & 1 & 3 \\ 1 & 3 & -13 & -6 \end{array} \right);$$

$$8) \left(\begin{array}{cccc|c} 1 & -2 & 3 & -4 & 4 \\ 0 & 1 & -1 & 1 & -3 \\ 1 & 3 & 0 & -3 & 1 \\ 0 & -7 & 3 & 1 & -3 \end{array} \right);$$

$$9) \left(\begin{array}{cccc|c} 2 & 7 & 3 & 1 & 5 \\ 1 & 3 & 5 & -2 & 3 \\ 1 & 5 & -9 & 8 & 1 \\ 5 & 18 & 4 & 5 & 12 \end{array} \right);$$

$$10) \left(\begin{array}{cccc|c} -1 & -5 & -4 & -3 & -5 \\ 2 & -1 & 2 & -1 & -2 \\ 5 & 3 & 8 & 1 & 1 \end{array} \right).$$

2.4. Дослідіть систему, задану матрицею, знайдіть загальний розв'язок в залежності від параметра λ .

$$1) \begin{pmatrix} 5 & -3 & 2 & 4 & | & 3 \\ 4 & -2 & 3 & 7 & | & 1 \\ 8 & -6 & -1 & -5 & | & 9 \\ 7 & -3 & 7 & 17 & | & \lambda \end{pmatrix};$$

$$2) \begin{pmatrix} 3 & 2 & 5 & 4 & | & 3 \\ 2 & 3 & 6 & 8 & | & 5 \\ 1 & -6 & -9 & -20 & | & -11 \\ 4 & 1 & 4 & \lambda & | & 2 \end{pmatrix};$$

$$3) \begin{pmatrix} 2 & 5 & 1 & 3 & | & 2 \\ 4 & 6 & 3 & 5 & | & 4 \\ 4 & 14 & 1 & 7 & | & 4 \\ 2 & -3 & 3 & \lambda & | & 7 \end{pmatrix};$$

$$4) \begin{pmatrix} \lambda & 1 & 1 & | & 1 \\ 1 & \lambda & 1 & | & 1 \\ 1 & 1 & \lambda & | & 1 \end{pmatrix}.$$

2.5. Знайдіть LU -розклад матриці A і розв'яжіть системи $Ax = b$:

$$1) A = \begin{pmatrix} 4 & -5 & 6 \\ 8 & -6 & 7 \\ 12 & -7 & 12 \end{pmatrix}, b = \begin{pmatrix} 5 \\ 9 \\ 17 \end{pmatrix};$$

$$3) A = \begin{pmatrix} 2 & 2 & -1 & 1 \\ 4 & 3 & -1 & 2 \\ 8 & 5 & -3 & 4 \\ 3 & 3 & -2 & 2 \end{pmatrix}, b = \begin{pmatrix} 4 \\ 6 \\ 12 \\ 6 \end{pmatrix}.$$

$$2) A = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 4 \\ 2 & 0 & 3 \\ 5 & 8 & 2 \end{pmatrix}, b = \begin{pmatrix} 12 \\ 9 \\ 5 \end{pmatrix};$$

2.6. За допомогою елементарних перетворень знайдіть обернені для наведених матриць:

$$1) \begin{pmatrix} 2 & 5 & 7 \\ 6 & 3 & 4 \\ 5 & -2 & -3 \end{pmatrix};$$

$$3) \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix};$$

$$2) \begin{pmatrix} 1 & 2 & 2 \\ 2 & 1 & -2 \\ 2 & -2 & 1 \end{pmatrix};$$

$$4) \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{pmatrix}.$$

2.7. Дослідіть, у якому випадку матриця $\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$ має обернену. Випишіть загальний вигляд оберненої матриці для матриці другого порядку.

2.8. Розв'яжіть матричні рівняння

$$1) \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix} X = \begin{pmatrix} 3 & 5 \\ 5 & 9 \end{pmatrix}; \quad 3) \begin{pmatrix} 3 & -1 \\ 5 & -2 \end{pmatrix} \cdot X \cdot \begin{pmatrix} 5 & 6 \\ 7 & 8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 14 & 16 \\ 9 & 10 \end{pmatrix}.$$

$$2) \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} X = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}; \quad 4) X \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}.$$

2.9. Матричне рівняння $AX = B$ можна розв'язати, подавши його як систему кількох систем лінійних рівнянь, у яких невідомими є стовпці матриці X . При цьому ліві частини всіх систем будуть мати ту саму матрицю A , а значить, системи можна розв'язувати одночасно за допомогою тих самих елементарних перетворень рядків. Технічно це зводиться до того, що розглядають “широку” матрицю $(A | B)$ і ліву половину зводять до одиничної матриці. Якщо це вдається, то в правій половині виникне розв'язок, який до того ж дорівнює матриці $A^{-1}B$. Скориставшись зазначенним вище підходом, розв'яжіть матричне рівняння, якщо $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix}$, $B = \begin{pmatrix} 3 & 5 \\ 5 & 9 \end{pmatrix}$.

2.10. Усім, крім одного. Розв'яжіть системи рівнянь

$$1) \begin{cases} x_2 + x_3 + \dots + x_n = 0; \\ x_1 + x_3 + \dots + x_n = 1; \\ \dots \\ x_1 + x_2 + \dots + x_{n-1} = n-1. \end{cases}$$

$$2) \begin{cases} x_1 + x_2 + x_3 = 1; \\ x_1 + x_2 + x_4 = 1; \\ x_1 + x_3 + x_4 = 1; \\ x_2 + x_3 + x_4 = 1. \end{cases}$$

2.11. Многочлени. Складіть і розв'яжіть систему лінійних рівнянь для того, щоб знайти многочлен $f(x)$

- 1) другого степеня і такий, що $f(1) = -1$, $f(-1) = 9$, $f(2) = -3$;
- 2) третього степеня і такий, що $f(-2) = 1$, $f(-1) = 3$, $f(1) = 13$, $f(2) = 33$.

Що ви знаєте про задачу знаходження многочлена за його значеннями? Якою є загальна постановка задачі? Що ви знаєте про її розв'язок?

2.12. Як швидше? Нехай дано визначену систему n рівнянь із n невідомими (тобто ця система має єдиний розв'язок). Ми хочемо написати програму, яка реалізує виключення Гаусса. Будемо уявляти, що в ході реалізації програма виконує деяку кількість операцій вигляду "помножити-відняти". Наприклад, якщо ми виключаємо першу змінну з другого рівняння (або будь-якого іншого), потрібно помножити всі елементи першого рядка на відповідний множник і відняти їх з елементами другого рядка, тобто буде зроблено $n+1$ операцій "помножити-відняти". У якому зі способів виключення Гаусса – за один прохід або з прямим і зворотним ходом – програма виконає менше операцій "помножити-відняти"?

У задачах 2.13-2.15 ви можете використати програмні засоби розв'язання систем замість розв'язання власноруч, наприклад, ресурс <https://www.wolframalpha.com/>

2.13. Алгебра і геометрія. Чотири точки $A(1, -2, -1); B(4, 1, 11); C(-8, -2, 2); D(-5, 10, -1)$ належать сфері ω радіуса R з центром у точці $O(a, b, c)$. Рівняння сфери (раптом хто не знає): $(x - a)^2 + (y - b)^2 + (z - c)^2 = R^2$.

