

Лекции по Методам Оптимизации.

Авторы

2022 — 2023

Содержание

1	Лекция №1. Безусловная оптимизация	4
1.1	Постановка задачи и определения	4
1.2	Общий вид оптимизационной задачи	4
1.3	Необходимые и достаточные условия экстремума	4
1.4	Необходимые условия экстремума I порядка	5
1.5	Необходимые и достаточные условия экстремума II порядка	5
1.6	Достаточные условия экстремума	5
1.7	Теорема Вейерштрасса	6
1.8	Критерий Сильвестра	7
1.9	Правило решения задачи безусловной оптимизации	8
2	Лекция №2. Условная оптимизация	9
2.1	Условная оптимизация с ограничениями-равенствами. Функция Лагранжа	9
2.2	Условная оптимизация с ограничениями-равенствами и неравенствами. Математическое программирование	11
3	Лекция №3. Выпуклый анализ	13
3.1	Выпуклые множества точек	13
3.2	Геометрический смысл решений СЛН и СЛУ	14
3.3	Выпуклые множества в n-мерном пространстве. Свойства ЗЛП	15
4	Лекция №4. Выпуклые и вогнутые функции	16
4.1	Свойства выпуклых (вогнутых) функций	16
4.2	Теорема (Крейна-Мильмана)	17
4.3	Теорема	17
4.4	Теорема	19
4.5	Теорема (дифференциальный признак выпуклых функций)	19
5	Лекция №5. Общая постановка выпуклого программирования(ЗВП). Теорема Куна-Таккера	22
5.1	Общая постановка ЗВП	22
5.2	Теорема Куна-Таккера.	23
5.3	Теорема Куна-Таккера (необходимые и достаточные условия решения (глобального минимума) ЗВП)	23
6	Лекция №6. Теорема Куна-Таккера(продолжение)	26
6.1	Доказательство теоремы Куна-Таккера	26
6.2	Теорема Куна-Таккера (в "седловом" варианте)	26
6.3	Линейное программирование	28
7	Лекция №7. Название лекции	29
7.1	29
8	Лекция №8. Определение первоначального допустимого базисного решения. Особые случаи симплексного метода. Двойственные задачи линейного программирования.	30
8.1	Определение первоначального допустимого базисного решения	30
8.2	Взаимно двойственные задачи линейного программирования(ЗЛП), их свойства. Основное неравенство теории двойственности. Первая(основная) теорема двойственности. Вторая теорема двойственности.	32
8.2.1	Взаимно двойственные задачи ЛП и их свойства	32
8.2.2	Экономико-математическая модель исходной и двойственной задач:	33

8.2.3	Свойства взаимно двойственных задач:	33
8.2.4	Алгоритм составления двойственной задачи	34
8.2.5	Теорема. Основное неравенство теории двойственности	35
8.2.6	Теорема. Достаточный признак оптимальности:	36
8.2.7	Первая(основная) теорема двойственности.	36
8.2.8	Экономический смысл первой(основной теоремы)	37
8.2.9	Вторая теорема двойственности	38
8.2.10	Теорема	39
8.2.11	Вторая теорема двойственности	40
9	Лекция №9. Название лекции	44
9.1	44
10	Словарик выражений	45

1 Лекция №1. Безусловная оптимизация

1.1 Постановка задачи и определения

def: Методы оптимизации — это раздел математики, посвящённый решению (экстремальных) задач, то есть задач на нахождение минимумов и максимумов функций.

Rem: Задачу на нахождение максимума функции " $f(x)$ " можно свести к задаче на нахождение минимума функции " $f_1(x) = -f(x)$ " и наоборот.

1.2 Общий вид оптимизационной задачи

Найти экстремум (минимум или максимум) функции $f : X \rightarrow R$ определенной на некотором множестве $X \in R^n$ при ограничении $X \in D (D \subset X)$ то есть $f(x) \rightarrow \text{extr}, X \in D$ (у функции есть экстремум на промежутке D).

В большинстве задач область определения функции " $f(x)$ " $X = R^n$. Ограничение $X \in D$ записывается, как правило, в виде уравнений или неравенств. Если множество $D = X$, то имеет место задача без ограничений или задача безусловной оптимизации.

При решении оптимизационной задачи находятся как локальные, так и глобальные экстремумы функции.

def: Точка " x^* " является точкой локального минимума (максимума) функции " $f(x)$ " if $\exists \epsilon$ - окрестность $\mathcal{U}_\epsilon = \{x : |x - x^*| < \epsilon\}$. Точка $x^* : f(x^*) \leq f(x) (f(x^*) \geq f(x)) \forall x \in \mathcal{U}_\epsilon$

Rem: то что пишется в скобках - для максимума, а то что без - для минимума

def: Точка " x^* " является точкой глобального минимума (максимума) функции " $f(x)$ " if $f(x^*) \leq f(x) (f(x^*) \geq f(x)) \forall x \in D$

1.3 Необходимые и достаточные условия экстремума

def: Точка $X^0 = (x_1^0, \dots, x_n^0)$ называется стационарной точкой дифференцируемой функции $f(x) = f(x_1 \dots x_n)$, если в ней все частные производные равны нулю, то есть $f'(x^0) = 0$ или $\frac{\partial f(x^0)}{\partial x_1} = \dots = \frac{\partial f(x^0)}{\partial x_n} = 0$

1.4 Необходимые условия экстремума I порядка

Теорема: if точка $x^* = (x_1^*, \dots, x_n^*)$ - точка локального extr дифференцируемой в точке x^* функции $f(x_1, \dots, x_n) \Rightarrow$ then $\frac{\partial f(x^*)}{\partial x_1} = \dots = \frac{\partial f(x^*)}{\partial x_n} = 0$ (1) (то есть - точка x^* - точка локального экстремума \Rightarrow точка x^* - стационарная точка (обратное утверждение неверно))

Доказательство: Рассмотрим функцию одной переменной:

$\varphi(x_i) = f(x_1^*, \dots, x_{i-1}^*, x_i^*, x_{i+1}^*, x_n^*)$ точка $x^* = (x_1^*, \dots, x_n^*)$ - т. локального extr функции " f " $\Rightarrow x_i^*$ - т. локального extr функции " φ " \Rightarrow по необходимому условию для функции одной переменной (по т. Ферма) 've:

$$\varphi(x_i^*) = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial f(x^*)}{\partial x_i} = 0 \text{ — что и требовалось доказать :)}$$

Для формулировки достаточных условий extr, позволяющих отобрать среди стационарных точек именно точки локального extr (среди стационарных точек могут быть также точки перегиба, седловые точки и т.д.), рассмотрим матрицу вторых производных функции - матрицу Гессе (гессиан):

$$A = f''(x^*) = \left(\frac{\partial^2 f(x^*)}{\partial x_i \partial x_j} \right)_{i,j=\overline{1,n}} = (a_{i,j})_{i,j=\overline{1,n}} \text{ (от 1 до n)}$$

def: Матрица "A" называется неотрицательно определённой ($A \geq 0$), если $\forall h = (h_1, \dots, h_n) \in R^n$ неотрицательной является квадратичная форма:

$$(A * h, h) = \sum_{i,j=1}^n a_{ij} h_i h_j \geq 0$$

def: Матрица "A" называется положительно определённой ($A > 0$), если $(A * h, h) > 0, \forall h \in R^n (h \neq 0)$

1.5 Необходимые и достаточные условия экстремума II порядка

Теорема: Пусть $f(x)$ - дважды дифференцируема в точке x^* . Необходимые условия условия extr:

if точка x^* - точка локального минимума (максимума) функции $f(x) \Rightarrow f'(x^*) = 0; (f''(x^*) * h, h) \geq 0 ((f''(x^*) * h, h) \leq 0) \forall h \in R^n$

1.6 Достаточные условия экстремума

$f'(x^*) = 0; (f''(x^*) * h, h) > 0 ((f''(x^*) * h, h) < 0) \forall h \in R^n (h \neq 0) \Rightarrow$ точка x^* - т. локального минимума (максимума) функции $f(x)$

Доказательство:

Для случая минимума (для максимума аналогично)

По формуле Тейлора 've:

$$f(x^* + h) = f(x^*) + (f'(x^*), h) + \frac{1}{2}(f''(x^*) * h, h) + r(h),$$

где $r(h) = o(|h|^2).$ (*)

1) Необходимость:

Пусть точка x^* - точка локального минимума \Rightarrow по необходимому условию I порядка $f'(x^*) = 0$, а также $f(x^* + \lambda h) \geq f(x^*)$ (при достаточно малых " λ ") \Rightarrow из (*) get (g при малых " λ " и фиксированном " h "):

$$f(x^* + \lambda h) - f(x^*) = 0 + \frac{\lambda^2}{2}(f''(x^*) * h, h) + r(\lambda * h) \geq 0 \mid : \lambda^2$$

