

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

для практичних занять та самостійної роботи  
з навчальної дисципліни

***ЕКОНОМІКО-МАТЕМАТИЧНЕ***  
***МОДЕЛЮВАННЯ***

*(для студентів заочної форми навчання  
освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр»  
напряму підготовки 6.030601 – Менеджмент)*

**Харків**  
**ХНУМГ ім. О. М. Бекетова**  
**2016**

Методичні вказівки для практичних занять та самостійної роботи з навчальної дисципліни «Економіко-математичне моделювання» (для студентів заочної форми навчання освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр» напрямку підготовки 6.030601 – Менеджмент) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад.: О. О. Воронков, І. А. Медведєв. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2016. – 69 с.

Укладачі:                   канд. екон. наук О. О. Воронков  
                                  канд. наук з держ. упр. І. А. Медведєв

Рецензенти:               канд. екон. наук, доцент Н. І. Склярчук

*Рекомендовано кафедрою економіки підприємств міського господарства,  
протокол № 1 від 27.08.2015 р.*

## ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Методичні вказівки спрямовані на допомогу студентам оволодіти практичними навичками з побудови оптимізаційних та економетричних економіко-математичних моделей та розв'язання типових завдань з оптимізації та прогнозування.

Дисципліна «Економіко-математичне моделювання» є нормативною дисципліною циклу природничо-наукової і загальноекономічної підготовки в навчальному плані за напрямом «Менеджмент» для кваліфікаційного рівня «Бакалавр». Обсяг практичних занять з дисципліни становить 6 аудиторних годин (3 практичних заняття), на самостійну роботу студента припадає 128 годин.

Метою вивчення дисципліни «Економіко-математичне моделювання» є формування системи базових знань в області методології постановки задач, побудови економіко-математичних моделей та їхнього аналізу.

В результаті вивчення курсу студенти мають оволодіти прийомами побудови економіко-математичних моделей, основними математичними поняттями і методами розв'язання оптимізаційних задач різної складності, а також вміти користуватися методами економетричного моделювання.

Відповідно до робочої програми курсу «Економіко-математичне моделювання» у методичних вказівках до практичних занять розглянуто найважливіші теми змістового модуля 1 «Оптимізаційні економіко-математичні моделі» – геометрична інтерпретація лінійної оптимізаційної моделі, двоїста задача лінійного програмування, аналіз розв'язків лінійних оптимізаційних моделей та змістового модуля 2 «Економетричні моделі» – побудова лінійної моделі парної регресії за методом найменших квадратів. Знання й навички, що отримані під час вивчення цих тем, є основою для вивчення наступних складніших тем курсу, та найчастіше застосовуються у практичній діяльності.

У методичних вказівках до самостійної роботи для кожної теми зазначено обсяг витрат часу на вивчення, що відповідає програмі курсу. Наприкінці методичних вказівок наведено список основних і додаткових підручників, які рекомендується використовувати. Кожна тема супроводжується посиланнями на відповідні їй сторінки підручників. Після вивчення теоретичного матеріалу треба дати відповіді на запитання для самоперевірки за темою, а також вирішити задачі, пропоновані для самостійного розв'язання. Для полегшення роботи перед задачами для самостійного розв'язання наведено розв'язання аналогічних прикладів.

# МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

## Практичне заняття 1 – 2 години

### Тема ПЗ: ПОБУДОВА МОДЕЛЕЙ ОПТИМІЗАЦІЙНИХ ЛІНІЙНИХ ЗАДАЧ

Мета – сформуванати вміння з побудови математичних моделей задач економічного вибору.

#### Задача 1.1

Виконати замовлення з виробництва 32 виробів  $V_1$  і 4 виробів  $V_2$  взяли бригади  $B_1$  і  $B_2$ . Продуктивність бригади  $B_1$  з виробництва виробів  $V_1$  та  $V_2$  становить відповідно 4 та 2 виробу на годину, фонд робочого часу цієї бригади 9,5 год. Продуктивність бригади  $B_2$  – відповідно 1 та 3 виробу на годину, а її фонд робочого часу – 4 год. Витрати, що пов'язані з виробництвом одиниці виробу, для бригади  $B_1$  дорівнюють відповідно 9 та 20 грн., для бригади  $B_2$  – 15 та 30 грн.

Складіть математичну модель задачі, що дозволяє знайти оптимальний обсяг випуску виробів, який забезпечує мінімальні витрати на виконання замовлення.

#### Розв'язання

Задамося змінними задачі Шуканими величинами у задачі є обсяги випуску виробів. Вироби  $V_1$  випускатимуться двома бригадами  $B_1$  та  $B_2$ . Тому необхідно розрізнати кількість виробів  $V_1$ , що вироблені бригадою  $B_1$ , і кількість виробів  $V_1$ , що вироблені бригадою  $B_2$ . Аналогічно, обсяги випуску виробів  $V_2$  бригадою  $B_1$  та бригадою  $B_2$  так само є різними величинами. Внаслідок цього в цій задачі 4 змінні. Для зручності сприйняття будемо використати двоіндексну форму запису  $x_{ij}$  – кількість виробів  $V_j$  ( $j=1,2$ ), що виготовляються бригадою  $B_i$  ( $i=1,2$ ), а саме,

$x_{11}$  – кількість виробів  $V_1$ , що виготовляються бригадою  $B_1$ , [шт.];

$x_{12}$  – кількість виробів  $V_2$ , що виготовляються бригадою  $B_1$ , [шт.];

$x_{21}$  – кількість виробів  $V_1$ , що виготовляються бригадою  $B_2$ , [шт.];

$x_{22}$  – кількість виробів  $V_2$ , що виготовляються бригадою  $B_2$ , [шт.].

**Цільова функція.** Метою розв'язання задачі є виконання плану з мінімальними витратами, тобто критерієм ефективності розв'язку є показник витрат на виконання усього замовлення. Тому цільову функцію треба представити формулою розрахунку цих витрат. Витрати кожної бригади на виробництво одного виробу  $V_1$  та  $V_2$  відомі з умови. Отже, цільова функція має вигляд

$$L(X) = 9x_{11} + 20x_{12} + 15x_{21} + 30x_{22} \rightarrow \min, \left[ \frac{\text{грн.}}{\text{шт}} * \text{шт} = \text{грн.} \right].$$

**Обмеження.** Можливі обсяги виробництва виробів бригадами обмежуються наступними умовами:

- загальна кількість виробів  $V_1$ , що вироблені обома бригадами, повинна дорівнювати 32 шт., а загальна кількість виробів  $V_2$  – 4 шт.;

- час, відпущений на роботу над цим замовленням, становить для бригади  $B_1$  – 9,5 год., а для бригади  $B_2$  – 4 год.;

- обсяги виробництва виробів не можуть бути від’ємними величинами.

Отже всі обмеження задачі розділимо на три групи, зумовлені:

- 1) величиною замовлення на виробництво виробів;
- 2) фондами часу, виділеними бригадам;
- 3) невід’ємністю обсягів виробництва.

Для зручності складання обмежень запишемо вихідні дані у вигляді таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Вихідні дані

Бригада	Продуктивність бригад, шт/год.		Фонд робочого часу, год.
	$B_1$	$B_2$	
$B_1$	4	2	9,5
$B_2$	1	3	4
Замовлення, шт	32	4	

Обмеження на замовленням виробів мають наступну змістову форму запису

$$\left[ \begin{array}{l} \text{кількість виробів } B_1 \\ \text{виготовлених бригадами } B_1 \text{ і } B_2 \end{array} \right] = [32 \text{ шт.}]$$

та

$$\left[ \begin{array}{l} \text{кількість виробів } B_2 \\ \text{виготовлених бригадами } B_1 \text{ і } B_2 \end{array} \right] = [4 \text{ шт.}].$$

Математична форма запису має вигляд

$$x_{11} + x_{21} = 32 \text{ [шт.]}$$

і

$$x_{12} + x_{22} = 4 \text{ [шт.]}$$

Обмеження за фондами часу має змістову форму

$$\left[ \begin{array}{l} \text{загальний час, витрачений бригадою } B_1 \\ \text{на виготовлення виробів } B_1 \text{ і } B_2 \end{array} \right] \leq [9,5 \text{ год.}]$$

та

$$\left[ \begin{array}{l} \text{загальний час, витрачений бригадою } B_2 \\ \text{на виготовлення виробів } B_1 \text{ і } B_2 \end{array} \right] \leq [4 \text{ год.}].$$

Проблема полягає в тому, що в умові задачі безпосередньо не заданий час, що витрачають бригади на виробництво одного виробу  $B_1$  або  $B_2$ , тобто не задана трудомісткість виробництва. Але є інформація про продуктивність кожної з бригад, тобто про кількість вироблених виробів за 1 годину. Трудомісткість  $Tr$  та продуктивність  $Pr$  є зворотними величинами, тобто

$$Tr = \frac{1}{Pr} \left[ \frac{\text{год.}}{\text{шт.}} \right].$$

Тому за даними таблиці 1.1 дістаємо наступну інформацію:

- $\frac{1}{4}$  год. витрачає бригада  $B_1$  на виробництво одного виробу  $V_1$ ;
- $\frac{1}{2}$  год. витрачає бригада  $B_1$  на виробництво одного виробу  $V_2$ ;
- $\frac{1}{1}$  год витрачає бригада  $B_2$  на виробництво одного виробу  $V_1$ ;
- $\frac{1}{3}$  год витрачає бригада  $B_2$  на виробництво одного виробу  $V_2$ .

Запишемо обмеження за фондами часу в математичному вигляді

$$\frac{x_{11}}{4} + \frac{x_{12}}{2} \leq 9,5 \quad \left[ \begin{array}{l} \text{год.} \\ \text{шт.} \end{array} \right] \leq [\text{год.}],$$

$$\frac{x_{21}}{1} + \frac{x_{22}}{3} \leq 4 \quad \left[ \begin{array}{l} \text{год.} \\ \text{шт.} \end{array} \right] \leq [\text{год.}].$$

Невід'ємність обсягів виробництва задається виразом

$$x_{ij} \geq 0 \quad (i = 1,2; j = 1,2).$$

Отже, математична модель цієї задачі має вигляд

$$L = 9x_{11} + 20x_{12} + 15x_{21} + 30x_{22} \rightarrow \min \quad [\text{грн.}],$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{11} + x_{21} = 32 \quad [\text{шт.}], \\ x_{12} + x_{22} = 4 \quad [\text{шт.}], \\ \frac{x_{11}}{4} + \frac{x_{12}}{2} \leq 9,5 \quad [\text{год.}], \\ \frac{x_{21}}{1} + \frac{x_{22}}{3} \leq 4 \quad [\text{год.}], \\ x_{ij} \geq 0 \quad (i = \overline{1,2}; j = \overline{1,2}) \quad [\text{шт.}]. \end{array} \right.$$

### Задача 1.2

Для пошиття одного виробу потрібно викроїти з тканини 6 деталей. На швейній фабриці розроблені два варіанти розкрою тканини. У таблиці 1.2 наведені характеристики варіантів розкрою 10 м тканини та комплектність, тобто кількість деталей певного виду, що необхідні для пошиття одного виробу. Щомісячний запас тканини для пошиття виробів певного типу становить 405 м<sup>2</sup>. У найближчий місяць планується зшити 90 виробів.

Треба побудувати математичну модель задачі, що дозволяє в найближчий місяць виконати план з пошиття з мінімальною кількістю відходів.

Таблиця 1.2 – Характеристика варіантів розкрою відрізів тканини по 10 м

Варіант розкрою	Кількість деталей, шт. /відріз						Відходи, м <sup>2</sup> /відріз
	1	2	3	4	5	6	
1	60	0	90	40	70	90	0,5
2	80	35	20	78	15	0	0,35
Комплектність, шт. /виріб	1	2	2	2	2	2	

## Розв'язання

**Змінні задачі.** У цій задачі шукані величини явно не вказані, але відомо, що має бути виконаний щомісячний план з пошиття 90 виробів. Для пошиття 90 виробів на місяць потрібно розкроїти строго певну кількість деталей. Крій проводиться з відрізів тканини по 10 м за двома різними способами, які дозволяють одержати різну кількість деталей. Оскільки заздалегідь невідомо, скільки тканини буде розкроюватися за першим способом і скільки – за другим, то як шукані величини можна задати кількість відрізів тканини по 10 м, що розкроєні за кожним із способів:

$x_1$  – кількість відрізів тканини по 10 м<sup>2</sup>, що розкроєні за першим способом протягом місяця, [відріз./міс.];

$x_2$  – кількість відрізів тканини по 10 м<sup>2</sup>, що розкроєні за другим способом протягом місяця, [відріз./міс.].

**Цільова функція.** Метою розв'язання задачі є виконання плану за мінімальну кількість відходів. Оскільки кількість виробів строго заплановано (90 шт. /міс.), то цей параметр не описує цільової функції, а належить до обмеження, невиконання якого означає, що задачу не розв'язано. А критерієм ефективності виконання плану служить параметр "кількість відходів", який необхідно звести до мінімуму. Оскільки при розкрої одного відрізу (10 м<sup>2</sup>) тканини за 1-м варіантом виходить 0,5 м<sup>2</sup> відходів, а за 2-м варіантом – 0,35 м<sup>2</sup>, то загальна кількість відходів при крої (цільова функція) має вигляд

$$L = 0,5x_1 + 0,35x_2 \rightarrow \min,$$
$$\left[ \frac{\text{м}^2 \text{ відх}}{\text{відріз}} * \frac{\text{відріз}}{\text{міс.}} = \frac{\text{м}^2 \text{ відх}}{\text{міс.}} \right].$$

**Обмеження.** Кількість розкроїв тканини за різними способами обмежується наступними умовами:

- має бути виконаний план з пошиття виробів, інакше кажучи, загальна кількість деталей, що викроєні, повинна бути такою, щоб з них можна було пошити 90 виробів на місяць, а саме: деталей 1-го виду має бути як мінімум 90 та деталей інших видів – як мінімум по 180;

- витрата тканини має не перевищувати її місячного запасу на складі;

- кількість відрізів розкраюваної тканини не може бути від'ємною.

Обмеження за планом пошиття пальто мають наступну змістову форму запису

$$\left[ \begin{array}{l} \text{загальна кількість деталей 1,} \\ \text{що викрієні за всіма варіантами} \end{array} \right] \geq [90 \text{ шт.}],$$
$$\left[ \begin{array}{l} \text{загальна кількість деталей 2,} \\ \text{що викрієні за всіма варіантами} \end{array} \right] \geq [180 \text{ шт.}],$$

.....

$$\left[ \begin{array}{l} \text{загальна кількість деталей 6,} \\ \text{що викрієні за всіма варіантами} \end{array} \right] \geq [180 \text{ шт.}].$$

Математично ці обмеження записуються у наступному вигляді:

$$60x_1 + 80x_2 \geq 90,$$

$$35x_2 \geq 180,$$

$$90x_1 + 20x_2 \geq 180,$$

$$40x_1 + 78x_2 \geq 180,$$

$$70x_1 + 15x_2 \geq 180,$$

$$90x_1 \geq 180,$$

$$\left[ \frac{\text{шт.}}{\text{відріз}} * \frac{\text{відріз}}{\text{міс.}} \right] \geq \left[ \frac{\text{шт.}}{\text{міс.}} \right].$$

Обмеження за витратами тканини має такі форми запису:  
змістову

$$\left[ \begin{array}{l} \text{загальна кількість тканини,} \\ \text{що розкрієна за місяць} \end{array} \right] \leq [405 \text{ м}^2]$$

і математичну

$$x_1 + x_2 \leq \frac{405}{10},$$

$$\left[ \frac{\text{відріз}}{\text{міс.}} \right] \leq \left[ \frac{\text{м}^2 * \text{відріз}}{\text{міс.} * \text{м}^2} \right].$$

Невід'ємність кількості розкrojених відрізів задається у вигляді виразу

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0.$$

Отже, математична модель задачі має вигляд

$$L = 0,5x_1 + 0,35x_2 \rightarrow \min \quad [\text{м}_2 \text{ відх.} / \text{міс.}],$$

$$60x_1 + 80x_2 \geq 90 \quad [\text{шт.} / \text{міс.}],$$

$$35x_2 \geq 180 \quad [\text{шт.} / \text{міс.}],$$

$$90x_1 + 20x_2 \geq 180 \quad [\text{шт.} / \text{міс.}],$$

$$40x_1 + 78x_2 \geq 180 \quad [\text{шт.} / \text{міс.}],$$

$$70x_1 + 15x_2 \geq 180 \quad [\text{шт.} / \text{міс.}],$$

$$90x_1 \geq 180 \quad [\text{шт.} / \text{міс.}],$$

$$x_1 + x_2 \leq 40,5 \quad [\text{відріз} / \text{міс.}],$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0 \quad [\text{відріз} / \text{міс.}].$$



## Практичне заняття 2 – 2 години

### Тема ПЗ: ГЕОМЕТРИЧНА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ ЛІНІЙНОЇ ОПТИМІЗАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ. ДВОЇСТА ЗАДАЧА ЛІНІЙНОГО ПРОГРАМУВАННЯ. АНАЛІЗ РОЗВ'ЯЗКІВ ЛІНІЙНИХ ОПТИМІЗАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ

Мета – засвоєння студентами основних понять і визначень дисципліни шляхом ілюстрації змісту оптимізації, формування розуміння сутності алгоритму пошуку оптимального розв'язку у оптимізаційних моделях економічного вибору. Оволодіння практичним вмінням з побудови математичної моделі двоїстої задачі, отримання оптимального плану шляхом використання симплекс-методу та зв'язку оптимальних планів прямої і двоїстої задач; оволодіння методикою аналізу чутливості оптимального розв'язку та формування вміння оцінювати рентабельність продукції, виконувати аналіз обмежень дефіцитних і недефіцитних ресурсів та коефіцієнтів цільової функції.

#### Задача 2.1

Знайдемо оптимальний розв'язок задачі, математична модель якої має вигляд

$$L = 3x_1 + 2x_2 \rightarrow \max,$$

$$\begin{cases} x_1 + 2x_2 \leq 6 & (1), \\ 2x_1 + x_2 \leq 8 & (2), \\ -x_1 + x_2 \leq 1 & (3), \\ x_2 \leq 2 & (4), \\ x_1 \geq 0, x_2 \geq 0. \end{cases}$$

Побудуємо прямі обмежень, для чого обчислимо координати точок перетинання цих прямих з осями координат (рис. 2.1).

$$\begin{cases} x_1 + 2x_2 = 6 & (1), \\ 2x_1 + x_2 = 8 & (2), \\ -x_1 + x_2 = 1 & (3), \\ x_2 = 2 & (4). \end{cases}$$

$$(1) - \begin{cases} x_1 = 0 \\ x_2 = 3 \end{cases}, \begin{cases} x_1 = 6 \\ x_2 = 0 \end{cases}, (2) - \begin{cases} x_1 = 0 \\ x_2 = 8 \end{cases}, \begin{cases} x_1 = 4 \\ x_2 = 0 \end{cases}, (3) - \begin{cases} x_1 = 0 \\ x_2 = 1 \end{cases}, \begin{cases} x_1 = -1 \\ x_2 = 0 \end{cases}.$$

Пряма (4) проходить через точку  $x_2 = 2$  паралельно осі  $x_1$ .

Визначимо ОПР. Наприклад, підставимо точку  $(0;0)$  у вихідне обмеження (3), дістанемо  $0 < 1$ , що є істинною нерівністю, тому стрілкою позначимо напівплощину, яка містить точку  $(0;0)$ , тобто розташовану правіше та нижче за пряму (3). Аналогічно визначимо припустимі напівплощини для інших обмежень та вкажемо їх стрілками біля відповідних прямих обмежень.

Загальною областю, дозволеною всіма обмеженнями, тобто ОПР, є багатокутник ABCDEF.

Цільову пряму можна побудувати за рівнянням

$$3x_1 + 2x_2 = 6,$$

$$\begin{cases} x_1 = 0 \\ x_2 = 3 \end{cases}, \quad \begin{cases} x_1 = 2 \\ x_2 = 0 \end{cases}.$$

Побудуємо вектор  $C$  з точки  $(0;0)$  у точку  $(3;2)$ . Точка  $E$  – це остання вершина багатокутнику припустимих рішень ABCDEF, крізь яку проходить цільова пряма, що рухається за напрямком вектору  $C$ . Тому  $E$  – це точка максимуму цільової функції. Визначимо координати точки  $E$  з системи рівнянь прямих обмежень (1) та (2):

$$\begin{cases} x_1 + 2x_2 = 6 \\ 2x_1 + x_2 = 8 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_1 = \frac{10}{3} \\ x_2 = \frac{4}{3} \end{cases};$$

$$E = \left(3\frac{1}{3}; 1\frac{1}{3}\right).$$

Максимальне значення цільової функції дорівнює  $L^* = 3 * \frac{10}{3} + 2 * \frac{4}{3} = 12\frac{2}{3}$ .

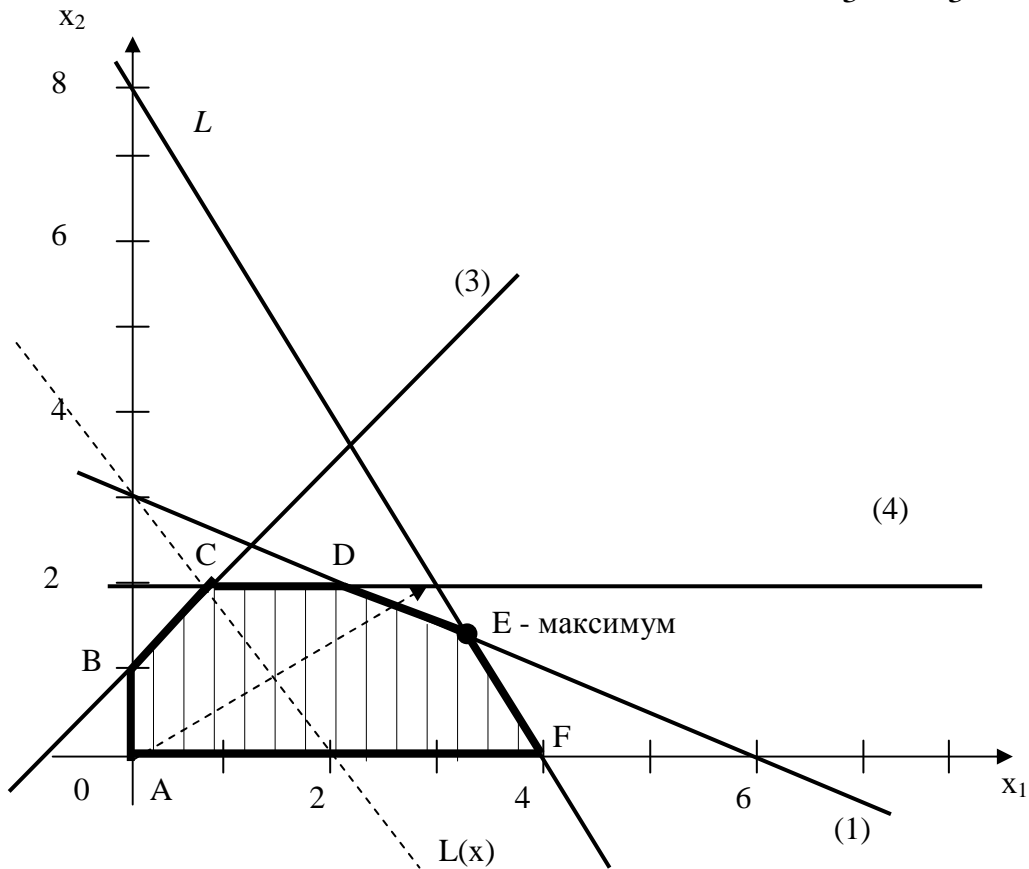


Рисунок 2.1 – Графічне розв'язання задачі

### Задача 2.2

Фабрика виробляє два види фарб: перший – для зовнішніх, а другий – для внутрішніх робіт. Для виробництва фарб використовують два інгредієнта: А і В. Максимально можливі добові запаси цих інгредієнтів відповідно 6 і 8 т. Відомі витрати А і В на 1 т відповідної фарби. Добовий попит на фарбу 2-го виду не перевищує попиту на фарбу 1-го виду більш ніж на 1 т. Попит на фарбу 2-го виду не перевищує 2 т на добу. Ціни на фарби відповідно дорівнюють 3 тис. грн і 2 тис. грн. за 1 т. Треба визначити план виробництва, що максимізує дохід та проаналізувати чутливість оптимального розв'язку задачі.

### Розв'язання

Параметри задачі зведемо у таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані

Інгредієнти	Витрати інгредієнтів, т.інгр/т.фарби		Запас, т.інгр/добу
	Фарба 1-го виду	Фарба 2-го виду	
А	1	2	6
В	2	1	8

ОПР задачі (рис. 2.2) – багатокутник ABCDEF. В оптимальній точці Е перетинаються прямі (1) і (2). Тому обмеження (1) і (2) є зв'язними, а відповідні їм ресурси (інгредієнти А і В) – дефіцитними.

