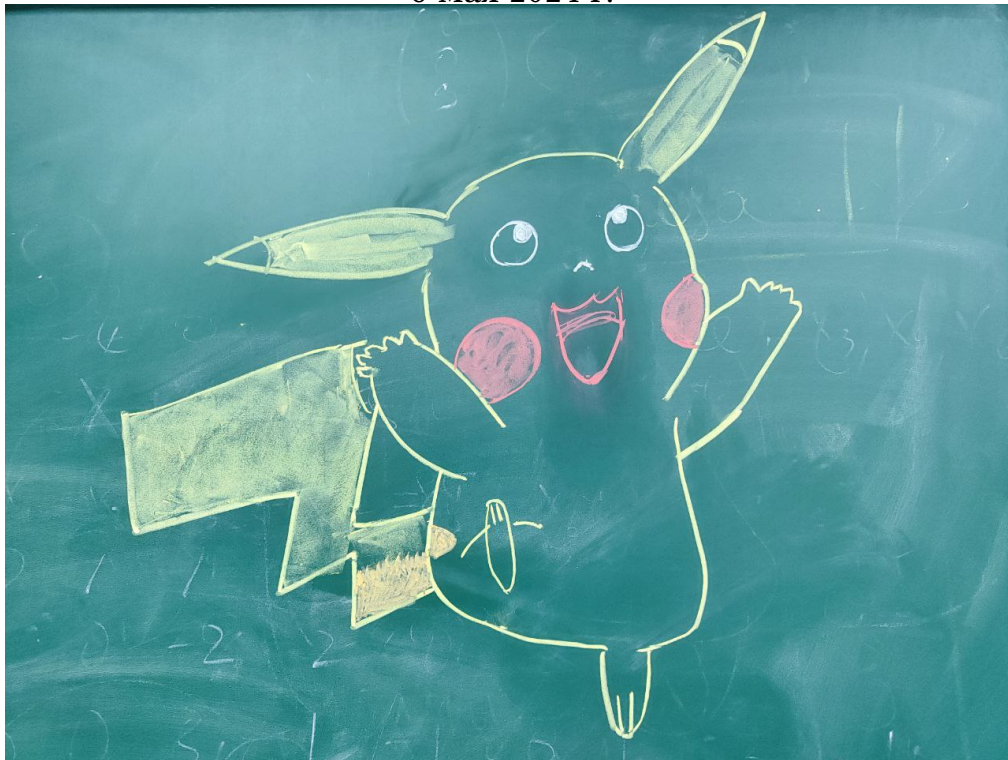


Заметки к семинарам по методам оптимальных решений

<https://github.com/bdemeshev/optimal-solution-pro>

зеркало: <https://gitlab.com/bdemeshev/optimal-solution-pro>

6 мая 2024 г.



皮卡丘

Содержание

1	Картинки на плоскости	3
2	Оптимизация на плоскости	4
3	Симплекс-метод	4
4	Двойственность	10
5	Транспортная задача	12
6	Решения	14
	Хэштеги	20
	Источники мудрости	20

При везении подсказку, ответ или решение можно найти, кликнув по номеру задачи.
Подробная книжка Фергюсона, [Fer]. Слайды к оксфордскому курсу, [Law].
Обсуждение интуиции за двойственными задачами, [htt].

1. Картинки на плоскости

Линейная оболочка (linear span):

$$\text{Span}(v_1, v_2, v_3) = \{x_1v_1 + x_2v_2 + x_3v_3 \mid x_1 \in \mathbb{R}, x_2 \in \mathbb{R}, x_3 \in \mathbb{R}\}$$

Конус (cone):

$$\text{Cone}(v_1, v_2, v_3) = \{x_1v_1 + x_2v_2 + x_3v_3 \mid x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, x_3 \geq 0\}$$

Выпуклая линейная оболочка (convex linear hull):

$$\text{Hull}(v_1, v_2, v_3) = \text{Convex}(v_1, v_2, v_3) = \left\{x_1v_1 + x_2v_2 + x_3v_3 \mid x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, x_3 \geq 0, \sum x_i = 1\right\}$$

1.1 Рассмотрим точки на плоскости, $A = (0, 0)$, $B = (5, 3)$ и $C = (5, -3)$.

- а) Нарисуйте точки $0.5B + 0.5C$, $0.9A + 0.1B$, $3B - 2C$.
- б) Нарисуйте точки $\frac{1}{3}A + \frac{1}{3}B + \frac{1}{3}C$, $0.1A + 0.45B + 0.45C$, $0.9A + 0.05B + 0.05C$.

1.2 Рассмотрим точки на плоскости, $A = (1, 2)$, $B = (3, 4)$ и $C = (5, 1)$.