(где $r(\lambda * h) = o(|\lambda|^2)$). $\frac{1}{2}(f''(x^*) * h, h) + \frac{r(\lambda * h)}{\lambda^2} \geq 0$

При $\lambda \rightarrow 0$ 've : $(f''(x^*) * h) \geq 0 (\forall h \in R^n) \Rightarrow$ необходимость доказана

2) Достаточность:

Можно показать, что в R^n имеет место эквивалентность условий:

$$(A * h, h) > 0 \forall h \in R^n (h \neq 0) \Leftrightarrow \exists \alpha > 0 : (A * h, h) \geq \alpha * |R|^2 (\forall h \in R^n)$$

Учитывая, что $f'(x^*) = 0$ и $(f''(x^*) * h, h) \geq \alpha * |h|^2$

По формуле Тейлора 've:

$f(x^* + h) - f(x^*) = 0 + \frac{1}{2}(f''(x^*) * h, h) + r(h) \geq \frac{\alpha}{2}|h|^2 + r(h) \geq 0$), то есть $f(x^* + h) \geq f(x^*) \Rightarrow$ точка x^* - точка локального extr функции $f(x) \Rightarrow$ достаточность доказана.

что и требовалось доказать

Rem: Для квадратичной функции

$Q(x) = \sum_{i,j=1}^n a_{ij}x_i x_j$ условие положительной(отрицательной) определённости матрицы $A = (a_{ij})_{i,j=1}^n > 0$ - это достаточное условие абсолютного минимума(максимума) $Q(x)$ в стационарной точке.

1.7 Теорема Вейерштрасса

Теорема:

Непрерывная функция $f : R^n \rightarrow R$ на непустом ограниченном замкнутом подмножестве(компакте) множества R^n достигает своих абсолютных минимума и максимума[или 1)в стационарной точке внутри; 2) в граничной

точке] - без доказательства

Следствие:

if функция " $f(x)$ " непрерывна на R^n и $\lim_{|x| \rightarrow \infty} f(x) = \infty$

($\lim_{|x| \rightarrow \infty} f(x) = -\infty$) \Rightarrow then она достигается своего абсолютного минимума (максимума) на \forall замкнутом подмножестве и R^n . (без доказательства).

1.8 Критерий Сильвестра

Rem: В необходимых и достаточных условиях экстремума II порядка use-ся знакоопределённость матрицы вторых производных (гессиана) $A = f''(x)$. Знакоопределённость матрицы устанавливается с помощью критерия Сильвестра.

Теорема:

Пусть A - симметричная матрица

1) Матрица " A " положительно определена ($A > 0$) \Leftrightarrow все её последовательные гл. миноры положительны, т.е. $A_{1...k} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{1k} \\ a_{k1} & a_{kk} \end{vmatrix} > 0$ ($k = \overline{1, n}$)

2) Матрица " A " отрицательно определена ($A < 0$) \Leftrightarrow все её последовательные главные миноры чередуют знак, начиная с отрицательного, т.е. $(-1)^k * A_k > 0$ ($k = \overline{1, n}$)

3) Матрица " A " неотрицательно определена ($A \geq 0$) \Leftrightarrow все её гл. миноры (необязательно только последовательные) неотрицательны, т.е. $A_{1...k} = \begin{vmatrix} a_{i_1 i_1} & a_{i_1 i_k} \\ a_{i_k i_1} & a_{i_k i_k} \end{vmatrix} \geq 0$ ($1 \leq i_1 \leq \dots \leq i_k \leq n$) ($k = \overline{1, n}$)

4) Матрица " A " неположительно определена ($A \leq 0$) \Leftrightarrow все её последовательные главные миноры чередуют знак, начиная с неположительного, т.е. $(-1)^k * A_{i_1...i_k} \geq 0$ ($k = \overline{1, n}$)

(Теорема без доказательства)

Rem:

1) Можно показать, что $A > 0$ ($A \geq 0$) $\Leftrightarrow \forall \lambda_i > 0$ ($\lambda \geq 0$), где λ_i - собственные значения матрицы.

2)

2.1) $A_{1...k} > 0 \Leftrightarrow A_{i_1...i_k} > 0$

2.2) $A_{1...k} \geq 0 \not\Leftrightarrow A_{i_1...i_k} \geq 0$ (т.е. $\not\Leftrightarrow A \geq 0$)

ex:

$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \Rightarrow$ последовательные главные миноры $A_1 = 0$; $A_{12} = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix} = 0$, но A не является неотрицательно определённой, так как $(Ah, h) = ((0; -h), (h, h)) = -h^2 < 0 (\forall h \neq 0)$

1.9 Правило решения задачи безусловной оптимизации

1) Найти стационарные точки, то есть точки, удовлетворяющие необходимому условию экстремума I порядка

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial x_1} = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial x_n} = 0 \end{cases}$$

2) Во всех стационарных точках " x^0 " проверяем достаточное условие extr II порядка, то есть проверяем знаки последовательных главных миноров гессиана " $f''(x^0)$ " :

2.1) if $A_{1..k} > 0$ (k от 1 до n) \Rightarrow then $x^0 \in locminf$;

2.2) if $(-1)^k * A_{1...k} > 0$ (при k от 1 до n) \Rightarrow then $x^0 \in locmaxf$;

3) Если достаточное условие extr II порядка не выполняется \Rightarrow , то проверяем в стационарной точке необходимое условие extr II порядка, то есть проверяем знаки главных миноров гессиана " $f''(x^0)$ "

3.1) if гессиан $f''(x^0) \not\geq 0$ не является неотрицательным отрезком, то есть не выполняется условие $A_{i1...ik} \geq 0 \Rightarrow$ then $x^0 \notin locminf$;

3.2) if гессиан $f''(x^0) \not\leq 0$ не является неположительным отрезком, то есть не выполняется условие что все $(-1)^k A_{i1...ik} \geq 0 \Rightarrow$ then $x^0 \notin locmaxf$;

2 Лекция №2. Условная оптимизация

2.1 Условная оптимизация с ограничениями-равенствами. Функция Лагранжа

def: Задачей условной оптимизации с ограничениями-равенствами называется следующая задача:

$f_1 \rightarrow \text{extr}$; $f_i(x) = 0 (i = \overline{1, m}), (m < n)$, где $f_i(x) : R^n \rightarrow R (i = \overline{0, m})$ и $\forall f_i(x)$ - дифференцируема.

Теорема 2.1.1. *необходимое условие экстремума I порядка.*

If $x^* = (x_1^*, \dots, x_n^*) \in \text{locextr} f_0 \Rightarrow$ then \exists вектор множителей Лагранжа $\lambda^* = (\lambda_1^*, \dots, \lambda_m^*) \in R^m (\lambda^* \neq 0)$ такой, что для функции Лагранжа:

$$\mathcal{L}(x_1, \dots, x_n; \lambda_1, \dots, \lambda_m) = f_0(x_1, \dots, x_n) + \sum_{i=1}^m \lambda_i f_i(x_1, \dots, x_n) \quad (1)$$

выполняются условия стационарности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{L}(x^*, \lambda^*)}{\partial x_j} &= \frac{\partial f_1(x^*)}{\partial x_j} + \sum_{i=1}^m \lambda_i \frac{\partial f_i(x^*)}{\partial x_j} = 0 \quad (j = \overline{1, n}) \\ \frac{\partial \mathcal{L}(x^*, \lambda^*)}{\partial \lambda_i} &= f_i(x^*) = 0 \quad (i = \overline{1, m}) \end{aligned} \quad (2)$$

т.е. 'ве систему $n + m$ уравнений для нахождения $n + m$ неизвестных $\{x_1^*, \dots, x_n^*; \lambda_1^*, \dots, \lambda_m^*\}$

Теорема 2.1.2. *необходимое условия экстремума II порядка.*

If $x^* = (x_1^*, \dots, x_n^*) \in \text{locmin} f_0$ (условие регулярности) и векторы $f_1'(x^*), \dots, f_m'(x^*)$ - линейно независимы \Rightarrow then \exists вектор множителей Лагранжа $\lambda^* = (\lambda_1^*, \dots, \lambda_m^*) \in R^m (\lambda^* \neq 0)$ такой, что для функции Лагранжа

$$\mathcal{L}(x, \lambda) = f_0(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i f_i(x)$$

выполняются условия:

1. стационарности (2)

2. неотрицательной определенности матрицы вторых производных:

$$(3) (\mathcal{L}''(x^*, \lambda^*)h, h) \geq 0 \quad \forall h \in \{(f'_i(x^*), h) = 0 (i = \overline{1, m})\}$$