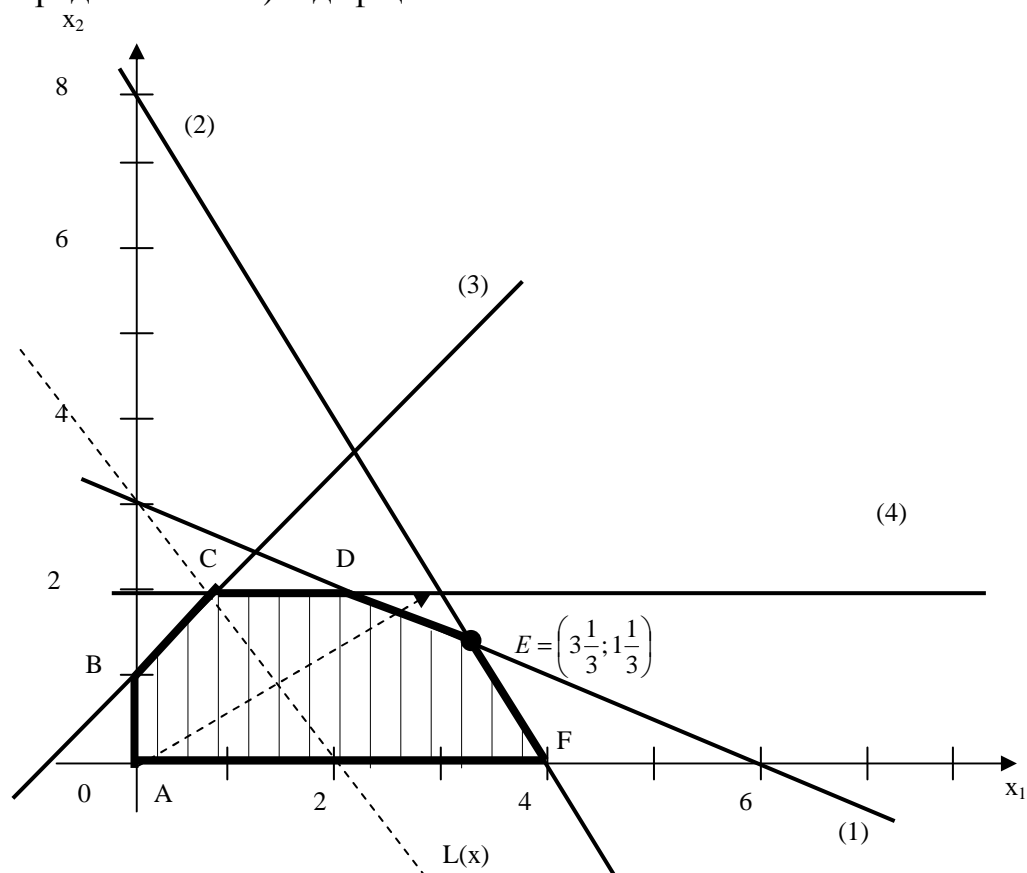


Рисунок 2.2 – Графічне розв'язання задачі

Розглянемо економічний зміст цих понять. Точка максимуму ЦФ  $E = \left(3\frac{1}{3}; 1\frac{1}{3}\right)$  відповідає добовому виробництву  $3\frac{1}{3}$  т фарби 1-го виду й  $1\frac{1}{3}$  т фарби 2-го виду. У виробництві фарб використовуються інгредієнти А і В. Добовий запас на складі інгредієнтів А і В - це праві частини зв'язних обмежень (1) і (2) (6 і 8 т інгр./добу). Згідно з цими обмеженнями, на виробництво в точці Е витрачається

$$1 * 3\frac{1}{3} + 2 * 1\frac{1}{3} = 6 \text{ [т інгр.А/добу]} \quad \text{і} \quad 2 * 3\frac{1}{3} + 1 * 1\frac{1}{3} = 8 \text{ [т інгр.В/добу]}.$$

$$L = 3x_1 + 2x_2 \rightarrow \max,$$

$$\begin{cases} x_1 + 2x_2 \leq 6 & (1), \\ 2x_1 + x_2 \leq 8 & (2), \\ -x_1 + x_2 \leq 1 & (3), \\ x_2 \leq 2 & (4), \\ x_1 \geq 0, x_2 \geq 0. \end{cases}$$

Отже, поняття «зв'язні обмеження» (1) і (2) означає, що при виробництві фарб у точці  $E\left(3\frac{1}{3}; 1\frac{1}{3}\right)$  запаси інгредієнтів А і В витрачаються повністю і з цієї причини неможливо подальше нарощування виробництва. У цьому полягає економічний зміст поняття дефіцитності ресурсів, тобто якщо фірма зможе збільшити добові запаси інгредієнтів, то це дозволить збільшити випуск фарб. У зв'язку з цим виникає питання: до якого рівня доцільно збільшити запаси інгредієнтів і на скільки при цьому збільшиться оптимальне виробництво фарб?

*Правило 1.* Щоб графічно визначити максимальне збільшення запасу дефіцитного ресурсу, що викликає поліпшення оптимального розв'язку, необхідно пересувати відповідну пряму в напрямку поліпшення ЦФ доти, поки це обмеження не стане надлишковим.

При проходженні прямої (1) через точку К (рис. 2.3) багатокутник АВСКФ стає ОПР, а обмеження (1) – надлишковим. Дійсно, якщо видалити пряму (1), що проходить через точку К, ОПР АВСКФ не зміниться. Точка К стає оптимальною, у цій точці обмеження (2) і (4) стають зв'язними.

*Правило 2.* Щоб чисельно визначити максимальну величину запасу дефіцитного ресурсу, що викликає поліпшення оптимального розв'язку, необхідно:

- визначити координати точки  $(x_1; x_2)$ , у якій відповідне обмеження стає надлишковим;
- підставити координати  $(x_1; x_2)$  у ліву частину відповідного обмеження.

Координати точки  $K(3;2)$  знайдемо шляхом рішення системи рівнянь прямих (2) і (4). Тобто у цій точці фірма буде робити 3 т фарби 1-го виду і 2 т фарби 2-го виду. Підставимо  $x_1 = 3$  і  $x_2 = 2$  у ліву частину обмеження (1) і отримаємо максимально припустимий запас інгредієнта А

$$x_1 + 2x_2 = 3 + 2 \cdot 2 = 7 \text{ [т інгр.А/добу]}.$$

Подальше збільшення запасу інгредієнта А недоцільно, тому що це не змінить ОПР і не призведе до іншого оптимального розв'язку. Дохід від продажу фарб в обсязі, що відповідає точці К, можна розрахувати, підставивши її координати (3;2) до виразу ЦФ

$$3x_1 + 2x_2 = 3 \cdot 3 + 2 \cdot 2 = 13 \text{ [тис. грн. /добу]}.$$

Розглянемо доцільність збільшення запасу інгредієнта В. Відповідно до правила 1, обмеження (2) стає надлишковим у точці J, в якій перетинаються пряма (1) і вісь змінної  $x_1$  (рис. 2.4). Багатокутник ABCDJ стає ОПР, а точка  $J(6;0)$  – оптимальним розв'язком.

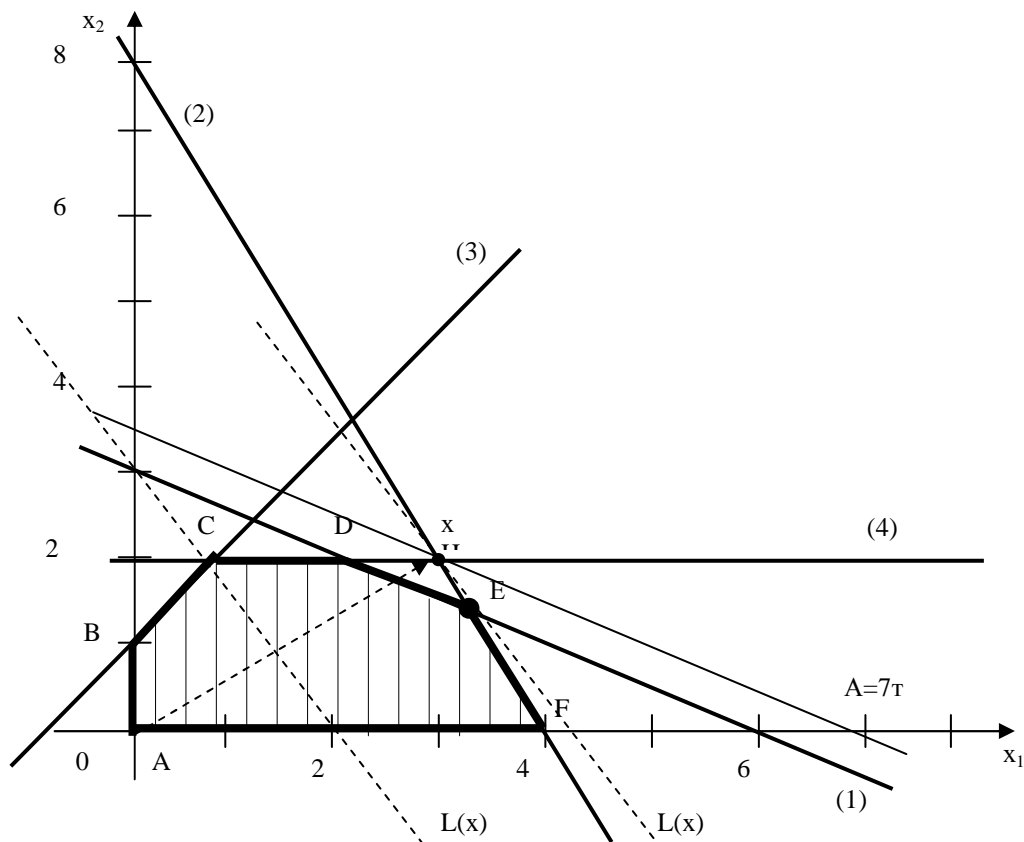


Рисунок 2.3 – Аналіз збільшення ресурсу А

У точці J вигідно виробляти тільки фарбу 1-го виду (6 т на добу). Дохід від продажу при цьому складе

$$3x_1 + 2x_2 = 3 \cdot 6 + 2 \cdot 0 = 18 \text{ [тис. грн. /добу]}.$$

Щоб забезпечити такий режим роботи, відповідно до правила 2, запас інгредієнта В треба збільшити до величини

$$2x_1 + x_2 = 2 \cdot 6 + 0 = 12 \text{ [т інгр.В/добу]}.$$

Обмеження (3) і (4) є незв'язними, тому що не проходять через оптимальну точку E (рис. 2.4). Відповідні їм ресурси (попит на фарби) є недефіцитними. З економічної точки зору це означає, що в цей момент рівень попиту на фарби безпосередньо не зумовлює обсяг виробництва. Тому деяке

його коливання може ніяк не вплинути на оптимальний режим виробництва в точці E.

Наприклад, збільшення (зменшення) попиту на фарбу 2-го виду буде відповідати переміщенню прямої обмеження  $x_2 \leq 2$  (4) вгору (униз). Переміщення прямої (4) вгору ніяк не може змінити точку E максимуму ЦФ. Переміщення ж прямої (4) униз не впливає на існуюче оптимальне рішення тільки до перетинання із точкою E (правило 3).

*Правило 3.* Щоб визначити максимальне зменшення запасу недефіцитного ресурсу, що не змінює оптимального розв'язку, необхідно пересувати відповідну пряму до перетинання з оптимальною точкою.

*Правило 4.* Щоб чисельно визначити мінімальну величину запасу недефіцитного ресурсу, що не змінює оптимального розв'язку, необхідно підставити координати оптимальної точки до лівої частини відповідного обмеження.

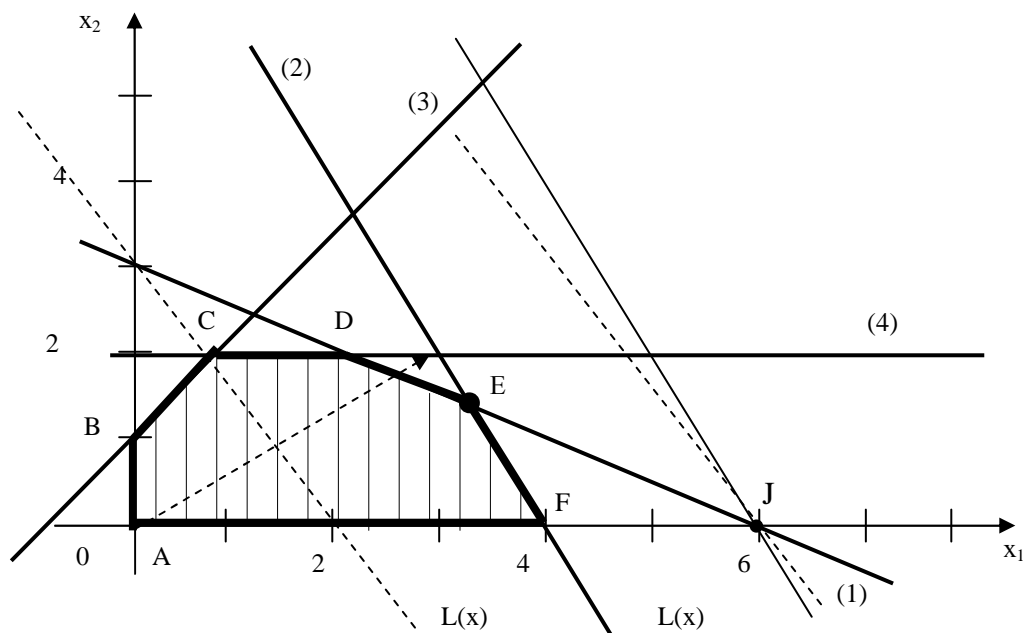


Рисунок 2.4 – Аналіз збільшення ресурсу B

Щоб з'ясувати, до яких меж падіння попиту на фарбу 2-го виду не вплине на виробництво в точці  $E\left(3\frac{1}{3}; 1\frac{1}{3}\right)$ , використаємо правило 4. Підставляємо до лівої частини обмеження (4) координати точки E, одержуємо

$$x_2 = 1\frac{1}{3}.$$

Тобто граничний рівень, до якого може знизитись попит на фарбу 2-го виду і при якому не зміниться оптимальність отриманого раніше рішення, дорівнює  $1\frac{1}{3}$  т фарби на добу.

Економічний зміст обмеження (3)

$$-x_1 + x_2 \leq 1 \text{ [т фарби/добу]}$$

полягає у тому, що обсяг продажів фарби 2-го виду може перевищити обсяг

продажів фарби 1-го виду максимум на 1 т. Подальше збільшення продажів фарби 2-го виду порівняно з фарбою 1-го виду графічно відобразиться переміщенням прямої (3) уліво й вгору, але ніяк не вплине на оптимальність точки Е. Але якщо різниця попитів на фарбу 2-го й 1-го видів буде зменшуватися, то пряма (3) буде переміщатися нижче й правіше. Останнім положенням прямої (3), при якому точка Е залишається оптимальною, є перетинання із точкою Е (рис. 2.2). Відповідно до правила 4, підставимо координати точки  $E\left(3\frac{1}{3}; 1\frac{1}{3}\right)$  у ліву частину обмеження (3)

$$-x_1 + x_2 = -3\frac{1}{3} + 1\frac{1}{3} = -2 \text{ [т фарби]}.$$

Різниця попитів на фарбу 2-го й 1-го виду в точці стала від'ємною. Тобто, проходження прямої (3) через точку Е означає, що фарбу 2-го виду будуть купувати у меншому обсязі, ніж фарбу 1-го виду

$$x_1 - x_2 = 2 \text{ [т фарби/доба]}.$$

Висновок: максимальне перевищення попиту на фарбу 1-го виду над попитом на фарбу 2-го виду, при якому оптимальне рішення в точці Е не зміниться, становить 2 т фарби в добу.

Результати розв'язання першої задачі аналізу оптимального рішення на чутливість подані в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати аналізу ресурсів задачі

№	Тип ресурсу	Максимальна зміна ресурсу, $\max\Delta B_i$ , т/добу	Максимальна зміна доходу, $\max\Delta L^*$ , тис. грн./добу	Цінність додаткової одиниці ресурсу $y_i = \max\Delta L^*/\max\Delta B_i$ , тис. грн./т
(1)	Дефіцитний	$7-6=+1$	$13-12\frac{2}{3}=+\frac{1}{3}$	$y_1 = \left[\frac{1/3}{1}\right] = \frac{1}{3}$
(2)	Дефіцитний	$12-8=+4$	$18-12\frac{2}{3}=+5\frac{1}{3}$	$y_2 = \left[5\frac{1/3}{4}\right] = 1\frac{1}{3}$
(3)	Недефіцитний	$-2-1=-3$	$12\frac{2}{3}-12\frac{2}{3}=0$	$y_3 = [0/(-3)] = 0$
(4)	Недефіцитний	$1\frac{1}{3}-2\frac{2}{3}=-\frac{2}{3}$	$12\frac{2}{3}-12\frac{2}{3}=0$	$y_4 = \left[0/\left(-\frac{2}{3}\right)\right] = 0$

*Друга задача аналізу на чутливість (вибір ресурсу, збільшення запасу якого є найвигіднішим)*

Аналіз таблиці 2.2 показує, що до поліпшення оптимального розв'язку, тобто до збільшення добового доходу, призводить збільшення дефіцитних ресурсів. Для визначення вигідності збільшення цих ресурсів використовують поняття цінності додаткової одиниці  $i$ -го ресурсу  $y_i$

$$y_i = \frac{\max \Delta L^*}{\max \Delta B_i},$$

де  $\max \Delta L^*$  – максимальний приріст оптимального значення ЦФ;  $\max \Delta B_i$  – максимально припустимий приріст обсягу  $i$ -го ресурсу.

Наприклад, з таблиці 2.2 випливає, що збільшення добового запасу інгредієнта А [обмеження (1)] на 1 т дозволить отримати додатковий дохід, що дорівнює  $y_1 = \frac{1}{3}$  тис.грн./добу, в той час як збільшення запасу В [обмеження (2)] на 1 т принесе  $y_2 = 1\frac{1}{3}$  тис.грн./добу. Недефіцитні ресурси мають нульові оцінки, оскільки зміна цих ресурсів не призводить до збільшення доходу.

Висновок: додаткові вкладення в першу чергу треба направляти на збільшення ресурсу В, а лише потім на ресурс А. Змінювати недефіцитні ресурси немає необхідності.

### *Третя задача аналізу на чутливість (Аналіз зміни коефіцієнтів ЦФ)*

Зробимо графічний аналіз припустимого діапазону зміни цін. Зміна цін на продукцію, тобто зміна коефіцієнтів ЦФ, подається на графіку обертанням цільовій прямої навколо оптимальної точки. Так, при збільшенні коефіцієнта ЦФ  $c_1$  або зменшенні  $c_2$  цільова пряма обертається за годинниковою стрілкою. При зменшенні  $c_1$  або ж збільшенні  $c_2$  цільова пряма обертається проти годинникової стрілки (рис. 2.5).

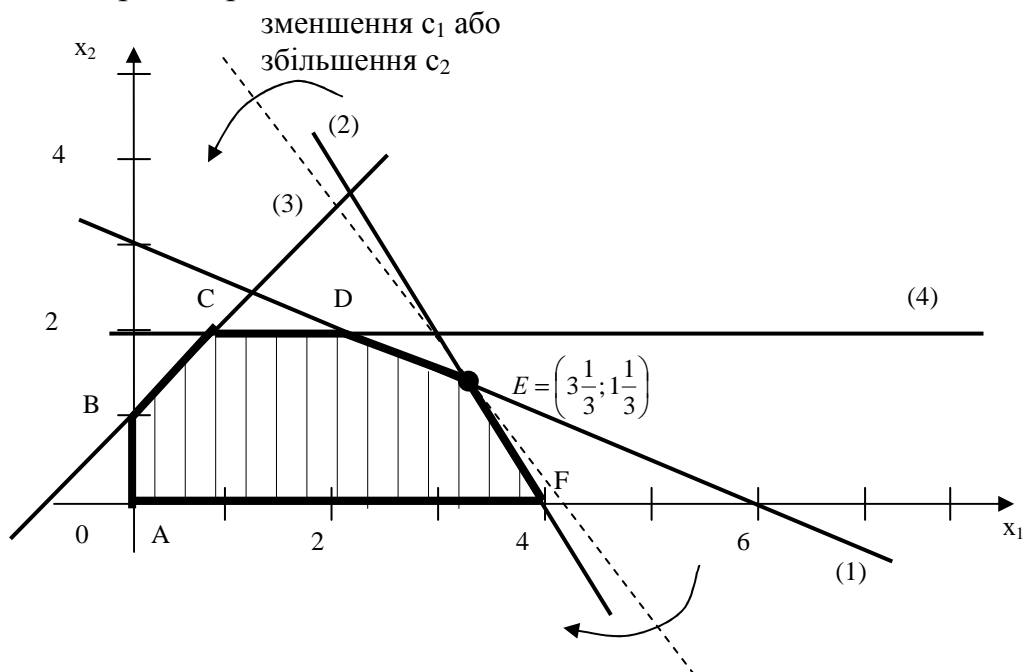


Рисунок 2.5 – Аналіз зміни цін

При таких поворотах точка  $E$  залишатиметься оптимальною доти, поки нахил цільової прямої не вийде за межі, зумовлені нахилами прямих обмежень (1) і (2). Так, наприклад, якщо нахил цільової прямої збіжиться з нахилом прямої (1), оптимальним рішенням будуть точки відрізка  $DE$ .



У випадку збігу с прямою (2) оптимальним рішенням будуть точки відрізка EF. Якщо цільова пряма вийде за межі нахилу (1) або (2), то оптимальною точкою стане відповідно D або F.

Припустимо, що ціна на фарбу 2-го виду не змінюється, тобто зафіксуємо значення цільового коефіцієнта  $c_2$ . Проаналізуємо графічно результати зміни значення цільового коефіцієнту  $c_1$ , тобто ціни на фарбу 1-го виду. Оптимальне рішення в точці E не буде змінюватися при збільшенні  $c_1$  доти, поки цільова пряма не збіжиться з прямою (2). Аналогічно, оптимальне рішення в точці E не буде змінюватися при зменшенні  $c_1$  доти, поки цільова пряма не збіжиться з прямою (1).

*Аналiтичний пошук припустимого  
діапазону зміни цін*

Збіг у процесі обертання цільової прямої з прямою обмеження означає, що кути їхнього нахилу щодо горизонтальної осі зрівнялися, а виходить, стали рівними тангенси кутів нахилу цих прямих.

*Правило 5.* Щоб визначити границі припустимого діапазону зміни коефіцієнта ЦФ, наприклад  $\min c_1$  і  $\max c_1$ , необхідно дорівняти тангенс кута нахилу цільової прямої  $\operatorname{tg}\alpha_{\text{ЦФ}}$  по черзі до тангенсів кутів нахилу прямих зв'язних обмежень, наприклад  $\operatorname{tg}\alpha_{(1)}$  і  $\operatorname{tg}\alpha_{(2)}$  (рис. 2.6 і 2.7).

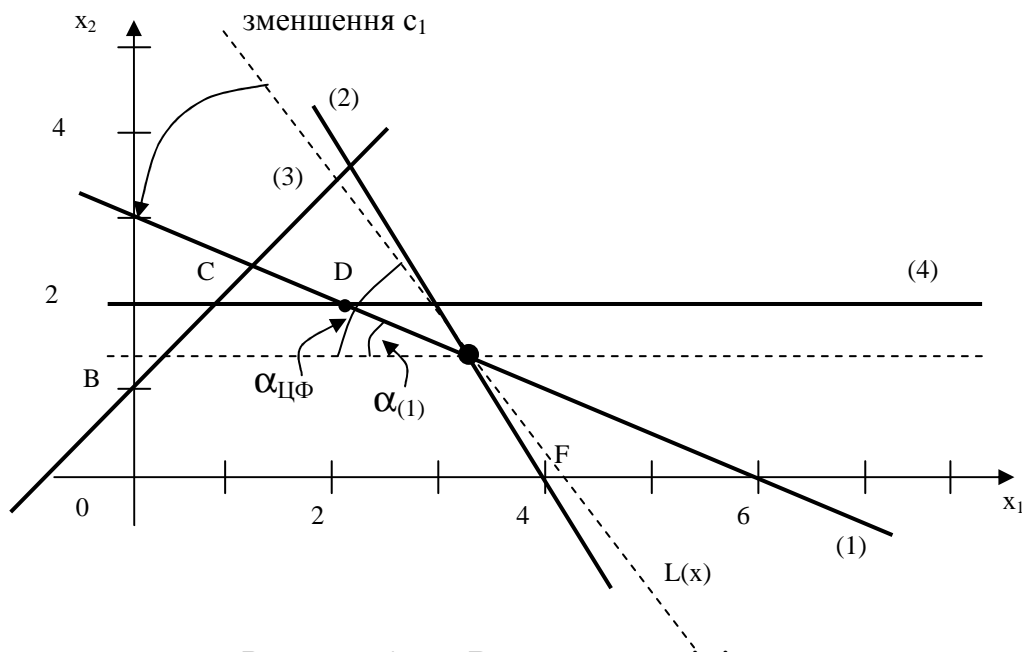


Рисунок 2.6 – Визначення мінімуму  $c_1$

Визначимо наскільки максимально може знизитися ціна на фарбу 1-го виду, не змінюючи оптимальну точку E. Для цього скористуємось правилом 5 і формулою розрахунку тангенса кута нахилу прямої (рис. 2.8).