- а) Нарисуйте $\text{Convex}(A, B)$, $\text{Convex}(A, B, C)$.
- б) Нарисуйте $\text{Cone}(A)$, $\text{Cone}(A, B)$, $\text{Cone}(A, B, C)$.
- в) Нарисуйте $\text{Span}(A)$, $\text{Span}(A, B)$.
- г) Нарисуйте $A + \text{Span}(B)$, $\text{Cone}(A) + \text{Cone}(B)$.
- д) Нарисуйте $\text{Convex}(A, B) + \text{Cone}(C)$, $\text{Convex}(A) + \text{Cone}(B, C)$, $\text{Convex}(A, C) + \text{Cone}(B, C)$.

1.3 Рассмотрим точки на плоскости $A = (1, 2)$, $B = (5, 2)$, $C = (1, 4)$, $D = (5, 4)$.

- а) Запишите $E = (1, 3)$ как выпуклую линейную комбинацию точек A , B , C и D .
- б) Запишите $F = (3, 3)$ как выпуклую линейную комбинацию точек A , B , C и D всеми возможными способами.
- в) Можно ли записать $G = (6, 3)$ как выпуклую линейную комбинацию точек A , B , C и D ?
- г) Сколькими способами можно записать $H = (4, 3)$ как выпуклую линейную комбинацию A , B , C и D ?
- д) Сколькими способами можно записать $I = (4, 3)$ как выпуклую линейную комбинацию A , B и D ?
- е) Сколькими способами можно записать $J = (4, 2)$ как выпуклую линейную комбинацию A , B , C и D ?
- ж) Сколькими способами можно записать $K = (4, 2)$ как выпуклую линейную комбинацию A , C и D ?

1.4 а) Нарисуйте семейство прямых $ax_1 + 5x_2 = 10$ на плоскости (x_1, x_2) .
б) Нарисуйте семейство прямых $2x_1 + x_2 = d$ на плоскости (x_1, x_2) .

2. Оптимизация на плоскости

- допустимое множество, feasible set, 可行集, kěxíng jí;
- допустимая область, feasible region, 可行域, kěxíng yù;
- линейное программирование, linear programming, 线性规划, xiànxíng guīhuà;
- целевая функция, objective function, 目标函数, mùbiāo hánshù;

2.1

2.1. Оптимизация на плоскости с параметром

2.2 Решите задачу линейного программирования при всех значениях c :

$$\begin{cases} cx_1 + x_2 \rightarrow \max \\ 2x_1 + 3x_2 \leq 6 \\ x_1 \geq 0 \\ x_2 \geq 0 \end{cases}$$

2.3 Решите задачу линейного программирования при всех значениях a :

$$\begin{cases} x_1 + 3x_2 \rightarrow \max \\ 2x_1 + ax_2 \leq 6 \\ x_1 \geq 0 \\ x_2 \geq 0 \end{cases}$$

3. Симплекс-метод

Решение x системы $Ax = b$ называется *допустимым*, если все $x_i \geq 0$.

Решение x системы $Ax = b$ называется *базисным*, если столбцы $\text{col}_i A$ при $x_i \neq 0$ линейно независимы.

Терминология

3.1 Рассмотрим систему уравнений

$$\begin{cases} 2x_1 + 3x_2 + x_3 = 8 \\ x_1 - x_2 + x_4 = 9 \end{cases}$$

Есть несколько векторов, $x_a = (0, 0, 0, 0)$, $x_b = (0, 0, 8, 9)$, $x_c = (1, 0, 6, 8)$, $x_d = (1, -9, 33, -1)$, $x_e = (0, -9, 35, 0)$.

- Какие векторы являются решениями системы?
- Какие векторы являются базисными решениями системы?
- Какие векторы являются допустимыми решениями при условии, что все $x_i \geq 0$?

3.2 Рассмотрим систему уравнений

$$\begin{cases} x_1 + 3x_2 + x_3 = 10 \\ 2x_1 + x_2 + x_4 = 11 \end{cases}$$

Есть несколько векторов, $x_a = (1, 2, 3, 4)$, $x_b = (0, 0, 10, 11)$, $x_c = (1, 0, 9, 9)$, $x_d = (6, -1, 7, 0)$, $x_e = (0, 11, -23, 0)$.

- а) Какие векторы являются решениями системы?
- б) Какие векторы являются базисными решениями системы?
- в) Какие векторы являются допустимыми решениями при условии, что все $x_i \geq 0$?

3.3 Рассмотрим систему ограничений в канонической форме:

$$\begin{cases} 2x_1 + 5x_2 + x_3 = 8 \\ x_1 - 6x_2 + x_4 = 15 \\ -x_1 + 2x_2 + x_5 = 11 \\ x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, x_3 \geq 0, x_4 \geq 0, x_5 \geq 0. \end{cases}$$

- а) Найдите хотя бы одно базисное допустимое решение системы.
- б) Найдите все базисные допустимые решения системы.

3.4 Рассмотрим систему ограничений в канонической форме:

$$\begin{cases} 2x_1 + 5x_2 - x_3 = 8 \\ x_1 - 6x_2 + x_4 = 15 \\ -x_1 + 2x_2 + x_5 = 11 \\ x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, x_3 \geq 0, x_4 \geq 0, x_5 \geq 0. \end{cases}$$

- а) Найдите хотя бы одно базисное допустимое решение системы.
- б) Найдите все базисные допустимые решения системы.