- 1) запишіть умови того, що точки A, B, C, D лежать на ω ;
- 2) з отриманих чотирьох умов зробіть три, віднявши з однієї умови три інші;
- 3) розв'яжіть отриману систему рівнянь – вона має бути лінійною;
- 4) розв'яжіть вихідну систему рівнянь і складіть рівняння сфери ω .

2.14. Різноманітні зустрічі. На деякій планеті мешкають істоти трьох кольорів: 13 червоних, 15 синіх та 17 зелених. Коли дві істоти різних кольорів зустрічаються, вони обидві змінюють свій колір на третій (наприклад, після зустрічі зелений та синій кольори змінюються на червоний). Чи можливо, що після кількох таких зустрічей всі істоти стануть одного кольору? На які кількості різноманітніх істот (в конкретному випадку вище маємо 13, 15, 17) ви можете узагальнити результат задачі?

2.15. Еврика! Подейкують, що винайшовши свій славетний закон, Архімед, який у цей момент перебував у ванні, вискочив з неї та побіг Сиракузами (містом, у якому жив), вигукуючи "Еврика" (у перекладі "знайшов"). У цій задачі вам доведеться скористатися законом Архімеда для знаходження пропорцій сплаву, з якого зроблено металеву кулю. Сам Архімед, до речі, винайшов закон, розв'язуючи задачу, поставлену царем Сиракуз Гіероном. Цар хотів довідатися, скільки золота в його короні, та чи не підманув його ювелір, що цю корону виготовляв.

Отже, металевий сплав, з якого виготовлено суцільну позолочену кулю, містить один або декілька з наступних металів: алюміній, мідь, срібло, свинець. Вага металевої кулі в повітрі становить 7588г, а якщо зважити її відповідно у воді, бензині, спирті та гліцерині, то 6588г, 6688г, 6778г, 6328г. Густину речовин наведено в таблиці.

| речовина | густини (g/cm^3) | речовина | густини (g/cm^3) |
|----------|----------------------|----------|----------------------|
| алюміній | 2.7 | вода | 1.0 |
| мідь | 8.9 | бензин | 0.9 |
| золото | 19.3 | спирт | 0.81 |
| свинець | 11.3 | гліцерин | 1.26 |
| срібло | 10.8 | | |

Визначте, яку частину кожного з металів (рахуючи їй золото на поверхні), містить металева куля. Чи є відповідь однозначною?

ЛА-МП-3. Визначники

3.1. Обчисліть визначники другого та третього порядків

$$1) \begin{vmatrix} 5 & 2 \\ 7 & 3 \end{vmatrix}$$

$$2) \begin{vmatrix} 6 & 9 \\ 8 & 12 \end{vmatrix}$$

$$3) \begin{vmatrix} a^2 & ab \\ ab & b^2 \end{vmatrix}$$

$$4) \begin{vmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{vmatrix}$$

$$5) \begin{vmatrix} 2 & 1 & 3 \\ 5 & 3 & 2 \\ 1 & 4 & 3 \end{vmatrix}$$

$$6) \begin{vmatrix} 4 & -3 & 5 \\ 3 & -2 & 8 \\ 1 & -7 & -5 \end{vmatrix}$$

$$7) \begin{vmatrix} a & b & c \\ b & c & a \\ c & a & b \end{vmatrix}$$

$$8) \begin{vmatrix} \sin \alpha & \cos \alpha & 1 \\ \sin \beta & \cos \beta & 1 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 1 \end{vmatrix}$$

3.2. Розв'яжіть системи за допомогою правил Крамера

$$1) \begin{cases} 2x_1 + 5x_2 = 1; \\ 3x_1 + 7x_2 = 2. \end{cases}$$

$$2) \begin{cases} 4x_1 + 7x_2 + 13 = 0; \\ 5x_1 + 8x_2 + 14 = 0. \end{cases}$$

$$3) \begin{cases} 2x_1 + 3x_2 + 5x_3 = 10; \\ 3x_1 + 7x_2 + 4x_3 = 3; \\ x_1 + 2x_2 + 2x_3 = 3. \end{cases}$$

$$4) \begin{cases} 5x_1 - 6x_2 + 4x_3 = 3; \\ 3x_1 - 3x_2 + 2x_3 = 2; \\ 4x_1 - 5x_2 + 2x_3 = 1. \end{cases}$$

3.3. З яким знаком входить до визначника порядку n

1) добуток елементів головної діагоналі; 2) добуток елементів побічної діагоналі.

3.4. Визначник є многочленом. Знайдіть коефіцієнти цього многочлена при x^3 , при x^4 .

$$1) \begin{vmatrix} 5x & 1 & 2 & 3 \\ x & x & 1 & 2 \\ 1 & 2 & x & 3 \\ x & 1 & 2 & 2x \end{vmatrix};$$

$$2) \begin{vmatrix} -3 & 2 & x & -3x \\ 4 & 5 & -x & 2 \\ 3 & -2x & 4x & 1 \\ x & -3 & 6 & 1 \end{vmatrix}.$$

3.5. Матрицею підстановки $\sigma \in S_n$ називається $P_\sigma = (p_{ij})$ – квадратна матриця порядку n ,

така що $p_{ij} = \begin{cases} 1, & \sigma(j) = i; \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases}$. Доведіть, що для довільних $\sigma, \tau \in S_n$ виконується $P_{\sigma\tau} = P_\sigma P_\tau$.

3.6. Обчисліть такі визначники за означенням. Подумайте, яким із трьох підходів до означення визначника зручніше користуватися.

$$1) \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 4 & 1 & 2 & 3 \\ 3 & -1 & 3 & -1 \\ 1 & 2 & 3 & 3 \end{vmatrix};$$

$$3) \begin{vmatrix} 5 & 0 & 3 & 2 \\ 6 & 0 & 1 & 1 \\ 4 & 0 & 3 & 2 \\ 7 & 0 & 5 & 1 \end{vmatrix};$$

$$2) \begin{vmatrix} 1 & 1 & 2 & 1 \\ 0 & 2 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix};$$

$$4) \begin{vmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{vmatrix}.$$

3.7. Як зміниться визначник, якщо

- 1) до кожного рядка, крім останнього, додати наступний рядок;
- 2) його рядки записати у зворотному порядку;
- 3) перший стовпець переставити на останнє місце, а решту пересунути вліво, не змінюючи їх розташування;
- 4) його матрицю повернути на 90° навколо центру?