Визначимо тангенси кутів нахилу:

- цільової прямої  $L(x) = 3x_1 + 2x_2 \rightarrow \max$ , з огляду на те, що  $c_2=2$  фіксоване

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{ЦФ}} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{c_1}{2};$$

- зв'язного обмеження  $x_1 + 2x_2 \leq 6$  (1)

$$\operatorname{tg} \alpha_{(1)} = \frac{1}{2};$$

- зв'язного обмеження  $2x_1 + x_2 \leq 8$  (2)

$$\operatorname{tg} \alpha_{(2)} = \frac{2}{1} = 2.$$

Для знаходження  $\min c_1$  цільова пряма має збігтися з прямою (1) (рис. 2.6):

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{ЦФ}} = \operatorname{tg} \alpha_{(1)},$$

$$\frac{c_1}{2} = \frac{1}{2}, \min c_1 = 1 \text{ [тис. грн./т].}$$

Для знаходження  $\max c_1$  цільова пряма має збігтися із прямою (2) (рис. 2.7):

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{ЦФ}} = \operatorname{tg} \alpha_{(2)},$$

$$\frac{c_1}{2} = 2; \max c_1 = 4 \text{ [тис. грн./т].}$$

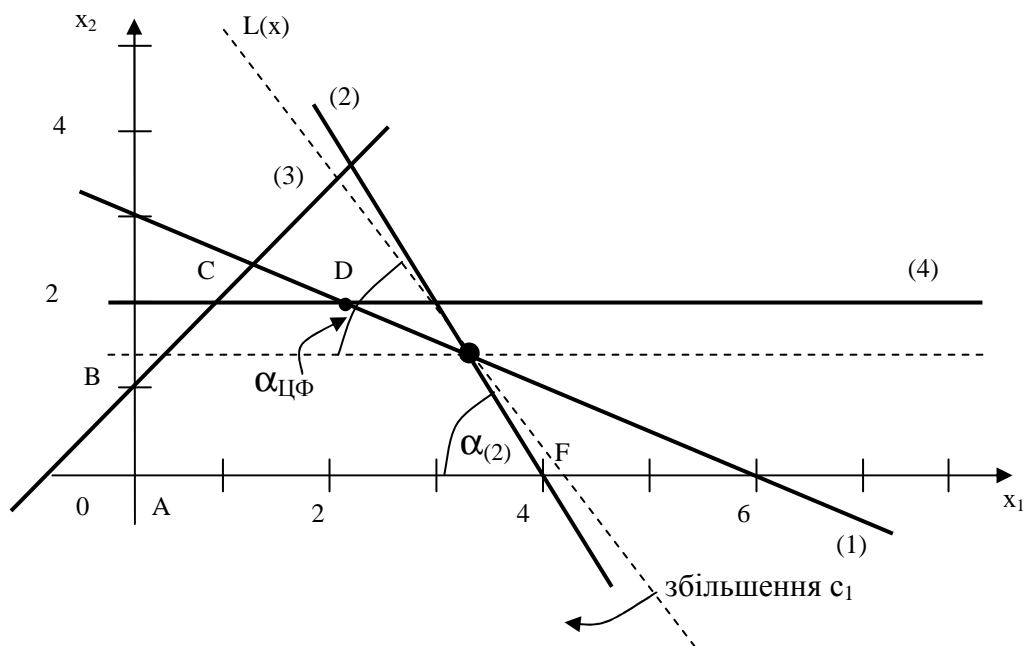


Рисунок 2.7 – Визначення максимуму  $c_1$

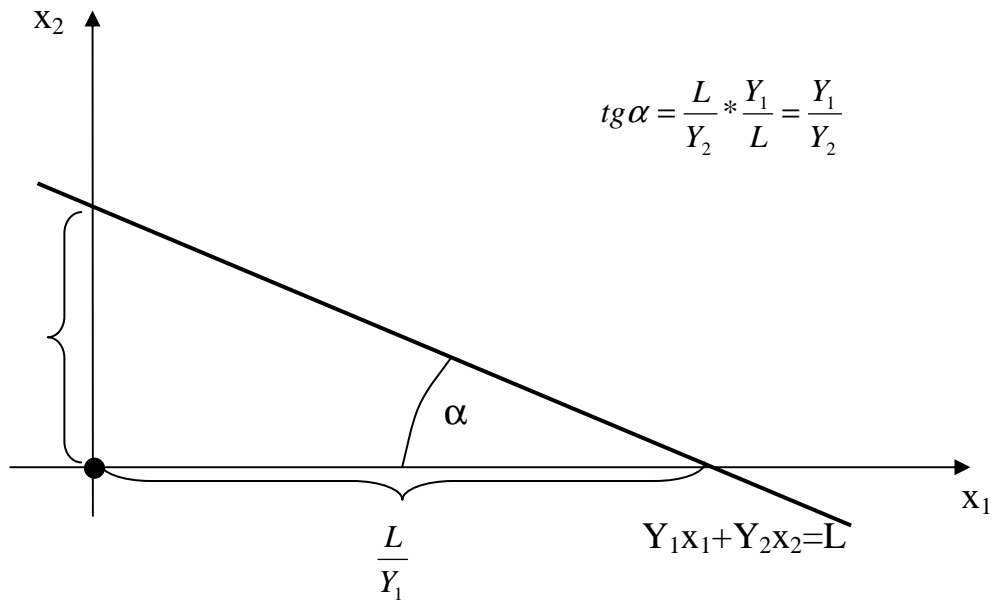


Рисунок 2.8 – Визначення тангенса кута нахилу  $\operatorname{tg} \alpha$  прямої  $Y_1x_1 + Y_2x_2 = L$

Отже, якщо ціни на фарбу першого виду коливатимуться в межах  $1 < c_1 < 4$  тис. грн/т, то оптимальне рішення задачі не зміниться.

З проведених розрахунків і їхньої графічної ілюстрації випливає, що якщо ціна на фарбу першого виду стане меншою за 1 тис.грн./т ( $c_1 < 1$ ), найбільш вигідним буде виробництво фарб у точці D (рис. 2.6). При цьому загальне споживання інгредієнту B знизиться, що призведе до його недефіцитності [ресурс (2)], а дефіцитними будуть ресурси (1) і (4).

### Практичне заняття 3 – 2 години

#### Тема ПЗ: ПОБУДОВА ЗАГАЛЬНОЇ ЛІНІЙНОЇ МОДЕЛІ

Мета – оволодіння основними етапами економетричного моделювання та визначення параметрів моделі за методом найменших квадратів.

#### Задача 3.1

За даними проведеного опитування восьми груп сімей відомі дані зв'язку витрат населення на продукти харчування з рівнем доходів сім'ї. Дані наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані

<b>Витрати на продукти харчування, у, тис. грн.</b>	0,9	1,2	1,8	2,2	2,6	2,9	3,3	3,8
<b>Доходи сім'ї, x, тис. грн.</b>	1,2	3,1	5,3	7,4	9,6	11,8	14,5	18,7

Припустимо, що зв'язок між доходами сім'ї та витратами на продукти харчування є лінійним. Для підтвердження цього припущення побудуємо поле кореляції, наведене на рисунку 3.1.

З графіка видно, що точки вибудовуються в певну пряму лінію.

Для зручності подальших обчислень складемо таблицю 3.2.

Розрахуємо параметри лінійного рівняння парної регресії  $\hat{y}_x = a + b \cdot x$ .

Для цього скористаємося формулами:

$$b = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sigma_x^2} = \frac{\overline{x \cdot y} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\overline{x^2} - \bar{x}^2} = \frac{26,09 - 8,95 \cdot 2,34}{30,56} = 0,168,$$

$$a = \bar{y} - b \cdot \bar{x} = 2,34 - 0,168 \cdot 8,95 = 0,836.$$

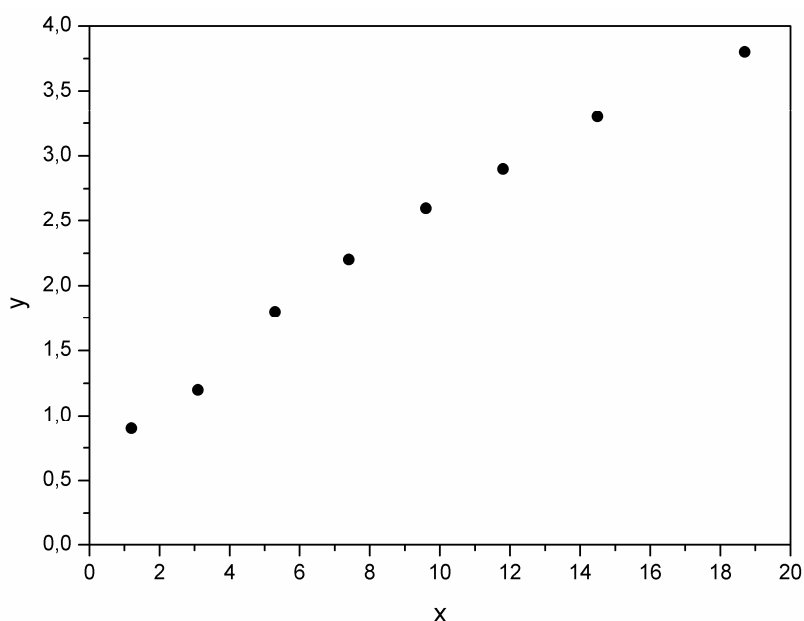


Рисунок 3.1 – Поле кореляції

Таблиця 3.2 – Поточні розрахунки

	$x$	$y$	$x \cdot y$	$x^2$	$y^2$	$\hat{y}_x$	$y - \hat{y}_x$	$(y - \hat{y}_x)^2$	$A_i, \%$
1	1,2	0,9	1,08	1,44	0,81	1,038	-0,138	0,0190	15,33
2	3,1	1,2	3,72	9,61	1,44	1,357	-0,157	0,0246	13,08
3	5,3	1,8	9,54	28,09	3,24	1,726	0,074	0,0055	4,11
4	7,4	2,2	16,28	54,76	4,84	2,079	0,121	0,0146	5,50
5	9,6	2,6	24,96	92,16	6,76	2,449	0,151	0,0228	5,81
6	11,8	2,9	34,22	139,24	8,41	2,818	0,082	0,0067	2,83
7	14,5	3,3	47,85	210,25	10,89	3,272	0,028	0,0008	0,85
8	18,7	3,8	71,06	349,69	14,44	3,978	-0,178	0,0317	4,68
Разом	71,6	18,7	208,71	885,24	50,83	18,717	-0,017	0,1257	52,19
Середнє значення	8,95	2,34	26,09	110,66	6,35	2,34	-	0,0157	6,52
$\sigma$	5,53	0,935	-	-	-	-	-	-	-
$\sigma^2$	30,56	0,874	-	-	-	-	-	-	-

Дістали рівняння:  $\hat{y}_x = 0,836 + 0,168 \cdot x$ . Тобто із збільшенням доходу сім'ї на 1000 грн. витрати на харчування збільшуються на 168 грн.

Як було відзначено вище, рівняння лінійної регресії завжди доповнюється показником тісноти зв'язку – лінійним коефіцієнтом кореляції  $r_{xy}$ :

$$r_{xy} = b \cdot \frac{\sigma_x}{\sigma_y} = 0,168 \cdot \frac{5,53}{0,935} = 0,994.$$

Наближеність коефіцієнта кореляції до одиниці вказує на тісний лінійний зв'язок між ознаками.

Коефіцієнт детермінації  $r_{xy}^2 = 0,987$  показує, що рівняння регресії пояснює 98,7% дисперсії результативної ознаки, а на долю інших факторів припадає лише 1,3%.

Оцінимо якість рівняння регресії в цілому за допомогою  $F$ -критерію Фішера. Розрахуємо фактичне значення  $F$ -критерію:

$$F = \frac{r_{xy}^2}{1 - r_{xy}^2} \cdot (n - 2) = \frac{0,987}{1 - 0,987} \cdot 6 = 455,54.$$

Табличне значення ( $k_1 = 1$ ,  $k_2 = n - 2 = 6$ ,  $\alpha = 0,05$ ):  $F_{\text{табл}} = 5,99$ . Оскільки  $F_{\text{факт}} > F_{\text{табл}}$ , визнаємо статистичну значущість рівняння в цілому.

Для оцінки статистичної значущості коефіцієнтів регресії та кореляції розрахуємо  $t$ -критерій Стьюдента та довірчі інтервали кожного з показників. Розрахуємо випадкові помилки параметрів лінійної регресії та коефіцієнту кореляції  $S_{\text{зал}}^2 = \frac{\sum (y - \hat{y}_x)^2}{n - 2} = \frac{0,1257}{8 - 2} = 0,021$ :

$$m_b = \frac{S_{\text{зал}}}{\sigma_x \sqrt{n}} = \frac{\sqrt{0,021}}{5,53 \sqrt{8}} = 0,0093,$$

$$m_a = S_{\text{зал}} \frac{\sqrt{\sum x^2}}{\sigma_x n} = \frac{\sqrt{0,021 * 885,24}}{5,53 * 8} = 0,0975,$$

$$m_r = \sqrt{\frac{1 - r^2}{n - 2}} = \sqrt{\frac{1 - 0,987}{6}} = 0,0465.$$

Фактичні значення  $t$ -статистик:  $t_b = \frac{0,168}{0,093} = 18,065$ ,  $t_a = \frac{0,836}{0,0975} = 8,574$ ,

$t_r = \frac{0,994}{0,0465} = 21,376$ . Табличне значення  $t$ -критерію Стьюдента при  $\alpha = 0,05$  та

кількості ступенів свободи  $\nu = n - 2 = 6$  дорівнює  $t_{\text{табл}} = 2,447$ . Оскільки  $t_b > t_{\text{табл}}$ ,

$t_a > t_{\text{табл}}$  та  $t_r > t_{\text{табл}}$ , визнаємо статистичну значущість параметрів регресії та

показника тісноти зв'язку. Розрахуємо довірчі інтервали для параметрів регресії

$a$  та  $b$ :  $a \pm t \cdot m_a$ ,  $b \pm t \cdot m_b$ . Отримаємо  $a \in [0,597; 1,075]$ ,

$b \in [0,145; 0,191]$ .

Середня помилка апроксимації (знаходимо за допомогою стовпця 10 таблиці 3.2 за формулою  $A_i = \left| \frac{y_i - \hat{y}_{x_i}}{y_i} \right| \cdot 100\%$ )  $A=6,52\%$  говорить про гарну якість рівняння регресії, тобто свідчить про гарний підбор моделі до вихідних даних.

Визначимо прогнозне значення результативного фактору  $\hat{y}_p$  при значенні ознаки-фактору, що складає 110% від середнього рівня  $x_p = 1,1 \cdot \bar{x} = 1,1 \cdot 8,95 = 9,845$ , тобто визначимо витрати на харчування, якщо доходи сім'ї складуть 9,85 тис. грн.

$$\hat{y}_p = 0,836 + 0,168 \cdot 9,845 = 2,490 \text{ (тис.грн.)}$$

Отже, якщо доходи сім'ї складуть 9,845 тис. грн., витрати на харчування будуть 2,490 тис.грн.

Визначимо довірчий інтервал прогнозу. Помилка прогнозу

$$m_{\hat{y}_p} = S_{\text{зал}} \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_p - \bar{x})^2}{n\sigma_x^2}} = \sqrt{0,021 \left( 1 + \frac{1}{8} + \frac{(9,845 - 8,95)^2}{8 \cdot 30,56} \right)} = 0,154,$$

а довірчий інтервал ( $\hat{y}_p - \Delta_{\hat{y}_p} \leq \hat{y}_p \leq \hat{y}_p + \Delta_{\hat{y}_p}$ ):

$$2,113 < \hat{y}_p < 2,867.$$

Отже, прогноз є статистично надійним.

На одному графіку побудуємо вихідні дані та лінію регресії (рис. 3.2):

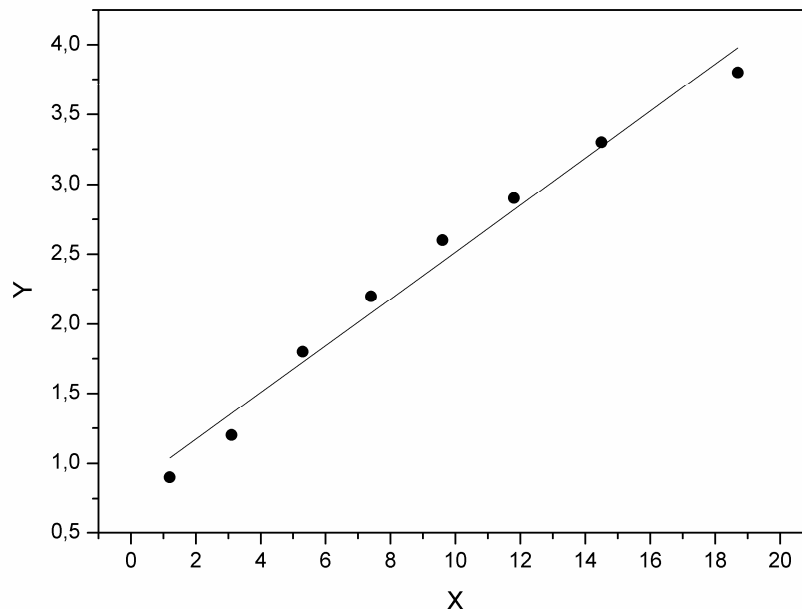


Рисунок 3.2 – Лінія регресії

### Задача 3.2

Нехай є дані (умовні) про змінний видобуток вугілля на одного робітника  $y$  (т), потужності шару  $x_1$  (м) та рівні механізації робіт  $x_2$  (%), що характеризують процес видобутку вугілля у 10 шахтах (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Вихідні дані

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$x_1$	8	11	12	9	8	8	9	9	8	12
$x_2$	5	8	8	5	7	8	6	4	5	7
$y$	5	10	10	7	5	6	6	5	6	8

Припустимо, що між змінними  $y$ ,  $x_1$ ,  $x_2$  існує лінійна кореляційна залежність та знайдемо рівняння регресії  $y$  на  $x_1$  та  $x_2$ .

Для зручності подальших обчислень складемо таблицю 3.4 ( $\varepsilon = y - \hat{y}_x$ ).

Для визначення параметрів рівняння регресії в цьому випадку необхідно розв'язати наступну систему нормальних рівнянь:

$$\begin{cases} 10a + 94b_1 + 63b_2 = 68, \\ 94a + 908b_1 + 603b_2 = 664, \\ 63a + 603b_1 + 417b_2 = 445. \end{cases}$$

Звідки отримаємо, що  $a = -3,54$ ,  $b_1 = 0,854$ ,  $b_2 = 0,367$ . Тобто рівняння множинної регресії має вигляд:

$$\hat{y}_x = -3,54 + 0,854 \cdot x_1 + 0,367 \cdot x_2.$$

Таблиця 3.4 – Поточні розрахунки

№	$x_1$	$x_2$	$y$	$x_1^2$	$x_2^2$	$y^2$	$x_1 \cdot x_2$	$x_1 \cdot y$	$x_2 \cdot y$	$\hat{y}_x$	$\varepsilon^2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	8	5	5	64	25	25	40	40	25	5,13	0,016
2	11	8	10	121	64	100	88	110	80	8,79	1,464
3	12	8	10	144	64	100	96	120	80	9,64	0,127
4	9	5	7	81	25	49	45	63	35	5,98	1,038
5	8	7	5	64	49	25	56	40	35	5,86	0,741
6	8	8	6	64	64	36	64	48	48	6,23	0,052
7	9	6	6	81	36	36	54	54	36	6,35	0,121
8	9	4	5	81	16	25	36	45	20	5,61	0,377
9	8	5	6	64	25	36	40	48	30	5,13	0,762
10	12	7	8	144	49	64	84	96	56	9,28	1,631
Сума	94	63	68	908	417	496	603	664	445	68	6,329
Середнє значення	9,4	6,3	6,8	90,8	41,7	49,6	60,3	66,4	44,5	–	–
$\sigma^2$	2,44	2,01	3,36	–	–	–	–	–	–	–	–
$\sigma$	1,56	1,42	1,83	–	–	–	–	–	–	–	–

Воно показує, що при збільшенні тільки потужності шару  $x_1$  (при незмінному  $x_2$ ) на 1 м здобування вугілля на одного робітника  $y$  зростає у середньому на 0,854 т, а при збільшенні тільки рівня механізації робіт  $x_2$  (при

незмінному  $x_1$ ) на 1% – у середньому на 0,367 т.

Знайдемо рівняння множинної регресії у стандартизованому масштабі:

$$t_y = \beta_1 t_{x_1} + \beta_2 t_{x_2} + \varepsilon,$$

при цьому визначимо стандартизовані коефіцієнти регресії:

$$\beta_1 = b_1 \frac{\sigma_{x_1}}{\sigma_y} = 0,854 \cdot \frac{1,56}{1,83} = 0,728,$$

$$\beta_2 = b_2 \frac{\sigma_{x_2}}{\sigma_y} = 0,367 \cdot \frac{1,42}{1,83} = 0,285.$$

Отже отримали рівняння

$$\hat{t}_y = 0,728 \cdot t_{x_1} + 0,285 \cdot t_{x_2}.$$

Стандартизовані коефіцієнти регресії можна порівнювати один з одним. Отже можна побачити, що потужність шару впливає на змінний видобуток вугілля більше за рівень механізації робіт.

Порівнювати вплив факторів на результат можна так само за допомогою середніх коефіцієнтів еластичності:

$$\bar{E}_i = b_i \cdot \frac{\bar{x}_i}{y_{xi}},$$

або

$$\bar{E}_1 = 0,854 \cdot \frac{9,4}{6,8} = 1,18, \quad \bar{E}_2 = 0,367 \cdot \frac{6,3}{6,8} = 0,34.$$

Отже, збільшення тільки потужності шару (від свого середнього значення) або тільки рівня механізації робіт на 1% збільшує в середньому змінний видобуток вугілля на 1,18% або 0,34% відповідно. Це підтверджує, що вплив на результат у фактору  $x_1$  перевищує вплив фактору  $x_2$ .

### Задача 3.3

Оцінимо якість рівняння, що отримане у попередній задачі. Спочатку визначимо парні коефіцієнти кореляції:

$$r_{yx_1} = \frac{y \cdot x_1 - \bar{y} \cdot \bar{x}_1}{\sigma_y \cdot \sigma_{x_1}} = \frac{66,4 - 6,8 \cdot 9,4}{1,83 \cdot 1,56} = 0,869,$$

$$r_{yx_2} = \frac{y \cdot x_2 - \bar{y} \cdot \bar{x}_2}{\sigma_y \cdot \sigma_{x_2}} = \frac{44,5 - 6,8 \cdot 6,3}{1,83 \cdot 1,42} = 0,639,$$

$$r_{x_1 x_2} = \frac{x_1 \cdot x_2 - \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2}{\sigma_{x_1} \cdot \sigma_{x_2}} = \frac{60,3 - 9,4 \cdot 6,3}{1,56 \cdot 1,42} = 0,488.$$

Їхні значення вказують на досить тісний зв'язок змінного видобутку вугілля на одного робітника  $y$  з потужністю шару  $x_1$  та на помірний зв'язок з рівнем механізації робіт  $x_2$ . У той самий час міжфакторний зв'язок  $r_{x_1 x_2}$  не дуже сильний ( $r_{x_1 x_2} = 0,49 < 0,7$ ). Це показує, що обидва фактори є інформативними, тобто необхідно включити до моделі  $x_1$  та  $x_2$ .



Визначимо сукупний коефіцієнт кореляції  $R_{yx_1x_2}$ . Для цього спочатку знайдемо визначник матриці парних коефіцієнтів кореляції

$$\Delta r = \begin{vmatrix} 1 & 0,87 & 0,64 \\ 0,87 & 1 & 0,49 \\ 0,64 & 0,49 & 1 \end{vmatrix} = 0,139064$$

та визначник матриці міжфакторної кореляції:

$$\Delta r_{11} = \begin{vmatrix} 1 & 0,49 \\ 0,49 & 1 \end{vmatrix} = 0,7599.$$

Тоді коефіцієнт множинної кореляції визначимо за формулою:

$$R_{yx_1x_2} = \sqrt{1 - \frac{\Delta r}{\Delta r_{11}}} = \sqrt{1 - \frac{0,139064}{0,7599}} = 0,904.$$

Можна сказати, що 81,7% (коефіцієнт детермінації  $R_{yx_1x_2}^2 = 0,817$ ) варіації результативної ознаки пояснюється варіацією представлених у рівнянні ознак-факторів, що вказує на досить тісний зв'язок ознак з результатом.