Rem: Для т. $x^* \in \text{locmax} f_0$ need $\mathcal{L}(x, \lambda) = -f_0(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i f_i(x)$

Теорема 2.1.3. *достаточное условие экстремума II порядка.*

If в т. $x^* = (x_1^*, \dots, x_n^*)$ векторы $f'_1(x^*), \dots, f'_m(x^*)$ - линейно независимы и \exists вектор множителей Лагранжа $\lambda^* = (\lambda_1^*, \dots, \lambda_m^*) \in R^m (\lambda^* \neq 0)$ такой, что для функции Лагранжа

$$\mathcal{L}(x, \lambda) = f_0(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i f_i(x)$$

в т. x^* выполняются условия:

1. стационарности (2)

2. положительной определенности матрицы вторых производных:

$$(\mathcal{L}(x^*, \lambda^*)h, h) > 0 \quad \forall h \in \{(f'_i(x^*), h) = 0 (i = \overline{1, m}), (h \neq 0)\} \Rightarrow \\ \Rightarrow \text{then т. } x^* \in \text{locmin} f_0$$

Rem: Для т. $x^* \in \text{locmax} f_0$ need $\mathcal{L}(x, \lambda) = -f_0(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i f_i$

Частный случай

$z = f(x, y) \rightarrow \text{extr}$; при $\varphi(x, y) = 0 \Rightarrow$ функция Лагранжа 've вид:

$$\mathcal{L}(x, y, \lambda) = f(x, y) + \lambda \varphi(x, y)$$

Условия стационарности(необх. усл. I порядка)(2):

$$\begin{cases} \mathcal{L}'_x(x^*, y^*, \lambda^*) = f'_x(x^*, y^*) + \lambda \varphi'_x(x^*, y^*) = 0 \\ \mathcal{L}'_y(x^*, y^*, \lambda^*) = f'_y(x^*, y^*) + \lambda \varphi'_y(x^*, y^*) = 0 \\ \mathcal{L}'_\lambda(x^*, y^*, \lambda^*) = \varphi'(x^*, y^*) = 0 \end{cases}$$

\Rightarrow система трех уравнений с тремя неизвестными

\Rightarrow находим стационарные точки (x^*, y^*, λ^*)

Вычисляется в каждой из get-х стационарных точек (x^*, y^*, λ^*) определитель:

$$\Delta = - \begin{vmatrix} 0 & \varphi'_x & \varphi'_y \\ \varphi'_x & \mathcal{L}''_{xx} & \mathcal{L}''_{xy} \\ \varphi'_y & \mathcal{L}''_{yx} & \mathcal{L}''_{yy} \end{vmatrix}$$

if $\Delta > 0 \Rightarrow$ then $\text{т.}(x^*, y^*, \lambda^*) \in \text{locmin } z$

if $\Delta < 0 \Rightarrow$ then $\text{т.}(x^*, y^*, \lambda^*) \in \text{locmax } z$

2.2 Условная оптимизация с ограничениями-равенствами и неравенствами. Математическое программирование

def: Задачей условной оптимизации с ограничениями-равенствами и ограничениями-неравенствами называется следующая задача:

$$(4)f_0(x) \rightarrow \min; (5)f_i(x) \leq 0 \ (i = \overline{1, p}), (6)f_i(x) = 0 \ (i = \overline{p+1, m}),$$

где $f_i(x) : R^n \rightarrow R (i = \overline{0, m})$

def: Эта задача называется задачей математического программирования (ЗМП)

Rem:

1) Обычно в ЗМП присутствуют условия неотрицательности переменных $x_i \geq 0 \ (i = \overline{1, n})$ эти условия записываются в системе неравенств (5) в виде: $-x_i \leq 0 \ (i = \overline{1, n})$

2) Каждое ограничение-равенство (6) можно заменить двумя неравенствами:

$$f_i(x) = 0 \Leftrightarrow \begin{cases} f_i(x) \leq 0 \\ -f_i(x) \leq 0 \end{cases} \quad (i = \overline{p+1, m})$$

В силу этих замечаний ЗМП можно записать в виде:

$$f_0(x) \rightarrow \min$$

$$f_i(x) \leq 0 \ (i = \overline{1, m}) \quad (8) \text{ где } x = (x_1, \dots, x_n)$$

Для ЗМП составляется функция Лагранжа

$$\mathcal{L}(x_1, \dots, x_n; \lambda_1, \dots, \lambda_m) = f_0(x_1, \dots, x_n) + \sum_{i=1}^m \lambda_i f_i(x_1, \dots, x_n)$$

С помощью функции Лагранжа выписываются необходимые и достаточные условия экстремума тип (2)-(3). Однако, проверка выполнения этих условий становится еще более сложной. При этом требуется решать систему, вообще говоря, нелинейных уравнений и неравенств. Для этого применяются итерационные численные методы, формирующие последовательность точек, сходящуюся к точке экстремума. Однако, эта точка может оказаться точкой локального (а не глобального) экстремума. Это объясняется тем, что ЗМП в такой общей постановке, без каких-либо предположений относительно функций $f_i(x)$, является многоэкстремальной задачей. Не существует универсальных методов решения таких задач. Содержательная теория построена лишь для отдельных классов ЗМП, в частности, задач оптимизации выпуклых функций на выпуклом множестве решений систем ограничений-неравенств. Такие задачи, называемые задачами выпуклого программирования (ЗВП), являются, как будет показано ниже, одноэкстремальными задачами.

3 Лекция №3. Выпуклый анализ

Ввиду важности задачи выпуклого программирования (ЗВП) рассматриваемые основные понятия раздела математики, называемого выпуклым анализом:

1) Выпуклое множество 2) Выпуклая(вогнутая) функция и ее дифференциальные свойства

3.1 Выпуклые множества точек

def: Множество точек называется выпуклым, если оно вместе с \forall двумя своими точками содержит весь отрезок, соединяющий эти точки **ex:** — Тут нужно иллюстрацию **ex:** круг, сектор, отрезок, прямая, полуплоскость, куб, пирамида

Теорема 3.1.1. Пересечение \forall числа выпуклых множеств-выпуклое множество, too

Доказательство. Для простоты - пересечение двух выпуклых множеств: $\forall N, M \in (A \cap B)$. Множество A - выпуклое \Rightarrow отрезок $MN \in A$. Аналогично

$MN \in B \Rightarrow MN \in (A \cap B) \Rightarrow (A \cap B)$ - выпуклое — тут нужно иллюстрацию ■

def: Внутренняя т. множества - \exists окрестность этой точки: в ней - только точек \in множеству.

def: Граничная точка множества - \forall окрестность этой точки содержит как точки \in множеству, так и точек \notin множеству

def: Угловая точка множества - она не является внутренней ни для какого отрезка, целиком \in -го множеству.

ex: — Тут нужно иллюстрацию точка M - внутренняя, точка N граничная, точка A - угловая ($AP \in$ множеству целиком, но точка A - не внутренняя точка для AP ; точка внутренняя точка для KL , но $KL \notin$ множеству)

целиком

def: Замкнутое множество точек - if оно включает все свои граничные точки.

def: Ограниченное множество точек - if \exists шар конечного радиуса с центром в \forall точке множества, который полностью содержит в себе данное множество.

Можно показать, что если фигура ограничена only прямыми или их отрезками, то она 've конечное число угловых точек. При криволинейности границ - бесконечное множество угловых точек.

def: Выпуклое замкнутое множество точек пространства(плоскости), имеющее конечное число угловых точек, называется выпуклым многогранником(многоугольником), если оно ограниченное, и выпуклой многогранной(многоугольной) областью, если оно неограниченное.

Rem: Для выпуклого многогранника(многоугольника) угловые точки \equiv его вершинам.

Для невыпуклого - не обязательно

ex: — Тут нужна иллюстрация точка E - вершина, но не угловая точка, т.к. KL \in множеству целиком и точка E - внутренняя точка для KL.