3.8. Обчисліть визначники, зводячи їх до трикутного вигляду.

$$1) \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 3 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 4 \end{vmatrix};$$

$$2) \begin{vmatrix} 2 & -5 & 1 & 2 \\ -3 & 7 & -1 & 4 \\ 5 & -9 & 2 & 7 \\ 4 & -6 & 1 & 2 \end{vmatrix};$$

3.9. Обчисліть визначники, розкладаючи їх за рядком (стовпчиком).

$$1) \begin{vmatrix} 5 & 1 & 2 & 7 \\ 3 & 0 & 0 & 2 \\ 1 & 3 & 4 & 5 \\ 2 & 0 & 0 & 3 \end{vmatrix};$$

$$2) \begin{vmatrix} 2 & 0 & 3 & 0 \\ 3 & 0 & -1 & b \\ 1 & a & 3 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 0 \end{vmatrix}.$$

3.10. Обчисліть визначники, знижуючи їх порядок.

$$1) \begin{vmatrix} 3 & -3 & -5 & 8 \\ -3 & 2 & 4 & -6 \\ 2 & -5 & -7 & 5 \\ -4 & 3 & 5 & -6 \end{vmatrix};$$

$$4) \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 2 & 3 & 7 & 10 & 13 \\ 3 & 5 & 11 & 16 & 21 \\ 2 & -7 & 7 & 7 & 2 \\ 1 & 4 & 5 & 3 & 10 \end{vmatrix}.$$

$$2) \begin{vmatrix} 7 & 6 & 3 & 7 \\ 3 & 5 & 7 & 2 \\ 5 & 4 & 3 & 5 \\ 5 & 6 & 5 & 4 \end{vmatrix};$$

$$5) \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 \end{vmatrix};$$

$$3) \begin{vmatrix} 2 & -3 & 4 & 2 \\ 3 & -2 & -1 & 4 \\ 4 & -2 & 3 & 5 \\ 5 & -3 & 2 & 3 \end{vmatrix};$$

$$6) \begin{vmatrix} 2 & -3 & 1 & -4 \\ 1 & -1 & -1 & 3 \\ 2 & -2 & 2 & 1 \\ 2 & -1 & 3 & -1 \end{vmatrix}$$

3.11. Обчисліть визначники, використовуючи визначник Вандермонда

$$1) \begin{vmatrix} 2 & 5 & -3 & 4 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 4 & 25 & 9 & 16 \\ 8 & 125 & -27 & 64 \end{vmatrix};$$

$$3) \begin{vmatrix} 1 & 2 & n \\ 1 & 2^3 & n^3 \\ 1 & 2^5 & n^5 \\ & \dots & \\ 1 & 2^{2n-3} & n^{2n-3} \\ 1 & 2^{2n-1} & n^{2n-1} \end{vmatrix};$$

$$2) \begin{vmatrix} 216 & 27 & 64 & 8 \\ 36 & 9 & 16 & 4 \\ 6 & 3 & 4 & 2 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix};$$

$$4) \begin{vmatrix} a^n & (a-1)^n & (a-n)^n \\ a^{n-1} & (a-1)^{n-1} & (a-n)^{n-1} \\ & \dots & \\ a & a-1 & a-n \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

3.12. Знайдіть обернені матриці для наступних матриць, побудувавши їх приєднані:

$$1) \begin{pmatrix} 5 & 2 \\ 7 & 3 \end{pmatrix};$$

$$2) \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix};$$

$$3) \begin{pmatrix} 2 & 1 & 3 \\ 5 & 3 & 2 \\ 1 & 4 & 3 \end{pmatrix};$$

$$4) \begin{pmatrix} 4 & -3 & 5 \\ 3 & -2 & 8 \\ 1 & -7 & -5 \end{pmatrix}.$$

3.13. Якого найбільшого значення може набути визначник третього порядку, елементами якого є 0 і 1?

3.14. Доведіть, що коли всі елементи визначника третього порядку дорівнюють ± 1 , то визначник є парним числом.

3.15. Визначник ортогональної матриці. Матриця Q називається ортогональною, якщо $Q^t Q = I$. Чому може дорівнювати визначник ортогональної матриці?

3.16. Віднімання одиниці. Відомо, що сума елементів кожного рядка матриці A дорівнює

1. Доведіть, що $\det(A - I) = 0$. Чи вірно, що $\det A = 1$?

ЛА-МП-4. Лінійні простори

4.1. З'ясуйте, чи є лінійно незалежними системи векторів у вказаних просторах.

- 1) $a_1 = (5, 2, -3)$, $a_2 = (4, 1, -2)$, $a_3 = (1, 1, -1)$ в \mathbb{R}^3 ;
- 2) $a_1 = (2, -3, 1)$, $a_2 = (3, -1, 5)$, $a_3 = (1, -4, 3)$ в \mathbb{R}^3 ;
- 3) $p_1(t) = 5t^2 - 4t + 3$, $p_2(t) = 3t^2 + 3t + 2$, $p_3(t) = 8t^2 + t + 3$ в $\mathbb{R}[t]$;

4.2. При яких λ вектор $b = (7, -2, \lambda)$ є лінійною комбінацією векторів $a_1 = (2, 3, 5)$, $a_2 = (3, 7, 8)$, $a_3 = (1, -6, 1)$?

4.3. Доведіть, що коли вектори a_1, a_2, a_3 є лінійно залежними і вектор a_3 не виражається лінійно через вектори a_1, a_2 , то a_1 і a_2 відрізняються лише скалярним множником.

4.4. Доведіть, що коли вектори a_1, a_2, \dots, a_n є лінійно незалежними, а вектори a_1, a_2, \dots, a_n, b – лінійно залежні, то вектор b лінійно виражається через a_1, a_2, \dots, a_n .

4.5. Доведіть, що вектори e_1, e_2, e_3 утворюють базис та знайдіть координати вектора x у цьому базисі.

- 1) $e_1 = (1, 1, 1)$, $e_2 = (1, 1, 2)$, $e_3 = (1, 2, 3)$, $x = (6, 9, 14)$;
- 2) $e_1 = (-1, 3, 5)$, $e_2 = (6, 3, 2)$, $e_3 = (3, 1, 0)$, $x = (6, 0, 1)$.

4.6. Розкладіть за базисом a_1, a_2, a_3 вектор x .

- 1) $a_1 = (1, 1, 0, 1)$, $a_2 = (1, 0, 1, 1)$, $a_3 = (1, 0, 0, 0)$, $a_4 = (0, 1, 0, 1)$; $x = (1, 1, 1, 1)$ у просторі \mathbb{Z}_2^4 .
- 2) $a_1 = (0, 1, 1)$, $a_2 = (1, 1, 1)$, $a_3 = (0, 0, 1)$; $x = (1, 0, 1)$ у просторі \mathbb{Z}_2^3 .
- 3) $a_1 = (1, 2, 0)$, $a_2 = (3, 4, 1)$, $a_3 = (2, 1, 3)$; $x = (1, 1, 1)$ у просторі \mathbb{Z}_5^3 .
- 4) $a_1 = (1, 1, 2)$, $a_2 = (1, 3, 1)$, $a_3 = (3, 1, 4)$; $x = (1, 2, 1)$ у просторі \mathbb{Z}_5^3 .

4.7. Знайдіть матрицю переходу від базису e_1, e_2 до базису f_1, f_2 та зв'язок координат вектора в цих базисах.

- 1) $e_1 = (1, 1)$, $e_2 = (0, 1)$, $f_1 = (2, 3)$, $f_2 = (3, 2)$;
- 2) $e_1 = (1, 0)$, $e_2 = (0, 1)$, $f_1 = (2, 3)$, $f_2 = (3, 2)$;
- 3) $e_1 = (3, 5)$, $e_2 = (1, 2)$, $f_1 = (1, 0)$, $f_2 = (1, 1)$.