Приблизно той самий результат (розходження пов'язані з помилками округлень) дістанемо для коефіцієнта множинної регресії, якщо скористаємося формулами:

$$R_{yx_1x_2} = \sqrt{1 - \frac{\sigma_{\text{зал}}^2}{\sigma_y^2}} = \sqrt{1 - \frac{0,633}{3,36}} = 0,901,$$

$$R_{yx_1x_2} = \sqrt{\sum \beta_i \cdot r_{yx_i}} = \sqrt{0,728 \cdot 0,87 + 0,285 \cdot 0,64} = 0,903.$$

Скорегований коефіцієнт множинної детермінації

$$\bar{R} = 1 - (1 - R^2) \cdot \frac{n-1}{n-m-1} = 1 - (1 - 0,817) \cdot \frac{10-1}{10-2-1} = 0,765$$

вказує на помірний зв'язок між результатом та ознаками. Це зумовлено малою кількістю спостережень.

Визначимо часткові коефіцієнти кореляції за формулами:

$$r_{yx_1x_2} = \sqrt{1 - \frac{1 - R_{yx_1x_2}^2}{1 - r_{yx_2}^2}} = \sqrt{1 - \frac{1 - 0,817}{1 - 0,408}} = 0,831,$$

$$r_{yx_2x_1} = \sqrt{1 - \frac{1 - R_{yx_1x_2}^2}{1 - r_{yx_1}^2}} = \sqrt{1 - \frac{1 - 0,817}{1 - 0,755}} = 0,503,$$

$$r_{yx_1x_2} = \frac{r_{yx_1} - r_{yx_2} \cdot r_{x_1x_2}}{\sqrt{(1 - r_{yx_2}^2) \cdot (1 - r_{x_1x_2}^2)}} = \frac{0,869 - 0,639 \cdot 0,488}{\sqrt{(1 - 0,489^2)(1 - 0,639^2)}} = 0,830,$$

$$r_{yx_2x_1} = \frac{r_{yx_2} - r_{yx_1} \cdot r_{x_1x_2}}{\sqrt{(1 - r_{yx_1}^2) \cdot (1 - r_{x_1x_2}^2)}} = \frac{0,639 - 0,869 \cdot 0,488}{\sqrt{(1 - 0,488^2)(1 - 0,869^2)}} = 0,498.$$

Звідси можна зробити висновок, що фактор  $x_1$  надає сильніший вплив на результат, ніж фактор  $x_2$ .

Оцінимо надійність рівняння регресії в цілому та показника зв'язку за допомогою  $F$ -критерію Фішера. Фактичне значення  $F$ -критерію:

$$F_{\text{факт}} = \frac{R^2}{1-R^2} \cdot \frac{n-m-1}{m} = \frac{0,817}{1-0,817} \cdot \frac{10-2-1}{2} = 15,63.$$

Табличне значення  $F$ -критерію за п'ятивідсотковий рівень значущості ( $\alpha = 0,05$ ,  $k_1 = 2$ ,  $k_2 = 10 - 2 - 1 = 7$ ):  $F_{\text{табл}} = 4,74$ . Оскільки  $F_{\text{факт}} = 15,63 > F_{\text{табл}} = 4,10$ , то рівняння визнається статистично значущим.

Оцінимо доцільність включення фактору  $x_1$  після фактору  $x_2$  та  $x_2$  після  $x_1$  за допомогою частки  $F$ -критерію Фішера:

$$F_{x_1} = \frac{R^2_{yx_1x_2} - r^2_{yx_2}}{1 - R^2_{yx_1x_2}} \cdot (n-3) = \frac{0,817 - 0,408}{1 - 0,817} \cdot 7 = 15,65,$$

$$F_{x_2} = \frac{R^2_{yx_1x_2} - r^2_{yx_1}}{1 - R^2_{yx_1x_2}} \cdot (n-3) = \frac{0,817 - 0,755}{1 - 0,817} \cdot 7 = 2,37.$$

Табличне значення частки  $F$ -критерію за п'ятивідсотковий рівень значущості ( $\alpha = 0,05$ ,  $k_1 = 1$ ,  $k_2 = 10 - 2 - 1 = 7$ ):  $F_{\text{табл}} = 5,59$ . Оскільки  $F_{x_1} = 15,65 > F_{\text{табл}} = 5,59$ , а  $F_{x_2} = 2,37 < F_{\text{табл}} = 5,59$ , то включення фактору  $x_1$  до моделі статистично виправдане, коефіцієнт чистої регресії  $b_1$  є статистично значущим, а додаткове включення фактору  $x_2$ , після того, як уже введений фактор  $x_1$ , є недоцільним.

Рівняння регресії, що включає тільки один значущий аргумент  $x_2$ :

$$\hat{y} = -2,754 + 1,016x_1.$$

# МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

## Змістовий модуль 1

### Оптимізаційні економіко-математичні моделі

#### Тема 1 КОНЦЕПТУАЛЬНІ АСПЕКТИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЕКОНОМІКИ (3 години)

Економічні моделі. Поняття економічної моделі.

Принципи моделювання.

Класифікація моделей.

Якість моделі.

Прийняття рішень (вибір).

Методи прийняття рішень.

Література: [1] с. 7-16; [3] с. 4-11; [4] с. 21-33.

Контрольні запитання

1. Чому необхідне використання математики в економіці?
2. Дайте визначення поняттю «модель».
3. Поясніть, що таке моделювання?
4. Поясніть, що таке математична модель?
5. Як будують математичну модель економічного явища або об'єкта?

Наведіть приклад побудови й уточнення моделі.

6. Перелічіть і поясніть основні принципи моделювання.
7. Який зв'язок між моделлю і ціллю системи?
8. У чому відмінність статичних моделей від динамічних?
9. Що таке прагматична модель? Наведіть кілька прикладів практичного застосування таких моделей.
10. Дайте визначення ідеальним моделям. Наведіть приклади таких моделей.
11. Перелічіть та охарактеризуйте основні властивості якості моделі.
12. Що таке «адекватна модель»?
13. Дайте визначення поняттям «рішення» і «прийняття рішення».
14. Сформулюйте послідовність процедур, які необхідно виконати для прийняття рішення. Чи можна змінити цю послідовність? Які з процедур можуть виконуватися паралельно?
15. Охарактеризуйте дві частини теорії прийняття рішень і перелічіть основні завдання, які вони вирішують.
16. Сформулюйте основні постулати теорії прийняття оптимальних рішень.
17. Дайте характеристику основним видам невизначеностей, що виникають у процесі прийняття рішень.
18. Охарактеризуйте основні напрями психологічної теорії прийняття рішень.
19. Перелічіть основні методи прийняття рішень та сформулюйте ситуації, у яких ці методи можуть бути реалізованими.

## **Тема 2 ПОНЯТТЯ ОПТИМІЗАЦІЙНИХ ЗАДАЧ І ОПТИМІЗАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ. КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ (3 години)**

Основні поняття оптимізаційних задач і моделей.

Класифікація методів оптимізації.

Література: [1] с. 18-28; [2] с. 7-14; [4] с. 21-33.

Контрольні запитання

1. Охарактеризуйте особливості оптимізаційних задач.
2. Які загальні етапи розв'язання оптимізаційних задач прийнято виділяти?
3. Чому до оптимізаційних задач не застосовують класичні методи пошуку умовного екстремуму функції?
4. Що являє собою цільова функція оптимізаційної задачі? Яке її призначення?
5. Дайте визначення понять: план, припустимий план, оптимальний план, розв'язок оптимізаційної задачі.
6. На чому заснована класифікація моделей і методів математичного програмування з розв'язання оптимізаційних задач? Які класи моделей і методів виділяють у математичному програмуванні?
7. Поясніть, що є множиною можливих розв'язків задачі математичного програмування?
8. Поясніть, яку область можливих розв'язків задачі математичного програмування називають областю припустимих планів.

## **Тема 3 ЛІНІЙНЕ ПРОГРАМУВАННЯ (8 годин)**

Загальна форма задачі лінійного програмування (ЗЛП).

Основні властивості ЗЛП та її перша геометрична інтерпретація.

Канонічна форма задачі лінійного програмування (КЗЛП).

Симплекс-метод.

Література: [1] с. 29-44; [2] с. 18-69; [3] с. 29-55 [4] с. 95-126.

Контрольні запитання

1. Сформулюйте задачу лінійного програмування.
2. Дайте визначення для наступних понять: план, припустимий план, оптимальний план, розв'язок задачі.
3. Поясніть, чим відрізняється загальна задача лінійного програмування від канонічної?
4. Чи завжди загальну задачу лінійного програмування можна привести до канонічного виду?
5. Яку точку опуклої множини називають кутовою?
6. У чому полягає перша геометрична інтерпретація задачі лінійного програмування?
7. Який план ЗЛП називають базисним?
8. Як пов'язані базисні плани й кутові точки області визначення задачі лінійного програмування?
9. Який план задачі лінійного програмування називають виродженим?

10. Сформулюйте критерій оптимальності припустимого базисного плану, застосовуваний у симплекс-методі.
11. Сформулюйте основні етапи стандартної ітерації симплекс-методу.
12. Для чого застосовують перетворення Жордана-Гауса?
13. Який елемент симплекс-таблиці називають ведучим?
14. За які умови роблять висновок про необмеженість цільової функції в розв'язуваній задачі?
15. Чи можна заздалегідь точно визначити кількість ітерацій, що необхідна для розв'язання задачі за симплекс-методом? Чи можна знайти верхню границю для даної величини?
16. Яку задачу називають виродженою? За якими ознаками можна впізнати, що поточний план є виродженим?
17. Поясніть, в чому полягає основна ідея методу збурень?
18. Для чого призначений метод мінімізації нев'язань? Поясніть сутність цього методу.

**Приклад 3.1.** На підприємстві є можливість випускати чотири види продукції  $P_j$ . При її виготовленні використовуються ресурси  $P_1, P_2$  і  $P_3$ . Розміри припустимих витрат ресурсів обмежені відповідно величинами 34, 16 і 22 одиниць. Видаток ресурсу  $P_i$  ( $i = \overline{1,3}$ ) на одиницю продукції  $P_j$  ( $j = \overline{1,4}$ ) заданий матрицею

$$\begin{bmatrix} 2 & 4 & 4 & 5 \\ 4 & 1 & 4 & 1 \\ 2 & 3 & 1 & 2 \end{bmatrix}.$$

Планова ціна одиниці продукції  $P_1, P_2, P_3, P_4$  відповідно дорівнює 18, 14, 15, 10 грош.од., а оптова ціна – 25, 17, 19, 12 грош.од. Скласти економіко-математичну модель задачі, що дозволяє знайти збалансований за ресурсами план випуску продукції, що забезпечує підприємству максимальний прибуток. Симплексним методом знайти оптимальний план випуску продукції за видами, дати змістовну відповідь, розкривши економічний зміст усіх змінних, які беруть участь у розв'язанні задачі.

### Розв'язання

Позначимо  $x_1, x_2, x_3, x_4$  кількість одиниць продукції відповідно  $P_1, P_2, P_3, P_4$ , запланованої до випуску. Прибуток підприємства є різницею між його доходом і витратами. Визначимо величину прибутку для кожного виробу:

для  $P_1$   $25-18=7$  грош. од.,

для  $P_2$   $17-14=3$  грош. од.,

для  $P_3$   $19-15=4$  грош. од.,

для  $P_4$   $12-10=2$  грош. од.

Тоді цільова функція виразиться в такий спосіб:

$$L = 7x_1 + 3x_2 + 4x_3 + 2x_4 \rightarrow \max.$$

Складемо обмеження, зумовлені видатком ресурсів:

$$2x_1+4x_2+1x_3+5x_4\leq 34,$$

$$4x_1+1x_2+4x_3+1x_4\leq 16,$$

$$2x_1+3x_2+1x_3+2x_4\leq 22.$$

За змістом задачі змінні  $x_1, x_2, x_3, x_4$  не можуть виражатися невід'ємними числами. Введемо обмеження

$$x_1\geq 0, x_2\geq 0, x_3\geq 0, x_4\geq 0.$$

Отже, модель задачі формулюється так:

Знайти такі  $x_1, x_2, x_3, x_4$ , які перетворюють на максимум цільову функцію

$$L = 7x_1+3x_2+4x_3+2x_4 \rightarrow \max$$

і задовольняють обмеженням

$$2x_1+4x_2+1x_3+5x_4\leq 34,$$

$$4x_1+1x_2+4x_3+1x_4\leq 16,$$

$$2x_1+3x_2+1x_3+2x_4\leq 22,$$

$$x_1\geq 0, x_2\geq 0, x_3\geq 0, x_4\geq 0.$$

Перш ніж вирішувати задачу лінійного програмування симплексним методом, її модель приводять до канонічної форми. Основною ознакою канонічної форми є запис обмежень задачі у вигляді рівностей. Щоб перетворити нерівності в еквівалентні рівняння, введемо в ліві частини нерівностей додаткові (балансові) невід'ємні змінні  $x_5, x_6, x_7$ , які за змістом є різницями між правими й лівими частинами нерівностей. У результаті модель буде записана у вигляді:

знайти такі  $x_j$ , що перетворюють на максимум функцію

$$L = 7x_1+3x_2+4x_3+2x_4 \rightarrow \max$$

і задовольняють обмеженням

$$2x_1+4x_2+1x_3+5x_4+x_5\leq 34,$$

$$4x_1+1x_2+4x_3+1x_4+x_6\leq 16,$$

$$2x_1+3x_2+1x_3+2x_4+x_7\leq 22,$$

$$x_j\geq 0.$$

Відзначимо також, що додаткові змінні  $x_5, x_6, x_7$  мають цілком певний економічний зміст – це не використовувана при даному плані виробництва кількість сировини того або іншого виду (можливі залишки ресурсів  $P_1, P_2, P_3$ ), їх ще називають резервами.

Аналізуючи канонічну модель, зазначимо, що кожна змінна  $x_5, x_6, x_7$  входить тільки в одне з рівнянь системи. Ця обставина свідчить про те, що змінні  $x_5, x_6, x_7$  є базисними, а інші  $x_1, x_2, x_3, x_4$  – вільними.

Складемо симплекс-таблицю 3.1, що відповідає початковому опорному плану

$$x = (0, 0, 0, 0, 34, 16, 22)$$

за якого цільова функція  $L = 0$ .

Таблиця 3.1 – Початковий опорний план

Базис	$C_{j\text{баз}}$	$C_j$	7	3	4	2	0	0	0
		$P_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$A_7$
$A_5$	0	34	2	4	1	5	1	0	0
$A_6$	0	16	4	1	4	1	0	1	0
$A_7$	0	22	2	3	1	2	0	0	1
$L_j$		0	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta_j$			-7	-3	-4	-2	0	0	0

Оскільки в рядку  $\Delta_j$  є від'ємні елементи, план не є оптимальним. Перш ніж перейти до нового опорного плану, визначимо, який вектор треба вводити до базису в першу чергу. Для цього визначимо добутки  $\Delta_j * \Theta_j$  і виберемо найбільший за абсолютною величиною.

$$\Theta_1 = \min(34/2, 16/4, 22/2) = 4,$$

$$\Theta_2 = \min(34/4, 16/1, 22/3) = 7,33,$$

$$\Theta_3 = \min(34/1, 16/4, 22/1) = 4,$$

$$\Theta_4 = \min(34/5, 16/1, 22/2) = 6,8,$$

$$\Delta_1 * \Theta_1 = -7 * 4 = -28, \Delta_2 * \Theta_2 = -3 * 7,33 = -22,$$

$$\Delta_3 * \Theta_3 = -4 * 4 = -16, \Delta_4 * \Theta_4 = -2 * 6,8 = -13,6.$$

Найбільшим за абсолютною величиною є  $\Delta_1 * \Theta_1 = -28$ . Будемо вводити до базису вектор  $A_1$ , і виводити з базису вектор  $A_6$ .

Складемо нову симплекс-таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 – Новий опорний план

Базис	$C_{j\text{баз}}$	$C_j$	7	3	4	2	0	0	0
		$P_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$A_7$
$A_1$	7	4	1	0,25	1	0,25	0	0,25	0
$A_5$	0	26	0	3,50	-1	4,50	1	-0,50	0
$A_7$	0	14	0	2,50	-1	1,50	0	-0,50	1
$L_j$		28	7	1,75	7	1,75	0	1,75	0
$\Delta_j$			0	-1,25	3	-0,25	0	1,75	0

Отриманий новий опорний план  $x = (4; 0; 0; 0; 26; 0; 14)$ , при якому цільова функція  $L = 28$ , тобто стала більше.

Перевірка плану на оптимальність показує, що в рядку  $\Delta_j$  є від'ємні елементи, тобто цей план також не є оптимальним. Визначимо, який вектор треба вводити до базису для переходу до нового опорного плану. Знайдемо добутки  $\Delta_j * \Theta_j$ :

$$\Theta_2 = \min(4 * 4, 26 * 2/7, 14 * 2/5) = 5,6,$$

$$\Theta_4 = \min(4 * 4, 26 * 4/18, 14 * 4/6) = 5,78,$$

$\Delta_2 * \Theta_2 = -1,25 * 5,6 = -7$ ,  $\Delta_4 * \Theta_4 = -1/4 * 5,78 = -1,445$ . Будемо вводити до базису вектор  $A_2$ , а виводити з базису вектор  $A_7$ .

Складемо нову симплекс-таблицю 3.3.

Таблиця 3.3 – Оптимальний план

Базис	C <sub>баз</sub>	C <sub>j</sub>	7	3	4	2	0	0	0
		P <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>	A <sub>7</sub>
A <sub>2</sub>	3	5,60	0	1	-0,40	0,60	0	-0,20	0,40
A <sub>1</sub>	7	2,60	1	0	1,10	0,10	0	0,30	-0,10
A <sub>5</sub>	0	6,40	0	0	0,40	2,40	1	0,20	-1,40
L <sub>j</sub>		35,00	7	3	6,50	2,50	0	1,50	0,50
Δ <sub>j</sub>			0	0	2,50	0,50	0	1,50	0,50

Отримано новий план  $x = (2,6; 5,6; 0; 0; 6,4; 0; 0)$ , за якого значення цільової функції  $L = 35$ .

Перевірка отриманого плану на оптимальність показує, що всі  $\Delta_j \geq 0$ , отже план є оптимальним. Відповідно до цього плану треба виготовити 2,6 од. продукції  $P_1$  і 5,6 од. продукції  $P_2$ ; продукцію  $P_3$  і  $P_4$  виготовляти не слід. При цьому підприємство дістане максимальний прибуток в розмірі 35 грош. од. Залишаться невикористаними 6,4 од. ресурсу  $P_1$ , а ресурси  $P_2$  і  $P_3$  будуть витрачені повністю.

#### Задачі для самостійного розв'язання

**Задача 3.1.** Для збереження здоров'я і працездатності людина має у добу споживати не менше 20 умовн.од. білків, не менше 40 умовн. од. жирів і не менше 88 умовн. од. вуглеводів. Для простоти припустимо, що є всього два види продуктів  $P_1$  і  $P_2$ , вартість одиниці кожного з них дорівнює відповідно 6 і 10 грош. одиниць. Вміст названих живильних речовин у різних продуктах харчування не однаковий. Припустимо, що в одиниці продукту  $P_1$  міститься 4 умовн. од. білків, 4 умовн. од. жирів і 4 умовн. од. вуглеводів, а в одиниці продукту  $P_2$  відповідно 1, 3 і 15 умовн. од. тих же живильних речовин. Потрібно скласти економіко-математичну модель задачі, що дозволяє сформулювати з продуктів  $P_1$  і  $P_2$  добову дієту, що, з однієї сторони, містила б білків, жирів і вуглеводів не менш науково обґрунтованих норм і разом з тим вимагала б мінімальних витрат. Вирішити задачу графічним способом. (Відповідь:  $x_1 = 7, x_2 = 4$ ).

**Задача 3.2.** Для виробництва трьох видів продуктів  $P_1, P_2, P_3$  використовуються чотири види ресурсів  $R_1, R_2, R_3, R_4$ . Добовий видаток ресурсів на 1 одиницю кожного продукту та їх денний запас наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Вихідні дані

Ресурси	Витрата ресурсу на 1 одиницю продукту			Запас, од.
	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	
R <sub>1</sub>	1	1,25	0,8	2500
R <sub>2</sub>	0,4	0,25	0,5	1000
R <sub>3</sub>	1	1,6	1,5	4000
R <sub>4</sub>	0,4	0	0	800



Ціна 1 од. продукту  $\Pi_1$  становить 58 грош.од., продукту  $\Pi_2$  – 40 грош.од., продукту  $\Pi_3$  – 60 грош.од. Яку кількість продуктів кожного виду необхідно виробляти, щоб дохід від реалізації був максимальним?  
(Відповідь:  $x = (2000; 211,8; 294; 0; 0; 1220; 0)$ ,  $L^*=142117,6$ ).

**Задача 3.3.** За графічним методом визначити оптимальні плани наступних задач лінійного програмування:

а)

$$\begin{aligned} & \min(\max)(x_1 + 2x_2) \\ & \begin{cases} x_1 + 2x_2 \leq 10 \\ x_1 + x_2 \geq 1 \\ x_2 \geq 1 \\ x_2 \leq 4 \\ x_1 \geq 0 \end{cases} \end{aligned} ;$$

в)

$$\begin{aligned} & \min(\max)(x_1 + 3x_2) \\ & \begin{cases} 10x_1 + 3x_2 \geq 30 \\ -x_1 + x_2 \leq 5 \\ x_1 + x_2 \leq 10 \\ x_2 \geq 2 \\ x_1 \geq 0 \end{cases} \end{aligned} ;$$

б)

$$\begin{aligned} & x_1 - 2x_2 \rightarrow \min \\ & \begin{cases} x_1 - x_2 \leq 1 \\ x_1 + x_2 \leq 2 \\ x_1 - 2x_2 \geq 0 \\ 2x_1 + x_2 \geq 1 \\ x_1 \geq 0, x_2 \geq 0 \end{cases} \end{aligned} ;$$

г)

$$\begin{aligned} & \min(\max)(x_1 + 2x_2) \\ & \begin{cases} x_1 - x_2 \leq 3 \\ x_1 + x_2 \leq 6 \\ -x_1 + 3x_2 \leq 10 \\ x_1 + 4x_2 \geq 4 \\ x_1 \geq 0, x_2 \geq 0 \end{cases} \end{aligned} .$$

#### Тема 4 ТЕОРІЯ ДВОЇСТОСТІ І ДВОЇСТІ ОЦІНКИ В АНАЛІЗІ РОЗВ'ЯЗКІВ ЛІНІЙНИХ ОПТИМІЗАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ (9 годин)

Пряма і двоїста задачі як пара сполучених задач ЛП.

Основні теореми двоїстості, їх економічний зміст.

Двоїсті оцінки і дефіцитність ресурсів.

Література: [1] с. 45-50; [2] с. 72-75, 90-105; [3] с. 88-99; [4] с. 141-161.

Контрольні запитання

1. Поясніть сутність подвійності в лінійному програмуванні.
2. Складіть просту економіко-математичну модель і запишіть до неї двоїсту. Дайте економічну інтерпретацію двоїстих оцінок.
3. Скільки змінних і обмежень має двоїста задача стосовно прямої задачі?
4. Поясніть економічний зміст першої теореми подвійності.
5. Поясніть економічний зміст другої теореми подвійності.
6. У чому полягає економічний зміст третьої теореми подвійності?
7. Сформулюйте правила побудови двоїстих задач.
8. Як на підставі оптимального розв'язку прямої задачі одержати оптимальний розв'язок двоїстої задачі?

**Приклад 4.1.** Використовуючи розв'язання прикладу 3.1 і відповідність між двоїстими змінними, знайти компоненти оптимального плану двоїстої задачі – двоїсті оцінки  $u_i$ .

### Розв'язання

Для складання двоїстої задачі скористуємося умовою прямої задачі та властивостями пари сполучених задач.

