

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Кафедра сільськогосподарського машинобудування

## **МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ**

Методичні рекомендації до виконання практичних робіт  
для здобувачів ступеня вищої освіти магістр спеціальності 133 – "Галузеве  
машинобудування"  
освітньо-наукова програма "Галузеве машинобудування"

Ухвалено  
на засіданні кафедри  
сільськогосподарського  
машинобудування.  
Протокол № 8 від 24 лютого 2021 р.

м. Кропивницький  
2021

Моделювання технічних систем : методичні рекомендації до виконання практичних робіт для здобувачів ступеня вищої освіти магістр спеціальності 133 – "Галузеве машинобудування" освітньо-наукова програма "Галузеве машинобудування" / [уклад. : В.В. Амосов, І. М. Осипов] ; М-во освіти і науки України, Центральнoукраїн. нац. техн. ун-т, каф. с.-г. машинобуд. – Кропивницький : ЦНТУ, 2021.– 36 с.

Укладачі: доц., канд. техн. наук В.В. Амосов,  
проф., канд. техн. наук І. М. Осипов

Рецензент: проф., доктор техн. наук Кулешков Ю. В.

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 1

### Побудова аналітичної математичної моделі руху точки

**Мета роботи:** набути практичних навиків побудови аналітичної моделі.

#### Теоретична частина

*Аналітична модель* – це ряд функціональних та логічних відношень, які повністю описують функціонування системи та її частин.

**Приклад 1.1** Маленька сталева кулька масою  $m$  лежить на горизонтальній гладенькій поверхні (тертям нехтуємо). Вона прикріплена до одного кінця пружини з коефіцієнтом жорсткості  $k$ , другий кінець якої закріплений нерухомо. Пружину стискають на величину  $x_0$  і відпускають. Вивести рівняння руху кульки.

#### Розв'язок

1. Вважаємо кульку матеріальною точкою. Зобразимо розрахункову схему процесу:



2. На кульку діє (відповідно до закону Гука) пружина з силою  $F = -kx$ , де  $x$  – величина деформації пружини.

За другим законом Ньютона

$$m\ddot{x} = F \text{ або } m\ddot{x} = -kx \quad (1.1)$$

Ми отримали диференціальне рівняння руху кульки (1.1). Це звичайне диференціальне рівняння другого порядку з постійними коефіцієнтами.

3. Його розв'язок:

$$x(t) = A \sin \sqrt{k/m} t + B \cos \sqrt{k/m} t, \quad (1.2)$$

де  $A$  і  $B$  – постійні величини.

Визначаємо їх, підставляючи в (1.2) початкові умови ( $t = 0, x(0) = x_0$ ).

Отримуємо  $A = 0; B = x_0$ , тому рівняння руху кульки

$$x(t) = x_0 \cos \sqrt{k/m} t. \quad (1.3)$$

4. Аналізуючи рівняння, можна зробити такі висновки:

а) кулька здійснює гармонічні коливання з амплітудою  $x_0$  та частотою

$$\omega = \sqrt{k/m}$$

б) при збільшенні жорсткості пружини та зменшенні маси кульки частота коливань збільшується.

#### Зміст звіту

1. Аналітичний розв'язок диференціального рівняння за умовами свого варіанту.

2. Оцінити тип отриманої математичної функції.

3. Якщо аналітично не вдається розв'язати диференціальне рівняння, перейти до його розв'язку чисельним методом (ПЗ №2, пункти 1 та 4).

## Індивідуальні варіанти умов задачі 1

**1.1–1.28.** Скласти математичну модель руху точки або тіла з метою визначення рівняння руху (залежність пройденого шляху від часу).

1.1. Тіло масою  $m$  падає з початковою швидкістю  $v_0$ . Сила опору рухові тіла пропорційна квадрату його швидкості (коефіцієнт пропорційності  $K$ ).

1.2. Точка масою  $m$  рухається прямолінійно під дією прискорюючої сили, пропорційної квадрату часу (коефіцієнт пропорційності  $K_1$ ). Сила опору середовища пропорційна швидкості (коефіцієнт пропорційності  $K_2$ ).

1.3. М'яч масою  $m$  кинуту вертикально вгору зі швидкістю  $v_0$ . Опір повітря пропорційний квадрату швидкості (коефіцієнт пропорційності  $K$ ).

1.4. Куля масою  $m$  з початковою швидкістю  $v_0$  занурюється в воду, сила опору якої пропорційна швидкості (коефіцієнт пропорційності  $K$ ).

1.5. Човен масою  $m$  рухається по озеру зі швидкістю  $v_0$ . Мотор вимикають. Опір води пропорційний швидкості човна (коефіцієнт пропорційності  $K$ ).

1.6. Тіло рухається прямолінійно з прискоренням, що пропорційне добутку квадрата швидкості  $v$  на час  $t$  (коефіцієнт пропорційності  $K$ ).

1.7. Точка масою  $m$  рухається прямолінійно. На неї діє прискорююча сила, що дорівнює потрійному кубу часу. На точку діє також опір середовища, що пропорційний добутку швидкості та часу (коефіцієнт пропорційності  $K$ ).

1.8. Поїзд вагою  $P$  рухається по прямолінійному горизонтальному відрітку шляху. Сила тяги тепловоза постійна та дорівнює  $F$ . Сила опору руху лінійно залежить від швидкості поїзда (коефіцієнт пропорційності  $K$ ).

1.9. Точка масою  $m$  рухається по прямолінійному шляху до центру, який притягує її з силою  $mk^2/r$ , де  $r$  – відстань від точки до центру ( $k$  – коефіцієнт пропорційності).

1.10. Тіло рухається прямолінійно з прискоренням, пропорційним добутку швидкості  $v$  на час  $t$  (коефіцієнт пропорційності  $K$ ).

1.11. Тіло занурюється вертикально у воду. Швидкість занурення прямопропорційна глибині занурювання (коефіцієнт пропорційності  $K$ ) та зворотнопропорційна початковій швидкості  $v_0$ .

1.12. Парашутист масою  $m$  падає з розкритим парашутом. Його кінетична енергія пропорційна висоті  $h$  над поверхнею землі (коефіцієнт пропорційності  $K$ ).

1.13. Локомотив масою  $m$  рухається по горизонтальному шляху зі швидкістю  $v_0$ . Машиніст включає термінове гальмування. Опір руху після початку гальмування дорівнює  $0,2$  ваги поїзда.

1.14. У катера зупинився двигун. Сила опору води пропорційна квадрату його швидкості (коефіцієнт пропорційності  $K$ ).

1.15. Куля об'ємом  $V$  та щільністю  $\rho_k$  вертикально падає в рідині щільністю  $\rho_p$ . Опір рідини пропорційний квадрату швидкості кулі (коефіцієнт пропорційності  $K$ ).

1.16. Тіло масою  $m$  рухається прямолінійно під дією сили, яка

прямопропорційна часу  $t$  та зворотньопропорційна швидкості руху  $v$  (коефіцієнт пропорційності  $K$ ).

1.17. Тіло рухається прямолінійно з прискоренням, яке пропорційне добутку швидкості руху на  $t^2$  (коефіцієнт пропорційності  $K$ ).

1.18. Літак масою  $m$  починає рух по злітній смузі. Сила тяги його двигунів –  $F$ . Сила опору повітря пропорційна швидкості літака  $v$  (коефіцієнт пропорційності  $K_1$ ). Підйомна сила пропорційна швидкості літака (коефіцієнт пропорційності  $K_2$ ).

1.19. Тіло падає в повітрі. Сила опору повітря пропорційна квадрату його швидкості  $v$  та площі  $A$  найбільшого перерізу тіла (коефіцієнт пропорційності  $K$ ).

1.20. Аеросани ковзають по горизонтальному полю зі швидкістю  $v_0$ . Сила тяги двигуна –  $F$ . Сила тертя лиж по снігу пропорційна вазі  $P$  саней (коефіцієнт пропорційності  $K_1$ ). Опір повітря пропорційний швидкості руху (коефіцієнт пропорційності  $K_2$ ).

1.21. Матеріальна точка масою  $m$  рухається по прямій зі швидкістю, обернено пропорційною до пройденого шляху (коефіцієнт пропорційності  $k$ ).

1.22. Метеорит під впливом земного тяжіння із стану спокою починає прямолінійно падати на Землю з висоти  $h$ . Якою була б швидкість метеорита на поверхні Землі, коли б не було земної атмосфери? Радіус Землі дорівнює 6377 км.

1.23. Матеріальна точка масою  $m$  рухається вздовж прямої до нерухомого центру під дією сили, яка прямо пропорційна відстані точки від центру (коефіцієнт пропорційності  $k^2m$ ). Сила опору середовища прямо пропорційна першому ступеню швидкості (коефіцієнт пропорційності  $2hm$ ).

1.24. Матеріальна точка, маса якої  $m$ , рухається по координатній прямій  $Ox$ . Робота сили, яка діє на точку, пропорційна до часу  $t$  від початку руху (коефіцієнт пропорційності дорівнює  $k$ ).

1.25. Парашутист опускається на парашуті, який має форму півсфери радіуса  $R=4$  м. Його маса разом з масою парашута дорівнює  $m=82$  кг. Знайти швидкість парашутиста через 2 с після початку опускання і шлях, який він пройшов за час  $t$ . Вважати, що сила опору повітря  $F_{оп}=0,00081Sv^2$ , де  $S$  – площа найбільшого перерізу, перпендикулярного до напрямку руху,  $v$  – швидкість руху.

1.26. Частику маси  $m$  кинуто вертикально вгору. При русі на неї діє сила опору, яка прямо пропорційна першому ступеню швидкості (коефіцієнт пропорційності дорівнює  $k^2m$ ).

1.27. Визначити закон прямолінійного руху матеріальної точки масою  $m$ , яка падає в середовищі, опір якого пропорційний другому ступеню швидкості (коефіцієнт пропорційності дорівнює  $k^2m$ ).

1.28. Вітер у лісі втрачає частину своєї швидкості. На нескінченно малому проміжку шляху ця втрата пропорційна швидкості на початку проміжку та його довжині (коефіцієнт пропорційності  $k$ ). Знайти швидкість вітру, який пройшов 150 м, якщо його початкова швидкість  $v_0=12$  м/с.