Приятная стартовая точка

3.5 Рассмотрим задачу линейного программирования:

$$\begin{cases} x_1 + x_2 \rightarrow \max \\ x_1 + 3x_2 \leq 9 \\ 2x_1 + x_2 \leq 8 \\ x_1 \geq 0, x_2 \geq 0. \end{cases}$$

- а) Приведите задачу к канонической форме.
- б) Выпишите стартовую симплекс-таблицу.
- в) Укажите допустимое базисное решение для стартовой симплекс-таблицы.
- г) Найдите хотя бы одно решение задачи симплекс-методом.

3.6 Рассмотрим задачу линейного программирования:

$$\begin{cases} x_1 + 2x_2 + 3x_3 \rightarrow \max \\ x_1 + x_2 + 2x_3 \leq 10 \\ 2x_1 + x_2 + x_3 \leq 5 \\ x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, x_3 \geq 0. \end{cases}$$

- а) Приведите задачу к канонической форме.
- б) Выпишите стартовую симплекс-таблицу.
- в) Укажите допустимое базисное решение для стартовой симплекс-таблицы.
- г) Найдите хотя бы одно решение задачи симплекс-методом.

3.7 Рассмотрим задачу линейного программирования:

$$\begin{cases} 2x_1 - 3x_2 \rightarrow \min \\ x_1 + x_2 \leq 10 \\ 2x_1 + x_2 \leq 5 \\ x_1 \geq 0, x_2 \geq 0. \end{cases}$$

- а) Приведите задачу к канонической форме.
- б) Выпишите стартовую симплекс-таблицу.
- в) Укажите допустимое базисное решение для стартовой симплекс-таблицы.
- г) Найдите хотя бы одно решение задачи симплекс-методом.

3.8 Рассмотрим задачу линейного программирования:

$$\begin{cases} x_1 + x_2 + x_3 \rightarrow \max \\ 2x_1 + x_2 + 3x_3 \leq 10 \\ x_1 - x_2 + x_3 \leq 6 \\ x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, x_3 \geq 0. \end{cases}$$

- а) Приведите задачу к канонической форме.
- б) Выпишите стартовую симплекс-таблицу.
- в) Укажите допустимое базисное решение для стартовой симплекс-таблицы.
- г) Найдите хотя бы одно решение задачи симплекс-методом.

3.9 Рассмотрим задачу линейного программирования:

$$\begin{cases} x_1 - 2x_2 + 3x_3 \rightarrow \min \\ 3x_1 + 2x_2 + x_3 \leq 10 \\ x_1 + x_2 - x_3 \leq 5 \\ x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, x_3 \geq 0. \end{cases}$$

- а) Приведите задачу к канонической форме.
- б) Выпишите стартовую симплекс-таблицу.
- в) Укажите допустимое базисное решение для стартовой симплекс-таблицы.

г) Найдите хотя бы одно решение задачи симплекс-методом.

3.10

	x_1	x_2	x_3	x_4	b
x_1	1	0	1	5	3
x_2	0	1	2	6	4
$\min z$	0	0	3	-3	$8 - z$

- а) Найдите хотя бы одно допустимое решение.
- б) Найдите все допустимые решения.
- в) Найдите все базисные допустимые решения.
- г) Запишите все допустимые решения в виде выпуклой линейной оболочки.
- д) Найдите оптимальное решение.

Особые случаи

Пустое допустимое множество

3.11 Рассмотрим задачу линейного программирования

$$\begin{cases} x_1 + x_2 \rightarrow \max \\ x_1 + x_2 \leq 1 \\ x_1 + x_2 \geq 2 \\ x_1 \geq 0, x_2 \geq 0. \end{cases}$$

- а) Решите задачу графически.
- б) Решите задачу симплекс-методом.

Неограниченная задача

3.12 Рассмотрим задачу линейного программирования

$$\begin{cases} x_1 + x_2 \rightarrow \max \\ x_1 + x_2 \geq 1 \\ x_1 \geq x_2 \\ x_1 \geq 0, x_2 \geq 0. \end{cases}$$

- а) Решите задачу графически.
- б) Решите задачу симплекс-методом.

Неединственное решение

3.13 Рассмотрим задачу линейного программирования

$$\begin{cases} x_1 + x_2 \rightarrow \max \\ x_1 + x_2 \leq 1 \\ x_1 \geq x_2 \\ x_1 \geq 0, x_2 \geq 0. \end{cases}$$

- а) Решите задачу графически.
- б) Приведите задачу к каноническому виду.
- в) Найдите хотя бы одно решение задачи симплекс-методом.
- г) Выпишите все решения задачи симплекс-методом.
- д) Выпишите все базисные допустимые решения задачи.
- е) Запишите ответ в виде выпуклой линейной оболочки.