4.8. Як зміниться матриця переходу від одного базису до іншого, якщо 1) поміняти місцями i -ий та j -ий вектори першого базису;

- 2) поміняти місцями i -ий та j -ий вектори другого базису;
- 3) записати вектори обох базисів у зворотному порядку.

4.9. Як пов'язані між собою базиси Δ і Δ' простору V , якщо матриця переходу від Δ до Δ' верхньотрикутна?

- 4.10.** Дайте відповіді на запитання
1. Яка максимальна кількість векторів може бути в лінійно-незалежній системі в n -мірному просторі?
 2. Якщо у просторі задано систему лінійно незалежних векторів, то чи можна доповнити її до базису простору?
 3. Чи може система векторів бути лінійно незалежною над одним полем та лінійно залежною над іншим?

4.11. Встановіть ізоморфізм лінійних просторів

- 1) $\mathbb{F}_n[x]$ і \mathbb{F}^{n+1} ;
- 2) $V = \{x = (x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^3 \mid x_3 = x_1 + x_2\}$ і \mathbb{R}^2 ;
- 3) \mathbb{C} (як лінійний простір над \mathbb{R}) і \mathbb{R}^2 ;

4.12. Знайдіть ранг матриць методом облямкових мінорів

$$1) \begin{pmatrix} 2 & -1 & 3 & -2 & 4 \\ 4 & -2 & 5 & 1 & 7 \\ 2 & -1 & 1 & 8 & 2 \end{pmatrix}; \quad 2) \begin{pmatrix} 1 & 3 & 5 & -1 \\ 2 & -1 & -3 & 4 \\ 5 & 1 & -1 & 7 \\ 7 & 7 & 9 & 1 \end{pmatrix}.$$

4.13. Знайдіть ранг матриць за допомогою зведення до ступінчастої форми

$$1) \begin{pmatrix} 8 & 2 & 2 & -1 & 1 \\ 1 & 7 & 4 & -2 & 5 \\ -2 & 4 & 2 & -1 & 3 \end{pmatrix};$$

3) див. матриці з попередньої задачі.

$$2) \begin{pmatrix} 1 & 7 & 7 & 9 \\ 7 & 5 & 1 & -1 \\ 4 & 2 & -1 & -3 \\ -1 & 1 & 3 & 5 \end{pmatrix};$$

4.14. З'ясуйте, чому дорівнює ранг матриці в залежності від параметра λ

$$1) \begin{pmatrix} 3 & 1 & 1 & 4 \\ \lambda & 4 & 10 & 1 \\ 1 & 7 & 17 & 3 \\ 2 & 2 & 4 & 3 \end{pmatrix};$$

$$2) \begin{pmatrix} 1 & \lambda & -1 & 2 \\ 2 & -1 & \lambda & 5 \\ 1 & 10 & -6 & 1 \end{pmatrix}.$$

4.15. Знайдіть ранг матриці з елементами з поля \mathbb{Z}_3

$$1) \begin{pmatrix} 0 & 2 & 1 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & 1 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 2 & 1 \end{pmatrix};$$

$$2) \begin{pmatrix} 1 & 2 & 2 & 1 & 0 \\ 2 & 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & 0 & 2 & 1 \end{pmatrix};$$

4.16. Знайдіть розмірність лінійної оболонки векторів і якийсь базис

1) $a_1 = (0, 2, -1)$, $a_2 = (3, 7, 1)$, $a_3 = (2, 0, 3)$, $a_4 = (5, 1, 8)$.

2) $a_1 = (1, 2, 1)$, $a_2 = (2, 4, 2)$, $a_3 = (2, 2, 6)$, $a_4 = (1, 4, 5)$.

4.17. Перевірте, що множина векторів є лінійним підпростором \mathbb{R}^n і знайдіть його базис і розмірність.

1) вектори, у яких перша координата збігається з останньою;

2) вектори, у яких сума координат дорівнює 0;

3) вектори, у яких остання координата нульова;

4) вектори, у яких остання координата дорівнює сумі інших.

Зверніть увагу на *лінійність* умов

4.18. Перевірте, що множина матриць утворює лінійний підпростір у просторі квадратних матриць порядку n з дійсними коефіцієнтами і знайдіть його базис і розмірність.

1) верхньотрикутні матриці;

2) симетричні матриці;

3) кососиметричні матриці;

4) діагональні матриці;

5) скалярні матриці.

4.19. Знайдіть суму та перетин підпросторів, які задано як лінійні оболонки векторів a_1, a_2, \dots, a_k і b_1, b_2, \dots, b_m відповідно.

1) $a_1 = (1, 2, 1)$, $a_2 = (1, 1, -1)$, $a_3 = (1, 3, 3)$; $b_1 = (2, 3, -1)$, $b_2 = (1, 2, 2)$, $b_3 = (1, 1, -3)$;

2) $a_1 = (1, 2, 1, -2)$, $a_2 = (2, 3, 1, 0)$, $a_3 = (1, 2, 2, -3)$; $b_1 = (1, 1, 1, 1)$, $b_2 = (1, 0, 1, -1)$, $b_3 = (1, 3, 0, -4)$.

4.20. Перевірте, що простір \mathbb{R}^n є прямою сумою підпросторів: L_1 , заданого рівнянням $x_1 + x_2 + \dots + x_n = 0$ та L_2 , заданого системою рівнянь $x_1 = x_2 = \dots = x_n$. Знайдіть проекції одиничних векторів на ці підпростори.

4.21. Перевірте, що простір усіх квадратних матриць порядку n є прямою сумаю підпросторів симетричних та кососиметричних матриць. Знайдіть проекції матричних одиниць на ці підпростори.

4.22. Нехай U_1, U_2 – лінійні підпростори простору V , причому $\dim(U_1) + \dim(U_2) > \dim(V)$. Доведіть, що перетин U_1, U_2 не є порожнім.

4.23. Знайдіть базиси підпросторів \mathbb{R}^3 , заданих системами рівнянь

$$1) \begin{cases} 5x_1 + 3x_2 + 4x_3 = 0; \\ 6x_1 + 5x_2 + 2x_3 = 0. \end{cases}; \quad 2) x_1 = x_2 = x_3; \quad 3) \begin{cases} x_1 + x_2 + x_3 = 0; \\ 2x_1 - x_2 + 2x_3 = 0. \end{cases}$$

4.24. Знайдіть однорідні системи рівнянь, які задають лінійні оболонки $\text{Lin}(a_1, a_2, a_3)$ в \mathbb{R}^3 .

- 1) $a_1 = (1, 2, 1), a_2 = (1, 1, -1), a_3 = (1, 3, 3);$
- 2) $a_1 = (1, 1, 0), a_2 = (0, 1, -1), a_3 = (1, 2, -1).$

4.25. Знайдіть основні простори матриць

$$1) \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 2 & 3 & 4 \\ 1 & 2 & 2 \end{pmatrix};$$

$$2) \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

$$3) \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & -2 \\ 1 & 1 & 2 & 3 \\ -1 & 1 & 4 & 7 \end{pmatrix};$$

$$4) \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

4.26. Доведіть, що коли добуток двох матриць $AB = O$, то простір стовпців матриці B міститься в нуль-просторі матриці A .