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 2

### Чисельний розв'язок диференціального рівняння

**Мета роботи:** набути практичних навиків чисельного розв'язку звичайного диференціального рівняння.

#### Теоретична частина

Однією з найрозповсюдженіших математичних моделей руху матеріальних точок та твердих тіл є диференціальне рівняння. Для розв'язку диференціальних рівнянь розроблено велику кількість аналітичних методів, але їх пошук та використання потребують ґрунтовної математичної підготовки та суттєвих витрат часу. Зрозуміло, що аналітичний розв'язок диференціального рівняння дає універсальний результат, який розкриває можливість краще зрозуміти фізичну сутність досліджуваного процесу та використати його у аналогічних випадках. Але бувають ситуації, коли знань вищої математики не вистачає, або потрібно швидко отримати інформацію про хоча б один розв'язок диференціального рівняння при заданих початкових умовах. Тут на допомогу приходять чисельні методи розв'язку диференціальних рівнянь, яких розроблено вже чимало. У системі Mathcad реалізовано різні алгоритми чисельних методів розв'язку звичайних диференціальних рівнянь (ЗДР). Наприклад,

$$\text{odesolve}(x, b, [\text{step}]),$$

де  $x$  – змінна інтегрування;  $b$  – кінцева точка інтервалу інтегрування;  $\text{step}$  (не обов'язковий) – кількість кроків при розв'язку рівняння.

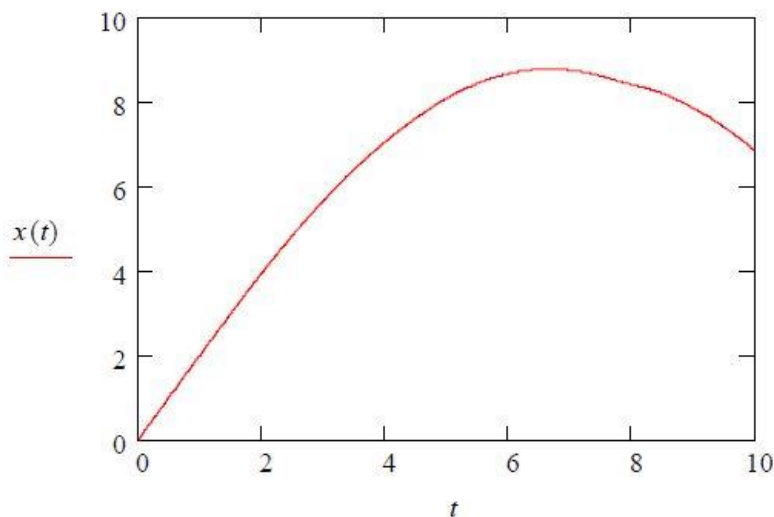
Приклад розв'язку ЗДР другого порядку з використанням функції *odesolve* з графічним представленням результату:

Given

$$53x''(t) + 0x'(t) + 3x(t) = e^{-t} + \tan(t)$$

$$x(0) = 0 \quad x(1) = 2$$

$$x := \text{Odesolve}(t, 150)$$



Рівняння вирішується з використанням так званого "блоку розв'язку", що складається з послідовності виразів, які містять у собі слово *Given*, набір початкових умов і виклик зовнішньої функції для розв'язку рівняння.

Символ «`», що позначає похідну, ставлять з використанням клавіш *Ctrl+F7*.

Іншою функцією, що дозволяє вирішувати ЗДР, є функція *rkfixed*. Для розв'язку за допомогою цієї функції ЗДР, якщо воно містить похідні другого порядку й вище, повинне бути представлено у вигляді системи ЗДР першого порядку.

Системи з ЗДР для їхнього розв'язку в середовищі *Mathcad* за допомогою функції *rkfixed* повинні бути представлені у формі Коші:

$$\begin{cases} y_1(x_0) = y_{0,1}; \\ y_2(x_0) = y_{0,2}; \\ \dots \\ y_n(x_0) = y_{0,n}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} y_1' = f_1(x, y_1, y_2, \dots, y_n); \\ y_2' = f_2(x, y_1, y_2, \dots, y_n); \\ \dots \\ y_n' = f_n(x, y_1, y_2, \dots, y_n). \end{cases}$$

Функція *rkfixed* ( $y, x1, x2, npoints, D$ ) повертає матрицю, перший стовпець якої містить точки, у яких обчислювався розв'язок; другий стовпець містить відповідні розв'язки і їх перші  $n - 1$  похідні.

Аргументи функції *rkfixed*:

$y$  повинен бути вектором з  $n$  початковими значеннями, де  $n$  – порядок диференціального рівняння або число рівнянь у системі (якщо вирішується система рівнянь);  $x1, x2$  – початкова й кінцева (граничні) точки інтервалу, на якому шукається розв'язок (початкові значення у векторі  $y$  дані для точки  $x1$ );

$npoints$  – число точок, не рахуючи початкової точки, у яких розв'язок повинний апроксимуватися; від значення  $npoints$  залежить кількість рядків матриці, що повертається функцією;

$D$  –  $n$ -елементна векторна функція, що містить перші похідні невідомих функцій.

Приклад розв'язку диференціального рівняння з використанням функції *rkfixed*:

Спочатку треба перепозначити диференціальне рівняння як систему двох рівнянь першого порядку

Нехай  $x''(t) - x'(t) + x(t) = \sinh(t)$ , ■

тоді хай  $x_0(t) = x(t)$   $x_1(t) = x_0'(t)$ , ■

тепер можна записати систему:

$$x_0'(t) = x_1(t)$$

$$x_1'(t) = x_1(t) - x_0(t) + \sinh(t)$$

$$\begin{pmatrix} x_0(0) \\ x_1(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 7 \end{pmatrix}$$

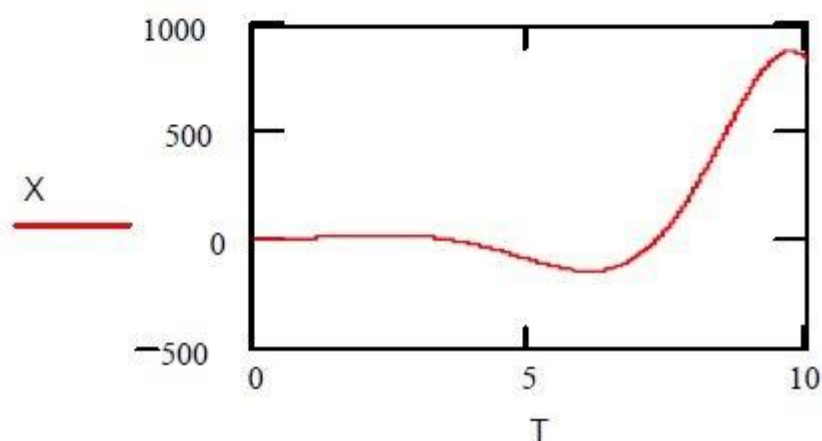
$$ic := \begin{pmatrix} 1 \\ 7 \end{pmatrix}$$

$$D(t, X) := \begin{pmatrix} X_1 \\ X_1 - X_0 + \sinh(t) \end{pmatrix}$$

$$S := rkfixed(ic, 0, 10, 1500, D)$$

$T := S^{(0)}$       значення незалежної змінної

$X := S^{(1)}$       значення шуканої функції



Існує ще одна функція для розв'язку систем ЗДР, а саме для розв'язку повільно мінливих систем ЗДР. Ця функція –  $Rkadapt(y, x_1, x_2, npoints, D)$ . Використовується вона аналогічно  $rkfixed$ , але, на відміну від  $rkfixed$ , яка інтегрує рівними кроками,  $Rkadapt$  аналізує швидкість зміни розв'язку й відповідно адаптує розмір кроку.

Задавшись фіксованим числом точок, можна апроксимувати функцію

більш точно, якщо обчислювати її значення в точках, розташованих у такий спосіб: досить часто на тих інтервалах, де функція міняється швидко; і не дуже часто там, де функція змінюється повільніше.

Функція *Rkadapt* має ті ж самі аргументи, що й функція *rkfixed*. Матриця з наближеним розв'язком, що вертається функцією *Rkadapt*, ідентична по виду матриці, що вертається функцією *rkfixed*.

**Приклад 2.1.** Розв'язати чисельним методом диференціальне рівняння  $m\ddot{x} = -kx$  з прикладу 1.1.

### Розв'язок

Вводимо чисельні значення вихідних даних. Використовуємо для розв'язку функцію *odesolve*. *Задаємо значення початкових умов* ( $t=0$ ,  $x(0)=x_0$ ) та кінцевої точки інтервалу інтегрування ( $v=3$ ).

### Чисельний розв'язок звичайного диференціального рівняння

Маса кульки, кг	$m := 0.1$
Коефіцієнт жорсткості пружини, Н/м	$k := 1$
Початкова деформація пружини, м	$x0 := 0.01$

Given

$$m \cdot x''(t) + 0 \cdot x'(t) + k \cdot x(t) = 0$$

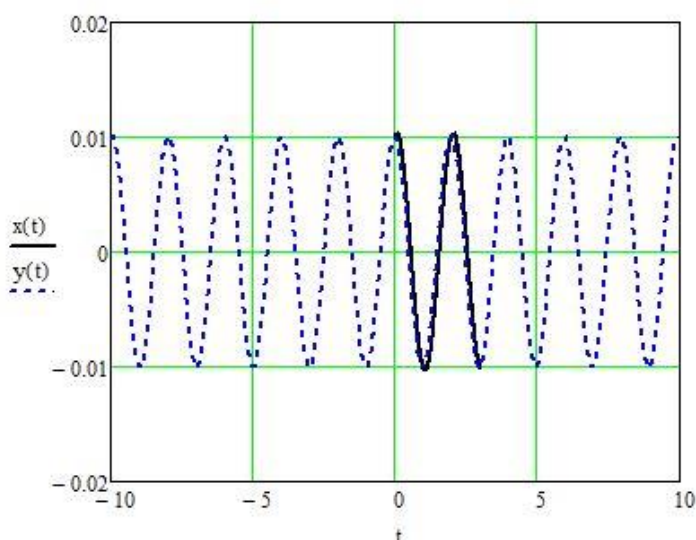
Початкові умови:

$$x(0) = x0 \quad x\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0$$

$$x := \text{Odesolve}(t, 3)$$

Побудова графіка за результатами аналітичного розв'язку рівняння (формула (1.3))

$$y(t) := x0 \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}} t\right)$$



На отриманих графіках чітко видно, що результати, отримані чисельним методом (суцільна лінія) та аналітично (пунктирна лінія), співпадають на інтервалі чисельного інтегрування  $(0; 3)$ .

### **Виконання роботи**

1. Розв'язати диференціальне рівняння за умовами свого варіанту чисельним методом з використанням функцій системи Mathcad та інтерпретувати його графічно. Вихідні дані та початкові умови обрати самостійно, враховуючи фізичний зміст задачі.

2. Побудувати графік залежності, отриманої у результаті аналітичного розв'язку на практичному занятті №1, розміщений у одній системі координат з графіком, побудованим у пункті 1.