Rem: В ЗЛП часто число параметров объекта $n > 3 \Rightarrow$ имеем дело с гипермногогранниками в гиперпространстве с координатами $x_i (i = \overline{1, n}, n > 3)$

3.2 Геометрический смысл решений СЛН и СЛУ

Теорема 3.2.1. Множество всех решений линейного неравенства

$$a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1$$

- это одно из полупространств, на которые n -мерные гиперпространство делится гиплоскостью

$$a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n = b_1$$

включая и эту гиперплоскость

3.3 Выпуклые множества в n-мерном пространстве. Свойства ЗЛП

Выпуклые множества в n-мерном пространстве. Рассмотрим в n-мерном пространстве k точек (векторов):

$$x_1 = (x_1^{(1)}, \dots, x_n^{(1)}), \dots, x_k = (x_1^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})$$

def: Точка(вектор) $X = (x_1, \dots, x_n)$ называется линейной комбинацией точек(векторов) X_1, \dots, X_k , если справедливо соотношение:

$$X = \alpha_1 X_1 + \dots + \alpha_k X_k \quad (3)$$

где $\alpha_j - \text{const } j = (\overline{1, k})$

def: Точка(вектор) X называется выпуклой линейной комбинацией точек(векторов) $X = \alpha_1 X_1 + \dots + \alpha_k X_k$, если:

1.

$$X = \alpha_1 X_1 + \dots + \alpha_k X_k$$

2.

$$\alpha_j \geq 0 \quad j = (\overline{1, k}) \quad (4)$$

3.

$$\sum_{j=1}^k \alpha_j = 1 \quad (5)$$

Очевидно, что в частном случае при $k=2$ выпуклой линейной комбинацией двух точек X_1 и X_2 является соединяющий их отрезок, т.к.

$$X = \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 = \left\{ \begin{array}{l} \alpha_1 + \alpha_2 = 1 \\ \alpha_2 = \alpha_1 - 1 \end{array} \right\} \alpha X_1 + (1 - \alpha_1) X_2$$

- уравнение точек $X \in [X_1, X_2]$ (см. аналитич. геометр.) — добавить иллюстрацию

4 Лекция №4. Выпуклые и вогнутые функции

Пусть функция " $f(x)$ ", def-на на множестве $M \subset R^n$ (т.е. $x = (x_1, \dots, x_n) \in M$

def: График функции " $f(x)$ " - это множество $\Gamma(f) \subset R^{n+1}$ состоящее из точек $(x, f(x)) = (x_1, \dots, x_n, f(x))$, где $x \in M$.

def: Надграфик функции " $f(x)$ " - это множество $\Gamma(f) \subset R^{n+1}$, состоящее из точек $(x, x_{n+1}) = (x_1, \dots, x_n, x_{n+1})$, где $x \in M$, $x_{n+1} \leq f(x)$

def: Функция " $f(x)$ ", заданная на множестве $m \subset R^n$ наз-ся выпуклой, если ее надграфик $\Gamma(f)$ является выпуклым множеством в R^{n+1}

Rem: Функция " $f(x)$ " вогнута \leftrightarrow функция " $-f(x)$ " выпукла.

Кроме данного геометрического def-я выпуклых (вогнутых) функций, часто use-ся следующее аналитическое def-e: **def:** Функция " $f(x)$ ", заданная на множестве $M \subset R^n$ наз-ся выпуклой(вогнутой), если 1) M - выпуклое, 2) $\forall x_1 \in M, x_2 \in M$ и числа $t \in [0, 1]$ 've:

$$f((1-t) * x_1 + t x_2) \leq (1-t) * f(x_1) + t * f(x_2) \quad (1)$$

(\geq - для вогнутой функции)

Rem: 1) Можно показать, что геометрические и аналитические def-я эквивалентны; (Rem: $(1-t) * f(x_1) + t * f(x_2)$ - уравнение отрезка $[x_1, x_2]$ ($t \in [0, 1]$) при $x_1 \neq x_2$ и $t \in (0, 1)$)

2) Если (1) 've строгое неравенство \Rightarrow , то функция " $f(x)$ " наз-ся строго выпуклой (строго вогнутой).

3)

4.1 Свойства выпуклых (вогнутых) функций

1. $f(x) = const$ и $f(x) = ax + b$ всюду выпуклы (вогнуты).

2. if функции $f_i(x)$ ($i = \overline{1, m}$), заданные на $M \subset R^n$, выпуклы \Rightarrow

then функция $f(x) = \sum_{i=1}^m \alpha_i f_i(x)$ выпукла (при $\forall \alpha_i \geq 0$)

3. if функция " $f(x)$ ", заданная на выпуклом множестве $M \subset R^n$, выпукла
 \rightarrow

then $\forall \alpha$ множество решений неравенства $f(x) \leq \alpha$, т.е. множество $M_\alpha = \{x \in M : f(x) \leq \alpha\}$, является выпуклым.

3.1 if функции $f_1(x), \dots, f_m(x)$, заданные на выпуклом множестве $M \subset R^n$, выпуклы \Rightarrow

then множество решений системы неравенств $f_i(x) \leq \alpha_i$ ($i = \overline{1, m}$) является выпуклым.

4. Выпуклая (вогнутая) функция, заданная на выпуклом множестве $M \subset R^n$, непрерывна в \forall внутренней точке множества.

(вставка на страницу 25)

def: Выпуклая оболочка множества - это совокупность всех выпуклых линейных комбинаций его конечных подмножеств $\{x_1, \dots, x_k$ (где $x_i \in M$).
(Конечное подмножество - это конечный набор точек x_1, \dots, x_k)

4.2 Теорема (Крейна-Мильмана)

Выпуклый компакт в нормированном пространстве является выпуклой оболочкой своих угловых (крайних) точек.

4.3 Теорема

Пусть выпуклая (вогнутая) функция " $f(x)$ " задана на выпуклом множестве $M \subset R^n \Rightarrow$

Каждый локальный минимум (максимум) функции " $f(x)$ " является её глобальным минимумом (максимумом) на множестве M .

Доказательство (для выпуклой функции)

Пусть точка $x^* \in M$ - точка локального min-а. Пусть точка $x \in M$ - произвольная точка множества M . Need доказать: $f(x) \geq f(x^*)$.

Отрезок $[x^*, x] = (1 - t_0)x^* + tx$ ($t \in [0, 1]$) принадлежит " M ". При малом значении $t_0 \in (0, 1)$ /-щая точка отрезка $[x^*, x]$ находится в малой окрестности т. x^* , в котором имеем:

$$f((1 - t_0)x^* + t_0x) \geq f(x^*)$$

Из def-я выпуклой функции $f(x)$ 've:

$$f((1 - t_0)x^* + t_0x) \leq (1 - t_0)f(x^*) + t_0f(x)$$

Т.о. :

$$(1 - t_0) * f(x^*) + t_0 * f(x) \geq f(x^*) \Rightarrow$$

$\Rightarrow f(x) \geq f(x^*)$ ч. и т.д. (для вогнутой " $f(x)$ " доказательство аналогичное.)

Rem:

1) Задачи выпуклой оптимизации называются одноэкстремальными. В многоэкстремальных задачах может \exists -ть локальные экстремумы, не совпадающие с глобальными.

2) Одноэкстремальность задач выпуклой оптимизации не означает, что каждая такая задача имеет решение и при том единственное. f.e.: 1) Выпуклая функция одной переменной $f(x) = x$, при $x \in (0, 1)$ не достигает min-а (и max-а) на $(0, 1)$; 2) Множество точек min-а выпуклой функции $f(x) = C - \text{const}$, $x \in M$, совпадает со всем M .

3) Если функция " $f(x)$ " - строго выпуклая (строго вогнутая), то разрешимая задача выпуклой оптимизации (т.е. множество $M \neq \emptyset$ и ограничено) имеет единственное решение.

def: Производной $\frac{\partial f(x)}{\partial \ell}$ функции $f(x) = f(x_1, \dots, x_n)$ по направлению ненулевого единичного вектора $\ell = (\ell_1, \dots, \ell_n)$ в т. $x = (x_1, \dots, x_n)$ называется предел

$$\frac{\partial f(x)}{\partial \ell} = \lim_{\lambda \rightarrow +0} \frac{f(x + \lambda \ell) - f(x)}{\lambda}$$

Если функция дифференцируема в т. x , то она в этой точке производную по \forall направлению $\ell = (\ell_1, \dots, \ell_n)$, которая выражается через частные производные по следующей формуле:

$$\frac{\partial f(x)}{\partial \ell} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f(x)}{\partial x_i} \ell_i$$

Производная по направлению равна скалярному произведению вектора " ℓ " и вектора градиента функции " $f(x)$ " в т. x

$$\nabla f(x) = \left(\frac{\partial f(x)}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial f(x)}{\partial x_n} \right) : \frac{\partial f(x)}{\partial \ell} = \nabla f(x) * \ell = \nabla f(x) * |\ell|$$

или

$$\frac{\partial f(x)}{\partial \ell} = |f(x)| * |\ell| * \cos \phi$$

Т.о.:

\forall направления " ℓ " производная $\frac{\partial f}{\partial \ell} \leq |\nabla f(x)|$.

\Rightarrow Вывод:

1) Производная по направлению " $\frac{\partial f}{\partial \ell}$ " - это скорость изменения функции " $f(x)$ " по направлению " ℓ " (знак " $\frac{\partial f}{\partial \ell}$ " - это характер изменения функции (возрастание или убывание)).