3.14 Рассмотрим задачу линейного программирования

$$\begin{cases} x_1 - x_2 \rightarrow \min \\ x_1 + x_2 \geq 1 \\ x_1 \geq x_2 \\ x_1 \geq 0, x_2 \geq 0. \end{cases}$$

- а) Решите задачу графически.
- б) Приведите задачу к каноническому виду.
- в) Найдите хотя бы одно оптимальное решение задачи симплекс-методом.
- г) Выпишите все решения задачи симплекс-методом в параметрическом виде.
- д) Выпишите все базисные оптимальные решения задачи.
- е) Запишите оптимальные решения в виде суммы выпуклой линейной оболочки и конуса.

3.15 Рассмотрим симплекс-табличку

	x_1	x_2	x_3	x_4	b
x_1	1	0	-1	3	5
x_2	0	1	-2	7	6
$\min z$	0	0	0	-3	$12 - z$

- а) Найдите хотя бы одно оптимальное решение.
- б) Выпишите все решения в параметрическом виде.
- в) Выпишите все базисные оптимальные решения задачи.
- г) Выпишите все решения, используя выпуклую линейную оболочку и конус.

3.16 Рассмотрим симплекс-табличку

	x_1	x_2	x_3	x_4	b
x_1	1	0	-1	3	5
x_2	0	1	3	7	6
$\max z$	0	0	0	-3	$16 + z$

- а) Найдите хотя бы одно оптимальное решение.
- б) Выпишите все решения в параметрическом виде.
- в) Выпишите все базисные оптимальные решения задачи.
- г) Выпишите все решения, используя выпуклую линейную оболочку и конус.

3.17 Рассмотрим симплекс-табличку

	x_1	x_2	x_3	x_4	b
x_1	1	0	-1	-2	5
x_2	0	1	3	-1	6
$\min z$	0	0	0	0	$20 - z$

- Найдите хотя бы одно оптимальное решение.
- Выпишите все решения в параметрическом виде.
- Выпишите все базисные оптимальные решения задачи.
- Выпишите все решения, используя выпуклую линейную оболочку и конус.

3.18 Рассмотрим симплекс-табличку

	x_1	x_2	x_3	x_4	b
x_1	1	0	2	-3	2
x_2	0	1	1	0	6
$\min z$	0	0	0	-2	$5 - z$

- Найдите хотя бы одно допустимое решение.
- Найдите все допустимые решения.
- Найдите базисные допустимые решения.
- Найдите хотя бы одно оптимальное решение.
- Найдите все оптимальные решения.
- Найдите базисные оптимальные решения.

3.19 Рассмотрим задачу

$$\begin{cases} 2x_1 + 2x_2 + x_3 \rightarrow \max \\ x_1 + x_2 + x_3 \leq 10 \\ x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, x_3 \geq 0. \end{cases}$$

- Найдите хотя бы одно допустимое решение.
- Найдите все допустимые решения.
- Найдите базисные допустимые решения.
- Найдите хотя бы одно оптимальное решение.
- Найдите все оптимальные решения.
- Найдите базисные оптимальные решения.

Поиск стартовой точки**3.20** Рассмотрим задачу линейного программирования:

$$\begin{cases} 3x_1 + x_3 \rightarrow \max \\ x_1 + 2x_2 + x_3 = 30 \\ x_1 - 2x_2 + 2x_3 = 18 \\ x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, x_3 \geq 0. \end{cases}$$

- а) Приведите задачу к канонической форме.
- б) Выпишите стартовую симплекс-таблицу с искусственными переменными.
- в) Найдите хотя бы одно решение задачи симплекс-методом.

4. Двойственность

- двойственная задача, dual problem, 对偶问题, duì'ou wèntí;
- двойственность, duality, 对偶, duì'ou;
- условия дополняющей нежёсткости, complementary slackness condition, 互补松弛条件, hùbǔ sōngchí tiáojiàn;

Двойственные задачи в стандартной форме:

$$\begin{array}{lll}
 z = c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 \rightarrow \min & \leftrightarrow & u = b_1y_1 + b_2y_2 \rightarrow \max \\
 a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 \geq b_1 & \leftrightarrow & y_1 \geq 0 \\
 a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 \geq b_2 & \leftrightarrow & y_2 \geq 0 \\
 x_1 \geq 0 & \leftrightarrow & a_{11}y_1 + a_{21}y_2 \leq c_1 \\
 x_2 \geq 0 & \leftrightarrow & a_{12}y_1 + a_{22}y_2 \leq c_2 \\
 x_3 \geq 0 & \leftrightarrow & a_{13}y_1 + a_{23}y_2 \leq c_3
 \end{array}$$

Двойственность между равенствами и переменными с произвольными значениями:

$$\begin{array}{ll}
 a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 = b_1 & \leftrightarrow y_1 \in \mathbb{R} \\
 x_2 \in \mathbb{R} & \leftrightarrow a_{12}y_1 + a_{22}y_2 = c_2
 \end{array}$$