3. Порівняти отримані графіки та зробити висновок.

4. Змінити вихідні дані та початкові умови. Зробити висновок про їх вплив на форму графіка.

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 3

### Графічний розв'язок задачі лінійного програмування

**Мета роботи:** набути практичних навиків розв'язку задачі лінійного програмування.

#### Теоретична частина

Суть лінійного програмування полягає у визначенні екстремуму лінійної цільової функції із множини значень оптимізованих параметрів, які визначаються лінійними обмеженнями у вигляді рівнянь та нерівностей.

$$y+2x+3>0$$

$$y=-2x-3$$

У загальному вигляді задача лінійного програмування формулюється так

$$a_{11}x_1+a_{12}x_2+\dots+a_{1n}x_n\geq b_1$$

$$a_{21}x_1+a_{22}x_2+\dots+a_{2n}x_n\geq b_2$$

.....

$$a_{m1}x_1+a_{m2}x_2+\dots+a_{mn}x_n\geq b_m$$

$$z=c_1x_1+c_2x_2+\dots+c_nx_n\rightarrow\text{extr}$$

Методами лінійного програмування розв'язують задачі раціонального використання ресурсів, складання харчових раціонів, задачі оптимального транспортування вантажів та інші.

Якщо кількість невідомих не перевищує двох, використовують графічний метод розв'язку, якщо більше 3, то симплексний метод розв'язку.

Якщо кількість невідомих дорівнює 3, то можливо розв'язувати задачу графічно (з використанням аксонометричних проєкцій), але практично цього ніколи не роблять.

**Приклад 3.1** При відгодівлі кожна тварина повинна отримати не менше 9 одиниць поживної речовини  $S_1$ , не менше 8 одиниць поживної речовини  $S_2$ , не менше 12 одиниць поживної речовини  $S_3$ .

Для складання раціону використовують 2 корми.

1 кг корму першого вміщує 3 одиниці речовини  $S_1$ , 1 одиницю  $S_2$ , 1 один. –  $S_3$ .

1 кг корму другого вміщує 1 од. –  $S_1$ ; 2 од. –  $S_2$ ; 6 од. –  $S_3$ .

1 кг корму першого коштує 1 гривню, 1 кг корму другого – 1,50 грн.

Скласти денний раціон потрібної поживності так, щоб його вартість була мінімальною.

#### Розв'язок

Позначимо  $x_1$  та  $x_2$  – кількість кілограмів першого та другого корму в денному раціоні.

$$3x_1+x_2\geq 9$$

$$x_1+2x_2\geq 8$$

$$x_1+6x_2\geq 12$$

$$z=x_1+1,5x_2\rightarrow\min$$

Будуємо прями, які відповідають нерівностям.

Визначаємо область розв'язків кожної із нерівностей, підставляючи в нерівність координати довільної точки, яка не лежить на прямій.

Показуємо їх стрілочками.

Визначаємо спільну для всіх нерівностей область допустимих розв'язків (ОДР).

Будуємо графік цільової функції на початку координат.

$$x_1 + 1,5x_2 = 0$$

$$x_1 = 3 \text{ та } x_2 = -2$$

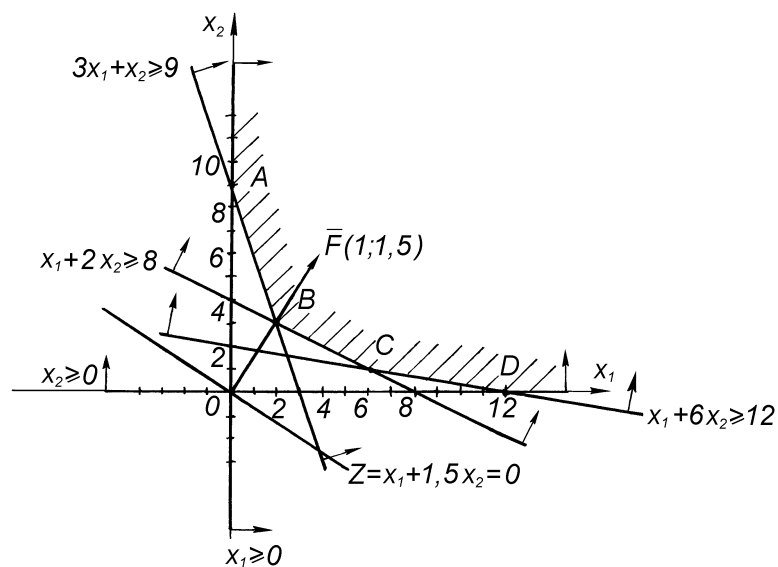
Будуємо вектор  $F$  з координатами, які дорівнюють коефіцієнтам цільової функції.

$$F(1; 1,5)$$

Переміщуємо цільову функцію паралельно самій собі до торкання з першою точкою ОДР (т. В).

$$Z_{\min} = 2 + 1,5 \cdot 3 = 6,5$$

Відповідна мінімальна вартість денного раціону (6,5 грн) буде досягнута, якщо використати 2 кг першого корму та 3 кг другого.



### Індивідуальні варіанти умов задачі 3

**3.1–3.28. Розв'язати задачу лінійного програмування, користуючись графічним методом.**

3.1. Є три види сировини – А, В, С, які використовуються для виробництва двох видів продуктів – І і ІІ. У наявності є 500 одиниць сировини А, 750 одиниць сировини В і 200 одиниць сировини С. Продукт І складається з 1 одиниці сировини А і 2 одиниць сировини В. Продукт ІІ складається з 2 одиниць сировини А, 1 одиниці сировини В і 1 одиниці сировини С. Прибуток від виробництва однієї одиниці продукту І складає 4 грн, а від однієї одиниці продукту ІІ – 5 грн. Скільки одиниць кожного продукту слід виробляти, щоб отримати максимальний прибуток?

3.2. При виготовленні виробів А і В використовують два типи технологічного обладнання Р і Q. На виробництво одиниці виробу А обладнання Р використовують 2 год, а Q – 1 год. На виробництво одиниці виробу В обладнання Р використовують 1 год, а Q – 2 год. Адміністрація на виготовлення виробів може виділити обладнання Р на 10 год, а обладнання Q – на 8 год.

Спланувати виробництво виробів А і В так, щоб загальний прибуток був найбільшим, якщо від реалізації одиниці виробу А прибуток дорівнює 50 грн, В – 20 грн.

3.3. Для виготовлення двох видів продукції P1, P2 використовують три види сировини: S1, S2, S3. Запаси сировини, кількість одиниць сировини, які витрачаються на виготовлення одиниці продукції, а також величина прибутку від реалізації одиниці продукції, наведено в таблиці. Необхідно скласти такий план випуску продукції, щоб при реалізації отримати максимальний прибуток.

Вид сировини	Запас сировини	Кількість одиниць сировини, які витрачаються на виготовлення одиниці продукції	
		P1	P2
S1	20	2	5
S2	40	8	5
S3	30	5	6
Прибуток від одиниці продукції, грн		50	40

3.4. Для виготовлення двох видів виробів використовують чотири види матеріалів: S1, S2, S3 та S4. Запаси матеріалів, технологічні норми витрати матеріалів на кожний виріб та ціна одиниці виробу приведені в таблиці.

Скласти план випуску виробів, що забезпечує їх максимальний випуск по вартості.

Вид матеріалу	Запас матеріалу, кг	Норма витрат матеріалу на один виріб, кг	
		P1	P2
S1	150000	4	2
S2	170000	6	2
S3	100000	2	4
S4	200000	8	8
Вартість одного виробу, грн		100	150

3.5. Підприємство випускає два види продукції. Питомі витрати ресурсів на випуск одиниці кожного з видів продукції та обсяги ресурсів наведено в таблиці.

Вид ресурсу	Вид продукції		Обсяг ресурсів
	1	2	
Площа складу, кв. м	0,6	0,5	7000
Фонд робочого часу, год	0,2	0,1	4000
Електроенергія, кВт·год	0,3	0,2	3000
Прибуток, грн	50	20	

Складіть план випуску продукції, який дозволить отримати максимальний прибуток.

3.6. Для виготовлення виробів двох видів склад може відпустити не більше 80 кг металу, причому на виріб 1-го виду витрачається 2 кг, а на виріб 2-го виду

– 1 кг металу. Потрібно спланувати виробництво так, щоб був забезпечений найбільший прибуток, якщо виробів 1-го виду потрібно виготовити не більше 30 шт., а виробів 2-го виду – не більше 40 шт., причому прибуток від реалізації одного виробу 1-го виду складає 50 грн, а 2-го виду – 30 грн.

3.7. Невелика фірма виробляє два типи підшипників А та В, кожний з яких повинен бути оброблений на трьох верстатах. Час, необхідний для кожної стадії виробничого процесу, наведено в таблиці.

Тип підшипника	Час обробки, годин			Прибуток від продажу одного підшипника, грн
	Токарний верстат	Шліфувальн. верстат	Свердлов. верстат	
А	0,01	0,02	0,04	80
В	0,02	0,01	0,01	125
Повний можливий час роботи на тиждень, год.	160	120	150	

Яку кількість підшипників кожного типу має виготовляти фірма, щоб отримати максимальний прибуток?

3.8. Цех випускає електродвигуни та трансформатори. Дані по витратах матеріалу на 1 виріб, запасах матеріалів та прибутку, отриманому від реалізації одного виробу, наведені в таблиці.

Виріб	Сталь, кг	Мідь, кг	Текстоліт, кг	Прибуток, тис. грн
Електродвигун	10	30	2	0,4
Трансформатор	60	50	3	0,7
Запаси матеріалів	1800	3000	180	

Визначте план випуску продукції, який забезпечить максимальний прибуток.

3.9. Меблевий цех виготовляє трюмо та тумбочки. Вихідні дані наведено в таблиці.

Види матеріалів	Запаси матеріалів, куб. м	Норми витрат, куб. м/шт.	
		трюмо	тумбочка
ДСП	80	0,030	0,036
Фанера	50	0,01	0,018
Дошки	60	0,02	0,008
Прибуток від реалізації одиниці продукції, грн		41	37

Яку кількість трюмо та тумбочок треба виготовити, щоб отримати максимальний прибуток?

3.10. Компанія виготовляє столи двох типів (1,2). Дані про обсяг роботи, необхідний для кожної операції та максимум обсягу робіт на тиждень наведено в таблиці.