2) Направление градиента $\nabla f(x)$ - это направление наибольшего возрастания функции " $f(x)$ " в т. x ; длина градиента $|\nabla f(x)|$ равна наибольшей скорости возрастания функции в этой точке.

4.4 Теорема

Пусть 've дифференцируемую выпуклую функцию " $f(x)$ ", def-ую на выпуклом множестве $M \subset R^n$.

1) $\forall x, y \in M$ 've: $\lambda f(x) * (y - x) \leq f(y) - f(x)$

2) т. $x^* \in \text{absminf} \Leftrightarrow \nabla f(x^*) = 0$ (2)

4.5 Теорема (дифференциальный признак выпуклых функций)

Дважды дифференцируемая функция " $f(x)$ ", def-ная на выпуклом множестве $M \subset R^n$ является выпуклой $\Leftrightarrow \forall x = (x_1, \dots, x_n) \in M$ и $\forall \ell = (\ell_1, \dots, \ell_n) \in R^n$

've:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_i \partial x_j} \ell_i \ell_j \geq 0, (3)$$

т.е. гессиан функции всюду неотрицательно определён:

$$A = f''(x) = \left(\frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_i \partial x_j} \right) \geq 0, (\forall x \in M)$$

Rem:

1) Функция является строго выпуклой \Leftrightarrow гессиан положительно определён, т.е.

$$\left(\frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_i \partial x_j} \right) > 0, (\forall x \in M)$$

2) Знакоопределённость гессиана устанавливается с помощью критерия Сильвестра.

ex 1:

Проверить выпуклость функции:

$$f(x_1, x_2) = 4x_1 + x_2^2 - 2x_1x_2 + 6x_1 - 5x_2 - 2$$

$$f'_{x_1} = 8x_1 = 2x_2 + 6; f''_{x_1x_1} = 8; f''_{x_1x_2} = -2; f''_{x_2x_2} = 2; f'_{x_2} = 2x_2 - 2x_1 - 5$$

$$\text{Гессиан } A = \begin{pmatrix} 8 & -2 \\ -2 & 2 \end{pmatrix}; \Delta_1 = 8 > 0; \Delta_2 = 12 > 0$$

\Rightarrow функция является строго выпуклой.

ex 2:

Проверить выпуклость функции: $f(x) = -\sqrt{x_1x_2}$ на множестве

$$M = \{(x_1, x_2) | x_1 > 0, x_2 > 0\}.$$

$$f'_{x_1} = -\frac{1 \cdot x_2}{2\sqrt{x_1x_2}} = -\frac{1}{2}\sqrt{\frac{x_2}{x_1}};$$

$$f'_{x_2} = -\frac{1}{2}\sqrt{\frac{x_1}{x_2}};$$

$$f''_{x_1x_1} = \left(-\frac{\sqrt{x_2}}{2} * x_1^{-\frac{1}{2}}\right)' = \frac{1}{4} \frac{\sqrt{x_2}}{\sqrt{x_1^3}} = \frac{1}{4x_1} \sqrt{\frac{x_2}{x_1}};$$

$$f''_{x_1x_2} = -\left(\frac{1}{2\sqrt{x_1}} * x_2^{\frac{1}{2}}\right)' = \frac{1}{4\sqrt{x_1x_2}};$$

$$f''_{x_2x_2} = \left(-\frac{1 \cdot \sqrt{x_1}}{2} * x_2^{-\frac{1}{2}}\right)' = \frac{1\sqrt{x_1}}{4\sqrt{x_2^3}} = \frac{1}{4x_2} * \sqrt{\frac{x_1}{x_2}}$$

$$\text{Гессиан } H = \begin{pmatrix} \frac{1}{4x_1} * \sqrt{\frac{x_2}{x_1}} & -\frac{1}{4\sqrt{x_1x_2}} \\ -\frac{1}{4\sqrt{x_1x_2}} & \frac{1}{4x_2} * \sqrt{\frac{x_1}{x_2}} \end{pmatrix}$$

$$\Delta_1 = \frac{1}{4x_1} \sqrt{\frac{x_2}{x_1}} > 0 (\forall x_1, x_2 > 0);$$

$$\Delta_2 = \frac{1}{16x_1x_2} \sqrt{\frac{x_2x_1}{x_1x_2}} - \frac{1}{16x_1x_2} = 0 \Rightarrow$$

Гессиан $H \geq 0 \Rightarrow$ функция является на множестве $M = \{(x_1, x_2) | x_1 > 0, x_2 > 0\}$ выпуклой (но не является строго выпуклой).

5 Лекция №5. Общая постановка выпуклого программирования(ЗВП). Теорема Куна-Таккера

5.1 Общая постановка ЗВП

ЗВП называется следующей задачей математического программирования(ЗМП)

$$f(x_1, \dots, x_n) \rightarrow \min$$

при ограничениях:

$$\begin{cases} g_1(x_1, \dots, x_n) \leq 0 \\ g_m(x_1, \dots, x_n) \leq 0 \end{cases},$$

где f, g_1, \dots, g_m - выпуклые функции, def-ные на некотором выпуклом множестве $M \subset R^n$.

При этом множество M содержит допустимую область значений, то есть множество, удовлетворяющее системе ограничений. Заметим, что свойству 3.1 выпуклых функций допустимая область ЗВП также выпукла

Rem:

1) Аналогично формулируется задача максимизации вогнутой функции "f" при вогнутых функциях " g_1, \dots, g_m ", def-х на некотором выпуклом множестве $M \subset R^n$. При этом знак неравенств — " \geq ".

Аналогично допустимая область ЗВП будет также выпуклым множеством(свойство для вогнутых функций)

2) В ??? с теор. на с.??? в ЗВП каждый локальный минимум является глобальным минимумом функции "f" в допустимой области. Причём, если функция "f" строго выпуклая и ограниченная снизу на ограниченном непустом множестве M , то ЗВП 've единственное решение, то есть минимумом функции "f" достигается в одной точке

$$x^0 = (x_1^0, \dots, x_n^0)$$

(см с.???)

5.2 Теорема Куна-Таккера.

Теорема: Пусть на ЗВП налагаются следующие требования:

1. Множество, удовлетворяющее системе строгих неравенств:

$$\begin{cases} g_1(x_1, \dots, x_n) < 0 \\ g_m(x_1, \dots, x_n) < 0 \end{cases}$$

и называемое внутренней частью допустимой области, не пусто (т.н. условие Слейтера)

2. Часть допустимой области, в которой некоторые ограничения обращаются в равенства, называется границей допустимой области, а эти ограничения - активными. Пусть градиенты активных ограничений в отвечающих им точках границы линейно независимы (т.н. условие регулярности (см с.???)

5.3 Теорема Куна-Таккера (необходимые и достаточные условия решения (глобального минимума) ЗВП)

Точка $x^0 = (x_1^0, \dots, x_n^0)$ является решением ЗВП (то есть точкой глобального минимума функции "f") \Leftrightarrow (Н. и Д.) в ней выполнены следующие условия (Условия Куна-Таккера):

1) Условие стационарности функции Лагранжа (см.с.???)

$$\lambda(x_1, \dots, x_n; \lambda_1, \dots, \lambda_m) = f(x_1, \dots, x_n) + \sum_{i=1}^m \lambda_i * g_i(x_1, \dots, x_n)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_1} = \dots = \frac{\partial L}{\partial x_n} = 0 \text{ (то есть } \nabla(x^0) = 0);$$

2) Условия "дополняющей нежёсткости":

$$\lambda_i * g_i(x_1^0, \dots, x_m^0) = 0 \text{ (} i = \overline{1, m});$$

3) Условия неотрицательности:

$$\lambda_i \geq 0 \text{ (} i = \overline{1, m})$$

Доказательство:

Заметим, что в условиях К.-Т. множители Лагранжа $\lambda_1, \dots, \lambda_m$ являются "выключателями" делящих ограничений. Если, например, $\lambda_k = 0$, то ограничение $g_k \leq 0$ исключается из условий К.-Т., так как : 1) это ограничение

не входит в функцию Лагранжа (слагаемое $\lambda_k * g_k = 0$) и,??? не входит в условие 1; 2) условия 2 и 3 для этого ограничения выполняются автоматически

1. Необходимость

Пусть точка $x^0 = (x_1^0, \dots, x_n^0)$ - решение ЗВП, то есть $\min f(x_1, \dots, x_n) = f(x_1^0, \dots, x_n^0)$. Целевая функция "f" может достигать минимума внутри допустимой области или на её границе.