Двойственные задачи в стандартной форме с векторами:

$$\begin{array}{lll}
 z = c^T x \rightarrow \min & \leftrightarrow & u = b^T y \rightarrow \max \\
 Ax \geq b & \leftrightarrow & y \geq 0 \\
 x \geq 0 & \leftrightarrow & A^T y \leq c
 \end{array}$$

Двойственность в оптимальной точке:

$$\begin{array}{ll}
 y_j^* \neq 0 & \Rightarrow a_{j1}x_1^* + a_{j2}x_2^* + a_{j3}x_3^* = b_j \\
 a_{1i}y_1^* + a_{2i}y_2^* \neq c_i & \Rightarrow x_i^* = 0
 \end{array}$$

4.1 Рассмотрим задачу линейного программирования

$$\begin{cases} x_1 + 3x_2 + x_3 - x_4 \rightarrow \min \\ x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \geq 6 \\ x_1 - x_2 + 2x_3 - 2x_4 \geq 10 \\ x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, x_3 \geq 0, x_4 \geq 0 \end{cases}$$

- а) Выпишите двойственную задачу.
- б) Решите двойственную задачу.
- в) Найдите решение исходной задачи.

4.2 Рассмотрим задачу линейного программирования

$$\begin{cases} x_1 + 3x_2 + x_3 - x_4 \rightarrow \max \\ x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \leq 6 \\ x_1 - x_2 + 2x_3 - 2x_4 \leq 10 \\ x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, x_3 \geq 0, x_4 \geq 0 \end{cases}$$

- а) Выпишите двойственную задачу.
- б) Решите двойственную задачу.
- в) Найдите решение исходной задачи.

4.3 Рассмотрим задачу линейного программирования

$$\begin{cases} x_1 + 3x_2 + x_3 - x_4 \rightarrow \min \\ x_1 + x_2 + x_3 + 3x_4 = 6 \\ x_1 - x_2 + 2x_3 - 2x_4 = 10 \\ x_1 \geq 0, x_3 \geq 0, x_4 \geq 0 \end{cases}$$

- а) Выпишите двойственную задачу.
- б) Решите двойственную задачу.
- в) Найдите решение исходной задачи.

4.4 Рассмотрим задачу линейного программирования

$$\begin{cases} x_1 + 3x_2 + x_3 - x_4 \rightarrow \min \\ x_1 + x_2 + x_3 + 3x_4 \geq 6 \\ x_1 - x_2 + 2x_3 - 2x_4 = 10 \\ x_1 \geq 0, x_3 \geq 0, x_4 \geq 0 \end{cases}$$

- а) Выпишите двойственную задачу.
- б) Решите двойственную задачу.
- в) Найдите решение исходной задачи.

4.5 Рассмотрим задачу линейного программирования

$$\begin{cases} x_1 + 3x_2 + x_3 - x_4 \rightarrow \min \\ x_1 + x_2 + x_3 + 3x_4 = 6 \\ 2x_1 + 2x_2 + 2x_3 + 6x_4 = 10 \\ x_3 \geq 0, x_4 \geq 0 \end{cases}$$

- а) Выпишите двойственную задачу.
- б) Найдите допустимое множество двойственной задачи.
- в) Найдите допустимое множество исходной задачи.

5. Транспортная задача

- базисное допустимое решение, basic feasible solution, 基本可行解, jīběn kěxíng jiě;
- метод минимального элемента, least-cost rule, 最小元素法, zuìxiǎo yuánsù fǎ;
- метод северо-западного угла, northwest corner rule, 西北角法, xīběi jiǎo fǎ;
- транспортная задача, transportation problem, 运输问题, yùnsū wèntí;

5.1 Рассмотрим сбалансированную транспортную задачу

$$\begin{cases} \sum_{ij} c_{ij}x_{ij} \rightarrow \min \\ \sum_j x_{ij} = a_i \text{ для любого } i \\ \sum_i x_{ij} = b_j \text{ для любого } j \\ \text{все } x_{ij} \geq 0 \end{cases}$$

- а) Может ли измениться оптимальная точка, если каждый элемент матрицы C увеличить в 2 раза?
- б) Может ли измениться оптимальная точка, если один столбец матрицы C увеличить в 2 раза?
- в) Может ли измениться оптимальная точка, если одну строку матрицы C увеличить в 2 раза?
- г) Может ли измениться оптимальная точка, если к каждому элементу матрицы C прибавить 1?
- д) Может ли измениться оптимальная точка, если в одном столбце матрицы C к каждому элементу прибавить 1?
- е) Может ли измениться оптимальная точка, если в одной строке матрицы C к каждому элементу прибавить 1?