Операція	Обсяг роботи, люд·год.		Максимум обсягу роботи, люд·год.
	1	2	
Виготовлення частин	2	3	360
Складання	1	2	240
Полірування та перевірка	1	1	180

Ринок збуту розширюється, але можливості зберігання обмежують виробництво 170 столами на тиждень. Прибуток від продажу столів типів 1 та 2 складає відповідно 15 та 22 грн. Скільки столів кожного типу на тиждень слід виготовляти, щоб отримати максимальний прибуток?

3.11. Цех випускає столи і книжкові шафи. Їх можна виробляти в будь-яких співвідношеннях, але ресурси деревини обмежені. Треба запланувати такий щомісячний випуск продукції, щоб сума прибутку була найбільшою. Використати всі ресурси деревини. У таблиці наводяться числові дані.

Види продукції	Норми витрат на одиницю продукції		Прибуток на одиницю продукції, грн
	деревини, куб.м	скла, кв.м	
Стіл	0,3	–	20
Шафа	0,6	2,0	50
Ресурси на місяць	24	60	

3.12. Компанія виробляє пластмасові полицки двох розмірів – А та В. Торгові агенти вважають, що на ринку може бути реалізовано до 550 полицок. Для кожної полицки типу А потрібно 0,4 кг сировини, а для полицки типу В – 0,6кг. Компанія може отримати до 240кг сировини на тиждень. Для виготовлення однієї полицки типу А потрібно 12хв. машинного часу, а для виготовлення однієї полицки типу В – 30хв. Верстат, який виготовляє полицки, можливо використовувати до 160 годин на тиждень. Якщо прибуток від продажу полицок типу А складає 30 грн, а від полицок типу В – 40 грн, то скільки полицок кожного типу слід випускати щотижня?

3.13. Фірма виробляє дві моделі А та В книжкових полиць. Для кожного виробу моделі А потрібно 0,3куб.м дощок, а для виробу моделі В – 0,4. Фірма може отримати від своїх поставників до 170куб.м дощок на тиждень. Для кожного виробу моделі А потрібно 12 хв. машинного часу, а для виробу моделі В – 30 хв. На тиждень можливо використати 160 год. машинного часу.

Скільки виробів кожної моделі слід випускати фірмі на тиждень, якщо кожний виріб моделі А приносить 20 грн прибутку, а кожний виріб моделі В – 40 грн прибутку?

3.14. Швейна майстерня виготовляє жіночі костюми та сукні двох видів. На сукню використовується тканини одного виду 1,5, іншого – 0,5 кв.м; на костюм відповідно 1,6 та 0,8 кв.м. Прибуток майстерні від реалізації одного костюма складає 25 грн, від реалізації однієї сукні – 15 грн. Визначити, скільки суконь та костюмів необхідно зшити в майстерні, щоб досягти найвищої рентабельності виробництва, якщо запас тканини першого виду 141 кв.м, другого – 63 кв.м.

3.15. У тваринницькому господарстві на виробництво 1ц молока витрачається 25 грн, з них на витрати праці припадає 10 грн, на матеріальні – 15 грн. Виробництво 1ц м'яса коштує 180 грн, з яких вартість працевитрат складає 100 грн, матеріальних – 80 грн. Державні закупівельні ціни за 1ц молока – 30 грн, за 1ц м'яса – 200 грн. Визначити оптимальний план виробництва продукції тваринницького господарства, якщо правлінням господарства виділено на тваринництво 19 тис. грн. Фонд заробітної плати повинен складати 10 тис. грн, залишки – на технічне обладнання ферми.

3.16. Скласти добовий кормовий раціон для худоби за даними, наведеними в таблиці, так, щоб його вартість була мінімальною.

Показник	Добова потреба	Вміст поживних речовин в 1кг корма	
		Комбікорм	Цукровий буряк
Поживність, к.од.	3,6	1,00	0,24
Протеїн, г	330	105	12
Вартість, грн/кг		0,84	0,17

3.17. Денний раціон молодняка ВРХ повинен вмещувати кормових одиниць – не менше 1,6 кг, протеїну – не менше 200г, каротину – не менше 10мг. Інші дані наведено в таблиці. Скласти денний раціон, який задовольняє умовам поживності та має мінімальну вартість.

Назва поживної речовини	Кількість одиниць поживних речовин, яку вмещує 1кг корма	
	ячмінь	боби
Кормові одиниці, кг	1,2	1,4
Протеїн, г	80	280
Каротин, мг	5	5
Ціна 1кг корма, грн	3	4

3.18. Для відгодівлі тварин використовують два види кормів; вартість 1 кг корму 1-го виду – 0,5 грн, а корму 2-го виду – 0,2 грн. У кожному кілограмі корму 1-го виду міститься 5 од. поживної речовини А, 2,5 од. поживної речовини Б та 1 од. поживної речовини В, а в кожному кілограмі корму 2-го виду відповідно – 3; 3 та 1,3 од.

Яку кількість корму кожного виду необхідно витратити щоденно, щоб витрати на корм були мінімальними, якщо добовий раціон передбачає не менше 225 од. поживної речовини типу А, не менше 150 од. – типу Б та не менше 80 од. типу В?

3.19. Людина повинна вживати за добу деяку кількість умовних одиниць поживних речовин: білків (B1), жирів (B2), вуглеводів (B3), води (B4) та вітамінів (B5). Їх запаси в двох видах їжі (П1 та П2) та мінімальна норма добового споживання наведені в таблиці.

Поживні речовини	Мінімальна норма	Запас поживних речовин, яку вміщує 1кг їжі	
		П1	П2
B1	10	1	5
B2	12	3	2
B3	16	2	4
B4	10	2	2
B5	1	1	0
Вартість одиниці їжі, грн		20	30

Як організувати харчування, щоб його вартість була найменшою, але організм отримував не менше мінімальної добової норми поживних речовин?

3.20. Пенсіонер складає дієту, яка повинна вміщувати не менше 20 од. білків, 30 од. вуглеводів, 10 од. жирів та 40 од. вітамінів. Як найдешевше цього досягнути при вказаних у таблиці вмісті поживних речовин та цінах?

Поживні речовини	Хліб	Молоко
Білки	2	2
Вуглеводи	12	3
Вітаміни	2	2
Жири	1	4
Ціна, грн	6,5	6

3.21. Складіть денний раціон розвантажувального дня з використанням двох видів продуктів:

1 кг виду I вміщує 150 ккал та 14 од. жиру,

1 кг виду II вміщує 200 ккал та 4 од. жиру.

Денне харчування цими продуктами повинно давати не більше 14 одиниць жиру та не менше 200 ккал. Ціна 1 кг продукту I – 15 грн, продукту II – 25 грн.

Яку кількість продуктів треба з'їсти, щоб витратити якнайменше грошей?

3.22. Торгівельне підприємство може замовити на цукровому заводі цукор-пісок та рафінад. Для розміщення кожної тони цукру-піску потрібно 8 кв. м площі складу, для рафінаду – 10 кв. м. На продаж 1 тони цукру-піску продавець витрачає 3 години, рафінаду – 5 годин. Торгівельне підприємство має склади площею 180 кв. м та 75 продавців. Прибуток від реалізації 1 тони цукру-піску складає 300 грн, 1 тони рафінаду – 320 грн.

Скільки тон цукру-піску та рафінаду має закупити торговельне підприємство, щоб отримати максимальний прибуток?

3.23. Скільки грамів вишень і скільки грамів абрикос треба ввести в

денний раціон, щоб в ньому було 75 мг вітаміну С і не більш як 0,25 кг вишень при найменших витратах?

Вміст вітаміну С в 1кг фруктів і вартість 1кг наведені в таблиці

Фрукти	Вітамін С, мг	Вартість, грн
Вишні	150	8
Абрикоси	75	6

3.24. У швейному цеху є 164 м сатину. На пошив одного халата потрібно 4 м, а однієї піжами – 3 м сатину. Скільки слід виготовити халатів і піжам, щоб одержати найбільший прибуток від реалізації продукції, якщо халат коштує 70грн, а піжама – 60 грн? Відомо, що халатів потрібно виготовити не менше як 14 штук.

3.25. Цех випускає столи і книжкові шафи. Їх можна виробляти в будь-яких співвідношеннях, але ресурси деревини обмежені. Треба запланувати такий щомісячний випуск продукції, щоб сума прибутку була найбільшою. Використати всі ресурси деревини. У таблиці наводяться числові дані.

Види продукції	Норми витрати на одиницю продукції		Прибуток на одиницю продукції, грн
	деревини, куб. м	скла, кв. м	
Стіл	0,3	–	20
Шафа	0,6	2,0	50
Ресурси на місяць	24	60	

3.26. Для виготовлення столів і шаф є 60 куб. м деревини. Витрати деревини і прибуток на 1 виріб такий:

Виріб	Деревина, куб. м	Прибуток, грн
Стіл	0,15	10
Шафа	0,2	16

Скільки столів і скільки шаф має виготовити майстерня, щоб забезпечити найбільший прибуток і виготовити не менш як 80 столів, якщо використовується вся деревина?

3.27. Кормовий раціон містить сіно і концентрати. В таблиці наведено числові дані про добове споживання однією твариною поживних речовин і собівартість кормів.

Види кормів	Вміст поживних одиниць в 1 кг кормів	Собівартість 1 кг кормів
Сіно	0,5	15
Концентрати	1,0	25
Добове споживання на 1 тварину	20	

Потрібно знайти найдешевший щоденний раціон, якщо він складається не менш як з 16 кг сіна.

3.28. Фермер виділив під кормові культури 100 га. Вирішили використати цю землю під посіви кукурудзи і цукрового буряку. Як розподілити площу між цими культурами, якщо врожай кукурудзи – 500 ц з гектару, а буряку – 200 ц/га, щоб зібрати не менш як 32000 ц врожаю?

### **Зміст звіту**

1. Розв'язок задачі лінійного програмування за умовами свого варіанту графічним методом.
2. Економічна інтерпретація отриманого результату.

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 4

### Розв'язок задачі лінійного програмування у системі Mathcad

**Мета роботи:** набути практичних навиків розв'язку задачі лінійного програмування з використанням системи Mathcad.

#### Теоретична частина

У практичному занятті № 3 було вказано, що при кількості невідомих більше трьох використовують симплексний метод розв'язку. Цей аналітичний метод полягає у поступовому наближенні до оптимального розв'язку шляхом цілеспрямованого перебору проміжних рішень, коли кожне з наступних усе більше наближається до оптимального. Для реалізації симплексного методу були розроблені спеціальні програми на універсальних мовах програмування. Їх використання дозволило автоматизувати розв'язок широкого кола задач планування виробництва, розподілу ресурсів, транспортування вантажів як в масштабах окремих підприємств, регіонів, так і великих галузей виробництва. Така спеціалізована програма для розв'язку задачі лінійного програмування у системі Mathcad відсутня. Тому доведеться скористатись універсальними програмами для пошуку мінімуму функції *Minimize* та для пошуку максимуму функції *Maximize*. Для практичного використання достатньо однієї з них, оскільки, як відомо з курсу математики,  $\min(f(x)) = \max(-f(x))$ . Функції використовують у поєднанні з блоком *given* та системою обмежень, яка може мати векторну форму або форму системи нерівностей та рівнянь.