4.27. Чи вірно, що для квадратної матриці A виконано $N(A) = N(A^t)$?

4.28. Скінченні лінійні простори. Нехай \mathbb{F} – скінченне поле з q елементів, а V – n -вимірний лінійний простір над полем \mathbb{F} . Знайдіть кількість

- 1) елементів V ;
- 2) базисів V ;
- 3) базисів у деякому фіксованому k -вимірному підпросторі $W < V$;
- 4) усіх k -вимірних підпросторів V .

4.29. Рівності й нерівності для рангів.

1. Доведіть, що

$$1) \text{rank} \begin{pmatrix} A & 0 \\ 0 & B \end{pmatrix} = \text{rank}A + \text{rank}B \quad (A, B – довільні матриці);$$

2) $\text{rank} \begin{pmatrix} A & X \\ 0 & B \end{pmatrix} \geq \text{rank}A + \text{rank}B$, якщо A, B, X – такі матриці, що X містить стільки ж рядків, скільки A , і стільки ж стовпців, скільки B .

2. Доведіть, що коли добуток матриць AB існує, то $\text{rank}(AB) \leq \min(\text{rank}A, \text{rank}B)$.

3. Доведіть, що коли матриці A, B мають однакові розміри, то $\text{rank}(A+B) \leq \text{rank}A + \text{rank}B$.

4. *Нерівність Сільвестра.* Якщо A, B – матриці порядку n , то $\text{rank}(AB) \geq \text{rank}A + \text{rank}B - n$.

4.30. Ранг і транспонування. Доведіть, що для довільної матриці A усі чотири матриці $A, A^t, A^t A, AA^t$ мають один і той самий ранг.

5.1. Виконайте такі дії для наведених векторів.

1. Зайдіть скалярний добуток двох векторів та кут між ними.
2. Знайдіть норму кожного вектора та нормуйте вектори.
- 1) $x = (2, 1, -1, 2); y = (3, -1, -2, 1);$
- 2) $x = (1, 2, 1, -1); y = (-2, 3, -5, -1).$

5.2. Перевірте, чи вектори наступної системи попарно ортогональні і доповніть їх до ортогонального базису. Нормуйте вектори так, щоб базис став ортонормованим. Знайдіть координати вектора $x = (1, 1, 1, 1)$ в отриманому базисі, знайшовши його проекції на базисні вектори за допомогою скалярного добутку.

- 1) $a_1 = (1, -2, 2, -3), a_2 = (2, -3, 2, 4);$
- 2) $a_1 = (1, 1, 1, -2), a_2 = (1, 2, 3, -3).$

5.3. Лінійний простір U задано системою рівнянь. Знайдіть базис ортогонального доповнення U^\perp та систему лінійних рівнянь, що задає U^\perp .

$$1) \begin{cases} 2x_1 + x_2 + 3x_3 - x_4 = 0, \\ 3x_1 + 2x_2 - 2x_4 = 0, \\ 3x_1 + x_2 + 9x_3 - x_4 = 0. \end{cases} \quad 2) \begin{cases} 2x_1 + x_2 + x_3 + 3x_4 = 0, \\ 3x_1 + 2x_2 + 2x_3 + x_4 = 0, \\ x_1 + 2x_2 + 2x_3 - 9x_4 = 0. \end{cases}$$

5.4. Для підпростору $U = \text{Lin}\{a_1, a_2, a_3\}$ побудуйте ортогональний базис за допомогою ортогоналізації Грама-Шмідта. Користуючись його результатами знайдіть також QR -розклад матриці A зі стовпцями a_1, a_2, a_3 .

- 1) $a_1 = (1, 2, 2, -1), a_2 = (1, 1, -5, 3), a_3 = (3, 2, 8, -7);$
- 2) $a_1 = (1, 1, -1, -2), a_2 = (5, 8, -2, -3), a_3 = (3, 9, 3, 8).$

5.5. Знайдіть проекцію p вектора x на пряму, що проходить через вектор a . Перевірте, що ортогональна складова $x - p$ ортогональна a .

- 1) $x = (1, 2, 2), a = (1, 1, 1);$
- 2) $x = (1, 3, 1), a = (1, -1, 0).$

5.6. Знайдіть матрицю ортогональної проекції P на підпростір U , натягнутий на вектори a_1, a_2 . Перевірте, що отримана матриця задовільняє властивості матриці ортогональної проекції: $P^2 = P^t = P$.

- 1) $a_1 = (1, 1, 0), a_2 = (0, 0, 1);$
- 2) $a_1 = (2, 2, 1), a_2 = (1, 0, 0).$

5.7. Знайдіть ортогональну проекцію p і ортогональну складову z вектора x на лінійний підпростір $U = \text{Lin}\{a_1, a_2, a_3\}$. Зробіть це двома способами: за допомогою матриці ортогональної проекції та за допомогою умов ортогональності базисним векторам підпростору.

- 1) $x = (4, -1, -3, 4); a_1 = (1, 1, 1, 1), a_2 = (1, 2, 2, -1), a_3 = (1, 0, 0, 3);$
- 2) $x = (5, 2, -2, 2); a_1 = (2, 1, 1, -1), a_2 = (1, 1, 3, 0), a_3 = (1, 2, 8, 1);$

5.8. Відстанню від точки, заданої вектором x до лінійного підпростору U називається мінімум відстаней від цієї точки до точок підпростору U , тобто мінімум норм векторів $x - u$, де $u \in U$. Доведіть, що ця відстань дорівнює довжині ортогональної складової вектора x на підпростір U . Знайдіть відстані від x до U в умовах попередньої задачі. Також знайдіть кут між вектором x і підпростором U , як кут між x та його ортогональною проекцією на U .

5.9. Перевірте, що основні підпростори матриці A , знайдені в задачі 4.23, розбиваються на пари взаємно ортогональних ($R(A) \perp N(A), C(A) \perp N(A^t)$)

5.10. Перевірте, що такі матриці ортогональні:

- 1) матриці перестановок (для перестановки $\sigma \in S_n$ її матриця $P_\sigma = (a_{ij})$ задається умовами: $a_{\sigma(i)i} = 1$, інші елементи рівні 0) ;

2)матриці Адамара порядку 2^k , $k \geq 0$, з нормуючим множником, які задаються рекурсивно: $H_1 = (1)$, $H_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$, $H_{2^{k+1}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} H_{2^k} & H_{2^k} \\ H_{2^k} & -H_{2^k} \end{pmatrix}$. Множник перед матрицею стоїть для нормування стовпців.

5.11. Модель лінійної регресії. У точках $x = (-1, 1, 2)$ виміряли величину y і отримали $y = (7, 7, 21)$. Ми побудуємо й дослідимо лінійну модель $\hat{y} = \theta_0 + \theta_1 x$ залежності y від x .