5.2 Рассмотрим сбалансированную транспортную задачу

$$\begin{cases} 8x_{11} + 5x_{12} + 4x_{13} + 6x_{21} + 7x_{22} + 3x_{23} \rightarrow \min \\ x_{11} + x_{12} + x_{13} = 10 \\ x_{21} + x_{22} + x_{23} = 20 \\ x_{11} + x_{21} = 7 \\ x_{12} + x_{22} = 11 \\ x_{13} + x_{23} = 12 \\ \text{все } x_{ij} \geq 0 \end{cases}$$

- а) Запишите задачу в виде симплекс-таблицы.
- б) Запишите задачу в виде транспортной таблицы.
- в) Запишите двойственную задачу.
- г) Найдите базисное допустимое решение методом северо-западного угла.
- д) Найдите базисное допустимое решение методом минимального элемента.
- е) Найдите хотя бы одно оптимальное решение.

5.3

5.4

5.5

6. Решения

1.1.

1.2.

1.3.

а) $E = 0.5A + 0B + 0.5C + 0D$

б) Например, $F = 0A + 0.5B + 0.5C + 0D = 0.5A + 0B + 0C + 0.5D = 0.25A + 0.25B + 0.25C + 0.25D$.
Для нахождения всех способов надо решить систему:

$$\alpha A + \beta B + \gamma C + \delta D = E \Rightarrow \alpha + \beta + \gamma + \delta = 1$$

$$\left(\begin{array}{cccc|c} 1 & 5 & 1 & 5 & 3 \\ 2 & 2 & 4 & 4 & 3 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{array} \right) \rightarrow \dots \rightarrow \left(\begin{array}{cccc|c} 0 & 1 & 0 & 1 & 1/2 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1/2 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{array} \right)$$

Система имеет бесконечное количество решений.

Все способы, $F = \alpha A + (0.5 - \alpha)B + (0.5 - \alpha)C + \alpha D$, где $\alpha \in [0; 0.5]$.

в) Нельзя, так как $G \notin \text{Convex}(A, B, C, D)$.

г) Есть ∞ способов.

д) Есть 1 способ. Решаем систему уравнений $I = t_1A + t_2B + (1 - t_1 - t_2)D$. Получаем, что $I = 0.25A + 0.25B + 0.5D$.

е) Есть 1 способ, $J = 0.25A + 0.75B$.

ж) 0

1.4.

2.1.

2.2.

2.3.

3.1.

вектор	решение	базисное решение	допустимое решение
$x_a = (0, 0, 0, 0)$	нет	нет	нет
$x_b = (0, 0, 8, 9)$	да	да	да
$x_c = (1, 0, 6, 8)$	да	нет	да
$x_d = (1, -9, 33, -1)$	да	нет	нет
$x_e = (0, -9, 35, 0)$	да	да	нет

	вектор	решение	базисное решение	допустимое решение
	$x_a = (1, 2, 3, 4)$	нет	нет	нет
3.2.	$x_b = (0, 0, 10, 11)$	да	да	да
	$x_c = (1, 0, 9, 9)$	да	нет	да
	$x_d = (6, -1, 7, 0)$	да	нет	нет
	$x_e = (0, 11, -23, 0)$	да	да	нет

3.3.

а) $x = (0, 0, 8, 15, 11)$

б)

3.4.

а) Решение $x = (0, 0, -8, 15, 11)$ является базисным и не является допустимым. Подойдёт, например, $x = (4, 0, 0, 11, 15)$.

б)

3.5.

	x_1	x_2	x_3	x_4	b
x_3	1	3	1	0	9
x_4	2*	1	0	1	8
$x = (0, 0, 9, 8), z = 0.$					
$\max z$	x_1	x_2	x_3	x_4	b
x_3	0	5/2*	1	-1/2	5
x_1	1	1/2	0	1/2	4
$x = (4, 0, 5, 0), z = 4.$					
$\max z$	x_1	x_2	x_3	x_4	b
x_2	0	1	2/5	-1/5	2
x_1	1	0	-1/5	3/5	3
$x = (3, 2, 0, 0), z = 5.$					
$\max z$	x_1	x_2	x_3	x_4	b
x_2	0	1	2/5	-1/5	2
x_1	1	0	-1/5	3/5	3
$x = (3, 2, 0, 0), z = 5.$					
$\max z$	x_1	x_2	x_3	x_4	b
x_2	0	1	2/5	-1/5	2
x_1	1	0	-1/5	3/5	3
$x = (3, 2, 0, 0), z = 5.$					
$\max z$	x_1	x_2	x_3	x_4	b
x_2	0	1	2/5	-1/5	2
x_1	1	0	-1/5	3/5	3
$x = (3, 2, 0, 0), z = 5.$					

3.6.