***Minimize*(f, var1, var2, ...)**

Повертає значення змінних *var1, var2, ...*, що задовольняють обмеженням у блоці розв'язку, які й доставляють найменше значення функції *f*. Повертає скаляр, якщо зазначено одну змінну, інакше повертає вектор розв'язків.

**Приклад 4.1** Розглянемо чисельний розв'язок задачі з Прикладу 3.1. Використаємо сформульовану математичну модель

$$3x_1 + x_2 \geq 9$$

$$x_1 + 2x_2 \geq 8$$

$$x_1 + 6x_2 \geq 12$$

$$z = x_1 + 1,5x_2 \rightarrow \min$$

Перш за все, введемо позначення  $x_1 = x_0$ , та  $x_2 = x_1$ , як елементи вектора *x* (у системі Mathcad за замовчуванням перший індекс дорівнює 0), та запишемо цільову функцію. Введемо коефіцієнти при невідомих у лівих частинах

нерівностей у формі матриці **A**, яка складається з 3 рядків (кількість нерівностей) та 2 стовпчиків (кількість невідомих). З вільних членів (у правих частинах нерівностей) сформуємо вектор-стовпець **B**. Обов'язково задаємо початкові значення змінних. Далі блоком *given* розпочинається блок розв'язку, до якого входять система обмежень у векторній формі та звернення до функції *Minimize*. Отримані значення невідомих  $x_1$  та  $x_2$  підставляємо у цільову функцію.

### Виконання роботи

1. Сформулювати математичну модель задачі лінійного програмування за умовами свого варіанту.
2. Розв'язати задачу лінійного програмування з використанням системи Mathcad.
3. Дати економічну інтерпретацію отриманого результату.

#### Розв'язок задачі лінійного програмування у системі Mathcad

Позначимо змінну  $x_1$  як  $x_0$ , а змінну  $x_2$  - як  $x_1$

$$z(x) := 1 \cdot x_0 + 1.5 \cdot x_1$$

Введемо коефіцієнти при невідомих у нерівностях одного типу ( $\geq$ ) у вигляді матриці **A**, а константи з правих частин - у вигляді вектора **B**

$$\mathbf{A} := \begin{pmatrix} 3 & 1 \\ 1 & 2 \\ 1 & 6 \end{pmatrix} \quad \mathbf{B} := \begin{pmatrix} 9 \\ 8 \\ 12 \end{pmatrix}$$

Задаємо початкові значення змінних управління, наприклад 1

$$x_0 := 1 \quad x_1 := 1$$

Проводимо обчислення, вказуючи обмеження.

Given

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \geq \mathbf{B}$$

$$\mathbf{x} \geq 0$$

Отримуємо розв'язок задачі у вигляді вектора-стовбця

$$\mathbf{x} := \text{Minimize}(z, \mathbf{x}) \quad \mathbf{x} = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$$z(\mathbf{x}) = 6.5$$

Елементи вектора-стовбця  $x_0=2$   $x_1=3$ , тобто мінімальна вартість денного раціону (6,5 грн) буде досягнута, якщо використати 2 кг першого корму та 3 кг другого.

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 5

### Постановка та аналітичний розв'язок задач оптимізації

**Мета роботи:** набути практичних навиків складання математичних моделей та розв'язку оптимізаційних задач.

#### Теоретична частина

**Оптимізацією** називають пошук мінімального або максимального значення функції (її називають *цільовою*) при заданих обмеженнях.

*Цільова функція* в математичній формі виражає мету задачі.

*Обмеження* можуть мати форму рівнянь або нерівностей.

Цільову функцію іноді називають критерієм якості. Вона в узагальненій формі відображує головні економічні або технічні характеристики об'єкта (собівартість і т. ін.).

Оптимізація буває *умовна* (коли є обмеження) і *безумовна* (коли обмежень немає).

Оптимізацію можна виконувати *аналітично* або *чисельними методами*.

#### Аналітичні методи оптимізації:

1. Безпосереднє диференціювання.
2. Математичне програмування.
3. Метод Понтрягіна.
4. Варіаційне числення.

Розглянемо приклад використання аналітичного методу оптимізації безпосереднім диференціюванням.

#### Приклад 5.1

Потрібно вибрати геометричні розміри циліндричного бака об'ємом  $V$  з умови мінімальної витрати матеріалу на його виготовлення.

#### Розв'язок

Для побудови математичної моделі введемо в розгляд вектор проектних розв'язків  $X = (r, h)$ , де  $2r, h$  – діаметр і висота бака (рис. 5.1).

Якщо припустити, що бак виготовляється зварюванням із трьох деталей, то витрата матеріалу при довільному векторі розв'язків  $X$  буде дорівнює площі поверхні бака:

$$S = 2\pi r^2 + 2\pi rh \rightarrow \min_{r,h}. \quad (5.1)$$

Згідно з умовами задачі вираження (5.1) є цільовою функцією (критерій оптимальності проектних розв'язків).

Умова того, що бак повинен мати об'єм заданого значення  $V$ , представимо у вигляді:

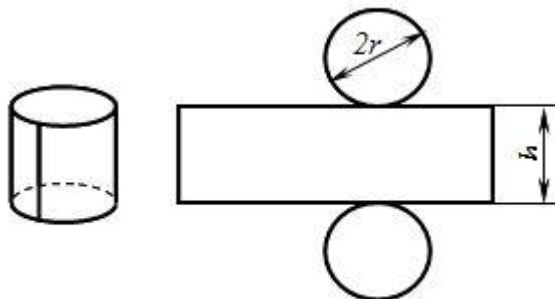


Рис. 5.1

$$\pi r^2 h = V. \quad (5.2)$$

На компоненти вектора розв'язків  $X$  необхідно накласти додаткові умови:

$$r > 0, \quad h > 0. \quad (5.3)$$

Вирази (5.1)–(5.3) описують нелінійну однокритеріальну модель формування оптимальних рішень.

З рівняння (5.2) виразимо

$$h = V/\pi r^2 \quad (5.4)$$

та підставимо до (5.1)

$$S = 2\pi r^2 + 2\pi r V/\pi r^2 = 2\pi r^2 + 2V/r. \quad (5.5)$$

Таким чином, ми звели рівняння критерію оптимальності до функції однієї змінної  $r$ . Візьмемо похідну (5.5) щодо змінної  $r$

$$dS/dr = 4\pi r - 2V/r^2$$

та прирівняємо її до нуля

$$2\pi r - V/r^2 = 0,$$

звідки

$$r = \sqrt[3]{V/(2\pi)},$$

або підставляючи до (5.4), отримуємо

$$h = \sqrt[3]{4V/\pi}.$$

При цих значеннях  $r$  і  $h$  буде досягнуто мінімальні витрати матеріалу на виготовлення баку.

Нехай бак повинен мати мінімальну трудомісткість його виготовлення. Якщо вважати трудомісткості виготовлення кришки, дна й бічної стінки досить малими величинами, то витрати часу на виготовлення бака будуть пропорційні довжині швів, що зварюються:

$$T = c(4\pi r + h) \rightarrow \min_{r,h}, \quad (5.6)$$

де  $c$  – витрати часу на зварювання одиниці довжини.

Вирази (5.1), (5.4), (5.2), (5.3) описують двокритеріальну нелінійну модель формування оптимальних розв'язків.

При побудові математичної моделі в цій задачі прийняття рішень були використані відомі геометричні закономірності.

Аналітичний розв'язок задачі ПР можливий, якщо відповідна математична модель містить у собі обмеження типу рівностей, тобто має вигляд:

$$W = f(c, X) \rightarrow \text{extr};$$

$$\varphi(a, X) = b;$$

$$-\infty < X < \infty.$$

Такі задачі вирішуються звичайно класичними методами умовної оптимізації, які передбачають побудову функції Лагранжа виду

$$L(x_1, x_2, \dots, x_n, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m) = f(c, x_1, \dots, x_n) + \sum_{j=1}^m \lambda_j [\varphi_j(a, x_1, \dots, x_n) - b_j], \quad (5.7)$$

де  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$  – невизначені множники Лагранжа.

Точки екстремуму цієї функції визначаються з розв'язку системи рівнянь виду

$$\begin{aligned}\frac{\partial L}{\partial x_i} &= 0, \quad i = 1, \dots, n; \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda_j} &= 0, \quad j = 1, \dots, m.\end{aligned}\tag{5.8}$$

Вирішуючи цю систему, одержимо розв'язок виду

$$\begin{aligned}x_i^{\text{опт}} &= \psi_i(a, b, c), \quad i = 1, \dots, n; \\ \lambda_j &= \lambda_j(a, b, c), \quad j = 1, \dots, m.\end{aligned}\tag{5.9}$$

Використовуємо цей метод для розв'язку однокритеріальної задачі (5.4), (5.2) (без урахування (5.1), (5.3)).

Функція Лагранжа має вигляд:

$$L(r, h, \lambda) = c(4\pi r + h) + \lambda(\pi r^2 h - V).$$

Її частинні похідні щодо змінних  $r, h, \lambda$ :

$$\begin{aligned}\frac{\partial L}{\partial r} &= 4\pi c + 2\lambda\pi r h = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial h} &= c + \lambda\pi r^2 = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} &= \pi r^2 h - V = 0.\end{aligned}\tag{5.10}$$

Маємо систему алгебраїчних рівнянь, вирішуючи яку, одержимо значення невідомих  $r, h$  ( $\lambda$  знаходити необов'язково):

$$r = \sqrt[3]{\frac{V}{2\pi^2}}; \quad h = \sqrt[3]{4\pi V}; \quad \lambda = -c \sqrt[3]{\frac{4\pi}{V^2}}.\tag{5.11}$$

Таким чином, оптимальні розміри бака, знайдені за допомогою аналітичного методу умовної оптимізації, не залежать від витрат часу  $c$  на зварювання одиниці довжини, але залежать від необхідного об'єму бака  $V$ . Вимога (5.4) при цих значеннях  $r$  і  $h$  виконується, тобто трудомісткість буде мінімальною.

Недоліками цього методу є:

- 1) Не враховуються в явному виді умови невід'ємності (5.3).
- 2) Система рівнянь (5.8) дозволяє одержати розв'язок у формі (5.9) тільки для простих функцій (5.1), (5.2).