Пусть минимум достигается внутри области \Rightarrow в точке x^0 выполняются необходимые условия локального(безусловного экстремума функции "f"):

$$\frac{\partial f}{\partial x_1} = \dots = \frac{\partial f}{\partial x_n}$$

Это частный случай условия 1 К.-Т.(условия стационарности функции Лагранжа) при $\lambda_1 = \dots = \lambda_m = 0$ все ограничения выключены, так как 've безусловную оптимизацию)

Условия 2 и 3 при этом (при $\lambda_i = 0 (i = \overline{1, m})$) выполняются автоматически.

Пусть минимум достигается на границе допустимой области, то есть является условным extr функции "f" с активными ограничениями задачи для точки минимума точки x^0 . Необходимые условия условного extr (см. с. ???) ($\frac{\partial L}{\partial x_j} = 0; (\frac{\partial L}{\partial \lambda_j} = 0 (j = \overline{1, n}; i = \overline{1, m}))$) влекут за собой выполнение условий 1 и 2 К.-Т., если положительно равными нулю множит. Лагранжа для неактивных ограничений (так как реально они не входят в функцию Лагранжа).

Остаётся доказать, что выполняется 3 условие К.-Т. : $\lambda_i \geq 0 (i = \overline{1, m})$

Для наглядности ограничимся случаем двух переменных (n=2).

Уравнение $g(x_1, x_2)$ означает плоскую кривую, а неравенство $g(x_1, x_2) \leq 0$ - одну из частей плоскости, ограниченную этой кривой

Система ограничений

$$\begin{cases} g_1(x_1, x_2) \leq 0 \\ \dots \\ g_m(x_1, x_2) \leq 0 \end{cases}$$

задает криволинейный многоугольник, в каждой вершине которого пересекаются две кривые.

Минимум на границе допустимой области достигается либо на строке этого многоугольника, либо в его вершине₂₄

Пусть минимум - на стороне многоугольника \Rightarrow активным является только одно ограничение и только отвечающий ему множитель Лагранжа $\lambda_k \neq 0$.
Функция Лагранжа 've вид:

$$L = f(x_1, \dots, x_n) + \lambda_k * g_k(x_1, \dots, x_n),$$

где $g_k = 0$ - активное ограничение.

В точке минимума выполняются необходимые условия. Условия условного extr(см. с. ???):

$$\frac{\partial L}{\partial x_1} = \dots = \frac{\partial L}{\partial x_n} = \frac{\partial L}{\partial \lambda_k}$$

или

$$\begin{cases} \nabla L = \nabla f + \lambda_k * \nabla g_k = 0 \\ g_k = 0, \end{cases}$$

$$\Rightarrow \nabla f = -\lambda_k * \nabla g_k, (*)$$

то есть векторы ∇f и ∇g_k — коллинеарны

Функция $g_k < 0$ внутри допустимой области и $g_k > 0$ вне её \Rightarrow вектор ∇g_k направлен из допустимой области (в сторону возрастания функции " g_k ")

Значение функции " f " внутри допустимой области больше, чем в точке минимума $\Rightarrow \nabla f$ направлен внутрь допустимой области.

Таким образом, векторы ∇f и ∇g_k противоположны и в равенстве (*) коэффициенты коллинеарности $\lambda_k \leq 0 \Rightarrow \lambda_k \geq 0$, то есть условие 3 К.-Т. доказано для случая, когда минимум достигается на стороне допустимого многоугольника.

Можно показать, что условие 3 К.-Т. ($\lambda_i \geq 0 (i = \overline{1, m})$) выполняется и для случая, когда минимум достигается в вершине допустимого многоугольника.

Таким образом, необходимость К.-Т. доказана.

6 Лекция №6. Теорема Куна-Таккера(продолжение)

6.1 Доказательство теоремы Куна-Таккера

2. Достаточность

Пусть в точке $x^0 = (x_1^0, \dots, x_n^0)$ выполняются условия 1-3 теоремы Куна-Таккера.

Имеем выпуклые функции " f, g_1, \dots, g_m " и выпуклую допустимую область \Rightarrow

\Rightarrow Функция Лагранжа

$L = f + \lambda_1 g_1 + \dots + \lambda_m g_m$ ($\lambda_1 \geq 0, \dots, \lambda_m \geq 0$) также выпукла (см. св-во 2 выпуклых ф-ий)

Если в точке $x^0 = (x_1^0, \dots, x_n^0)$ выполняется условие 1 теоремы Куна-Таккера $\frac{\partial L}{\partial x_1} = \dots = \frac{\partial L}{\partial x_n} = 0$, (т.е. $\nabla L(x^0) = 0$) то эта точка - точка \min выпуклой функции Лагранжа " L " в допустимой области.

Обозначим $\min L(x) = L(x^0) = L^0 \Rightarrow L^0 \leq L$

Но вследствие условия 2 теоремы Куна-Таккера

$$\lambda_1 g_1^0 = \dots = \lambda_m g_m^0 = 0 \Rightarrow L^0 = f^0, f^0 \leq L$$

Кроме того, в допустимой области $g_1 \leq 0, \dots, g_m \leq 0$ и по условию 3 теоремы Куна-Таккера, $\lambda_1 \geq 0, \dots, \lambda_m \leq 0 \Rightarrow \lambda_1 g_1 = \dots = \lambda_m g_m \leq 0 \Rightarrow$

в допустимой области

$L = f + \lambda_1 g_1 + \dots + \lambda_m g_m \leq f \Rightarrow$ в допустимой области:

$f^0 \leq L \leq f$, т.е. $f^0 \leq f \Rightarrow \min f = f^0 = f(x^0)$, т.е. точка $x^0 = (x_1^0, \dots, x_n^0)$ - точка минимума (глобального) целевой функции в допустимой области. Т.

О. достаточность теоремы Куна-Таккера доказана.

ч и т.д.

6.2 Теорема Куна-Таккера (в "седловом" варианте)

Точка $x^0 = (x_1^0, \dots, x_n^0)$ является решением ЗВП (т.е. точкой глобального \min -а функции " f ") $\Leftrightarrow \exists$ неотрицательный вектор множителей Лагранжа

$\lambda^0 = (\lambda_1^0, \dots, \lambda_m^0)$ ($\lambda_i^0 \geq 0; i = \overline{1, m}$) такой, что для функции Лагранжа

$L = (x_1, \dots, x_n; \lambda_1, \dots, \lambda_m) = f(x_1, \dots, x_n) + \sum_{i=1}^m \lambda_i g_i(x_1, \dots, x_n)$ точка $(x^0; \lambda^0)$ является седловой точкой, т.е.

$$L(x^0, \lambda) \leq (x^0, \lambda^0) \leq L(x, \lambda^0) (*)$$

$\forall x \in$ допустимой области, $\lambda \geq 0$
(без доказательства)

Rem:

1. Из неравенства (*) следует, что точка - точка минимума функции, а точка - точка максимума функции по. Существование седловой точки означает равенство минимакса максимуму.
2. Можно показать, что необходимые и достаточные условия того, чтобы являлась седловой точкой функции Лагранжа, имеют вид:

Rem: 1. При доказательстве необходимости условий теоремы Куна-Таккера выпуклость функций и допустимой области не требовалась \Rightarrow условия Куна-Таккера являются необходимыми для произвольной (необязательно выпуклой) ЗМП.

2. Множители Лагранжа " λ_k " представляют собой "цену" ограничения " $g_k \leq 0$ ", т.е. чувствительность оптимального значения целевой функции " f^0 " к нарушению этого ограничения. В функции Лагранжа слагаемые " $\lambda_k g_k$ " представляет собой как бы "штраф" за нарушение ограничения " $g_k \leq 0$ ". Чем больше значение множителя Лагранжа " λ_k " и чем больше нарушено /-щее ограничение (т.е. стало " $g_k > 0$ "), тем больше величина этого "штрафа". На этой идее основан один из методов решения ЗМП - метод штрафных функций, который был рассмотрен ниже.

3. Условия теоремы Куна-Таккера представляют собой систему нелинейных (в общем случае) уравнений и неравенств, которая допускает лишь приближенное решение численными методами. Для решения ЗВП разработали специальные итерационные численные методы, которые заключаются в построении последовательных приближений к точке целевой функции в допустимой области. Критерием окончания итерационного процесса является достижение заданной точности вычислений. В результате определяются приближенные значения.

4. Точное решение ЗВП допускает в случае, когда и целевая функция и

все ограничения являются линейными функциями переменных (линейные функции являются выпуклыми в /-ии со свойством 1 выпуклых функций). Такая ЗВП называется задачей линейного программирования (ЗЛП).