Пряма задача була сформульована в такий спосіб: знайти такі  $x_j$ , які перетворюють на максимум функцію

$$L = 7x_1 + 3x_2 + 4x_3 + 2x_4 \rightarrow \max$$

і задовольняють обмеженням

$$2x_1 + 4x_2 + 1x_3 + 5x_4 + x_5 \leq 34,$$

$$4x_1 + 1x_2 + 4x_3 + 1x_4 + x_6 \leq 16,$$

$$2x_1 + 3x_2 + 1x_3 + 2x_4 + x_7 \leq 22,$$

$$x_j \geq 0.$$

Двоїста задача формулюється в такий спосіб: знайти такі  $u_1, u_2, u_3$ , які перетворюють на мінімум цільову функцію

$$L' = 34u_1 + 16u_2 + 22u_3 \rightarrow \min$$

і задовольняють обмеженням

$$2u_1 + 4u_2 + 2u_3 \geq 7,$$

$$4u_1 + u_2 + 3u_3 \geq 3,$$

$$u_1 + 4u_2 + u_3 \geq 4,$$

$$5u_1 + u_2 + 2u_3 \geq 2,$$

$$u_i \geq 0 \quad (i = 1, 3).$$

З теорем двоїстості випливає, що якщо розв'язано одну з пари двоїстих задач, то одночасно знайдений і розв'язок іншої задачі. Компоненти оптимального плану цієї задачі перебувають у рядку цільової функції останньої симплекс-таблиці розв'язаної задачі. Визначити їх можна, використовуючи відповідність між змінними двоїстих задач. Щоб установити цю відповідність, перетворимо обмеження двоїстої задачі в еквівалентні рівняння, віднімаючи з лівих частин додаткові невід'ємні змінні. Отримаємо:

$$2u_1 + 4u_2 + 2u_3 - u_4 = 7,$$

$$4u_1 + u_2 + 3u_3 - u_5 = 3,$$

$$u_1 + 4u_2 + u_3 - u_6 = 4,$$

$$5u_1 + u_2 + 2u_3 - u_7 = 2,$$

$$u_i \geq 0 \quad (i = 1, 7).$$

У цьому запису змінні  $u_4, u_5, u_6, u_7$  є базисними, а  $u_1, u_2, u_3$  – вільними. У прямій задачі змінні  $x_1, x_2, x_3$  і  $x_4$  є вільними, а  $x_5, x_6, x_7$  – базисними. Відповідність встановлюють, зіставляючи базисним змінним однієї задачі вільні змінні іншої і навпаки.

вільні				базисні		
$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$
⇕	⇕	⇕	⇕	⇕	⇕	⇕
$u_4$	$u_5$	$u_6$	$u_7$	$u_1$	$u_2$	$u_3$
базисні				вільні		

Як бачимо, змінна  $u_1$  зв'язана із змінною  $x_5$  (тому їх називають двоїстими змінними), в останній симплексній таблиці, що містить оптимальний план,  $x_5$  перебуває в базисі, значить двоїста їй змінна  $u_1$  на цьому етапі розрахунків є

вільною і як вільна змінна дорівнює нулю (у будь-якій двоїстій парі завжди одна змінна базисна, а інша – вільна). Отже,  $u_1 = 0$ . Далі,  $u_2$  відповідає  $x_6$ . Остання симплекс-таблиця 4.1.

Таблиця 4.1 – Оптимальний план

Базис	$C_{j\text{баз}}$	$C_j$	7	3	4	2	0	0	0
		$P_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$A_7$
$A_2$	3	5,60	0	1	-0,40	0,60	0	-0,20	0,40
$A_1$	7	2,60	1	0	1,10	0,10	0	0,30	-0,10
$A_5$	0	6,40	0	0	0,40	2,40	1	0,20	-1,40
$L_j$		35,00	7	3	6,50	2,50	0	1,50	0,50
$\Delta_j$			0	0	2,50	0,50	0	1,50	0,50

Оптимальний план  $x = (2,6; 5,6; 0; 0; 6,4; 0; 0)$ , за якого значення цільової функції  $L = 35$ .

У цій симплекс-таблиці в стовпці вектора  $A_6$  у рядку  $L_6$  знаходиться елемент 1,5, отже  $u_2 = 1,5$ . У такий же спосіб можна визначити, що  $u_3 = 0,5$ .

З теорем подвійності також виходить, що значення цільових функцій розв'язаних двоїстих задач дорівнюють одне одному, тому  $L' = 35$ .

#### Задачі для самостійного розв'язання

**Задача 4.1.** Використовуючи розв'язання задачі 3.1 і відповідність між двоїстими змінними, знайти компоненти оптимального плану двоїстої задачі – двоїсті оцінки  $u_j$ . (Відповідь:  $u^* = (11,8; 101,18; 0; 14,4)$ ).

**Задача 4.2.** Для виготовлення виробів А, В, С підприємство використовує три різних види сировини. Норми витрати сировини на виробництво одного виробу кожного виду, ціна одного виробу А, В і С, а також загальна кількість сировини кожного виду, що може бути використана підприємством, наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Вихідні дані

Вид сировини	Норми витрат сировини			Запас сировини
	А	В	С	
$S_1$	18	15	12	360
$S_2$	6	4	8	192
$S_3$	5	3	3	180
Ціна одного виробу, грн.	9	10	16	

Скласти план виготовлення виробів, при якому загальна вартість всієї виробленої підприємством продукції є максимальною. Скласти двоїсту задачу й знайти її оптимальний план. (Відповідь:  $x^* = (0; 8; 20; 0; 0; 96)$ ,  $L^* = 400$  грн.  $u^* = (0,22; 1,67; 0)$ ).

## Тема 5 АНАЛІЗ ЛІНІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ЕКОНОМІЧНИХ ЗАДАЧ (11 годин)

Аналіз розв'язків лінійних економіко-математичних моделей.

Аналіз параметричної стійкості розв'язків ЗЛП.

Оцінка рентабельності виробленої продукції.

Аналіз обмежень дефіцитних і недефіцитних ресурсів.

Література: [1] с. 51-58; [2] с. 72-75, 90-105; [3] с. 101-116; [4] с. 171-190.

Контрольні запитання

1. У чому полягає економічна інтерпретація прямої й двоїстої задач лінійного програмування?
2. Як визначити, чи є ресурс дефіцитним?
3. Як визначити, що продукція є рентабельною або нерентабельною?
4. У чому полягає економічний зміст змінних двоїстої задачі?
5. Який зміст вкладають у поняття «параметрична стійкість»?
6. Сформулюйте умови для припустимих змін цільової функції задачі, при яких її оптимальний план залишається незмінним.
7. Як визначити статус ресурсів прямої задачі?
8. Як визначити інтервали стійкості двоїстих оцінок щодо зміни запасів дефіцитних ресурсів?
9. Як визначити оптимальний план виробництва продукції й зміну доходу підприємства при збільшенні або зменшенні обсягу ресурсів?
10. Як розрахувати інтервали можливої зміни ціни одиниці кожного виду продукції?

**Приклад 5.1.** Зробимо аналіз оптимальних планів задачі, отриманих у прикладі 4.1. Остання симплекс-таблиця, що містить оптимальний план, має вигляд, наведений у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Оптимальний план

Базис	C <sub>јбаз</sub>	C <sub>ј</sub>	7	3	4	2	0	0	0
		B <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>	A <sub>7</sub>
A <sub>2</sub>	3	5,60	0	1	-0,40	0,60	0	-0,20	0,40
A <sub>1</sub>	7	2,60	1	0	1,10	0,10	0	0,30	-0,10
A <sub>5</sub>	0	6,40	0	0	0,40	2,40	1	0,20	-1,40
L <sub>ј</sub>		35,00	7	3	6,50	2,50	0	1,50	0,50
Δ <sub>ј</sub>			0	0	2,50	0,50	0	1,50	0,50

Оптимальний план  $x^* = (2,6; 5,6; 0; 0; 6,4; 0; 0)$ , за якого значення цільової функції  $L^* = 35$ .

Оптимальний план двоїстої задачі  $u^* = (0; 1,5; 0,5)$ .

### Розв'язання

З останньої симплекс-таблиці прямої задачі маємо:

$$x^* = (2,6; 5,6; 0; 0; 6,4; 0; 0), \max L = 35,$$

$$u^* = (0; 1,5; 0,5),$$

$$\min L' = 35 = \max L.$$

Оптимальний план прямої задачі передбачає виробництво тільки двох видів продукції П<sub>1</sub> і П<sub>2</sub> у кількості відповідно 2,6 і 5,6 од. Випуск продукції П<sub>3</sub> і П<sub>4</sub> не передбачається ( $x_3 = x_4 = 0$ ). Додаткові змінні  $x_5, x_6, x_7$  характеризують залишок (невикористану частину) ресурсів відповідно P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> і P<sub>3</sub>. Оскільки

$x_5 = 6,4$ , перший ресурс використовується у процесі виробництва продукції повністю, а другий і третій ресурси - повністю ( $x_6 = x_7 = 0$ ). При такому оптимальному плані виробництва продукції і використанні ресурсів підприємство отримує найбільший прибуток у розмірі 35 грош. од.

План двоїстої задачі дає оптимальну систему оцінок ресурсів, використовуваних у виробництві. Так,  $u_2 = 1,5$  і  $u_3 = 0,5$  відмінні від нуля, а ресурси  $P_2$  і  $P_3$  використовуються цілком. Двоїста оцінка  $u_1 = 0$  і відповідний вид ресурсу не повністю використовується при оптимальному плані виробництва продукції. Це підтверджується також попереднім аналізом додаткових змінних оптимального плану прямої задачі. Така оптимальна система оцінок дає найменшу загальну вартість всіх ресурсів, використовуваних на підприємстві:  $\min L' = 35$  грош. од.

Статус ресурсів прямої задачі можна визначити трьома способами. Перший – підстановкою  $x^*$  у систему обмежень прямої задачі. Якщо обмеження виконується як строга рівність, то відповідний ресурс є дефіцитним, у противному разі - недефіцитним.

$$2 \cdot 2,6 + 4 \cdot 5,6 + 1 \cdot 0 + 5 \cdot 0 = 27,6 < 34 \quad (\text{ресурс 1 недефіцитний});$$

$$4 \cdot 2,6 + 1 \cdot 5,6 + 4 \cdot 0 + 1 \cdot 0 = 16 \quad (\text{ресурс 2 дефіцитний});$$

$$2 \cdot 2,6 + 3 \cdot 5,6 + 1 \cdot 0 + 2 \cdot 0 = 22 \quad (\text{ресурс 3 дефіцитний}).$$

Другий спосіб – за допомогою додаткових змінних прямої задачі. Якщо додаткова змінна в оптимальному плані дорівнює нулю, то відповідний ресурс є дефіцитним, а якщо відмінна від нуля - ресурс недефіцитний.

Третій спосіб – за допомогою двоїстих оцінок. Якщо  $u_i \neq 0$ , то зміна (збільшення або зменшення) обсягів  $i$ -го ресурсу приводить до відповідної зміни прибутку підприємства, тому такий ресурс є дефіцитним. Якщо  $u_i = 0$ , то й ресурс недефіцитний. Так,

$$u_1 = 0 \quad (\text{ресурс 1 недефіцитний});$$

$$u_2 = 1,5 \quad (\text{ресурс 2 дефіцитний});$$

$$u_3 = 0,5 \quad (\text{ресурс 3 дефіцитний}).$$

Отже, якщо запас другого дефіцитного ресурсу збільшити на одну умовну одиницю ( $b_2 = 16 + 1 = 17$ ), то цільова функція  $\max L$  збільшиться за інших незмінних умов на  $u_2 = 1,5$  грош. од. і дорівнюватиме  $\max L = 36,5$  грош.од. Але за рахунок яких змін в оптимальному плані виробництва продукції збільшиться прибуток підприємства? Інформацію про це дають елементи стовпця « $A_6$ » останньої симплекс-таблиці, що відповідає двоїстій оцінці  $u_2 = 1,5$ . У новому оптимальному плані значення базисної змінної  $x_1$  збільшиться на 0,3, змінної  $x_2$  - зменшиться на 0,2, а витрати сировини  $P_2$  зростуть на 0,2. При цьому структура плану не зміниться, а нові оптимальні значення змінних будуть такими:

$$x^* = (2,9; 5,4; 0; 0; 6,6; 0; 0).$$

Отже, збільшення запасу другого дефіцитного ресурсу за інших незмінних умов спричинить зростання випуску продукції  $\Pi_1$  і зниження виробництва продукції  $\Pi_2$ , а обсяг використання ресурсу  $P_1$  збільшиться. При такому плані виробництва максимальний прибуток підприємства буде

$$\max L = 7 \cdot 2,9 + 3 \cdot 5,4 + 4 \cdot 0 + 2 \cdot 0 = 36,5,$$

тобто зросте на  $u_2 = 1,5$ .

Проаналізуємо, як зміниться оптимальний план виробництва продукції, якщо запас дефіцитного ресурсу  $P_3$ , при інших незмінних умовах, збільшити на одну умовну одиницю ( $b_3 = 22 + 1 = 23$ ). Аналогічно міркуючи, скористаємося елементами стовпчика «A<sub>7</sub>» останньої симплекс-таблиці, що відповідає двоїстій оцінці  $u_3 = 0,5$ . Запишемо новий оптимальний план:

$$x^* = (2,5; 6; 0; 0; 5; 0; 0),$$

$$\max L^* = 7 \cdot 2,5 + 3 \cdot 6 + 4 \cdot 0 + 2 \cdot 0 = 35,5.$$

Таким чином, прибуток підприємства збільшиться на 0,5 грошових одиниць за рахунок збільшення виробництва продукції  $P_2$  на 0,4 одиниці й зменшення випуску продукції  $P_1$  на 0,1 одиниці. При цьому обсяг використання ресурсу  $P_1$  зменшиться на 1,4 од.

У результаті проведеного аналізу виникає питання, чи зберігатимуться встановлені співвідношення, якщо запас дефіцитного ресурсу змінити не на одиницю, а, наприклад, на 10 од.? Щоб однозначно відповісти на це запитання, необхідно розрахувати інтервали можливої зміни обсягів дефіцитних ресурсів, у межах яких двоїсті оцінки  $u_i$  залишаються на рівні оптимальних значень.

Приріст (зміну) запасу ресурсу  $P_2$  позначимо  $\Delta b_2$ . Тоді якщо  $b'_2 = b_2 + \Delta b_2$ , то новий оптимальний план

$$x^* = (2,6 + 0,3\Delta b_2; 5,6 - 0,2\Delta b_2; 0; 0; 6,4 + 0,2\Delta b_2; 0; 0).$$

Єдина вимога, яку можна висунути до нових оптимальних значень, – це умова невід'ємності, тобто

$$\begin{cases} 2,6 + 0,3\Delta b_2 \geq 0 \\ 5,6 - 0,2\Delta b_2 \geq 0 \\ 6,4 + 0,2\Delta b_2 \geq 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Delta b_2 \geq -8,67 \\ \Delta b_2 \leq 28 \\ \Delta b_2 \geq -32 \end{cases},$$

$$-8,67 \leq \Delta b_2 \leq 28.$$

Це означає, що коли запас ресурсу  $P_2$  збільшиться на 28 од. або зменшиться на 8,67 од., то оптимальною двоїстою оцінкою ресурсу  $P_2$  залишиться  $u_2 = 1,5$ . Таким чином, запас ресурсу  $P_2$  може змінюватися в межах

$$16 - 8,67 \leq b_2 + \Delta b_2 \leq 16 + 28,$$

$$7,33 \leq b_2 \leq 44.$$

Відповідно до цього максимально можливий прибуток підприємства буде перебувати в межах

$$35 - 8,67 \cdot 0,3 \leq L_{\max} \leq 35 + 28 \cdot 0,2,$$

$$32,4 \leq L_{\max} \leq 40,6.$$

Аналогічно розраховують інтервал стійкості двоїстої оцінки  $u_3 = 1,5$  дефіцитного ресурсу  $P_3$ :

$$\begin{cases} 2,6 - 0,1\Delta b_3 \geq 0 \\ 5,6 + 0,4\Delta b_3 \geq 0 \\ 6,4 - 1,4\Delta b_3 \geq 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Delta b_3 \leq 26 \\ \Delta b_3 \geq -14 \\ \Delta b_3 \leq 4,57 \end{cases}$$

$$-14 \leq \Delta b_3 \leq 4,57.$$

$$8 \leq b_3 \leq 26,57.$$

Таким чином, якщо запас ресурсу  $P_3$  збільшиться на 4,57 од. або зменшиться на 14 од., то двоїста оцінка  $u_3 = 1,5$  цього ресурсу залишиться

оптимальною.

Зазначимо, що вказані інтервали стосуються тільки випадків, коли змінюється тільки один ресурс, а запаси всіх інших фіксовані, тобто при інших незмінних умовах. У випадку одночасної зміни обсягів всіх або декількох ресурсів підхід до визначення нового оптимального плану дещо інший.

Оцінку рентабельності продукції, що виготовляється на підприємстві, виконують шляхом аналізу двоїстих оцінок і обмежень двоїстої задачі, що характеризують кожен вид продукції.

Підставимо  $u^*$  у систему обмежень двоїстої задачі. Якщо вартість ресурсів на одиницю продукції (ліва частина) перевищує ціну цієї продукції (права частина), то виробництво такої продукції для підприємства недоцільне. Якщо ж співвідношення виконується як строга рівність, то продукція рентабельна:

$$2 \cdot 0 + 4 \cdot 1,5 + 2 \cdot 0,5 = 7 \quad (\text{продукція } P_1 \text{ рентабельна});$$

$$4 \cdot 0 + 1 \cdot 1,5 + 3 \cdot 0,5 = 3 \quad (\text{продукція } P_2 \text{ рентабельна});$$

$$1 \cdot 0 + 4 \cdot 1,5 + 1 \cdot 0,5 = 6,5 > 4 \quad (\text{продукція } P_3 \text{ нерентабельна});$$

$$5 \cdot 0 + 1,5 + 2 \cdot 0,5 = 2,5 > 2 \quad (\text{продукція } P_4 \text{ нерентабельна}).$$

Аналогічні результати можна отримати, проаналізувавши двоїсті оцінки додаткових змінних, значення яких показують, на скільки вартість ресурсів перевищує ціну одиниці відповідної продукції. Тому якщо додаткова змінна двоїстої задачі дорівнює нулю, то продукція рентабельна. І, навпаки, якщо  $u_i \neq 0$ , то відповідна продукція нерентабельна.

Додаткові змінні двоїстої задачі розташовуються в індексному рядку останньої симплекс-таблиці в стовпцях « $A_1$ »-« $A_4$ ». Їхні оптимальні значення  $u_4 = 0$ ;  $u_5 = 0$ ;  $u_6 = 2,5$ ;  $u_7 = 0,5$ . Тому продукція  $P_3$  і  $P_4$  нерентабельна, а продукція  $P_1$  і  $P_2$  – рентабельна.

Під впливом різних обставин ціна одиниці продукції на підприємстві може змінюватися (збільшуватися або зменшуватися). Тому завжди цікаво знати, в межах яких змін ціни продукції кожного виду оптимальний план її виробництва залишається той самий:

$$x^* = (2,6; 5,6; 0; 0; 6,4; 0; 0).$$

Для визначення інтервалів зміни коефіцієнтів цільової функції скористаємося тим, що при цьому симплекс-таблиця, що відповідає оптимальному плану, зберігає свій вигляд за винятком елементів індексного рядка. Нові оцінки ( $L_j - C_j$ ) повинні задовольняти умові оптимальності задачі максимізації, тобто бути невід'ємними.

Зміну коефіцієнта  $c_3$  позначимо  $\Delta c_3$ . Оскільки  $x_3$  – небазисна змінна, то в симплекс-таблиці зміниться лише відповідна оцінка  $L_3 - c_3$ :

$$(L_3 - c_3) = 3 \cdot (-0,4) + 7 \cdot 1,1 + 0 \cdot 0,4 - (4 + \Delta c_3) = 2,5 - \Delta c_3.$$

За умови  $L_3 - c_3 \geq 0$  одержимо нерівність  $2,5 - \Delta c_3 \geq 0$ , тобто  $\Delta c_3 \leq 2,5$ . Це означає, що коли ціна одиниці продукції  $P_3$ , при інших незмінних умовах, зросте не більше ніж на 2,5 грош. од., то оптимальним планом виробництва продукції на підприємстві залишиться  $x^* = (2,6; 5,6; 0; 0; 6,4; 0; 0)$ . Тільки максимальний прибуток зміниться на  $\max \Delta L = \Delta c_3 x_3$ .

Аналогічно розраховуємо інтервал зміни коефіцієнта  $\Delta c_4$ :

$$(L_4 - c_4) = 3 * 0,6 + 7 * 0,1 + 0 * 2,4 - (2 + \Delta c_4) = 0,5 - \Delta c_4;$$

$$\Delta c_4 \leq 0,5.$$

Із зростанням ціни одиниці продукції  $P_4$  на 0,5 грош. од., за інших незмінних умов, оптимальний план виробництва продукції не зміниться, а  $\max \Delta L = \Delta c_4 x_4$ .

### Задачі для самостійного розв'язання

**Задача 5.1.** Підприємство виготовляє три види продукції А, В і С, використовуючи для цього три види ресурсів 1, 2, 3. Норми витрат всіх ресурсів на одиницю продукції і запаси ресурсів наведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Вихідні дані

Ресурс	Норма витрат на одиницю продукції			Запас ресурсу
	А	В	С	
1	18	15	12	360
2	6	4	8	192
3	5	3	3	180

Відома ціна одиниці продукції кожного виду: А – 9 грош.од., В – 10 грош.од. і С – 16 грош.од. Визначити план виробництва продукції, що забезпечує підприємству найбільший дохід.

Остання симплекс-таблиця даної задачі має вигляд, що наведений у таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Оптимальний план

Базис	$C_{j\text{баз}}$	$C_j$	9	10	16	0	0	0
		В	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$
$A_2$	10	8	1	1	0	1/9	-1/6	0
$A_3$	16	20	1/4	0	1	-1/18	5/24	0
$A_6$	0	96	5/4	0	0	-1/6	-1/8	1
$L_j$		400	14	10	16	2/9	5/3	0
$\Delta_j$			0	0	10	2/9	5/3	0

Записати математичні моделі прямої і двоїстої задач; записати оптимальні плани прямої і двоїстої задач, виконати їх економічний аналіз; визначити статус ресурсів, використовуваних для виробництва продукції, і рентабельність кожного виду продукції; обчислити інтервали стійкості двоїстих оцінок щодо зміни запасів дефіцитних ресурсів; розрахувати інтервали можливих змін ціни одиниці рентабельної продукції.

**Задача 5.2.** Підприємство виготовляє продукцію А, В і С, для чого використовує три види ресурсів 1, 2, 3. Норми витрат всіх ресурсів на одиницю продукції і обсяги ресурсів на підприємстві наведені в таблиці 5.4.



Таблиця 5.4 – Вихідні дані

Ресурс	Норма витрат на одиницю продукції			Запас ресурсу
	А	В	С	
1	4	2	1	180
2	3	1	3	210
3	1	2	5	244

Відома ціна одиниці продукції кожного виду: А – 10 грош.од., В – 14 грош.од. і С – 12 грош.од. Визначити план виробництва продукції, що забезпечує підприємству найбільший дохід.

Остання симплекс-таблиця, що містить оптимальний план, має вигляд, наведений у таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Оптимальний план

Базис	$C_{j\text{баз}}$	$C_j$	10	14	12	0	0	0
		В	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$
$A_2$	14	82	19/8	1	0	5/8	0	-1/8
$A_5$	0	80	23/8	0	0	1/8	1	-5/8
$A_3$	12	16	-3/4	0	1	-1/4	0	1/4
$L_j$		1340	97/4	14	12	23/4	0	5/4
$\Delta_j$			57/4	0	0	23/4	0	5/4

Записати математичні моделі прямої і двоїстої задач; записати оптимальні плани прямої і двоїстої задач, виконати їхній економічний аналіз; визначити статус ресурсів, використовуваних для виробництва продукції, і рентабельність кожного виду продукції; обчислити інтервали стійкості двоїстих оцінок щодо зміни запасів дефіцитних ресурсів; розрахувати інтервали можливих змін ціни одиниці рентабельної продукції.

**Задача 5.3.** Підприємство виготовляє продукцію чотирьох видів А, В, С і D, для чого використовує три види ресурсів 1, 2, 3. Норми витрат ресурсів на одиницю продукції і запаси ресурсів на підприємстві приведені в таблиці 5.6.

Таблиця 5.6 – Вихідні дані

Ресурс	Норма витрат на одиницю продукції				Запас ресурсу
	А	В	С	Д	
1	2	1	1	1	280
2	1	—	1	1	80
3	1	5	1	—	250

Відома ціна одиниці продукції кожного виду: А – 4 грош.од., В – 3 грош.од., С – 6 грош.од., D – 7 грош.од. Визначити план виробництва продукції, що максимізує дохід підприємства.

Остання симплекс-таблиця має вигляд, що наведений у таблиці 5.7.