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	b
x_4	1	1	2	1	0	10
x_5	2	1	1	0	1	5
$x = (0, 0, 0, 10, 5), z = 0.$						
$\max z$	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	b
x_4	-3	-1	0	1	-2	0
x_3	2	1	1	0	1	5
$x = (0, 0, 5, 10, 0), z = 15.$						
$\max z$	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	b
x_4	-3	-1	0	1	-2	0
x_3	2	1	1	0	1	5
$x = (0, 0, 5, 10, 0), z = 15.$						
$\max z$	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	b
x_4	-3	-1	0	1	-2	0
x_3	2	1	1	0	1	5
$x = (0, 0, 5, 10, 0), z = 15.$						

3.7.

	x_1	x_2	x_3	x_4	b	
x_3	1	1	1	0	10	, $x = (0, 0, 10, 5), z = 0.$
x_4	2	1	0	1	5	

$\min z$	-2	3	0	0	$-z$	
	x_1	x_2	x_3	x_4	b	
x_3	-1	0	1	-1	5	, $x = (0, 5, 5, 0), z = -15.$
x_2	2	1	0	1	5	
$\min z$	-8	0	0	-3	$-z - 15$	

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	b	
x_4	2	1*	3	1	0	10	, $x = (0, 0, 0, 10, 6), z = 0.$
x_5	1	-1	1	0	1	6	
$\max z$	1	1	1	0	0	z	
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	b	
x_2	2	1	3	1	0	10	, $x = (0, 10, 0, 0, 16), z = 10.$
x_5	3	0	4	1	1	16	
$\max z$	-1	0	-2	-1	0	$z - 10$	

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	b	
x_4	3	2	1	1	0	10	, $x = (0, 0, 0, 10, 5), z = 0.$
x_5	1	1*	-1	0	1	5	
$\min z$	-1	2	-3	0	0	$-z$	
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	b	
x_4	1	0	3	1	-2	0	, $x = (0, 5, 0, 0, 0), z = -10.$
x_2	1	1	-1	0	1	5	
$\min z$	-3	0	-1	0	-2	$-z - 10$	

3.10.

а) $x = (3, 4, 0, 0).$

б) Найдите все допустимые решения.

в)

$$x_1 = 3 - x_3 - 5x_4 \geq 0, x_2 = 4 - 2x_3 - 6x_4 \geq 0, x_3 \geq 0, x_4 \geq 0$$

г) $A = (3, 4, 0, 0), B = (0, 2/5, 0, 3/5), C = (0, 0, 1/2, 1/2), D = (1, 0, 2, 0).$

д) $\text{Convex}(A, B, C, D)$, где $A = (3, 4, 0, 0), B = (0, 2/5, 0, 3/5), C = (0, 0, 1/2, 1/2), D = (1, 0, 2, 0).$

е) $D = (1, 0, 2, 0), z = 2.$

	x_1	x_2	x_3	x_4	b	
x_1	1	-1	0	2	1	
x_3	0	0.5	1	3	2	
$\min z$	0	-1.5	0	-12	$2 - z$	

3.11.

3.12.

	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	b	
x_1	1	0	$-1/2$	$-1/2$	$1/2$	$1/2$, неограниченная задача
x_2	0	1	$-1/2$	$1/2$	$1/2$	$1/2$	
$\max z$	0	0	1	0	-1	$z - 1$	
$\min u$	0	0	0	0	-1	$-u$	

3.13.

	x_1	x_2	x_3	x_4	b	
x_1	1	0	$1/2$	$-1/2$	$1/2$, $x = (1/2, 1/2, 0, 0), z = 1$.
x_2	0	1	$1/2$	$1/2^*$	$1/2$	
$\max z$	0	0	-1	0	$z - 1$	
	x_1	x_2	x_3	x_4	b	
x_1	1	1	1	0	1	, $x = (1, 0, 0, 0), z = 1$.
x_4	0	2^*	1	1	1	
$\max z$	0	0	-1	0	$z - 1$	

Оптимум: $[A, B] = \text{Convex}(A, B)$, $A = (1/2, 1/2)$, $B = (1, 0)$.

3.14.

3.15. $z = 15$

а) Например, $A = (5, 6, 0, 0)$.

б)

$$\begin{cases} x_3 \geq 0 \\ x_1 = 5 + x_3 \\ x_2 = 6 + 2x_3 \\ x_4 = 0 \end{cases}$$

в) $A = (5, 6, 0, 0)$

г) $x \in A + \text{Cone}(u)$, где $A = (5, 6, 0, 0)$, $u = (1, 2, 1, 0)$.

3.16. $z = -16$

а) Например, $A = (5, 6, 0, 0)$.

б)

$$\begin{cases} x_3 \in [0; 2] \\ x_1 = 5 + x_3 \\ x_2 = 6 - x_3 \\ x_4 = 0 \end{cases}$$

в) $A = (5, 6, 0, 0)$, $B = (7, 0, 2, 0)$.

г) $x \in \text{Convex}(A, B)$, где $A = (5, 6, 0, 0)$, $B = (7, 0, 2, 0)$.

3.17. $z = 20$

а) Например, $A = (5, 6, 0, 0)$.

б)

$$\begin{cases} (x_3, x_4) \in S \\ S = \{(x_3, x_4) \mid x_3 \geq 0, x_4 \geq 0, 6 - 3x_3 + x_4 \geq 0\} \\ x_1 = 5 + x_3 + 2x_4 \\ x_2 = 6 - 3x_3 + x_4 \end{cases}$$

в) $A = (5, 6, 0, 0)$, $B = (7, 0, 2, 0)$.