### Виконання роботи

1. Вивести вектор проектних розв'язків задачі 4 за умовами свого варіанту (табл. А1 у додатку А)
2. Записати критерій оптимальності проектних розв'язків.
3. Вивести рівняння зв'язку між параметрами вектора проектних розв'язків.
4. Накласти додаткові умови на параметри вектора проектних розв'язків.
5. Взяти частинні похідні рівняння критерію оптимальності проектних розв'язків по кожному параметру.
6. Прирівняти отримані вирази частинних похідних до нуля та розв'язати як систему алгебраїчних рівнянь відносно невідомих параметрів.

## Індивідуальні варіанти умов задачі 5

### 5.1–5.26. Розв'язати задачі оптимізації

5.1. Пункти  $A$  і  $B$  (рис.5.1) розташовані по один бік від магістралі  $CD$ . Потрібно з'єднати їх найкоротшою дорогою  $AMB$ , яка виходить до магістралі (знайти відстань  $x$ , вважаючи що відстані  $a$ ,  $b$ ,  $c$  відомі).

5.2. Обабіч від залізниці у пункті  $A$  (рис.5.2) перебуває склад лісу. Цей ліс треба перевезти на станцію  $B$ . З цією метою вирішили від пункту  $A$  до пункту  $C$  (на залізниці) прокласти прямолінійний автомобільний шлях. Як треба вибрати положення  $x$  пункту  $C$  на залізниці, щоб перевезти ліс з  $A$  до  $B$  за найменший час, якщо швидкість руху по автомобільному шляху  $v_1$ , а залізницею  $v_2$  ( $v_2 > v_1$ )?

5.3. Центральна садиба господарства  $A$  (рис.5.3) розташована на відстані 50 км від райцентру  $B$  і на відстані 30 км від магістралі, що проходить через райцентр. Під яким кутом до магістралі  $x$  слід провести під'їзний шлях з  $A$ , щоб вартість доставки вантажу з  $A$  в  $B$  і з  $B$  в  $A$  була найнижчою, якщо вартість перевезень по кілометровому відрізку магістралі буде коштувати господарству в 2 рази дешевше, ніж по 1 км під'їзного шляху.

5.4. Центральна садиба господарства  $A$  (рис.5.3) розташована на відстані 50 км від райцентру  $B$  і на відстані 30 км від магістралі, що з'єднує райцентр з елеватором  $C$ , розташованим на відстані 100 км від райцентру. Визначити, яким повинен бути кут примикання  $x$  під'їзного шляху до магістралі, щоб сумарний річний пробіг автомобілів з  $A$  в  $B$  і  $C$  був якомога менше, якщо відомо, що рух між  $A$  і  $B$  буде в 2 рази інтенсивнішим, ніж між  $A$  і  $C$ .

5.5. Проектується канал. Поперечний переріз його повинен мати форму рівнобічної трапеції площею  $S$  та висотою  $h$ . Визначити розміри каналу, при яких втрати на тертя води по дну та стінках будуть мінімальними.

5.6. З трьох однакових дощок шириною  $a$  (рис.5.4) треба зробити жолоб, поперечний переріз якого мав би форму трапеції. Яким повинен бути кут  $\beta$ , щоб отримати переріз максимальної площі?

5.7. Під яким кутом  $x$  (рис.5.5) слід збити три дошки однакової ширини  $b$ , щоб одержати водонапувальний жолоб найбільшої місткості?

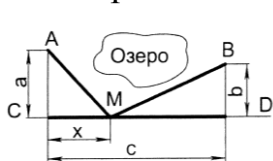


Рис. 5.1

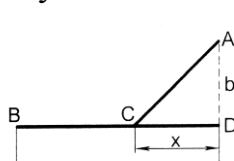


Рис. 5.2

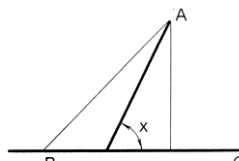


Рис. 5.3

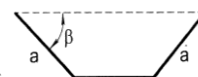


Рис. 5.4

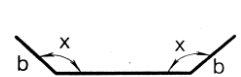


Рис. 5.5

5.8. Щоб зменшити тертя рідини об стінки та дно каналу, треба зробити площу, яку вона змочує, якомога меншою. Потрібно знайти розміри  $a$  і  $b$  прямокутного каналу заданої площі перерізу  $S$ , при яких змочувана площа буде найменшою.

5.9. Площа стін і дна каналу зрошувальної системи з прямокутним перерізом становить  $S$ . Якими мають бути розміри перерізу  $a$  і  $b$ , щоб об'єм води в каналі, довжина якого  $L$ , був найбільшим?

5.10. Переріз тунелю має форму прямокутника з півколом, яке примикає до нього (рис.5.6). Площа перерізу має дорівнювати  $S$ . Якими мають бути розміри  $R$  і  $H$ , щоб периметр перерізу був найменшим?

5.11. Які розміри  $a$  і  $b$  повинна мати прямокутна ділянка землі площею  $S$ , щоб довжина обмежувачої її огорожі була мінімальною?

5.12. Заготовлено матеріал для влаштування огорожі довжиною  $l$ . Ним має бути обнесено прямокутний майданчик, який прилягає до стіни будинку. Якими повинні бути розміри цього майданчика  $a$  і  $b$ , щоб його площа була якнайбільшою?

5.13. Сторінка книги має площу  $S$  (рис.5.7). За технічними умовами ширина полів зверху та знизу має бути  $a$ , зліва і справа –  $b$ . Якими повинні бути розміри сторінки, щоб площа сторінки, яку займає текст, була найбільшою?

5.14. Прямокутний дорожній показчик розмірами  $w$  і  $h$  (рис.5.8) виготовлено з металічного листа постійної товщини. Площа поля, яка вміщує зображення, має складати  $S$ . З нижнього боку показчик має поле  $a$ , з трьох інших –  $b$ . Знайти значення  $w$  і  $h$ , при яких для виготовлення показчика потрібна мінімальна кількість листового матеріалу.

5.15. З прямокутного листа жерсті розмірами  $a$  і  $b$  (рис.5.9) треба виготовити відкриту зверху коробку. Для цього по кутах листа вирізають однакові квадрати та загинають краї. Квадрати якого розміру  $x$  потрібно вирізати, щоб отримати коробку максимальної місткості?

5.16. З квадратного листа жерсті зі стороною  $a$  (рис.5.10) в кутах вирізають однакові квадрати  $x$ , загинаючи краї листа, роблять годівницю. При якому розмірі сторони квадрата  $x$  об'єм годівниці буде найбільшим?

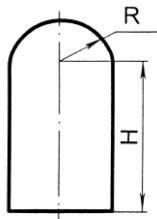


Рис. 5.6

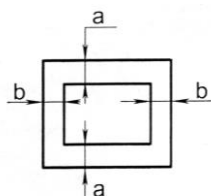


Рис. 5.7

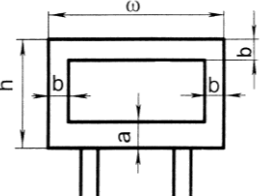


Рис. 5.8

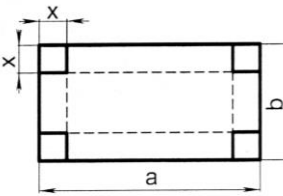


Рис. 5.9

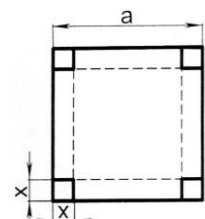


Рис. 5.10

5.17. Із трьох прямокутних шматків жерсті виготовляють закриту циліндричну банку місткістю  $V$  (рис.5.11). Якими мають бути її розміри  $D$  і  $H$ , щоб площа використаних шматків жерсті була мінімальною?

5.18. З кружечка фільтрувального паперу радіуса  $R$  (рис.5.12) треба вирізати сектор з кутом  $x$  і згорнути його в конусоподібний фільтр. Сектор якого кутового розміру  $x$  треба вирізати, щоб із нього отримати фільтр найбільшої місткості?

5.19. Спроекувати контейнер у формі кругового конуса без дна місткістю  $V$  (рис.5.13). Якими повинні бути його геометричні характеристики  $D$  і  $H$ , щоб його бічна поверхня була мінімальною?

5.20. З круглого дерева, діаметр якого дорівнює  $d$  (рис. 5.14), потрібно вирізати балку прямокутного перерізу так, щоб площа перерізу була найбільшою. Якими повинні бути розміри  $a$  і  $b$  цього перерізу?

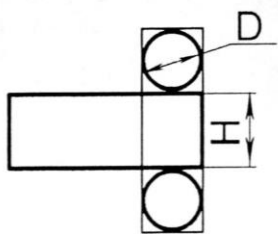


Рис. 5.11

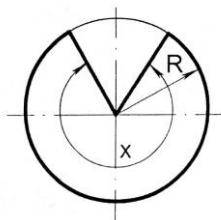


Рис. 5.12

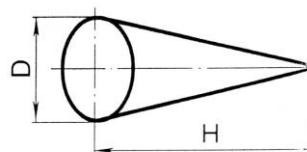


Рис. 5.13

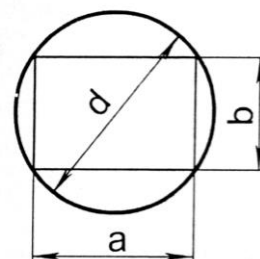


Рис. 5.14

5.21. Круговий майданчик, радіус якого  $R$ , збираються освітлювати одним світильником, який підвішений над його центром. На якій висоті  $h$  треба підвісити світильник, щоб освітленість межі майданчика була максимальною?

5.22. Глядач перебуває на відстані  $a$  (рис.5.15) від площини екрана кінотеатру. Висота екрана  $h$ . На якій висоті від рівня очей глядача  $y$  має бути розташований нижній край екрана, щоб видимість була найкращою (кут зору  $x$  був би найбільший)?

5.23. Є похила площина, довжина основи якої дорівнює  $b$  (рис.5.16). Кут її нахилу  $x$  та довжину  $l$  можна змінювати. По цій площині вільно скочується куля. Яким повинен бути кут нахилу площини  $x$ , щоб час скочування був найменшим?

5.24. На причіпний плуг діє сила тяги  $S$  (рис. 5.17), прикладена під кутом  $\alpha$  до горизонту. Визначити кут  $\alpha$ , при якому сила тяги  $S$  буде мінімальною, але достатньою для того, щоб зрушити плуг з місця, долаючи силу тертя (коефіцієнт тертя сталі по ґрунту  $f$ ).