Таблиця 5.7 – Оптимальний план

Базис	$C_{j_{\text{баз}}}$	$C_j$	4	3	6	7	0	0	0
		B	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$A_7$
$A_5$	0	150	4/5	0	-1/5	0	1	-1	-1/5
$A_4$	7	80	1	0	1	1	0	1	0
$A_2$	3	50	1/5	1	1/5	0	0	0	1/5
	$L_j$	710	38/5	3	38/5	7	0	7	3/5
	$\Delta_j$		18/5	0	8/5	0	0	7	3/5

Записати математичні моделі прямої і двоїстої задач; записати оптимальні плани прямої і двоїстої задач, виконати їхній економічний аналіз; визначити статус ресурсів, використовуваних для виробництва продукції, і рентабельність кожного виду продукції; обчислити інтервали стійкості двоїстих оцінок щодо зміни запасів дефіцитних ресурсів; розрахувати інтервали можливих змін ціни одиниці рентабельної продукції.

### Тема 6 ТРАНСПОРТНА ЗАДАЧА (12 годин)

Транспортна задача в матричній постановці та її властивості.

Методи побудови опорного плану.

Метод потенціалів.

Випадок виродження.

Транспортна задача за критерієм часу.

Література: [1] с. 59-70; [2] с. 118-138; [3] с. 134-169; [4] с. 193-216.

Контрольні запитання

1. Які специфічні властивості дозволяють виділити транспортні задачі в окремий клас з множини задач лінійного програмування?
2. Опишіть методи побудови припустимого плану транспортної задачі.
3. Скільки ненульових елементів повинен містити невироджений базисний план транспортної задачі?
4. Сформулюйте критерій оптимальності для припустимого плану транспортної задачі.
5. Поясніть, на чому заснований метод потенціалів?
6. З чого впливає критерій оптимальності припустимого плану транспортної задачі?
7. Перелічіть основні етапи методу потенціалів.
8. Які умови повинні бути дотримані при побудові ланцюжка перетворення плану за методом потенціалів?
9. Як подолати виникнення ситуації виродженості поточного плану в транспортній задачі?

**Приклад 6.1.** На ділянках  $U_1, U_2, U_3$  площею 300, 500 і 400 га відповідно можуть вирощуватися сільськогосподарські культури  $K_1, K_2, K_3$  і  $K_4$ . Планове завдання передбачає збір цих культур у кількостях відповідно по 6000, 1500, 225 і 1250 тонн. Матриця

$$\begin{bmatrix} 20 & 50 & 24 & 10 \\ 25 & 40 & 10 & 20 \\ 30 & 15 & 20 & 15 \end{bmatrix}$$

характеризує прибуток у грош.од. від реалізації 1 тонни при вирощуванні на ділянці  $U_i$  ( $i=1,3$ ) культури  $K_j$  ( $j=1,4$ ). Урожайність різних культур не залежить від ділянки посіву й становить 20, 30, 15 і 50 ц/га. Скласти економіко-математичну модель задачі, користуючись якою можна знайти план посіву сільськогосподарських культур, який максимізує прибуток. Методом потенціалів знайти такий розподіл культур  $K_1, K_2, K_3$  і  $K_4$  за ділянками  $U_1, U_2$  і  $U_3$ , при якому прибуток досягає найбільшого значення. Знайти оптимальний розподіл культур за ділянками при додатковій умові, що в майбутньому році використання ділянки  $U_3$  під культуру  $K_1$  агрономічною службою не рекомендовано. Встановити, на скільки зміниться величина максимального прибутку при дотриманні додаткового обмеження.

### Розв'язання

Позначимо  $x_{ij}$  площу (у га), що передбачається зайняти на ділянці  $U_i$  ( $i=1,3$ ) культурою  $K_j$  ( $j=1,4$ ). З урахуванням урожайності культур для виконання планового завдання під культуру  $K_1$  треба відвести  $6000/20=300$  га, під культуру  $K_2$  –  $15000/30=500$  га, під культуру  $K_3$  –  $2250/15=150$  га й під культуру  $K_4$  –  $12500/50=250$  га. Усього буде потрібно  $300+500+150+250=1200$  га. Загальна посівна площа також становить  $300+500+400=1200$  га.

Умови повного використання наявних посівних площ на всіх ділянках занесемо в таблицю 6.1.

Таблиця 6.1 – Вихідні дані

Площа ділянки $U_i$	Площа, займана під культуру $K_j$			
	$K_1$ (300)	$K_2$ (500)	$K_3$ (150)	$K_4$ (250)
$U_1$ (300)	20	50	24	10
	$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{14}$
$U_2$ (500)	25	40	10	20
	$x_{21}$	$x_{22}$	$x_{23}$	$x_{24}$
$U_3$ (400)	30	15	20	15
	$x_{31}$	$x_{32}$	$x_{33}$	$x_{34}$

Отримаємо обмеження з використання посівних площ:

$$x_{11}+x_{12}+x_{13}+x_{14}=300,$$

$$x_{21}+x_{22}+x_{23}+x_{24}=500,$$

$$x_{31}+x_{32}+x_{33}+x_{34}=400$$

та умови повної зайнятості площ відповідними культурами

$$x_{11}+x_{21}+x_{31}=300,$$

$$x_{12}+x_{22}+x_{32}=500,$$

$$x_{13}+x_{23}+x_{33}=150,$$

$$x_{14}+x_{24}+x_{34}=250,$$

умови невід'ємності змінних

$$x_{ij} \geq 0, (i=1,3; j=1,4).$$

Цільова функція задачі має вигляд

$$L = 20x_{11}+50x_{12}+24x_{13}+10x_{14}+25x_{21}+40x_{22}+10x_{23}+20x_{24}+30x_{31}+15x_{32}+20x_{33}+15x_{34} \rightarrow \max.$$

Таким чином, задача зводиться до знаходження розв'язання системи лінійних рівнянь, яке доставляє максимум цільової функції.

Аналізуючи систему рівнянь, відзначимо, що вона має всі особливості транспортної задачі. Отже її можна розв'язати, наприклад, методом потенціалів. Оскільки в розглянутому випадку має місце задача максимізації, ознакою оптимального плану буде відсутність у заключній таблиці вільних кліток з додатними оцінками.

Побудуємо початковий опорний план за методом найбільшого елемента (табл. 6.2).

Таблиця 6.2 – Початковий опорний план

Площа ділянки $U_i$	Площа, займана під культуру $K_j$			
	$K_1$ (300)	$K_2$ (500)	$K_3$ (150)	$K_4$ (250)
$U_1$ (300)	20	50	24	10
$U_2$ (500)	25	40	10	20
$U_3$ (400)	30	15	20	15
	300 -	200	150	250 -
	0 +			

Для дослідження плану на оптимальність треба знайти оцінки вільних кліток. Для цього слід знайти потенціали  $U_i$  і  $V_j$ , які визначаються в результаті вирішення системи рівнянь, складених за зайнятими клітками:

$$U_1 + V_2 = 50,$$

$$U_2 + V_1 = 25,$$

$$U_2 + V_2 = 40,$$

$$U_3 + V_1 = 30,$$

$$U_3 + V_3 = 20,$$

$$U_3 + V_4 = 15.$$

Отримаємо:

$$\begin{aligned} U_1 &= 5, & V_1 &= 30, \\ U_2 &= -5, & V_2 &= 45, \\ U_3 &= 0, & V_3 &= 20, \\ & & V_4 &= 15. \end{aligned}$$

Тепер знайдемо оцінки вільних кліток:

$$\Delta_{11} = c_{11} - (U_1 + V_1) = 20 - (5 + 30) = -15,$$

$$\Delta_{13} = c_{13} - (U_1 + V_3) = 24 - (5 + 20) = -1,$$

$$\Delta_{14} = c_{14} - (U_1 + V_4) = 10 - (5 + 15) = -10,$$

$$\Delta_{23} = c_{23} - (U_2 + V_3) = 10 - (-5 + 20) = -5,$$

$$\Delta_{24} = c_{24} - (U_2 + V_4) = 20 - (-5 + 15) = 10,$$

$$\Delta_{32} = c_{32} - (U_3 + V_2) = 15 - (0 + 45) = -30.$$

Оскільки серед оцінок є додатна ( $\Delta_{24} = 10$ ), план не оптимальний і його можна поліпшити, займаючи клітку  $(Y_2, K_4)$ . Щоб визначити, яку площу  $x_{24}$  треба відвести в новому опорному плані на ділянці  $Y_2$  під культуру  $K_4$ , побудуємо замкнутий контур для клітки  $(Y_2, K_4)$  і визначимо  $\lambda = \min(x_{ij}) = \min(300, 250) = 250$ .

Додаючи  $\lambda$  в «додатних» клітках і віднімаючи у «від'ємних», отримуємо новий опорний план (табл. 6.3).

Таблиця 6.3 – Початковий опорний план

Площа ділянки $Y_i$	Площа, займана під культуру $K_j$			
	$K_1$ (300)	$K_2$ (500)	$K_3$ (150)	$K_4$ (250)
$Y_1$ (300)	20	50	24	10
$Y_2$ (500)	25	40	10	20
$Y_3$ (400)	30	15	20	15
	50	200	150	250
	250			

Перевіримо план на оптимальність. Потенціали зайнятих кліток:

$$U_1 + V_2 = 50,$$

$$U_2 + V_1 = 25,$$

$$U_2 + V_2 = 40,$$

$$U_2 + V_4 = 20,$$

$$U_3 + V_1 = 30,$$

$$U_3 + V_3 = 20.$$

Звідки отримаємо:

$$\begin{aligned} V_1 &= 25, \\ U_1 &= 10, & V_2 &= 40, \\ U_2 &= 0, & V_3 &= 15, \\ U_3 &= 5, & V_4 &= 20. \end{aligned}$$

Визначимо оцінки вільних кліток:

$$\Delta_{11} = c_{11} - (U_1 + V_1) = 20 - (10 + 25) = -15,$$

$$\Delta_{13} = c_{13} - (U_1 + V_3) = 24 - (10 + 15) = -1,$$

$$\Delta_{14} = c_{14} - (U_1 + V_4) = 10 - (10 + 20) = -20,$$

$$\Delta_{23} = c_{23} - (U_2 + V_3) = 10 - (0 + 15) = -5,$$

$$\Delta_{32} = c_{32} - (U_3 + V_2) = 15 - (5 + 40) = -30,$$

$$\Delta_{34} = c_{34} - (U_3 + V_4) = 15 - (5 + 20) = -10.$$

Оцінки всіх вільних кліток від'ємні, отже отриманий план оптимальний.

Розмір прибутку при реалізації оптимального плану посіву складе

$$L = 50 \cdot 30 \cdot 300 + 25 \cdot 20 \cdot 50 + 40 \cdot 30 \cdot 200 + 20 \cdot 50 \cdot 250 + 30 \cdot 20 \cdot 250 + 20 \cdot 15 \cdot 150 = 1160000 \text{ грн.}$$

Щоб визначити оптимальний план посіву без використання ділянки  $U_1$  під культуру  $K_2$ , звільнимо клітку ( $U_1, K_2$ ). Для цього умовно занижимо показник критерію оптимальності в цій клітці, наприклад, до значення мінус 100 (від'ємний прибуток), щоб цю клітку займати було не вигідно. Замість культури  $K_2$  на ділянці  $U_1$  розмістимо культури  $K_3$  і  $K_4$ , а під  $K_2$  відведемо ділянку  $U_2$ , а на ділянці  $U_3$  залишаться культури  $K_1$  і  $K_3$  (табл. 6.4).

Таблиця 6.4 – Початковий опорний план без використання ділянки  $U_1$

Площа ділянки $U_i$	Площа, займана під культуру $K_j$			
	$K_1$ (300)	$K_2$ (500)	$K_3$ (150)	$K_4$ (250)
$U_1$ (300)	20	-100	24	10
$U_2$ (500)	25	40	10	20
$U_3$ (400)	30	15	20	15
	300	0	100	+

Перевіримо оптимальність отриманого плану. Потенціали зайнятих кліток:

$$\begin{aligned} U_1 + V_3 &= 24, \\ U_1 + V_4 &= 10, \\ U_2 + V_2 &= 40, \\ U_3 + V_1 &= 30, \\ U_3 + V_3 &= 20, \\ U_3 + V_2 &= 15. \end{aligned}$$

Звідки отримаємо:

$$\begin{aligned} V_1 &= 30, \\ U_1 &= 4, & V_2 &= 15, \\ U_2 &= 25, & V_3 &= 20, \\ U_3 &= 0, & V_4 &= 6. \end{aligned}$$

Визначимо оцінки вільних кліток

$$\begin{aligned} \Delta_{11} &= c_{11} - (U_1 + V_1) = 20 - (4 + 30) = -14, \\ \Delta_{12} &= c_{12} - (U_1 + V_2) = -100 - (4 + 15) = -119, \\ \Delta_{21} &= c_{21} - (U_2 + V_1) = 25 - (25 + 30) = -30, \\ \Delta_{23} &= c_{23} - (U_2 + V_3) = 10 - (25 + 20) = -35, \\ \Delta_{24} &= c_{24} - (U_2 + V_4) = 20 - (25 + 6) = -11, \\ \Delta_{34} &= c_{34} - (U_3 + V_4) = 15 - (0 + 6) = 9. \end{aligned}$$

План не оптимальний, оскільки оцінка вільної клітки ( $U_3, K_4$ ) додатна  $\Delta_{34} = 9$ . Поліпшимо його, помістивши в клітку ( $U_3, K_4$ ) ненульову компоненту і визначимо  $\lambda = \min(x_{ij}) = \min(100, 250) = 100$ . Отримаємо новий план і визначимо його оптимальність (табл. 6.5).

Таблиця 6.5 – Оптимальний план

Площа ділянки $Y_i$	Площа, займана під культуру $K_j$			
	$K_1$ (300)	$K_2$ (500)	$K_3$ (150)	$K_4$ (250)
$Y_1$ (300)	20	-100	24	10
$Y_2$ (500)	25	40	10	20
$Y_3$ (400)	30	15	20	15
	300	0		100

Потенціали зайнятих кліток:

$$U_1 + V_3 = 24,$$

$$U_1 + V_4 = 10,$$

$$U_2 + V_2 = 40,$$

$$U_3 + V_1 = 30,$$

$$U_3 + V_2 = 15,$$

$$U_3 + V_4 = 15.$$

Звідки отримаємо:

$$\begin{aligned} V_1 &= 25, \\ U_1 &= 0, & V_2 &= 10, \\ U_2 &= 30, & V_3 &= 24, \\ U_3 &= 5, & V_4 &= 10. \end{aligned}$$

Визначимо оцінки вільних кліток:

$$\Delta_{11} = c_{11} - (U_1 + V_1) = 20 - (0 + 25) = -5,$$

$$\Delta_{12} = c_{12} - (U_1 + V_2) = -100 - (0 + 10) = -110,$$

$$\Delta_{21} = c_{21} - (U_2 + V_1) = 25 - (30 + 25) = -30,$$

$$\Delta_{23} = c_{23} - (U_2 + V_3) = 10 - (30 + 24) = -44,$$

$$\Delta_{24} = c_{24} - (U_2 + V_4) = 20 - (30 + 10) = -20,$$

$$\Delta_{33} = c_{33} - (U_3 + V_3) = 20 - (5 + 24) = -9.$$

Оскільки всі оцінки вільних кліток від'ємні, план є оптимальним. Відповідно до цього плану на ділянці  $Y_1$  треба 150 га відвести під культуру  $K_3$  і 150 га під культуру  $K_4$ ; ділянка  $Y_2$  повністю зайнята культурою  $K_2$ , а на ділянці  $Y_3$  на 300 га розмістити культуру  $K_1$  і на 100 га культуру  $K_4$ . При цьому максимальний прибуток становитиме

$$L = 24 \cdot 15 \cdot 150 + 10 \cdot 50 \cdot 150 + 40 \cdot 30 \cdot 500 + 30 \cdot 20 \cdot 300 + 15 \cdot 50 \cdot 100 = 984000 \text{ грн.}$$

Додаткове обмеження на посів культури  $K_2$  скоротило прибуток на  
 $1160000 - 984000 = 176000$  грн.

### Задачі для самостійного розв'язання

**Задача 6.1.** На ділянках  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  і  $B_4$  при спорудженні метрополітену необхідно виконати грабарства в обсягах відповідно 5, 8, 10 і 2 тис. м<sup>3</sup> з використанням взаємозамінних механізмів  $M_1$ ,  $M_2$  і  $M_3$ . Ресурси часу роботи механізмів відповідно дорівнюють 170, 210 і 120 годин, а їхня продуктивність залежно від ґрунто-геологічних умов на ділянках і конструкції механізмів

виражається величинами 50, 35 і 20 м<sup>3</sup>/год відповідно. Собівартість робіт у грош. од. /м<sup>3</sup> механізмів на ділянках наведена у матриці

$$\begin{bmatrix} 1,8 & 0,7 & 2,1 & 1,9 \\ 0,8 & 1,1 & 2,3 & 0,7 \\ 1,5 & 2,8 & 0,9 & 0,4 \end{bmatrix}.$$

Скласти економіко-математичну модель задачі, що дозволяє знайти план розподілу механізмів за ділянками робіт, при якому загальна вартість робіт буде найменшою. За методом потенціалів знайти такий розподіл механізмів за ділянками, при якому сумарна вартість виконаних робіт буде мінімальною. Знайти оптимальний розподіл механізмів по дільницях робіт при додатковій умові, що на пусковій ділянці В<sub>3</sub> грабарства повинні бути виконані в повному обсязі. Встановити, наскільки зміниться вартість робіт при виконанні цієї вимоги.

**Задача 6.2.** Передбачено штрафи за недопоставку одиниці продукції споживачам В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub>, В<sub>3</sub> у розмірі відповідно 5, 3 і 2 грош.од. Визначити оптимальний план ТЗ:

$$\begin{aligned} a_i &= (10; 80; 15) \\ b_j &= (75; 20; 50) ; \end{aligned} \quad c_{ij} = \begin{pmatrix} 5 & 1 & 7 \\ 6 & 4 & 6 \\ 3 & 2 & 5 \end{pmatrix}.$$

**Задача 6.3.** Розв'язати транспортну задачу

$$\begin{aligned} a_i &= (80; 40; 60; 40) \\ b_j &= (70; 60; 80) ; \end{aligned} \quad c_{ij} = \begin{pmatrix} 7 & 4 & 3 \\ 5 & 8 & 3 \\ 6 & 1 & 4 \\ 8 & 2 & 2 \end{pmatrix},$$

якщо вартість збереження одиниці продукції, що не вивезена, у постачальників А<sub>1</sub>, А<sub>2</sub>, А<sub>3</sub>, А<sub>4</sub> дорівнює відповідно 5, 4, 2 і 3 грош.од.

**Задача 6.4.** Розв'язати транспортну задачу:

$$\begin{aligned} a_i &= (75; 40; 35; 40) \\ b_j &= (20; 60; 140) ; \end{aligned} \quad c_{ij} = \begin{pmatrix} 5 & 3 & 7 \\ 2 & 1 & 4 \\ 3 & 2 & 4 \\ 4 & 6 & 6 \end{pmatrix},$$

якщо штрафи за недопоставку продукції споживачам В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub>, В<sub>3</sub> складають відповідно 6, 4 і 8 грош.од.



## Тема 7 ЦІЛОЧИСЛОВІ ЗАДАЧІ ЛІНІЙНОГО ПРОГРАМУВАННЯ. ОСНОВНІ МЕТОДИ ЇХ РОЗВ'ЯЗАННЯ І АНАЛІЗУ (6 годин)

Типи задач дискретного програмування.

Метод Гоморі.

Метод віток і границь.

Література: [1] с. 71-78; [2] с. 152-171; [3] 175-186; 214-221; [4] с. 397-417, 422-428, 432-437.

Контрольні запитання

1. Які основні проблеми виникають при розв'язанні дискретних задач?
2. Сформулюйте задачу про ранець.
3. Які економіко-математичні моделі можна звести до задачі про комівояжера?
4. Наведіть приклади моделей з розривними цільовими функціями.
5. Який принцип використовують для побудови правильного відсікання в методі Гоморі?
6. Яку роль відіграє алгоритм двоїстого симплекс-методу при розв'язанні цілочислової лінійної задачі за методом Гоморі?
7. Перелічіть принципові ідеї, що лежать в основі методу віток і границь.
8. Як провадиться побудова відсікання при розв'язанні цілочислової лінійної задачі за методом віток і границь?
9. Опишіть схему розв'язання цілочислової задачі лінійного програмування за методом віток і границь.
10. За рахунок яких перетворень вдається побудувати сполучений базис при додаванні відсікаючого обмеження?

**Приклад 7.1.** На придбання обладнання для нової виробничої ділянки виділено 15 грош. од. Підприємство може замовити машини типу А вартістю 3 грош. од., що випускають 1 од. продукції за зміну; і машини типу В вартістю 2 грош. од., що забезпечують випуск 2 од. продукції за зміну. Причому число придбаних машин В не повинне перевищувати 5 штук. Потрібно скласти економіко-математичну модель, користуючись якою, можна знайти план придбання машин, що враховує можливості підприємства й забезпечує найвищу продуктивність нової ділянки. Користуючись одним з методів цілочислового програмування, знайти оптимальний план придбання обладнання.

### Розв'язання

Складемо математичну модель задачі. Припустимо, що підприємство придбає  $x_1$  машин А і  $x_2$  машин В. Тоді змінні  $x_1$  і  $x_2$  повинні задовольняти наступним нерівностям:

$$\begin{aligned} 3x_1 + 2x_2 &\leq 15, \\ x_2 &\leq 5. \end{aligned}$$

Якщо підприємство придбає зазначену кількість обладнання, то продуктивність нової ділянки складе:

$$L = x_1 + 2x_2 \rightarrow \max.$$

За своїм економічним змістом змінні  $x_1$  і  $x_2$  можуть приймати тільки цілі невід'ємні значення, тобто

$$x_1, x_2 \geq 0, \\ x_1, x_2 - \text{цілі.}$$

Отже, математична модель задачі матиме вигляд: знайти таке рішення  $x=(x_1, x_2)$ , що перетворює на максимум цільову функцію  $L = x_1 + 2x_2 \rightarrow \max$  і задовольняє обмеженням

$$3x_1 + 2x_2 \leq 15, \\ 208x_1 + 505x_2 \leq 5200, \\ x_1, x_2 \geq 0, \\ x_1, x_2 - \text{цілі.}$$

Оскільки невідомі можуть приймати тільки цілі значення, задача є задачею цілочислового програмування. Оскільки число змінних дорівнює двом, для розв'язання задачі можна використати її геометричну інтерпретацію. Для цього побудуємо багатокутник рішень (рис. 7.1).

Обмеженням задачі задовольняють всі точки отриманого багатокутника  $OBAC$ , а умовам цілочисельності – тільки точки, показані кружками. Щоб знайти точку, координати якої є рішенням задачі, замінимо багатокутник  $OBAC$  багатокутником  $OBDEFGHK$ , що містить всі припустимі точки із цілочисельними координатами й таким, що координати кожної з вершин є цілими числами. Для визначення вершини, що містить оптимальний план, побудуємо вектор  $s=(1;2)$  і пряму  $x_1 + 2x_2 = 0$ . Пересуваючи побудовану пряму в напрямку, зазначеному вектором, визначимо, що останньою точкою, яка з'єднує її з багатокутником  $OBDEFGHK$ , є його вершина з координатами  $x=(1; 5)$ .

Вирішимо задачу симплексним методом, не вважаючи на вимогу цілочисельності. Для цього приведемо її до канонічного вигляду:

$$L = x_1 + 2x_2 \rightarrow \max, \\ 3x_1 + 2x_2 + x_3 = 15, \\ x_2 + x_4 = 5, \\ x_1, x_2 \geq 0.$$

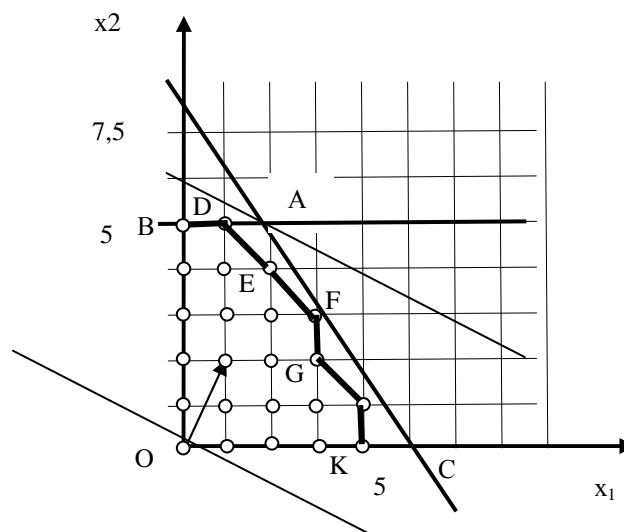


Рисунок 7.1 – Багатокутник рішень

Очевидно, що опорним планом є план

$$x = (0, 0, 15, 5).$$

Заповнимо симплекс-таблицю 7.1.