г) $x \in \text{Convex}(A, B) + \text{Cone}(u, v)$, где $A = (5, 6, 0, 0)$, $B = (7, 0, 2, 0)$, $u = (2, 1, 0, 1)$, $v = (7, 0, 1, 3)$.

3.18.

а) Например, $A = (2, 6, 0, 0)$.

б) $\text{Convex}(A, B, C) + \text{Cone}(u)$, где $A = (2, 6, 0, 0)$, $B = (0, 5, 1, 0)$, $C = (0, 0, 6, 10/3)$, $u = (3, 0, 0, 1)$.

в) $A = (2, 6, 0, 0)$, $B = (0, 5, 1, 0)$, $C = (0, 0, 6, 10/3)$

г) Например, $A = (2, 6, 0, 0)$.

д) $\text{Convex}(A, B)$, где $A = (2, 6, 0, 0)$, $B = (0, 5, 1, 0)$

е) $A = (2, 6, 0, 0)$, $B = (0, 5, 1, 0)$

3.19.

а) Например, $A = (0, 0, 0)$.

б) $\text{Convex}(A, B, C, D)$, где $A = (0, 0, 0)$, $B = (10, 0, 0)$, $C = (0, 10, 0)$, $D = (0, 0, 10)$.

в) $A = (0, 0, 0)$, $B = (10, 0, 0)$, $C = (0, 10, 0)$, $D = (0, 0, 10)$.

г) Например, $B = (10, 0, 0)$.

д) $\text{Convex}(B, C)$, где $B = (10, 0, 0)$, $C = (0, 10, 0)$.

е) $B = (10, 0, 0)$, $C = (0, 10, 0)$.

3.20.

4.1.

а)

$$\begin{cases} 6y_1 + 10y_2 \rightarrow \max \\ y_1 + y_2 \leq 1 \\ y_1 - y_2 \leq 3 \\ y_1 + 2y_2 \leq 1 \\ y_1 - 2y_2 \leq -1 \\ y_1 \geq 0, y_2 \geq 0 \end{cases}$$

б) $y_1 = 0, y_2 = 1/2, u = 5$

в) $x_1 = 0, x_2 = 0, x_3 = 5 + x_4, x_4 \geq 1/2, z = 5$. Можно записать ответ в виде $x \in A + \text{Cone}(u)$, где $A = (0, 0, 5.5, 0.5), u = (0, 0, 1, 1)$.

4.2.

а)

$$\begin{cases} 6y_1 + 10y_2 \rightarrow \min \\ y_1 + y_2 \geq 1 \\ y_1 - y_2 \geq 3 \\ y_1 + 2y_2 \geq 1 \\ y_1 - 2y_2 \geq -1 \\ y_1 \geq 0, y_2 \geq 0 \end{cases}$$

б) $y_1 = 3, y_2 = 0, u = 18$

в) $x_1 = 0, x_2 = 6, x_3 = 0, x_4 = 0, z = 18$

4.3.

а)

$$\begin{cases} 6y_1 + 10y_2 \rightarrow \max \\ y_1 + y_2 \leq 1 \\ y_1 - y_2 = 3 \\ y_1 + 2y_2 \leq 1 \\ 3y_1 - 2y_2 \leq -1 \end{cases}$$

б) $y_1 = -7, y_2 = -10, u = -142$

в) $x_1 = 0, x_2 = -42, x_3 = 0, x_4 = 16, z = -142$

4.4.

а)

$$\begin{cases} 6y_1 + 10y_2 \rightarrow \max \\ y_1 + y_2 \leq 1 \\ y_1 - y_2 = 3 \\ y_1 + 2y_2 \leq 1 \\ 3y_1 - 2y_2 \leq -1 \\ y_1 \geq 0 \end{cases}$$

б) Пустое допустимое множество.

в) Неограниченная задача.

4.5.

а)

$$\begin{cases} 6y_1 + 10y_2 \rightarrow \max \\ y_1 + 2y_2 = 1 \\ y_1 + 2y_2 = 3 \\ y_1 + 2y_2 \leq 1 \\ 3y_1 + 6y_2 \leq -1 \end{cases}$$

б) Пустое допустимое множество.

в) Пустое допустимое множество.

5.1.

5.2.

5.3.

5.4.

5.5.

Источники мудрости

- [Fer] Tomas Ferguson. *Linear programming: concise introduction*. URL: http://web.tecnico.ulisboa.pt/mcasquilho/acad/or/ftp/FergusonUCLA_LP.pdf.
- [Law] Neil Laws. *Linear programming: lecture notes*. URL: <https://www.stats.ox.ac.uk/~cmcd/lp/lp.pdf>.
- [htt] xxxx (<https://math.stackexchange.com/users/169207/stumped>). *Intuition behind duality*. Mathematics Stack Exchange. URL: <https://math.stackexchange.com/q/223235>. eprint: <https://math.stackexchange.com/q/223235>. URL: <https://math.stackexchange.com/q/223235>.