1. Намалюйте експериментальні точки на площині.
2. Підставивши значення x та y , отримайте систему $A\Theta = y$ ($\Theta = (\theta_0, \theta_1)$ – вектор невідомих параметрів моделі). Переконайтесь, що вона не має розв'язків.
3. Для того щоб знайти *найкращий* розв'язок системи $A\Theta = y$, спроектуйте вектор y на підпростір, натягнутий на стовпці A та отримайте вектори проекції p та помилки e : $y = p + e$. Переконайтесь, що p і e ортогональні. Переконайтесь, що проекція e (на той же підпростір) дорівнює 0.

4. Чому дорівнює вектор параметрів Θ ? Намалюйте модель (тобто отриману пряму) на тій же площині, що й експериментальні точки. Чому відповідають компоненти вектора проекції p ? Чому відповідають компоненти вектора помилки e ?

Зробіть те саме для $x = (1, 2, 3)$, $y = (1, 2, 2)$.

5.12. Проекція на ортогональне доповнення.

Нехай P – матриця проекції на лінійний підпростір U . Якою буде матриця проекції на ортогональне доповнення U^\perp ? Вказівка: розгляньте матрицю $I - P$. Проілюструйте отриманий результат, розглянувши проекції на координатні вісі в \mathbb{R}^2 та на координатну площину й ортогональну координатну вісь в \mathbb{R}^3 .

5.13. Кососиметричність та ортогональність.

Доведіть, що коли матриця A кососиметрична, то $Ax \perp x$ для довільного вектора x , такого що Ax існує. Тобто множення на кососиметричну матрицю переводить вектор в ортогональний йому.

5.14. Нерівність для норм.

Нормою Фробеніуса матриці $A = (a_{ij})$ називається $\|A\| = \sqrt{\sum_{i,j} |a_{ij}|^2}$.

Доведіть, що для довільного вектора x , такого що Ax існує, виконано $\|Ax\| \leq \|A\| \|x\|$.

Вказівка. Використайте нерівність Коші–Буняковського, щоб довести, що $(a_i^t x)^2 \leq \|a_i\|^2 \|x\|^2$, а потім додайте отримані нерівності $(a_i - i\text{-ий рядок матриці } A)$.

5.15. 1+1=3.

Доведіть, що коли матриця має дві з наступних трьох властивостей:

- 1) симетричність;
 - 2) ортогональність;
 - 3) інволютивність (тобто $A^2 = I$),
- то вона також має і третю властивість.

5.16. Поліноми Лежандра. Поліномами Лежандра називають поліноми (многочлени) $P_0 = 1$, $P_k = \frac{1}{2^k k!} \cdot \frac{d^k}{dx^k} [(x^2 - 1)^k]$, $k \in \mathbb{N}$.

1. Знайдіть поліноми P_0, P_1, P_2, P_3, P_4 , записавши їх за степенями x . Перевірте, що вони утворюють базис у просторі $\mathbb{R}_4[x]$.

2. Розгляньте у просторі $\mathbb{R}_4[x]$ скалярний добуток $\langle f, g \rangle = \int_{-1}^1 f(x)g(x)dx$. Перевірте, що це скалярний добуток і покажіть, що поліноми P_0, P_1, P_2, P_3, P_4 попарно ортогональні по відношенню до цього добутку. Отже вони утворюють ортогональний базис у $\mathbb{R}_4[x]$. Чи можете ви узагальнити цей результат на простір $\mathbb{R}_n[x]$ з довільним n ?

3. Знайдіть “довжини” поліномів P_0, P_1, P_2, P_3, P_4 як векторів евклідового простору $\mathbb{R}_4[x]$ із вказанім вище скалярним добутком.

4. Покажіть, що якщо до базису $1, x, x^2, x^3, x^4$ евклідова простору $\mathbb{R}_4[x]$ застосувати алгоритм ортогоналізації, то отримаємо многочлени, які співпадають з поліномами Лежандра, з точністю до скалярного множника.

ЛА-МП-6. Лінійні оператори

6.1. Перевірте, чи є лінійним наступне перетворення. У випадку, якщо перетворення лінійне, знайдіть його матрицю в базисі, в якому дано координати вектора $x = (x_1, x_2, x_3)$.

- | | |
|--|---|
| 1) $\varphi(x) = (x_2 + x_3, 2x_1 + x_3, 3x_1 - x_2 + x_3);$ | 3) $\varphi(x) = (x_1 - x_2 + x_3, x_3, x_2);$ |
| 2) $\varphi(x) = (x_1, x_2 + 1, x_3 + 2);$ | 4) $\varphi(x) = (2x_1 + x_2, x_1 + x_3, x_3^2).$ |

6.2. Задайте лінійне перетворення φ матрицею в стандартному базисі тривимірного простору, якщо

- 1) φ – це віддзеркалення відносно площини, натягнутої на вектори $a_1 = (1, 1, 0), a_2 = (0, 0, 1)$;
- 2) φ – це ортогональна проекція на площину, натягнуту на вектори $a_1 = (1, 1, 0), a_2 = (0, 0, 1)$;
- 3) φ – це обертання на кут α проти годинникової стрілки навколо осі $0X$;
- 4) $\varphi(x) = \langle x, a \rangle a$, де a – деякий фіксований вектор.

6.3. Дано матрицю A_e лінійного перетворення у базисі e_1, e_2, e_3 . Знайдіть матрицю A_f цього перетворення у базисі f_1, f_2, f_3 .

- 1) $A_e = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; f_1 = e_1, f_2 = e_1 + e_2, f_3 = e_1 + e_2 + e_3;$
- 2) $A_e = \begin{pmatrix} 2 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -2 & 3 & 1 \end{pmatrix}; f_1 = e_2, f_2 = e_1 - e_2, f_3 = e_1 + 2e_3.$

6.4. Як зміниться матриця лінійного оператора, якщо переставити вектори базису в зворотному порядку?

6.5. 1) Знайдіть матрицю лінійного перетворення диференціювання, що діє з простору многочленів $\mathbb{R}_4[x]$ у $\mathbb{R}_3[x]$ у парі стандартних базисів, що складаються зі степенів x .

2) Знайдіть матрицю лінійного перетворення інтегрування $\int_0^x f(x)dx$, що діє з простору многочленів $\mathbb{R}_3[x]$ у $\mathbb{R}_4[x]$ у парі стандартних базисів, що складаються зі степенів x .

Як пов'язані матриці, що ви їх отримали?

6.6. 1. Нехай σ_x – віддзеркалення площини xOy відносно осі Ox , а σ_y – відносно осі Oy . Знайдіть композицію відображень $\sigma_x \circ \sigma_y$.

2. Узагальніть результат попереднього пункту. Нехай σ_α – віддзеркалення площини xOy відносно прямої, що нахиlena до осі Ox під кутом α , а σ_β – відносно прямої, що нахиlena до осі Ox під кутом β . Знайдіть композицію цих перетворень, використавши їх матриці.