Таблиця 7.1 – Вихідна симплекс-таблиця

Базис	C <sub>jбаз</sub>	C <sub>j</sub>	1	2	0	0
		P <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>
A <sub>3</sub>	0	15	3	2	1	0
A <sub>4</sub>	0	5	0	1	0	1
L <sub>j</sub>		0	0	0	0	0
Δ <sub>j</sub>			-1	-2	0	0

Зроблена оцінка оптимальності плану показує, що план не є оптимальним. Перейдемо до нового базису. Очевидно, що вводити до базису треба в першу чергу вектор A<sub>2</sub>, виводити з базису при цьому необхідно вектор A<sub>4</sub>. Складемо нову симплекс-таблицю 7.2. Помножимо головний рядок нової таблиці на -2 і додаємо до рядку вектору A<sub>3</sub>, результат записуємо в рядок вектора A<sub>3</sub> нової таблиці.

Таблиця 7.2 – Покращення опорного плану

Базис	C <sub>jбаз</sub>	C <sub>j</sub>	1	2	0	0
		P <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>
A <sub>2</sub>	2	5	0	1	0	1
A <sub>3</sub>	0	5	3	0	1	-2
L <sub>j</sub>		10	0	2	0	2
Δ <sub>j</sub>			-1	0	0	2

Новий опорний план  $x = (0; 5; 5; 0)$ . Перевіривши його на оптимальність, переконуємося, що цей план також не є оптимальним, його необхідно поліпшити. Перейдемо до чергового опорного плану. Для цього введемо до базису вектор A<sub>1</sub>, виводити з базису будемо вектор A<sub>3</sub>. Заповнимо чергову симплекс-таблицю 7.3.

Таблиця 7.3 – Оптимальний план

Базис	C <sub>jбаз</sub>	C <sub>j</sub>	1	2	0	0
		P <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>
A <sub>1</sub>	1	5/3	1	0	1/3	-2/3
A <sub>2</sub>	2	5	0	1	0	1
L <sub>j</sub>		35/3	1	2	1/3	4/3
Δ <sub>j</sub>			0	0	1/3	4/3

Отримали новий опорний план  $x = (5/3; 5; 0; 0)$ . Всі розраховані значення симплекс-різниць додатні або дорівнюють нулю, отже отриманий план є оптимальним. Але він не задовольняє умові цілочисельності змінних  $x_1$  і  $x_2$ . Для змінної  $x_1$ , що має дробову частину, складаємо додаткове обмеження, користуючись останньою симплекс-таблицею:

$$x_1 + 1/3x_3 - 2/3x_4 \geq 5,3.$$

До системи обмежень додамо нерівність

$$f(1)x_1 + f(1/3)x_3 + f(-2/3)x_4 \geq f(5/3),$$

$$1/3x_3 + 1/3x_4 \geq 2/3.$$

Введемо невід'ємну змінну  $x_5$  і складемо рівняння:

$$1/3x_3 + 1/3x_4 - x_5 = 2/3.$$

Складемо нову симплекс-таблицю 7.4 з новою умовою, доповнивши таблицю, що містить оптимальний план, новим рядком.

Таблиця 7.4 – Цілочисловий оптимальний план

Базис	$C_{j\text{баз}}$	$C_j$	1	2	0	0	0
		$P_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$
$A_1$	1	5/3	1	0	1/3	-2/3	0
$A_2$	2	5	0	1	0	1	0
$A_5$	0	-2/3	0	0	-1/3	-1/3	1
$L_j$		35/3	1	2	1/3	4/3	0
$\Delta_j$			0	0	1/3	4/3	0

Треба пам'ятати, що після включення до системи обмежень додаткового рівняння, яке відповідає правильному відсіканню, завжди буде утворюватися неприпустиме базисне рішення. Для одержання припустимого базисного рішення потрібно перевести в базисні змінні одну з вільних змінних ( $x_3$  або  $x_4$ ). Нехай це буде  $x_3$ . Введемо до базису вектор  $A_3$ . Для цього помножимо рядок  $A_5$  на (-3) і результат запишемо в рядок  $A_3$ . Головний рядок нової таблиці помножимо на (-1/3) і додамо до першого рядку попередньої таблиці. Результат запишемо в рядок  $A_1$ . Потім цей же рядок помножимо на 0,069 і додамо до другого рядку попередньої таблиці, результат запишемо в рядок  $A_2$ . Потім помножимо головний рядок на (-1/3) і додамо до другого рядку попередньої таблиці. Отримаємо таблицю 7.5.

Таблиця 7.5 – Кінцевий план задачі

Базис	$C_{j\text{баз}}$	$C_j$	1	2	0	0	0
		$P_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$
$A_1$	1	1	1	0	0	-1	1
$A_2$	2	5	0	1	0	1	0
$A_5$	0	2	0	0	1	1	-3
$L_j$		11	1	2	0	1	1
$\Delta_j$			0	0	0	1	1

Отримано план  $x = (1; 5; 0; 0; 2)$ . Дослідження плану на оптимальність показує, що він є оптимальним, при цьому отримали цілочисельне рішення.

Таким чином, підприємству треба придбати одну машину А і п'ять машин типу В. При цьому продуктивність нової ділянки буде максимальною і складе 11 одиниць продукції.

### Задачі для самостійного розв'язання

**Задача 7.1.** Для виконання робіт  $P_1$ ,  $P_2$  і  $P_3$  сільськогосподарське підприємство може придбати трактори марок А і Б вартістю 4 і 3 грош.од.

кожний. З використанням нової техніки необхідно виконати не менше 2020 умовн.од. роботи  $P_1$ , не менше 104 умовн.од. роботи  $P_2$  і не менше 20 умовн.од. роботи  $P_3$ . За розглянутий проміжок часу з використанням трактора марки А можна виконати 404 умовн.од. роботи  $P_1$ , 8 умовн.од. роботи  $P_2$  або 1 умовн.од. роботи  $P_3$ . З використанням трактора марки Б можна виконати 105 умовн.од. роботи  $P_1$ , 10 умовн.од. роботи  $P_2$  або 4 умовн.од. роботи  $P_3$ . Скласти економіко-математичну модель, що дозволяє знайти такий варіант придбання тракторів тієї чи іншої марки, при якому будуть виконані всі необхідні роботи, а витрати на нову техніку будуть мінімальними. Користуючись одним з методів цілочисельного лінійного програмування, знайти оптимальний варіант придбання тракторів.

**Задача 7.2.** Підприємство випускає вироби А і В, при виготовленні яких використовується сировина  $C_1$  і  $C_2$ . Відомі запаси сировини ( $b_1 = 7$ ,  $b_2 = 10$ ), норми витрати на одиницю виробу А сировини  $C_1$  – 1 од., сировини  $C_2$  – 1 од. На одиницю продукції В сировини  $C_1$  – 1 од., сировини  $C_2$  – 2 од. Оптові ціни виробу А – 12 од., виробу В – 11 од., планова собівартість виробу А – 9 од., В – 10 од. Як тільки обсяг випуску продукції перестане відповідати оптимальним розмірам підприємства, подальше збільшення випуску  $x_j$  приводить до підвищення вартості продукції і в першому наближенні фактична собівартість  $c_j$  описується функцією

$$c_j = c_j^0 + c'_j x_j,$$

де  $c'_j$  – певна постійна величина.

При пошуку плану випуску виробів, що забезпечує підприємству найвищий прибуток в умовах порушення балансу між обсягом випуску й оптимальних розмірів підприємства цільова функція набуває вигляд

$$f = (p_1 - (c_1^0 + c'_1 x_1)) * x_1 + (p_2 - (c_2^0 + c'_2 x_2)) * x_2,$$

а обмеження за видами сировини мають вигляд

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 \leq b_1,$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 \leq b_2,$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0.$$

Скласти економіко-математичну модель задачі. Графічним методом вирішити отриману задачу й сформулювати відповідь в економічних термінах відповідно до умов задачі.

**Задача 7.3.** За методом Гоморі розв'язати задачі цілочислового програмування:

а)

$$Z = x_1 \rightarrow \max$$

$$\begin{cases} x_1 + 3x_2 + x_3 = 12 \\ 3x_1 - 8x_2 + x_4 = 24 \\ x_j \geq 0; \quad x_j - \text{цілі} \end{cases};$$

б)

$$Z = x_1 + x_2 \rightarrow \max$$

$$\begin{cases} 2x_1 + x_2 + x_3 = 6 \\ 2x_1 + 3x_2 + x_4 = 9 \\ x_j \geq 0; \quad x_j - \text{цілі} \end{cases};$$

$$\begin{aligned} & \text{в)} \\ & Z = 3x_1 + 3x_2 \rightarrow \max \\ & \begin{cases} x_1 + 3x_2 \geq 6 \\ 3x_1 + 2x_2 \leq 36 \\ x_2 \leq 13 \\ x_j \geq 0; \quad x_j - \text{цїлі} \end{cases} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{г)} \\ & Z = 3x_1 + 4x_2 \rightarrow \max \\ & \begin{cases} 3x_1 + 2x_2 \leq 8 \\ x_1 + 4x_2 \leq 10 \\ x_j \geq 0; \quad x_j - \text{цїлі} \end{cases} \end{aligned}$$

**Задача 7.4.** За методом віток і границь розв'язати задачу цілочислового програмування:

$$\begin{aligned} & \text{а)} \\ & Z = 2x_1 + x_2 \rightarrow \max \\ & \begin{cases} 2x_1 + 5x_2 \leq 16 \\ 6x_1 + 5x_2 \leq 30 \\ x_j \geq 0; \quad x_j - \text{цїлі} \end{cases} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{б)} \\ & Z = 3x_1 + 7x_2 \rightarrow \max \\ & \begin{cases} 4x_1 + 8x_2 \leq 32 \\ 6x_1 + 2x_2 \leq 12 \\ x_j \geq 0; \quad x_j - \text{цїлі} \end{cases} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{в)} \\ & Z = x_1 + 4x_2 \rightarrow \max \\ & \begin{cases} 5x_1 + 2x_2 \leq 10 \\ 3x_1 + 7x_2 \leq 21 \\ x_j \geq 0; \quad x_j - \text{цїлі} \end{cases} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{г)} \\ & Z = 2x_1 + 3x_2 \rightarrow \max \\ & \begin{cases} 8x_1 + 5x_2 \leq 40 \\ 3x_1 + 9x_2 \leq 27 \\ x_j \geq 0; \quad x_j - \text{цїлі} \end{cases} \end{aligned}$$

## Тема 8 ЗАДАЧІ НЕЛІНІЙНОГО ПРОГРАМУВАННЯ. ОСНОВНІ МЕТОДИ ЇХ РОЗВ'ЯЗАННЯ І АНАЛІЗУ (10 годин)

Постановка задачі нелінійного програмування (ЗНП).

Класичний метод оптимізації з використанням множників Лагранжа.

Опукле програмування.

Необхідні й достатні умови існування сідлової точки. Теорема Куна-Таккера.

Деякі методи розв'язання задач НЛП.

Література: [1], с. 79-93; [2], с. 187-195; [3], с. 251-279; [4], с. 797-804.

Контрольні запитання

1. За яких умов оптимізаційну задачу можна віднести до класу нелінійних?
2. Наведіть приклад економічної моделі, що зводиться до задачі нелінійного програмування.
3. Перелічіть основні труднощі, що виникають у процесі розв'язання задачі нелінійного програмування.
4. Який зміст вкладають в поняття «умовна оптимізація»?
5. Для чого призначений метод множників Лагранжа й у чому він полягає?
6. Яку точку множини розв'язків називають стаціонарною?
7. Які принципові етапи належать до градієнтних методів?
8. Поясніть, для розв'язання яких задач призначений метод найскорішого спуску й метод дроблення кроку?
9. Дайте визначення опуклої (увігнутої) функції.

10. Сформулюйте достатню умову опуклості (увігнутості) функції.
11. У чому полягає специфіка задач опуклого програмування?
12. Дайте визначення сідлової точки. Наведіть приклад функції, що має сідлову точку.
13. Сформулюйте необхідну й достатню умови теореми Куна-Таккера. Яке значення вони мають для розв'язання задач нелінійного програмування?
14. У чому полягає умова регулярності Слейтера? Поясніть її зміст.
15. Наведіть приклад пари двоїстих задач нелінійного програмування.
16. Які властивості пари нелінійних двоїстих задач можна застосувати для їх розв'язання?

**Приклад 8.1.** Знайти умовний екстремум функції  $F=xy$  за умови

$$g(x, y) = x + y - 2 = 0 \text{ для } x \geq 0, y \geq 0.$$

### Розв'язання

Функція Лагранжа має вигляд

$$L(x, y, \lambda) = xy + \lambda(y+x-2).$$

Для відшукування передбачуваного екстремуму вирішимо систему трьох рівнянь:

$$\frac{\partial L}{\partial x} = y + \lambda = 0, \quad \frac{\partial L}{\partial y} = x + \lambda = 0, \quad \frac{\partial L}{\partial \lambda} = y + x - 2 = 0.$$

Віднімаючи від першого рівняння друге, знаходимо  $y-x=0$ . З третього рівняння визначаємо  $y + x = 1$ . Підставивши  $y = x$  в останню формулу, остаточно одержимо  $x^* = 1$  і  $y^* = 1$ . З урахуванням цих результатів з першого або другого рівнянь знаходимо  $\lambda^* = -1$ . Значення функції в точці екстремуму

$$F^* = x^* y^* = 1 \cdot 1 = 1.$$

Умови прикладу подані на рисунку 8.1.

Лінія рівня, що проходить через точку передбачуваного екстремуму, описується рівнянням  $xy=1$ . Всі лінії рівня, що лежать нижче лінії  $xy=1$ , мають рівень менше 1, а що лежать вище лінії рівня  $xy=1$ , мають рівень більше 1. Це впливає з рівняння ліній рівнів  $y = k/x$ , де  $k$  - значення рівня. Ясно, що чим більше  $k$ , тим правіше проходить крива. Функція, зумовлена умовою  $g(xy)=y+x-2=0$ , є прямою лінією  $y=2-x$ . Через симетрію задачі функції  $xy=1$  і  $g(xy)=y+x-2=0$  торкаються одна одної в точці передбачуваного екстремуму (з координатами (1,1)). Із сказаного випливає, що на прямій  $y=2-x$  значення функції  $u=xy$  менше одиниці скрізь, крім точки передбачуваного екстремуму. Таким чином, у цій точці має місце максимум.

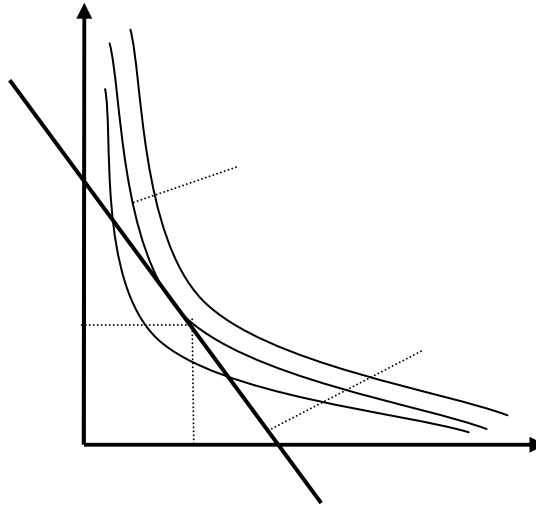


Рисунок 8.1 – Умови прикладу

*Задачі для самостійного розв'язання*

**Задача 8.1.** Використовуючи метод Лагранжа, відшукати умовний екстремум функції

$$F = x_1 x_2 + x_3$$

за умови

$$x_1^2 x_2^2 + x_3^2 = 1,$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, x_3 \geq 0.$$

**Задача 8.2.** Знайти графічним методом максимум і мінімум функції:

$$F = x + 2y$$

за умови

$$x^2 + y^2 \leq 4,$$

$$x \geq 0, y \geq 0.$$

**Задача 8.3.** За методом Лагранжа знайти точку умовного екстремуму.

а)  $F = 2x_1^2 + x_2^2;$   
 $2x_1 + 3x_2 = 5;$

б)  $F = x_1^2 - x_2^2;$   
 $3x_1 + 4x_2 = 12;$

в)  $F = (x_1 - 1)^2 + (x_2 - 3)^2;$   
 $2x_1 - x_2 = 5$

г)  $F = x_1^2 + 2x_2^2 + 3x_3^2;$   
 $x_1 + 2x_2 + x_3 = 8$

д)  $F = x_1^2 + 2x_1 + x_2^2 - 5x_2;$   
 $x_1 + 3x_2 = 6$

е)  $F = 2x_1^2 + 5x_1 + x_2^2 + 3x_2.$   
 $x_1 + 5x_2 = 12$

**Задача 8.4.** На виробництво трьох видів продукції А, В і С витрачають матеріальні, трудові й фінансові ресурси. Норми витрат на одиницю продукції, сумарний запас, а також розмір прибутку від реалізації одиниці продукції, що залежить від обсягу виробництва (в умовних одиницях), відбиває таблиця 8.1.



Таблиця 8.1 – Вихідні дані

Ресурси	Продукція			Запас ресурсів
	А	В	С	
Матеріальні	4	5	7	100
Трудові	3	6	8	120
Фінансові	2	1	4	75
Прибуток	$4x_1^2$	$x_2^2+2x_2$	$3x_3^2+6$	
Обсяг виробництва	$X_1$	$X_2$	$X_3$	

Попит на продукцію видів В і С відомий і становить 12 і 8 од. Визначити оптимальний план виробництва продукції кожного виду, якщо ресурси потрібно використати повністю. Знайти оцінки ресурсів і подати економічний аналіз оптимального плану.

## Змістовий модуль 2 Економетричні моделі

### Тема 9 ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ЕКОНОМЕТРИЧНИХ МОДЕЛЕЙ (6 годин)

Роль економетричних досліджень в економіці.

Етапи економетричного моделювання.

Класифікація економетричних моделей.

Література: [1], с. 140-146; [10], с. 6-23.

Контрольні запитання

1. З якою метою проводять економетричні дослідження?
2. Поясніть складові загальної економетричної моделі.
3. Охарактеризуйте етапи економетричного моделювання.
4. Поясніть відмінність між ендогенними і екзогенними змінними.
5. У чому полягає ідентифікація і верифікація економетричної моделі?
6. Поясніть терміни «регресія», «умовне математичне сподівання» і «збурення».
7. Які класи моделей використовують для аналізу або прогнозу в економетрії?
8. Якими властивостями повинна володіти регресійна модель з одним рівнянням, побудована на основі просторової вибірки?
9. Поясніть терміни «гомоскедастичність» і «гетероскедастичність».
10. Яку вибірку спостережень називають часовим рядом?
11. Які економетричні моделі належать до систем одночасних рівнянь?

### Тема 10 МЕТОДИ ПОБУДОВИ ЗАГАЛЬНОЇ ЛІНІЙНОЇ МОДЕЛІ (18 годин)

Побудова загальної лінійної моделі.

Лінійна модель парної регресії. Суть методу найменших квадратів.

Оцінка значущості рівняння лінійної регресії та перевірка моделі на адекватність за критеріями Стюдента і Фішера.

Лінійна модель множинної регресії.

Оцінка значущості множинної регресії і показники якості моделі.

Література: [1], с. 147-168; [10], с. 50-80.

### Контрольні запитання

1. Поясніть терміни «рівняння регресії» і «функція регресії».
2. Які помилки належать до помилок специфікації? До помилок виміру?
3. На яких підставах вибирають вид регресійної залежності?
4. Як розраховують залишкову дисперсію? Загальну дисперсію ознаки  $y$ ?
5. У чому полягає сутність методу найменших квадратів?
6. Якими властивостями повинна володіти лінійна модель, щоб оцінки її параметрів мали найменшу дисперсію в класі всіх лінійних незміщених оцінок?
7. Поясніть, що таке коефіцієнт регресії? Коефіцієнт кореляції? Коефіцієнт детермінації?
8. Як визначають статистичну значущість рівняння регресії в цілому?
9. З якою метою визначають стандартну помилку коефіцієнта регресії? Який критерій для цього використовують?
10. Як визначають довірчий інтервал для коефіцієнта регресії?
11. З якою метою і як визначають значущість лінійного коефіцієнта кореляції?
12. У якому випадку використовують лінійну модель множинної регресії?
13. Що таке коефіцієнти «чистої» регресії? Який в них економічний зміст?
14. У якому випадку використовують стандартизовані коефіцієнти регресії?
15. Що характеризують показник множинної кореляції і показник детермінації?
16. Що таке лінійний коефіцієнт множинної кореляції і скорегований індекс множинної кореляції?
17. Для чого розраховують часткові коефіцієнти кореляції?
18. Як оцінюють значущість рівняння множинної регресії в цілому та значущість коефіцієнтів чистої регресії?
19. Поясніть, у чому полягає процедура відбору факторів при побудові рівняння регресії методом виключення?

**Приклад 10.1.** Визначити залежність між змінним видобутком вугілля  $Y$  (т) на одного робітника і потужністю пласта вугілля  $X$  (м). Вихідні дані наведено у таблиці 10.1.

Таблиця 10.1 – Вихідні дані

$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$x_i$	8	11	12	9	8	8	9	9	8	12
$y_i$	5	10	10	7	5	6	6	5	6	8

Знайти рівняння регресії  $Y$  на  $X$ .

## Розв'язання

Обчислимо необхідні суми:

$$\sum_{i=1}^{10} x_i = 8 + 11 + 12 + 9 + 8 + 8 + 9 + 9 + 8 + 12 = 94;$$

$$\sum_{i=1}^{10} x_i^2 = 8^2 + 11^2 + 12^2 + 9^2 + 8^2 + 8^2 + 9^2 + 9^2 + 8^2 + 12^2 = 908;$$

$$\sum_{i=1}^{10} y_i = 5 + 10 + 10 + 7 + 5 + 6 + 6 + 5 + 6 + 8 = 68;$$

$$\sum_{i=1}^{10} x_i y_i = 8 \cdot 5 + 11 \cdot 10 + 12 \cdot 10 + 9 \cdot 7 + 8 \cdot 5 + 8 \cdot 6 + 9 \cdot 6 + 9 \cdot 5 + 8 \cdot 6 + 12 \cdot 8 = 664;$$

Обчислимо вибіркові характеристики та параметри рівняння регресії:

$$\bar{x} = 94/10 = 9,4 \text{ м}; \quad \bar{y} = 68/10 = 6,8 \text{ т},$$

$$s_x^2 = 908/10 - 9,4^2 = 2,44,$$

$$K(X, Y) = 664/10 - 9,4 \cdot 6,8 = 2,48; \quad b_1 = 2,48/2,44 = 1,016.$$

Отримаємо рівняння регресії

$$\hat{y} - 6,8 = 1,016(x - 9,4) \quad \text{або} \quad \hat{y} = 2,75 + 1,016x.$$

З одержаного рівняння випливає, що при збільшенні потужності пласта на 1 м видобуток вугілля на одного робітника збільшується в середньому на 1,016 т. Відзначимо, що вільний член в даному рівнянні регресії не має реального смислу.

### Задачі для самостійного розв'язання

**Задача 10.1.** Є наступні дані про рівень механізації робіт  $X(\%)$  та продуктивності праці  $Y$  (т/год) для 14 однотипних підприємств (табл. 10.2).

Таблиця 10.2 – Вихідні дані

$x_i$	32	30	36	40	41	47	56	54	60	55	61	67	69	76
$y_i$	20	24	28	30	31	33	34	37	38	40	41	43	45	48

Необхідно:

- оцінити тісноту і напрям зв'язку між змінними за допомогою коефіцієнта кореляції;
- знайти рівняння регресії  $K$  за  $x$ .

**Задача 10.2.** За результатом досліджень кореляційної залежності між ціною на нафту  $X$  та індексом нафтових компаній  $Y$  одержані наступні дані:  
 $x = 16,2$  (грош.од),  $y = 4000$  (умовн. од),  $s_x^2 = 4$ ,  $s_y^2 = 500$ ,  $\text{Cov}(X, Y) = 40$ .

Необхідно:

- скласти рівняння регресії  $Y$  за  $X$ ;
- використовуючи рівняння регресії, знайти середнє значення індексу при ціні на нафту 16,5 грош. од.

**Задача 10.3.** За даними задачі 10.1:

- а) знайти рівняння регресії  $Y$  за  $X$ ;
- б) знайти коефіцієнт детермінації  $R^2$  і пояснити його смисл;
- в) перевірити значущість рівняння регресії на 5%-му рівні за  $F$ -критерієм;
- г) оцінити середню продуктивність праці на підприємствах з рівнем механізації робіт 60% та по будувати для неї 95%-ий довірчий інтервал; аналогічний довірчий інтервал знайти для індивідуальних значень продуктивності праці на тих самих підприємствах.

**Задача 10.4.** За даними 30 нафтових компаній одержане наступне рівняння регресії між оцінкою  $Y$  (грош. од.) та фактичною вартістю  $X$  (грош. од.) цих компаній:  $y_x = 0,8750x + 295$ . Знайти: 95%-ві довірчі інтервали для середнього та індивідуального значень оцінки підприємств, фактична вартість яких склала 1300 грош. од., якщо коефіцієнт кореляції між змінними дорівнює 0,76, а середнє квадратичне відхилення змінної  $X$  дорівнює 270 грош. од.