5.25. Камінь масою  $m$  лежить на дерев'яній горизонтальній підлозі. Під яким кутом до горизонту треба прикласти до нього силу, щоб зсунути його і щоб для цього була потрібна найменша сила?

5.26. Під яким кутом  $x$  (рис.5.18) до берега потрібно спрямувати човен, щоб під час переправи через річку його якомога менше знесло течією, швидкість якої  $v_1$ ? Власна швидкість човна  $v_2$ .

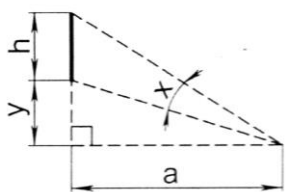


Рис. 5.15

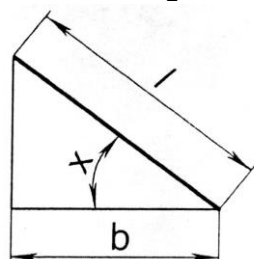


Рис. 5.16

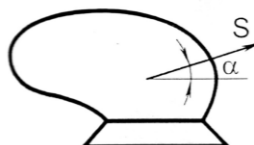


Рис. 5.17

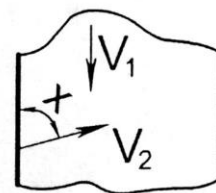


Рис. 5.18

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 6

### Розв'язок задач оптимізації з використанням системи Mathcad

**Мета роботи:** набути практичних навичок використання системи Mathcad для розв'язку задач оптимізації.

#### Теоретична частина

Система Mathcad має крім широких обчислювальних можливостей потужний засіб для аналітичного розв'язку математичних задач – символний процесор. Операції, які відносяться до роботи символного процесора, вміщуються в підменю позиції Symbolic головного меню. Вони виконуються у командному режимі.

Найчастіше використовуються такі символні операції:

- 1) диференціювання виразу за виділеною змінною;
- 2) інтегрування виразу за виділеною змінною;
- 3) розв'язок рівняння відносно виділеної змінної;
- 4) розкладання функції в ряд Тейлора;
- 5) розкладання раціонального дроби на елементарні дроби;
- 6) розкладання виразу на множники;
- 7) спрощення виразу;
- 8) перетворення Фур'є, Лапласа (пряме та зворотне) та інші.

Вирази, над якими повинні бути виконані перетворення, повинні бути виділені. Майже всі перетворення можуть бути виконані:

- а) безпосередньо в командному режимі (використовуючи позиції *Symbolic* головного меню);
- б) за допомогою символних операцій  $\rightarrow$  та операцій, які представлені в палітрі символних обчислень (позначена докторською чотирьохуголкою).

#### Виконання роботи

1. Вивести математичну залежність, яка виражає мету задачі (цільову функцію), і записати її в документ Mathcad. Використати умови задачі за своїм варіантом з практичного заняття №5.

Наприклад:

$$S(x) = 2\pi r^2 + 2V/r$$

2. Взяти похідну від цієї функції за змінною  $x$  (рис. 6.1, а)

$$\frac{d}{dx} f(x)$$

4. Розв'язати рівняння похідної відносно  $x$ , попередньо виділивши його (рис. 6.1, б)

*Solve,  $x \rightarrow$*

і отримати вираз у формі вектора-стовбця, елементами якого є коренів рівняння похідної. Обрати серед них ті, які підходять за фізичним змістом задачі.

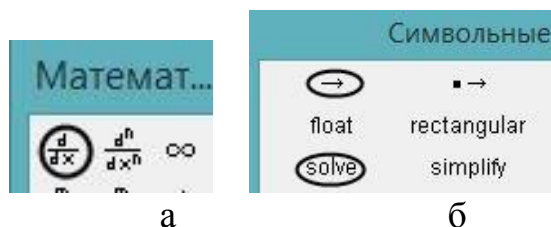


Рис. 6.1 Підменю «Математика» (а) та «Символьные» (б).

### Розв'язок задачі оптимізації за допомогою символічних операцій

Функція, екстремум якої потрібно визначити

$$S(r) := 2 \cdot \pi \cdot r^2 + 2 \cdot \frac{V}{r}$$

Визначення похідної функції

$$\frac{d}{dr} S(r) \rightarrow 4 \cdot \pi \cdot r - \frac{2 \cdot V}{r^2}$$

Розв'язок рівняння похідної відносно  $r$

$$\rightarrow 4 \cdot \pi \cdot r - \frac{2 \cdot V}{r^2} \text{ solve} \rightarrow \begin{bmatrix} \left(\frac{V}{2 \cdot \pi}\right)^{\frac{1}{3}} \\ \frac{\left(\frac{V}{2 \cdot \pi}\right)^{\frac{1}{3}}}{2} + \frac{\sqrt{3} \cdot \left(\frac{V}{2 \cdot \pi}\right)^{\frac{1}{3}}}{2} \cdot i \\ \frac{\left(\frac{V}{2 \cdot \pi}\right)^{\frac{1}{3}}}{2} - \frac{\sqrt{3} \cdot \left(\frac{V}{2 \cdot \pi}\right)^{\frac{1}{3}}}{2} \cdot i \end{bmatrix}$$

Комплексні корені нас не влаштовують, тому єдиний дійсний розв'язок рівняння

$$r := \left(\frac{V}{2 \cdot \pi}\right)^{\frac{1}{3}}$$

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 7

### 3D-моделі

**Мета роботи:** Ознайомитись зі способами побудови та набути практичних навиків користування 3D-моделями.

### Теоретична частина

Сучасне виробництво неможливо уявити без промислового моделювання продукції. З появою 3D-технологій виробники отримали можливість значної економії матеріалів і зменшення фінансових витрат на інженерне проектування. З допомогою 3D-моделювання, дизайнери-графіки створюють тривимірні зображення деталей і об'єктів, які в подальшому можна використовувати для створення прес-форм і прототипів об'єкту.

**3D-моделювання** – це процес розробки математичного представлення будь-якої тривимірної поверхні об'єкта за допомогою спеціалізованого ПЗ. Продукт моделювання є **3D-модель**. Вона може бути представлена у вигляді програмного коду або відображена, як 3D-модель, а також за допомогою двовимірного зображення. 3D-моделі можуть створюватись вручну або автоматично, у тому числі за допомогою 3D-сканера. Виготовлення моделей вручну є подібним до створення скульптури в пластичному мистецтві.

3D-моделі представляють 3D-об'єкт, використовуючи набір точок в 3D-просторі, поєднаних між собою різноманітними геометричними об'єктами, як от трикутниками, лініями тощо.

Загалом на сьогодні усі алгоритми для створення 3D-моделі можна поділити на такі категорії:

- **Полігональне моделювання** – це вид 3D-моделювання, яке з'явилося в той час, коли для визначення місцезнаходження точки необхідно було вручну вводити її координати по осях X, Y, Z. Якщо три точки координат задати як вершини і з'єднати їх ребрами, то вийде трикутник, який в 3D-моделюванні називають полігоном;

- **Сплайнове моделювання** – це вид 3D-моделювання, при якому модель створюється за допомогою сплайнів (тривимірна крива). Лінії сплайнів задаються тривимірним набором контрольних точок в просторі, які і визначають гладкість кривої. Всі сплайни зводяться до каркасу сплайна, на основі якого вже буде створюватися огинаюча тривимірна геометрична поверхня;

- **NURBS моделювання** або технологія Non-UniformRational B-Spline – це технологія неоднорідних раціональних B-сплайнів, створення плавних форм і моделей, у яких немає гострих країв, як у полігональних моделей. Саме через цю відмінну рису технологію NURBS застосовують для побудови органічних моделей і об'єктів (рослин, тварин, людей);

- Моделювання за допомогою **сабдивів** (англ. *Subdivision surfaces*) – один із сучасних алгоритмів, який прогресивно розвивається і все більш нарощує конкуренцію попереднім;

- **Процедурне моделювання** – таке моделювання дозволяє оперувати масштабними проектами, тому використовується великими студіями комп'ютерної графіки;

- **3D-скульптинг** він же «цифрова скульптура» являє собою імітацію процесу «ліплення» 3D-моделі, тобто деформування її полігональної сітки спеціальними інструментами – пензликами. Можна провести аналогію з ліпленням фігур руками з пластиліну або глини. Тільки в програмах 3D-моделювання пальці замінені на інструмент «пензлик», а «пластиліном» є полігональна сітка.

Сучасне програмне забезпечення дозволяє використовувати незалежно від алгоритму моделювання різноманітні підходи для побудови моделі.

- *Примітиви* – моделювання за допомогою простих геометричних фігур (кулі, циліндри, конуси тощо), які використовуються як цеглинки при побудові складніших об'єктів. Перевагою методу є швидка та легка побудова, а також те, що моделі є математично визначені і точні. Підходить до технічного моделювання і менше для моделювання органіки.

- *3D-сканування* та ін.

Сучасний ринок інформаційних технологій пропонує велику кількість програм для комп'ютерного моделювання, які використовуються спеціалістами для тих чи інших галузей діяльності.

Серед найбільш популярних програм тривимірної графіки виділяють:

- комерційні програмні пакети: Autodesk 3D Studio Max; Autodesk Maya; Autodesk Softimage; Maxon Cinema 4D; Side Effects Software Houdini; NewTek LightWave 3D; Luxology Modo; Robert McNeel & Associates Rhinoceros 3D; Nevercenter Silo; Pixologic ZBrush;

- безкоштовні програмні пакети: Blender Foundation Blender; K-3D; Wings3D та інші.

Професійні програми для 3D-моделювання:

- **SolidWorks** (SolidWorks Corporation) застосовується для дизайну, деталізації та візуалізації продуктів, систем, машин та оснащення. Всі версії включають моделювання, збірки, малювання, зварювані деталі. Він також підтримує Visual Basic та C.

- **ProEngineering** – система автоматизованого проектування, інженерного аналізу та підготовки виготовлення виробів будь-якої складності і призначення. ProEngineering є ядром інтегрованого комплексу автоматизації підприємства, за допомогою якого здійснюється підтримка життєвого циклу виробу відповідно до концепції CALS-технологій (Continuous Acquisition and Life cycle Support), включаючи двонаправлений обмін даними з іншими Windows-додатками і створення інтерактивної документації. ProEngineering Enterprise SE (Standard Edition) – повний інструментальний пакет, що забезпечує комплексне рішення задач розробки виробу і точно відповідає сучасним вимогам глобально розподілених виробничо-конструкторських груп.