6.3 Линейное программирование

7 Лекция №7. Название лекции

7.1

8 Лекция №8. Определение первоначального допустимого базисного решения. Особые случаи симплексного метода. Двойственные задачи линейного программирования.

8.1 Определение первоначального допустимого базисного решения

Базисные решения, получаемые на I шаге, не всегда являются допустимыми.

Рассмотрим один из алгоритмов получения допустимого базисного решения (ДБР):

1. Если в каждом уравнении дополнительная переменная и свободный член, стоящий в правой части, имеют одинаковые знаки, то дополнительные переменные берём в качестве базисных и при этом получаем ДБР.

2. Если хотя бы в одном уравнении дополнительная переменная и свободный член имеют противоположные знаки (и дополнительные переменные — в качестве базисных, то есть 1 базисное решение получается недопустимым), то в системе (1) (в которой базисные выражаются через свободные) рассмотрим \forall ур-е с отрицательным свободным членом и переводим в базисные \forall из свободных переменных, входящих в это уравнение с положительным коэффициентом.

Процедура повторяется до достижения ДБР. При этом (при возможности выбора) следует переводить из свободных в базисные ту свободную переменную, которая def-т в качестве разрешающего уравнения с отрицательным свободным членом. Только в этом случае новые базисные решения будут иметь меньше отрицательных компонент.

3. Если базисное решение недопустимое и в уравнениях с отрицательным свободным членом \nexists свободных переменных с положительным коэффициентом, то \nexists ДБР (то есть условия ЗЛП противоречивы).

ex:

$F = x_1 + x_2 \rightarrow \max$ при

$$\begin{cases} x_1 - x_2 \leq -1 \\ x_1 - x_2 \geq -3 \\ x_1 \leq 3 \\ x_1, x_2 \geq 0 \end{cases}$$

В каноническом виде

$$\begin{cases} x_1 - x_2 + x_3 & = -1 \\ x_1 - x_2 & - x_4 = -3 \\ x_1 & + x_5 = 3 \\ x_i \geq 0 \ (i = \overline{1,5}) \end{cases}$$

I шаг

В соответствии с правилом со стр. ??? в качестве базисных берём дополнительные переменные $\{x_3, x_4, x_5\}$; свободные - $\{x_1, x_2\}$. Базисные — через свободные:

$$\begin{cases} x_3 = \boxed{-1} - x_1 + x_2 \\ x_4 = \boxed{3} + x_1 - x_2 \\ x_5 = \boxed{3} - x_1 \end{cases}$$

\Rightarrow базисное решение $X_1 = (0; 0; -1; 3; 3)$ - не является допустимым, то есть оно \notin многоугольнику решений $\Rightarrow \nexists F(X_1)$

Уравнение с отрицательным свободным членом — 1-ое, в нём с положительным коэффициентом — " x_2 " \Rightarrow её в базисные (так как при этом будет увеличиваться " x_3 ")

Оценочные отношения \Rightarrow Наибольшее возможное значение: $x_2 = \min\{1; 3; \infty\} \Rightarrow$ 1-ое уравнение $\boxed{x_3 = -1 - x_1 + x_2}$ — разрешающее

II шаг

Базисные — $\{x_2; x_4; x_5\}$; свободные — $\{x_1, x_3\}$

$$\begin{cases} x_2 = \boxed{1} + x_1 + x_3 \\ x_4 = \boxed{3} + x_1 - (1 + x_1 + x_3) = 2 \\ x_5 = \boxed{3} - x_1 \end{cases}$$

\Rightarrow get ДБР: $X_2 = (0; 1; 0; 2; 3);$

$$F = x_1 + (1 + x_1 + x_3) = 1 + 2x_1 + x_3;$$

$$F(X_2) = 1 \neq F_{max}$$

\Rightarrow следующий шаг симплексного метода (так как в F есть положительные коэффициенты, а значит он не max)...₃₁

8.2 Взаимно двойственные задачи линейного программирования(ЗЛП), их свойства. Основное неравенство теории двойственности. Первая(основная) теорема двойственности. Вторая теорема двойственности.

8.2.1 Взаимно двойственные задачи ЛП и их свойства

∀ ЗЛП соответствует двойственная (сопряжённая) ей задача ЗЛП.

ex: (см стр. ??? об use-нии ресурсов):

Из ресурсов S_i ($i = \overline{1, m}$) с запасами b_i ($i = \overline{1, m}$) изготавливаются виды продукции P_j ($j = \overline{1, n}$) в количестве x_j ($j = \overline{1, n}$). Технологические коэффициенты — a_{ij} ($i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$) — число единиц ресурса S_i затративших на изготовление одной единицы продукции p_j . Прибыль(выручка) от реализации единицы продукции P_j — c_j , ($j = \overline{1, n}$) (то есть цена единицы продукции P_j).

Целевая функция:

$F = \sum_{j=1}^n c_j * x_j \rightarrow \max$ — прибыль от реализации всей продукции.

При ограничениях:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} * x_j \leq b_i, (i = \overline{1, m})$$

Пусть другая организация хочет купить у этого предприятия все ресурсы S_i ($i = \overline{1, m}$).

Целевая функция(для другой организации, так как они хотят купить как можно дешевле):

$Z = \sum_{i=1}^m b_i * y_i \rightarrow \min$ — затраты на покупку всех ресурсов по ценам " y_i ";

При ограничениях:

$Z = \sum_{i=1}^m a_{ij} * y_i \geq c_j, (j = \overline{1, n})$ — выручка продавца (предприятия) должна быть не менее той суммы, которую предприятие может получить при переработке ресурсов S_i в готовую продукцию P_j .

8.2.2 Экономико-математическая модель исходной и двойственной задач:

Задача I (исходная):

$$F = c_1x_1 + \dots + c_nx_n \rightarrow \max \quad (1)$$

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1 \\ \dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m \end{cases} \quad (2)$$

$$x_j \geq 0 \quad (j = \overline{1, n}) \quad (3)$$

Найти: план выпуска продукции $X = (x_1, \dots, x_n)$, прибыль от её реализации $F = F_{\max}$, при условии, что потребление ресурсов S_i не превзойдёт запасов b_i

Задача II (двойственная):

$$Z = b_1y_1 + \dots + b_ny_n \rightarrow \min \quad (4)$$

$$\begin{cases} a_{11}y_1 + a_{12}y_2 + \dots + a_{1n}y_n \geq c_1 \\ \dots \\ a_{m1}y_1 + a_{m2}y_2 + \dots + a_{mn}y_n \geq c_m \end{cases} \quad (5)$$

$$y_j \geq 0 \quad (j = \overline{1, m}) \quad (6)$$

Найти: набор цен(оценок ресурсов) $Y = (y_1, \dots, y_n)$, общие затраты на ресурсы $Z = Z_{\min}$, при условии, что затраты на ресурсы при производстве продукции P_j не менее прибыли от её реализации c_j

8.2.3 Свойства взаимно двойственных задач:

1. В одной задаче $\rightarrow \max$, в другой — $\rightarrow \min$
2. Коэффициенты целевой функции одной задачи — свободные члены системы ограничений другой задачи
3. Обе ЗЛП — в стандартной форме; в задаче \max -ции неравенства вида \leq — в \min -ции — \geq
4. Матрицы системы ограничений транспонированные друг к другу
5. Число неравенств системы ограничений одной задачи — число переменных другой задачи
6. В обеих задачах неотрицательные переменные

8.2.4 Алгоритм составления двойственной задачи

1. Все неравенства к одному виду: if $\max \rightarrow \leq$, if $\min \rightarrow \geq$
2. Составить расширенную матрицу исходной системы: дописываем $n+1$ столбец свободных членов, $m+1$ строка — строка коэффициентов целевой функции.
3. Транспонируем её
4. Формулируем двойственную задачу на основе этой матрицы.

Будет n ограничений, m переменных.