6.7. Перетворення φ має в стандартному базисі \mathbb{R}^2 матрицю $\Phi = \begin{pmatrix} 4 & 3 \\ 5 & 4 \end{pmatrix}$, а перетворення ψ має в базисі $f_1 = (2, 1), f_2 = (1, 1)$ має матрицю $\Psi = \begin{pmatrix} -3 & -1 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}$. Знайдіть в стандартному базисі та в базисі f_1, f_2 матриці операторів

- | | | | |
|-------------------|----------------|----------------|-----------------|
| 1) $\phi + \psi;$ | 2) $\phi\psi;$ | 3) ϕ^{-1} | 4) $\psi^{-1}.$ |
|-------------------|----------------|----------------|-----------------|

6.8. Знайдіть ядро та образ лінійного оператора в \mathbb{R}^3 , заданого матрицею в деякому базисі.

$$1) \begin{pmatrix} 4 & -5 & 2 \\ 5 & -7 & 3 \\ 6 & -9 & 4 \end{pmatrix}; \quad 2) \begin{pmatrix} 3 & 2 & -3 \\ 4 & 10 & -12 \\ 3 & 6 & -7 \end{pmatrix}$$

6.9. Знайдіть лінійне перетворення (наприклад, знайшовши його матрицю), яке переводить вектори $a_1 = (1, 1), a_2 = (2, 3)$ у $b_1 = (3, 4), b_2 = (1, 2)$ відповідно. Яке перетворення переводить $b_1 = (3, 4), b_2 = (1, 2)$ у $a_1 = (1, 1), a_2 = (2, 3)$? Вважайте, що координати всіх векторів задано в одному й тому ж базисі (наприклад, стандартному).

Виконайте те саме завдання для пар векторів:

- 1) $a_1 = (1, 0), a_2 = (0, 1)$ і $b_1 = (2, 5), b_2 = (1, 3)$; 2) $a_1 = (1, 3), a_2 = (2, 6)$ і $b_1 = (1, -3), b_2 = (4, 2)$.

Чи завжди існує перетворення, яке одну пару векторів переводить в іншу?

6.10. Знайдіть власні значення та власні вектори лінійного оператора, заданого в деякому базисі матрицею. Зведіть матрицю до діагонального вигляду у базисі з власних векторів, якщо це можливо.

$$1) \begin{pmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{pmatrix};$$

$$2) \begin{pmatrix} -1 & 3 & -1 \\ -3 & 5 & -1 \\ -3 & 3 & 1 \end{pmatrix};$$

$$3) \begin{pmatrix} 2 & -1 & 2 \\ 5 & -3 & 3 \\ -1 & 0 & -2 \end{pmatrix};$$

$$3) \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 4 \end{pmatrix}$$

$$5) \begin{pmatrix} 11 & 2 & -8 \\ 2 & 2 & 10 \\ -8 & 10 & 5 \end{pmatrix}$$

$$6) \begin{pmatrix} 4 & -5 & 2 \\ 5 & -7 & 3 \\ 6 & -9 & 4 \end{pmatrix}.$$

6.11. Діагоналізуйте матрицю A та знайдіть A^{100} .

$$1) \begin{pmatrix} -5 & 0 & 6 \\ -3 & 1 & 3 \\ -4 & 0 & 5 \end{pmatrix};$$

$$2) \begin{pmatrix} -4 & -2 & 6 \\ -2 & -1 & 3 \\ -3 & -2 & 5 \end{pmatrix}.$$

6.12. 1. Відомо, що характеристичний многочлен матриці $\chi(\lambda) = \lambda^3 - 3\lambda + 2$. Чому дорівнює визначник цієї матриці? Слід цієї матриці?

2. Відомо, що для квадратної матриці A порядку 2 $\det A = TrA = 4$. Який характеристичний многочлен у цієї матриці? Чому дорівнюють власні значення?

6.13. Парадокс транспонування. Розглянемо у просторі усіх дійсних квадратних матриць порядку 2 перетворення $\varphi(A) = A^t$. Покажіть, що це перетворення лінійне. У лінійного перетворення має існувати матриця, тобто має існувати Φ , така що $\varphi(A) = A^t = \Phi \cdot A$. Доведіть, що такої матриці НЕ існує. Чи можете ви пояснити цю суперечність? Де помилка в наших міркуваннях?

6.14. Ще раз по рангам. Нехай A квадратна матриця $n \times n$. Доведіть, що $n - \text{rank } A \geq \text{rank } A - \text{rank } A^2$. Підказка: розгляньте оператор із матрицею A та його обмеження на свій власний образ.

6.15. Подібні матриці. Матриця A подібна до матриці B , якщо існує така невироджена матриця T , що $A = T^{-1}BT$ (тобто A є матрицею того ж лінійного оператора, що і B , але в іншому базисі).

- 1) покажіть, що відношення подібності матриць є відношенням еквівалентності;
- 2) покажіть, що подібні матриці мають ті самі власні значення (але взагалі кажучи різні власні вектори);
- 3) слід матриці (Tr) – це сума її елементів, що стоять на головній діагоналі. Покажіть, що подібні матриці мають одинаковий слід. Скористайтеся тим, що $Tr(AB) = Tr(BA)$.

6.16. Невироджені оператори Лінійне перетворення у просторі \mathbb{R}^n називається невиродженим, якщо його матриця у деякому базисі є невиродженою. Доведіть, що наступні умови еквівалентні.

1. φ – невироджене перетворення в \mathbb{R}^n .
2. Матриця φ є невиродженою в довільному базисі \mathbb{R}^n .
3. Для довільного вектора x з $\varphi x = 0$ випливає, що $x = 0$ (тобто $\text{Ker } \varphi = \{0\}$).
4. Під дією перетворення φ будь-який базис переходить у базис \mathbb{R}^n .
5. Для довільних векторів x_1, x_2 з $\varphi x_1 = \varphi x_2$ випливає, що $x_1 = x_2$ (тобто φ є ін'єктивним).
6. Для кожного $y \in \mathbb{R}^n$ знайдеться такий $x \in \mathbb{R}^n$, що $\varphi x = y$ (тобто φ є сюр'єктивним).
7. φ має обернене перетворення ψ (тобто таке перетворення, що для довільного вектора x з $\varphi(\psi x) = x$ і $\psi(\varphi x) = x$).

ЛА-МП-7. Квадратичні форми й симетричні матриці

Усі матриці вважаються дійсними.

7.1. Перевірте, що для будь-якої матриці A (у тому числі прямокутної) матриці $A^t A$, AA^t симетричні (зокрема квадратні).

7.2. Доведіть, що $\text{rank}A^t A = \text{rank}A$, зокрема, якщо A – квадратна матриця, то A невироджена тоді і лише тоді, коли $A^t A$ невироджена. До речі, для комплексних матриць це не так. Наведіть приклад!

7.3. Нехай B – квадратна матриця. Покажіть, що матриці B та B^t мають однакові власні значення.