## **Тема 11** МУЛЬТИКОЛІНЕАРНІСТЬ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ (16 годин)

Поняття мультиколінеарності. Вплив мультиколінеарності на оцінки параметрів.

Методи виключення мультиколінеарності.

Література: [1], с. 169-175; [10], с. 108-114.

Контрольні запитання

1. Поясніть поняття мультиколінеарності та у яких формах вона може проявлятися?
2. Які критерії використовують для визначення наявності або відсутності мультиколінеарності?
3. Охарактеризуйте методи, використовувані для усунення або зменшення мультиколінеарності.
4. Поясніть, у чому полягають наслідки включення до моделі мультиколінеарних факторів.
5. Як для оцінки мультиколінеарності факторів використовують визначник матриці парних коефіцієнтів кореляції між факторами?
6. Поясніть алгоритм покрокових процедур відбору найбільш інформативних змінних.

**Приклад 11.1.** Для дослідження залежності між продуктивністю праці ( $X_1$ ), віком ( $X_2$ ) і виробничим стажем ( $X_3$ ) була проведена вибірка з 100 робітників тієї самої спеціальності. Обчислені парні коефіцієнти кореляції виявилися значущими і склали:  $r_{12}=0,20$ ;  $r_{13}=0,41$ ;  $r_{23}=0,82$ . Обчислити часткові коефіцієнти кореляції та оцінити їх значущість на рівні  $\alpha=0,05$ .

### Розв'язання

Часткові коефіцієнти кореляції обчислюють формулою

$$r_{ijk} = \frac{r_{ij} - r_{ik}r_{jk}}{\sqrt{(1-r_{ik}^2)(1-r_{jk}^2)}}, \quad r_{123} = \frac{0,2^2 - 0,41 \cdot 0,82}{\sqrt{(1-0,41)^2(1-0,82)^2}} = -0,26.$$

аналогічно отримаємо  $r_{132}=0,44$ ;  $r_{231}=0,83$ .

Оцінимо значущість  $r_{123}$ . Значення статистики  $t$ -критерію за формулою при  $n'=n-p+2=100-3+2=99$  (за абсолютною величиною)

$$|t_1| = \frac{|-0,26|\sqrt{99-2}}{\sqrt{1-(-0,26)^2}} = 2,65$$

перевищує табличне  $t_{0,95;97}=1,99$ , отже, частковий коефіцієнт кореляції  $r_{123}$  є значущим. Аналогічно встановлюється значущість інших часткових коефіцієнтів кореляції.

Порівнюючи часткові коефіцієнти кореляції  $r_{ijk}$  з відповідними парними коефіцієнтами, бачимо, що за рахунок «очищення зв'язку» найбільшій зміні піддався коефіцієнт кореляції між продуктивністю праці ( $X_1$ ) і віком ( $X_2$ ) робітників (змінлося не тільки його значення, але і знак  $r_{12}=0,20$ ;  $r_{123}=-0,26$ , причому обидва ці коефіцієнти є значущими).

Отже, між продуктивністю праці ( $X_1$ ) і віком ( $X_2$ ) робітників існує прямий кореляційний зв'язок ( $r_{12}=0,20$ ). Якщо ж усунути (еліминувати) вплив змінної «виробничий стаж» ( $X_3$ ), то в чистому вигляді продуктивність праці ( $X_1$ ) знаходиться у зворотному за напрямом (і слабкому за тісністю) зв'язку з віком робітників ( $X_2$ ) ( $r_{123}=-0,26$ ). Це цілком зрозуміло, якщо розглядати вік тільки як показник працездатності організму на певному етапі його життєдіяльності. Так само можуть бути інтерпретовані й інші часткові коефіцієнти кореляції.

#### Задачі для самостійного розв'язання

**Задача 11.1.** Є наступні дані про споживання певного продукту  $Y$  (умовн. од.) залежно від рівня урбанізації (частки міського населення)  $X_1$ , відносного освітнього рівня  $X_2$  і відносного заробітку  $X_3$  для дев'яти географічних районів (табл. 11.1).

Таблиця 11.1 – Вихідні дані

$i$ (номер району)	$x_{i1}$	$x_{i2}$	$x_{i3}$	$y_i$
1	42,2	11,2	31,9	167,1
2	48,6	10,6	13,2	174,4
3	42,6	10,6	28,7	160,8
4	39,0	10,4	26,1	162,0
5	34,7	9,3	30,1	140,8
6	44,5	10,8	8,5	174,6

## Продовження таблиці 11.1

<i>i</i> (номер району)	$x_{i1}$	$x_{i2}$	$x_{i3}$	$y_i$
7	39,1	10,7	24,3	163,7
8	40,1	10,0	18,6	174,5
9	45,9	12,0	20,4	185,7
Середні	41,85	10,62	24,42	167,07

Стандартні відхилення  $s_{x_1} = 4,176$ ;  $s_{x_2} = 0,7463$ ;  $s_{x_3} = 7,928$ ;  $s_y = 12,645$ .  
Кореляційна матриця має вигляд, наведений у таблиці 11.2.

Таблиця 11.2 – Кореляційна матриця

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y$
$X_1$	1	0,684	-0,616	0,802
$X_2$	0,684 -	1	-0,173	0,770
$X_3$	0,616	-0,173	1	-0,629
$Y$	0,802	0,770	-0,629	1

Використовуючи покрокову процедуру відбору найбільш інформативних пояснюючих змінних, визначити відповідну регресійну модель, виключивши при цьому мультиколінеарність. Оцінити значущість коефіцієнтів регресії одержаної моделі за  $t$ -критерієм.

**Задача 11.2.** Є наступні дані про вагу  $Y$  (у фунтах) та вік  $X$  (у тижнях) 13 індишок, вирощених в областях А, В, С (табл. 11.3).

Таблиця 11.3 – Вихідні дані

<i>i</i>	$x_i$	$y_i$	Область походження
1	28	12,3	А
2	20	8,9	А
3	32	15,1	А
4	22	10,4	А
5	29	13,1	В
6	27	12,4	В
7	28	13,2	В
8	26	11,8	В
9	21	11,5	С
10	27	14,2	С
11	29	15,4	С
12	23	13,1	С
13	25	13,8	С

Є підстава вважати, що на вагу індичок робить вплив не тільки їх вік, але й область походження. Необхідно:

- а) знайти рівняння парної регресії  $Y$  за  $X$  та оцінити його значущість;
- б) ввівши відповідні фіктивні змінні, знайти загальне рівняння множинної регресії за всіма пояснюючими змінними (включаючи фіктивні);
- в) оцінити значущість загального рівняння множинної регресії за  $F$ -критерієм та значущість його коефіцієнтів за  $t$ -критерієм на рівні  $\alpha=0,05$ ;
- г) простежити за зміною корегованого коефіцієнта детермінації при переході від парної до множинної регресії;
- д) оцінити на рівні  $\alpha=0,05$  значущість відмінності між вільними членами рівнянь, що одержуються із загального рівняння множинної регресії  $Y$  для кожної області.

**Задача 11.3.** Під час побудови лінійної залежності витрат на одяг від доходу за вибіркою для 10 жінок одержані наступні суми квадратів та добутків спостережень:

$$\sum_1^{10} x_i = 110, \quad \sum_1^{10} x_i^2 = 1540, \quad \sum_1^{10} y_i = 60, \quad \sum_1^{10} x_i y_i = 828, \quad \sum_1^{10} y_i^2 = 448.$$

Аналогічні обчислення сум за вибіркою з 5 чоловіків дали:

$$\sum_1^5 x_i = 35, \quad \sum_1^5 x_i^2 = 325, \quad \sum_1^5 y_i = 15, \quad \sum_1^5 x_i y_i = 140, \quad \sum_1^5 y_i^2 = 61.$$

За загальною (об'єднаною) вибіркою оцінено регресію з використанням фіктивної змінної  $Z$  ( $Z=1$  для чоловіка і  $Z=0$  для жінки), яка має вигляд:

$$\hat{y} = -0,06 + 0,438x + 0,46z + 0,072(zx).$$

На рівні значущості  $\alpha=0,05$  перевірити гіпотезу, що функція споживання одна і та сама для чоловіків та жінок, якщо виконані всі передумови класичної нормальної лінійної регресії.

**Задача 11.4.** З метою дослідження впливу чинників  $X_1$  – середньомісячної кількості профілактичних налаштувань автоматичної лінії та  $X_2$  – середньомісячної кількості обривів нитки на чинник  $Y$  – середньомісячну характеристику якості тканини (у балах) за даними 37 підприємств легкої промисловості були обчислені парні коефіцієнти кореляції:  $r_{y1}=0,105$ ,  $r_{y2}=0,024$  та  $r_{12}=0,996$ . Визначити часткові коефіцієнти кореляції  $r_{y12}$  та  $r_{y21}$  і оцінити їх значущість на 5%-му рівні.

## Тема 12 УЗАГАЛЬНЕНИЙ МЕТОД НАЙМЕНШИХ КВАДРАТІВ (10 годин)

Поняття гомоскедастичності і гетероскедастичності.

Узагальнений метод найменших квадратів (УМНК).

Література: [1], с. 175-184; [10], с. 150-166.

Контрольні запитання

1. Якими властивостями повинні володіти оцінки параметрів регресії?
2. Як впливає на параметри множинної лінійної моделі порушення умови, що математичне сподівання збурювання є дорівнює нулю?

3. Як впливає на параметри множинної лінійної моделі порушення умови, що дисперсія збурювання є постійною?
4. Який спосіб використовують для вивчення гомо- і гетероскедастичності?
5. На підставі якого дослідження роблять висновок про автокорельованість залишків?
6. Як поведуться при недотриманні основних передумов МНК?
7. Чим відрізняється узагальнений МНК від звичайного? У яких випадках його використовують?
8. Які властивості притаманні оцінкам параметрів моделі, отриманим на основі узагальненого МНК?

### **Тема 13 ЕКОНОМЕТРИЧНІ МОДЕЛІ ДИНАМІКИ (16 годин)**

Загальні відомості про часові ряди і завдання їх аналізу.

Моделювання тенденції часового ряду.

Аналіз адитивної і мультиплікативної моделей часового ряду.

Спектральний аналіз часового ряду.

Прогнозування часового ряду.

Зв'язний аналіз часових рядів.

Література: [1], с. 184-199; [10], с. 133-149, 191-222.

Контрольні запитання

1. Наведіть визначення часового ряду.
2. Чим відрізняються часові ряди від звичайних просторових вибірок?
3. Які фактори впливають на рівні часового ряду?
4. Які компоненти містить реальний часовий ряд?
5. Поясніть адитивну і мультиплікативну моделі часового ряду.
6. Поясніть, що таке тренд часового ряду і які види тренду зустрічаються?
7. Як визначають значущість тренду?
8. Перелічіть основні етапи аналізу часових рядів.
9. Перелічіть найпоширеніші методи аналізу часових рядів.
10. Поясніть, що таке автокореляція рівнів часового ряду. Як її можна виміряти?
11. Перелічіть властивості коефіцієнта автокореляції.
12. Що таке автокореляційна функція часового ряду і корелограма?
13. З якою метою виконують аналітичне вирівнювання часового ряду?
14. Які функції найчастіше застосовують для побудови трендів?
15. Який метод дозволяє визначити параметри тренду?
16. Які методи використовують для згладжування часового ряду?
17. В чому полягає метод ковзних середніх?
18. Поясніть, як провадиться усунення сезонних коливань за методом ковзної середньої?
19. З якою метою провадиться спектральний аналіз часового ряду?
20. Поясніть, у чому полягає зв'язний аналіз часових рядів?



**Приклад 13.1.** Часовий ряд попиту  $y_t$  наведено у таблиці 13.1. За даними таблиці визначить середнє значення, середнє квадратичне відхилення, коефіцієнти автокореляції (для лагів  $\tau=1;2$ ) і частковий коефіцієнт автокореляції 1-го порядку.

Таблиця 13.1 – Часовий ряд попиту

Рік, $t$	1	2	3	4	5	6	7	8
Попит, $y_t$	213	171	291	309	317	362	351	361

### Розв'язання

Знаходимо середнє значення часового ряду за формулою:

$$\bar{y}_t = \frac{\sum_{t=1}^n y_t}{n} = \frac{213 + 171 + 291 + 309 + 317 + 362 + 351 + 361}{8} = 296,88 \text{ (од.)}.$$

Дисперсію і середнє квадратичне відхилення обчислимо за співвідношенням

$$s_t^2 = \bar{y}_t^2 - \bar{y}_t^2 = 92478,38 - 296,88^2 = 4343,61,$$

$$s_t = \sqrt{4343,61} = 65,31 \text{ (од.)},$$

$$\text{де } \overline{y_t^2} = \frac{\sum_{t=1}^n y_t^2}{n} = \frac{213^2 + 171^2 + 291^2 + 309^2 + 317^2 + 362^2 + 351^2 + 361^2}{8} = 92478,38.$$

Знайдемо коефіцієнт автокореляції  $r(\tau)$  часового ряду (для лага  $\tau=1$ ), тобто коефіцієнт кореляції між послідовностями семи пар спостережень  $y_t$  та  $y_{t+1}$  ( $t=1,2,\dots,7$ ). Спостереження наведені у таблиці 13.2.

Таблиця 13.2 – Результати спостережень  $y_t$  часового ряду

$y_t$	213	171	291	309	317	362	351
$y_{t+1}$	171	291	309	317	362	351	361

Обчислюємо необхідні суми:

$$\sum_{t=1}^7 y_t = 213 + 171 + 291 + 309 + 317 + 362 + 351 = 2014,$$

$$\sum_{t=1}^7 y_t^2 = 213^2 + 171^2 + 291^2 + 309^2 + 317^2 + 362^2 + 351^2 = 609506,$$

$$\sum_{t=1}^7 y_{t+\tau} = 171 + 291 + 309 + 317 + 362 + 351 + 361 = 2162,$$

$$\sum_{t=1}^7 y_{t+\tau}^2 = 171^2 + 291^2 + 309^2 + 317^2 + 362^2 + 351^2 + 361^2 = 694458,$$

$$\sum_{t=1}^7 y_t y_{t+\tau} = 213 \cdot 171 + 171 \cdot 291 + 291 \cdot 309 + 309 \cdot 317 + 317 \cdot 362 +$$

$$+ 362 \cdot 351 + 351 \cdot 361 = 642583.$$

Тепер обчислимо коефіцієнт автокореляції

$$r(1) = \frac{7 \cdot 642583 - 2014 \cdot 2162}{\sqrt{7 \cdot 609506 - 2014^2} \sqrt{7 \cdot 694458 - 2162^2}} = 0,725.$$

Коефіцієнт автокореляції  $r(2)$  для лага  $\tau = 2$  між членами ряду  $y_t$  і  $y_{t+2}$  ( $t=1,2,\dots,6$ ) за шістьма парами спостережень обчислюємо аналогічно:  $r(2) = 0,842$ .

Для визначення часткового коефіцієнта кореляції 1-го порядку  $r_{\text{част}}(2) = r_{021}$  між членами ряду  $y_t$  і  $y_{t+2}$  при виключенні впливу  $y_{t+1}$  спочатку знайдемо (за аналогією з попереднім) коефіцієнт автокореляції  $r(1,2)$  між членами ряду  $y_{t+1}$  і  $y_{t+2}$ :  $r(1,2)=0,825$ , а потім обчислимо  $r_{\text{част}}(2)$ :

$$r_{\text{част}}(2) = r_{021} = \frac{0,842 - 0,725 \cdot 0,825}{\sqrt{1 - 0,725^2} \sqrt{1 - 0,825^2}} = 0,627.$$

Знання автокореляційних функцій  $r(\tau)$  і  $r_{\text{част}}(\tau)$  може надати істотну допомогу при підборі та ідентифікації моделі аналізованого часового ряду і статистичній оцінці його параметрів.

**Приклад 13.2.** За даними прикладу 13.1 знайти рівняння невинуваткової складової (тренду) для часового ряду  $y_t$ , вважаючи тренд лінійним.

### Розв'язання

Відповідно до методу найменших квадратів параметри лінійної залежності визначають з системи нормальних рівнянь. З урахуванням, що значення  $t$  утворюють натуральний ряд чисел від 1 до  $n$ , суми  $\sum_{t=1}^n t$  та  $\sum_{t=1}^n t^2$  можна виразити як кількість членів ряду  $n$  за відомими формулами:

$$\sum_{t=1}^n t = \frac{n(n+1)}{2} = \frac{8 \cdot 9}{2} = 36, \quad \sum_{t=1}^n t^2 = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6} = \frac{8 \cdot 9 \cdot 17}{6} = 204.$$

Далі

$$\sum_{t=1}^8 y_t = 213 + 171 + 291 + 309 + 317 + 362 + 351 + 361 = 2375,$$

$$\sum_{t=1}^8 y_t^2 = 213^2 + 171^2 + 291^2 + 309^2 + 317^2 + 362^2 + 351^2 + 361^2 = 739827,$$

$$\sum_{t=1}^8 y_t t = 213 \cdot 1 + 171 \cdot 2 + 291 \cdot 3 + 309 \cdot 4 + 317 \cdot 5 + \\ + 362 \cdot 6 + 351 \cdot 7 + 361 \cdot 8 = 11766.$$

Система нормальних рівнянь має вигляд:

$$\begin{cases} 8b_0 + 36b_1 = 2375, \\ 36b_0 + 204b_1 = 11766. \end{cases}$$

Отримаємо  $b_0=181,32$  та  $b_1=25,679$ . Отже рівняння тренду має вигляд:

$$\hat{y}_t = 181,32 + 25,679t,$$

тобто попит щорічно збільшується у середньому на 25,7 одиниць.

Перевіримо значущість отриманого рівняння тренду за  $F$ -критерієм на 5%-му рівні значущості. Обчислимо дисперсії.

Дисперсія зумовлена регресією

$$Q_R = \sum_{t=1}^n (\hat{y}_t - \bar{y}_t)^2 = \sum b_1^2 (t - \bar{t})^2 = b_1^2 \left( \sum_{t=1}^n t^2 - \frac{\left( \sum_{t=1}^n t \right)^2}{n} \right) =$$

$$= 25,679^2 \left( 204 - \frac{36^2}{8} \right) = 27695,3.$$

Дисперсія загальна

$$Q = \sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y}_t)^2 = \sum y_t^2 - \frac{\left( \sum_{t=1}^n y_t \right)^2}{n} = 739827 - \frac{2375^2}{8} = 34748,9.$$

Дисперсія залишкова

$$Q_{\text{зал}} = Q - Q_R = 34748,9 - 27695,3 = 7053,6.$$

Обчислимо значення статистики

$$F = \frac{Q_R (n-2)}{Q_{\text{зал}}} = \frac{27695,3 \cdot 6}{7053,6} = 23,56.$$

Оскільки  $F > F_{0,05;1;6}$ , рівняння тренду є значущим.

*Задачі для самостійного розв'язання*

**Задача 13.1.** Дані про врожайність озимої пшениці у (ц/га) за 10 років наведено у таблиці 13.2

Таблиця 13.2 – Врожайність озимої пшениці у (ц/га)

$t$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$y_t$	16,3	20,2	17,1	7,7	15,3	16,3	19,9	14,4	18,7	20,7

Знайти середнє значення, середнє квадратичне відхилення та коефіцієнти автокореляції для лагів  $\tau = 1; 2$  часового ряду.

**Задача 13.2.** За даними таблиці 13.2 знайти рівняння тренду часового ряду  $y_t$ , вважаючи що він лінійний. Перевірте значущість тренду часового ряду на рівні 0,05.

**Задача 13.3.** У таблиці 13.3 представлені дані, що відображають динаміку зростання доходів на душу населення  $y_t$  (грош. од.) за восьмирічний період.

Таблиця 13.3 – Доходи на душу населення  $y_t$  (грош. од.)

$t$	1	2	3	4	5	6	7	8
$y_t$	1133	1222	1354	1389	1342	1377	1491	1684

Вважаючи, що тренд лінійний і умови класичної моделі виконані, знайти рівняння тренду, оцінити його значущість на рівні 0,05 та дати точковий і з надійністю 0,95 інтервальний прогнози середнього та індивідуального значень доходів на дев'ятий рік.

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Ачкасов А. Є. Конспект лекцій з курсу «Економіко-математичне моделювання» (для студентів 3 курсу заочної форми навчання бакалаврів за галуззю знань 0305 – Економіка і підприємництво, напрями підготовки 6.030504— Економіка підприємства, 6.030509 – Облік і аудит) / А. Є. Ачкасов, О. О. Воронков; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Х.: ХНАМГ, 2011.– 204 с.
2. Вітлінський В. В. Математичне програмування: [навч. посіб для студ. вищих навч. закл. економ. спец.] / В. В. Вітлінський, С. І. Наконечний, Т. О. Терещенко. – К.: КНЕУ, 2001. – 380 с.
3. Кузнецов Ю. Н. Математическое программирование: учебник / Ю. Н. Кузнецов, В. А. Кузубов, А. В. Волощенко. – М.: Высш.школа, 1980. – 240 с.
4. Таха Х. А. Введение в исследование операций / Х. А. Таха – М.: Изд.дом «Вильямс», 2005. – 912 с. Таха Х. А. Введение в исследование операций / Х. А. Таха – М.: Изд.дом «Вильямс», 2005. – 912 с.
5. Исследование операций в экономике : Уч. пособие для вузов / Н. Ш. Кремер, Б. А. Путко, И. М. Тришин, М. Н. Фридман./ Под ред. проф. Н. Ш. Кремера. – М.: ЮНИТИ, 2003. – 407 с.
6. Наконечный С. И. Эконометрия : учебник / С. И. Наконечный, Т. П. Терещенко. – К.: КНЕУ, 2001.
7. Кремер Н. Ш. Эконометрика : Учебник для вузов / [Н. Ш. Кремер, Б. А. Путко; под ред. проф. Н. Ш. Кремера]. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2002. –311 с.
8. Елисеева И. И. Эконометрика : учебник / И. И. Елисеева, С. В. Курышева, Т. В. Костеева. – М.: Финансы и статистика, 2007. – 576 с.
9. Практикум по эконометрике : Учебн. пособие / [И. И. Елисеева, С. В. Курышева, Н. М. Гордиенко и др.; Под ред. И. И. Елисеевой]. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 192 с.

## ЗМІСТ

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ.....	3
МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ .....	4
Практичне заняття 1. Побудова моделей оптимізаційних лінійних задач .....	4
Задача 1.1 .....	4
Задача 1.2 .....	6
Практичне заняття 2. Геометрична інтерпретація задачі лінійного програмування.....	9
Задача 2.1 .....	9
Задача 2.2 .....	11
Практичне заняття 3 Побудова загальної лінійної моделі.....	19
Задача 3.1 .....	19
Задача 3.2 .....	23
Задача 3.3 .....	24
МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ .....	27
Змістовий модуль 1 Оптимізаційні економіко-математичні моделі ...	27
Тема 1 Концептуальні аспекти математичного моделювання економіки (3 години) .....	27
Тема 2 Поняття оптимізаційних задач і оптимізаційних моделей. Класифікація методів (3 години) .....	28
Тема 3 Лінійне програмування (8 годин) .....	28
Тема 4 Теорія двоїстості і двоїсті оцінки в аналізі розв'язків лінійних оптимізаційних моделей (9 годин).....	33
Тема 5 Аналіз лінійних моделей економічних задач (11 годин)..	35
Тема 6 Транспортна задача (12 годин) .....	42
Тема 7 Цілочислові задачі лінійного програмування. основні методи їх розв'язання і аналізу (6 годин).....	48
Тема 8 Задачі нелінійного програмування. основні методи їх розв'язання і аналізу (10 годин).....	53
Змістовий модуль 2 Економетричні моделі .....	56
Тема 9 Принципи побудови економетричних моделей (6 годин)	56
Тема 10 Методи побудови загальної лінійної моделі (18 годин)	57
Тема 11 Мультиколінеарність та її вплив на оцінки параметрів моделі (16 годин).....	59
Тема 12 Узагальнений метод найменших квадратів (10 годин) ..	62
Тема 13 Економетричні моделі динаміки (16 годин).....	63
СПИСОК ДЖЕРЕЛ .....	67

*Навчальне видання*

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

для практичних занять та самостійної роботи  
з навчальної дисципліни

# ***ЕКОНОМІКО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ***

*(для студентів заочної форми навчання  
освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр»  
напрямку підготовки 6.030601 – Менеджмент)*

Укладачі: **ВОРОНКОВ** Олексій Олександрович  
**МЕДВЕДЄВ** Ігор Анатолійович

Відповідальний за випуск *А. Є. Ачкасов*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2015, поз. 486М

---

Підп. до друку 03.11.2015  
Друк на різнографі  
Зам. №

Формат 60x84/16  
Ум. друк. арк. 4,1  
Тираж 50 пр.

Виконавець і виготовлювач:  
Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Революції, 12, Харків, 61002  
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК 4705 від 28.03.2014 р.