- **3DMAX** у своєму розпорядженні має засоби для створення різноманітних за формою і складністю тривимірних комп'ютерних моделей,

реальних чи фантастичних об'єктів навколишнього світу, з використанням різноманітних технік і механізмів, включаючи полігональне моделювання, в яке входять Editable mesh (редагована поверхня) і Editable poly (редагований полігон). Це поширений метод моделювання, який використовується для створення складних моделей і низькополігональних моделей для ігор.

- SketchUp Pro (Trimble) – програма для моделювання, що підтримує 2D та 3D моделі. Безкоштовна версія також доступна та інтегрована в Google Earth. SketchUp – програма для моделювання відносно простих трьох-вимірних об'єктів – будівель, меблів, інтер'єру. Основною особливістю цієї програми є майже повна відсутність вікон попередніх налаштувань.

- AutoCAD – дво- і тривимірна система автоматизованого проектування і креслення, що включає в себе повний набір інструментів для комплексного тривимірного моделювання (підтримується твердотільне, поверхневе і полігональне моделювання). AutoCAD дозволяє отримати високоякісну візуалізацію моделей за допомогою рендеринга mental ray (програма для створення комп'ютерної візуалізації). Також в програмі реалізовано управління тривимірним друком (результат моделювання можна відправити на 3D-принтер) і підтримка хмар точок (дозволяє працювати з результатами 3D-сканування). Тим не менш, слід зазначити, що відсутність тривимірної параметризації не дозволяє AutoCAD безпосередньо конкурувати з машинобудівними САПР, такими як Inventor, SolidWorks та іншими.

- Inventor (Autodesk) 3D САПР для створення і вивчення поведінки цифрових прототипів виробів і деталей. Розробник компанія [Autodesk](http://Autodesk.com). Створений для 3D дизайну механіки, емуляції продукту, створення інструментаріїв.

- КОМПАС-3D – інтерактивний графічний редактор з сучасним інтерфейсом, оснащений інструментальними засобами, які дозволяють створювати тверділі об'єкти з використанням набору елементарних параметричних тіл (паралелепіпед, циліндр та ін.). Основні компоненти КОМПАС-3D – власне система тривимірного моделювання, універсальна система автоматизованого 2D-проектування КОМПАС-Графік, модуль проектування специфікацій і текстовий редактор. Він легкий в освоєнні та має довідкову систему.

Базові можливості системи передбачають функціонал, який дозволяє спроектувати виріб будь-якого ступеня складності в 3D, а потім оформити на цей виріб комплект документації, необхідний для його виготовлення відповідно до чинних стандартів.

### Твердотільне моделювання

**Моделювання твердих тіл** являє собою послідовний набір принципів математичного та комп'ютерного моделювання тривимірних твердих тіл. Твердотільне моделювання відрізняється від суміжних областей геометричного моделювання та комп'ютерної графіки наголосом на фізичних властивостях. Разом, принципи геометричного і твердотільного моделювання є основою

автоматизованого проектування і загальної підтримки створення, обміну, візуалізації, анімації, опису і анотування цифрових моделей фізичних об'єктів.

**Твердотільне моделювання** – це проектування тіл, що мають всі ознаки фізичного тіла. Об'єкти, виконані за допомогою даної технології, краще сприймаються у порівнянні з об'єктами, виконаними іншими способами.

При твердотільному моделюванні модельєри працюють не з окремими поверхнями, а одразу з оболонками. Поверхня модельованого об'єкта повністю описується оболонками, які відокремлюють внутрішній обсяг об'єкта від всього іншого простору. У твердотільному моделюванні процес побудови оболонки об'єкту аналогічний процесу виготовлення самого об'єкта, що моделюється. Спочатку створюється оболонка простої форми, яку потім вже підганяють під модель потрібним чином.

#### **Переваги твердотільного моделювання:**

1. Краща візуалізація і сприйняття створеної моделі – тривимірна модель із застосуванням сучасних технологій виглядає більш ніж реалістично.

2. Автоматичне формування креслень – одна з найголовніших переваг даної технології. Побудова моделі та формування креслень по ній з використанням твердотільного моделювання – справа кількох секунд.

3. Швидкість і легкість в процесі внесення змін і коригувань в моделі – не потрібно заново формувати креслення, досить змінити потрібні пункти і оновити програму. Також можна використовувати шаблони, що значно скоротить час на виконання роботи.

4. Об'єднання з різними додатковими програмами – інтеграція дозволяє скоротити час, використавши відразу отримані результати на наступних стадіях роботи.

5. Швидкість при проектуванні – твердотільне моделювання скорочує термін виконання проектування об'єкта. Швидкість моделювання позитивно впливає на швидкість повернення вкладених інвестицій.

**Створення твердотільних моделей**, як ніколи, сьогодні актуально. Важливо не тільки швидко створювати об'єкт, але і так само швидко редагувати його. Твердотільне моделювання володіє даними якостями, тому воно вважається найдосконалішою технологією. Методи уявлень, а саме, граничний і конструктивний, забезпечують максимально реалістичні моделі.

Володіючи такими істотними перевагами, твердотільне моделювання визнано найшвидшим, якісним і ефективним методом при проектуванні складних об'єктів.

#### **Виконання роботи**

1. Завантажити програму КОМПАС-3D.

2. Знайти серед файлів ті, які мають розширення “m3d”, та відкрити один з них. Клацнути на зображенні правою клавішею миші та обрати в меню, яке з'явиться, один зі способів відображення деталі («Каркас», «Без невидимих ліній», «Невидимые линии тонкие», «Полутоновое», «Полутоновое с каркасом»). Почергово аналогічним чином, або через планку меню вгорі (рис. 7.1), подивитись інші способи відображення деталі.

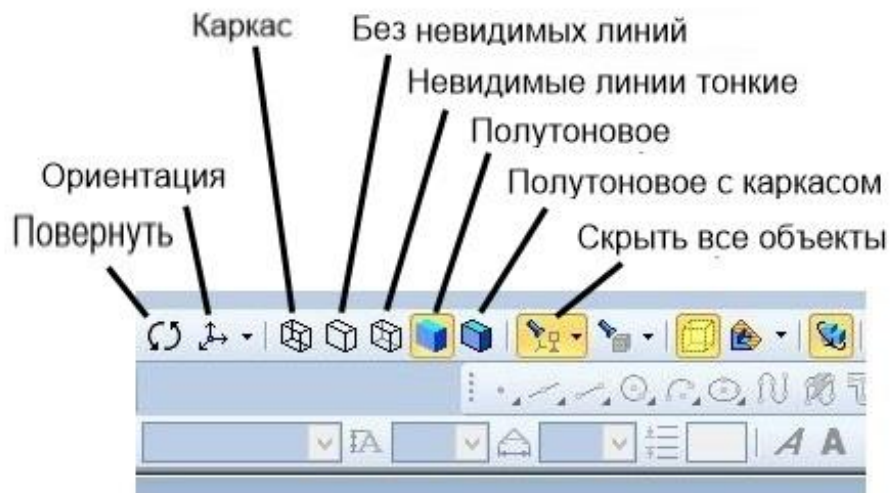


Рис. 7.1 Фрагмент меню програми КОМПАС-3D.

3. Змінити орієнтацію 3D-зображення (пункт меню «Повернуть») (рис. 7.1), навівши курсор на зображення системи координат (рис. 7.2), виділити площину обертання та обертати його навколо потрібної осі.

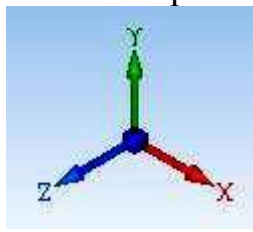


Рис. 7.2 Зображення системи координат (варіант «Изометрия XYZ»).

4. Переглянути вигляд деталі у різних аксонометричних проекціях, використовуючи пункт меню «Ориентация» (рис. 7.1).

5. Обрати з переглянутих зображень деталі найбільш наочне, з Вашої точки зору, прибрати з нього всі допоміжні об'єкти (пункт меню «Скрыть все объекты») (рис. 7.1) та записати результат під новим ім'ям.

## Додаток А

## Таблиця А1

## Варіанти задач для самостійної роботи

№ варі- анту	Задача		
	1	3	5
1	1	1	1
2	2	2	2
3	3	3	3
4	4	4	4
5	5	5	5
6	6	6	6
7	7	7	7
8	8	8	8
9	9	9	9
10	10	10	10
11	11	11	11
12	12	12	12
13	13	13	13
14	14	14	14
15	15	15	15
16	16	16	16
17	17	17	17
18	18	18	18
19	19	19	19
20	20	20	20
21	21	21	21
22	22	22	22
23	23	23	23
24	24	24	24
25	25	25	25
26	26	26	26
27	27	27	1
28	28	28	2
29	1	2	3
30	2	3	4

№ варі- анту	Задача		
	1	3	5
31	3	4	5
32	4	5	6
33	5	6	7
34	6	7	8
35	7	8	9
36	8	9	10
37	9	10	11
38	10	11	12
39	11	12	13
40	12	13	14
41	13	14	15
42	14	15	16
43	15	16	17
44	16	17	18
45	17	18	19
46	18	19	20
47	19	20	21
48	20	21	22
49	21	22	23
50	22	23	24
51	23	24	25
52	24	25	26
53	25	26	1
54	26	27	2
55	27	28	3
56	28	1	4
57	1	3	5
58	2	4	6
59	3	5	7
60	4	6	8

№ варі- анту	Задача		
	1	3	5
61	5	7	9
62	6	8	10
63	7	9	11
64	8	10	12
65	9	11	13
66	10	12	14
67	11	13	15
68	12	14	16
69	13	15	17
70	14	16	18
71	15	17	19
72	16	18	20
73	17	19	21
74	18	20	22
75	19	21	23
76	20	22	24
77	21	23	25
78	22	24	26
79	23	25	1
80	24	26	2
81	25	27	3
82	26	28	4
83	27	1	5
84	28	2	6
85	4	3	7
86	5	4	8
87	6	5	9
88	7	6	10
89	8	7	11
90	9	8	12

## ЗМІСТ

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 1. Побудова аналітичної математичної моделі руху точки	3
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 2. Чисельний розв'язок диференціального рівняння	6
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 3. Графічний розв'язок задачі лінійного програмування	11
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 4. Розв'язок задачі лінійного програмування у системі Mathcad	20
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 5. Постановка та аналітичний розв'язок задач оптимізації	22
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 6. Розв'язок задач оптимізації з використанням системи Mathcad	28
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 7. 3D-моделі	30
ДОДАТКИ	35

## МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Методичні рекомендації до виконання практичних робіт  
для студентів спеціальності 133 – "Галузеве машинобудування"  
освітньо-наукова програма "Галузеве машинобудування"

Укладачі: В.В. Амосов, І. М. Осипов