7.4. Знайдіть власні значення матриці S і ортонормований базис, у якому вона діагоналізується. Яка квадратична форма K відповідає S ? Діагоналізуючи матрицю S , ми тим самим зводимо K до головних осей. Яку криву на площині (поверхню у просторі) задасть рівність $K(x) = 1$?

$$1) S = \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix};$$

$$2) S = \begin{pmatrix} 0 & 2 & 2 \\ 2 & 3 & -1 \\ 2 & -1 & 3 \end{pmatrix};$$

$$3) \begin{pmatrix} -2 & 0 & -36 \\ 0 & -3 & 0 \\ -36 & 0 & -23 \end{pmatrix};$$

$$4) S = \begin{pmatrix} 11 & 12 \\ 12 & 2 \end{pmatrix};$$

$$5) S = \begin{pmatrix} 11 & 2 & -8 \\ 2 & 2 & 10 \\ -8 & 10 & 5 \end{pmatrix};$$

$$6) \begin{pmatrix} -3 & 1 & 2 \\ 1 & -3 & 2 \\ 2 & 2 & 0 \end{pmatrix}.$$

7.5. 1. Знайдіть симетричну матрицю порядку 3, яка має власні значення $\lambda_1 = -1, \lambda_2 = 3, \lambda_3 = 7$ та відповідні власні вектори $v_1 = (0, 1, -1), v_2 = (1, 0, 0), v_3 = (0, 1, 1)$.

2. Чи зможете ви виконати завдання, якщо $v_1 = (0, 1, -1), v_2 = (1, 0, 0), v_3 = (1, 1, 1)$?

7.6. Як зміниться квадратична форма $Q(x)$, задана в базисі e_1, e_2, e_3 , якщо розглянути її в базисі $f_1 = e_1, f_2 = e_1 + e_2, f_3 = e_1 + e_2 + e_3$?

$$1) Q(x) = x_1^2 + 2x_2^2 - 2x_1x_2 + 4x_1x_3;$$

$$2) Q(x) = 2x_1x_2 + 4x_1x_3 - 4x_2x_3.$$

7.7. За яких значень параметра λ є додатно визначеною квадратична форма:

$$1) Q(x) = 5x_1^2 + x_2^2 + \lambda x_3^2 + 4x_1x_2 - 2x_1x_3 - 2x_2x_3;$$

$$2) Q(x) = 2x_1^2 + x_2^2 + 3x_3^2 + 2\lambda x_1x_2 + 2x_1x_3.$$

7.8. Симетрична матриця S є додатно визначеною в тому й лише тому випадку, коли знайдеться матриця A з лінійно незалежними стовпцями, така, що $S = A^t A$ (A не обов'язково квадратна). Це зокрема означає, що матриця S є матрицею Грама системи стовпців матриці A (для стандартного скалярного добутку). Знайти матрицю A можна, наприклад, такими способами:

1) використовуючи розклад $S = Q\Lambda Q^t$, можна взяти $A = \sqrt{\Lambda}Q^t$, де $\sqrt{\Lambda}$ – діагональна матриця, з коренями з власних значень S на діагоналі.

2) використовуючи розклад $S = Q\Lambda Q^t$, можна взяти $A = Q\sqrt{\Lambda}Q^t$.

Поясніть, чому ці методи працюють. Для матриці S знайдіть A тими способами, якими це зручно зробити.

$$1) S = \begin{pmatrix} 5 & 4 \\ 4 & 5 \end{pmatrix}; \quad 2) S = \begin{pmatrix} 10 & 6 \\ 6 & 10 \end{pmatrix};$$

$$3) S = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 7 \end{pmatrix}; \quad 4) S = \begin{pmatrix} 9 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 \\ 0 & 2 & 8 \end{pmatrix}.$$

7.9. Перевірте, що симетричні матриці S із попередньої задачі є додатно визначеними п'ятьма способами:

1. Обчисліть власні значення. Усі мають бути додатними.

2. Доведіть, що квадратична форма $x^t S x$ набуває лише додатних значень для $x \neq 0$.
3. Зведіть матрицю до ступінчастого вигляду без перестановок рядків. Усі ведучі елементи мають бути додатними.
4. Знайдіть матрицю A , таку що $S = A^t A$ (ви це вже зробили в попередній задачі).
5. Знайдіть усі кутові мінори. Вони мають бути додатними (критерій Сільвестра).

7.10. Як зміняться умови з попередньої задачі для невід'ємно визначеної матриці? Знайдіть інформацію про це.

7.11. Симетрія та ортогональність. Нехай матриця A має власні значення $\lambda_1 = 1, \lambda_2 = -1$ і власні вектори $x_1 = (\cos \theta, \sin \theta), x_2 = (-\sin \theta, \cos \theta)$. Доведіть, що матриця A є симетричною й ортогональною. Яким є лінійне перетворення площини, що його здійснює матриця A ?

7.12. Спектральний розклад симетричної матриці. Нехай (u_1, \dots, u_n) – ортонормований базис в \mathbb{R}^n . Нехай матриця A має вигляд $A = c_1 u_1 u_1^t + \dots + c_n u_n u_n^t$ для деяких дійсних c_1, \dots, c_n . Доведіть, що A є симетричною і c_1, \dots, c_n – її власні значення.

7.13. Симетричні матриці та виключення Гаусса. Доведіть, що коли застосувати процес виключення Гаусса до першого стовпчика симетричної матриці (тобто залишивши перший рядок, перетворити всі інші таким чином, щоб у першому стовпчику стояли 0), то матриця на одиницю меншого порядку, яку ми отримаємо викреслюванням першого рядка та першого стовпчика, також буде симетричною. З аналогічних причин на кожному кроці виключення Гаусса матриці, що ми їх будемо отримувати, залишатимуться симетричними.

7.14. Добуток симетричних.

1. Доведіть, що добуток двох симетричних матриць є симетричною матрицею тоді і лише тоді, коли ці матриці комутують.

2. Доведіть, що добуток двох кососиметричних матриць A, B є кососиметричною матрицею тоді і лише тоді, коли $AB = -BA$.

7.15. Додатна діагональ.

1. Для матриці $S = \begin{pmatrix} 4 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \\ 1 & 2 & 5 \end{pmatrix}$, знайдіть такий вектор x , що значення відповідної квадратичної форми $Q(x) = x^t S x$ не є додатним. Отже $Q(x)$ не є додатно визначеною. Зверніть увагу, що S має 0 на головній діагоналі.

2. Узагальніть міркування з попереднього пункту й поясніть, чому додатно визначена матриця не може мати нульові чи від'ємні елементи на головній діагоналі.

7.16. Ще один спосіб побудувати симетричну матрицю з A, A^t . Покажіть, що для довільної (в тому числі прямокутної) матриці A блочна матриця $S = \begin{pmatrix} O & A \\ A^t & O \end{pmatrix}$ є симетричною.

Розглянемо її власний вектор x : $Sx = \lambda x \Leftrightarrow \begin{pmatrix} O & A \\ A^t & O \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y \\ z \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} y \\ z \end{pmatrix}$.

Тобто $Az = \lambda y, A^t y = \lambda z$.

1. Доведіть, що $-\lambda$ також є власним значенням S із власним вектором $(y, -z)$.

2. Доведіть, що $A^t Az = \lambda^2 z$, тобто λ^2 – це власне значення $A^t A$.

3. Якщо A – одинична матриця порядку 2, то знайдіть усі чотири власні значення й власні вектори матриці S .

4. Якщо $A = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$, то знайдіть усі три власні значення й власні вектори матриці S .