Последняя $n+1$ строка — бывшие коэффициенты свободных членов в исходной матрице. Они теперь являются коэффициентами целевой функции двойственной задачи (Z)

Столбец свободных членов $n+1$ в исходной задаче — матрица коэффициентов целевой функции F . Теперь это вектор свободных членов в системе ограничений для двойственной задачи.

ex:

Исходная ЗЛП:

$$F = -x_1 + 2x_2 \rightarrow \max$$
$$\begin{cases} 2x_1 - x_2 \geq 1 \\ -x_1 + 4x_2 \leq 24 \\ x_1 - x_2 \leq 3 \\ x_1 + x_2 \geq 5 \\ x_1 \geq 0; x_2 \geq 0 \end{cases} \Rightarrow m = 4; n = 2$$

Пункт №1. Приводим неравенства данной задачи \max -ции к виду " \leq "

$$\begin{cases} -2x_1 + x_2 \leq 1 \\ -x_1 + 4x_2 \leq 24 \\ x_1 - x_2 \leq 3 \\ -x_1 - x_2 \leq 5 \\ x_1 \geq 0; x_2 \geq 0 \end{cases}$$

Пункт №2. Составляем расширенную матрицу системы.

$$A = \left(\begin{array}{cc|c} -2 & 1 & -1 \\ -1 & 4 & 24 \\ 1 & -1 & 3 \\ -1 & -1 & -5 \\ \hline -1 & 2 & F \end{array} \right)$$

Пункт №3. Составляем расширенную матрицу двойственной задачи (Транспонировали предыдущую)

$$A' = \left(\begin{array}{cccc|c} -2 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 4 & -1 & -1 & 2 \\ \hline -1 & 24 & 3 & -5 & Z \end{array} \right)$$

Пункт №4. Двойственная ЗЛП:

$$z = -y_1 + 24y_2 + 3y_3 - 5y_4 \rightarrow \min;$$

при

$$\begin{cases} -2y_1 - y_2 + y_3 - y_4 \geq -1 \\ y_1 + 4y_2 - y_3 - y_4 \geq 2 \\ y_i, (i = \overline{1, 4}) \end{cases}$$

8.2.5 Теорема. Основное неравенство теории двойственности

Основное неравенство:

\forall пары допустимых решений исходной $X = (x_1, \dots, x_n)$ и двойственной $Y = (y_1, \dots, y_m)$ имеем:

$$F(X) \leq Z(Y), \text{ то есть } \sum_{j=1}^n c_j x_j \leq \sum_{i=1}^m b_i y_i$$

Доказательство:

Умножим каждое i -ое неравенство системы ограничений задачи I (2) на неотрицательную переменную $y_i (i = \overline{1, m})$ и сложим все неравенства, то есть:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \mid * y_i \Rightarrow \sum_{i=1}^m y_i * (\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j) \leq \sum_{i=1}^m b_i y_i \boxed{=Z(Y)}$$

Аналогично каждое "j" неравенство задачи II (5) — на $x_j (j = \overline{1, n})$ и сложим, то есть:

$$\sum_{i=1}^m a_{ij} y_i \geq c_j \mid * x_j \Rightarrow \sum_{j=1}^n x_j * (\sum_{i=1}^m a_{ij} y_i) \geq \sum_{j=1}^n c_j x_j \boxed{=F(X)}$$

Таким образом get-уем:

$$F(X) \leq \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j y_i \leq Z(Y)$$

то, что по центру это как раз и есть то общее, что было в предыдущих двух неравенствах ■

8.2.6 Теорема. Достаточный признак оптимальности:

if $X^* = (x_1^*, \dots, x_n^*), Y^* = (y_1^*)$ — допустимые решения взаимно-двойственных задач и

$$F(X^*) = Z(Y^*)(7) \Rightarrow$$

\Rightarrow then $X^* = X_{max}, Y^* = Y_{min}$ (то есть это оптимальные решения своих задач)

8.2.7 Первая(основная) теорема двойственности.

1. Если существует оптимальное решение одной из взаимно-двойственных задач \Rightarrow then \exists решение другой задачи и они равны:

$$F_{max} = Z_{min} \text{ or } F(X^*) = Z(Y^*)$$

2. if целевая функция одной из задач неограничена \Rightarrow then условия другой задачи противоречивы.

Доказательство:

1) Первая часть — без доказательства. Но, таким образом, равенство(7) — не только достаточный, но и необходимый признак оптимальности решений взаимно двойственных задач, то есть

$$F(X^*) = Z(Y^*) \Leftrightarrow X^* = X_{max}, Y^* = Y_{min}.$$

2) Вторая часть доказывается от противного.

Пусть $F_{max} = \infty$, а условия другой задачи не является противоречивыми, то есть \exists допустимое решение $Y = (y_1, \dots, y_m) \Rightarrow \forall X : F(X) \leq Z(Y) \Rightarrow \nexists$ допустимых решений Y . ■

ex:

I

$$F = 2x_1 + 3x_2 \rightarrow \max$$

$$\begin{cases} x_1 + 3x_2 \leq 18 \\ 2x_1 + x_2 \leq 16 \\ x_2 \leq 5 \\ 3x_1 \leq 21 \\ x_i \geq 0 (i = \overline{1, 2}) \end{cases}$$

II

$$Z = 18y_1 + 16y_2 + 5y_3 + 21y_4 \rightarrow \min$$

$$\begin{cases} y_1 + 2y_2 + 3y_4 \geq 2 \\ 3y_1 + y_2 + y_3 \geq 3 \\ y_i \geq 0 (i = \overline{1, 4}) \end{cases}$$

$F_{max} = 24$, значит можно сделать вывод о том, что $Z_{min} = 24$ и наоборот.

8.2.8 Экономический смысл первой(основной теоремы)

План производства $X^* = (x_1^*, \dots, x_n^*)$ и набор цен(оценок) ресурсов $Y^* = (y_1^*, \dots, y_m^*)$ оптимальны \Leftrightarrow прибыль(выручка) от продукции $F(X)$ равная затратам на ресурсы $Z(Y)$.

Для других планов X и Y прибыль (выручка) от продукции всегда меньше затрат на ресурсы.

Таким образом, предприятию безразлично либо

1) производить продукцию по оптимальному плану X^* , либо

2) продавать ресурсы по оптимальному плану Y^* и возместить от продажи равные F_{max} затраты на ресурсы Z_{min} .

8.2.9 Вторая теорема двойственности

Две взаимно двойственные ЗЛП характеризуются не только равенством оптимальных значений их целевых функций, а также взаимосвязью между первоначальными переменными одной из задач и дополнительными переменными другой задачи в их оптимальных ДБР X^* и Y^*

Рассмотрим взаимно двойственные задачи со стр. ??? . Для решения их симплексным методом они должны быть приведены к каноническому виду путем введения в систему ограничений дополнительных неотрицательных переменных:

Было $\dots \leq b_i$:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} * x_j + x_{n+i} = b_i, (i = \overline{1, m}) \quad (8)$$

Было $\dots \geq c_j$:

$$\sum_{i=1}^m a_{ij} * y_i - y_{m+j} = c_j, (j = \overline{1, n}) \quad (9)$$

Установим соответствие между переменными:

Первоначальные(исходной) — дополнительные(двойственной)

$$x_1 \leftrightarrow y_{m+1}$$

...

$$x_j \leftrightarrow y_{m+j}$$

...

$$x_n \leftrightarrow y_{m+n}$$

Теперь наоборот:

Дополнительные(исходной) — первоначальные(двойственной):

$$x_{n+1} \leftrightarrow y_1$$

...

$$x_{n+i} \leftrightarrow y_j$$

...

$$x_{n+m} \leftrightarrow y_m$$

8.2.10 Теорема

Положительным компонентам оптимального решения одной из задач соответствуют нулевые компоненты оптимального решения другой задачи, то есть:

$$if\ x_j^* > 0 \Rightarrow then\ y_{m+j}^* = 0;$$

$$if\ x_{n+i}^* > 0 \Rightarrow then\ y_i^* = 0;$$

Аналогично:

$$if\ y_i^* > 0 \Rightarrow then\ x_{n+i}^* = 0;$$

$$if\ y_{m+j}^* > 0 \Rightarrow then\ x_j^* = 0;$$

$$(i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n})$$

Доказательство:

Выразим дополнительные переменные:

$$x_{n+i} = b_i - \sum_{j=1}^n (a_{ij} x_j), (i = \overline{1, m}) (10)$$

$$y_{m+j} = -c_j + \sum_{i=1}^m (a_{ij} y_i), (j = \overline{1, n}) (11)$$

Каждое равенство системы (10) умнож. на $y_i \geq 0$ и складываем. Аналогично — каждое равенство системы (11) умножаем на $x_j \geq 0$ и складываем. Get:

$$\sum_{i=1}^m (x_{n+i} * y_i) = \sum_{i=1}^m (b_i * y_i) - \sum_{i=1}^m (\sum_{j=1}^n (a_{ij} x_j * y_i)), (i = \overline{1, m}) (12)$$

$$\sum_{j=1}^n (y_{m+j} * x_j) = \sum_{j=1}^n (-c_j * x_j) + \sum_{j=1}^n (\sum_{i=1}^m (a_{ij} y_i * x_j)), (j = \overline{1, n}) (13)$$

Равенства (12) и (13) верны \forall допустимых значений переменных, в том числе и для оптимальных значений. Но:

$$F(X^*) = Z(Y^*)$$

то есть

$$\sum_{j=1}^n c_j x_j^* = \sum_{i=1}^m b_i y_i^* \Rightarrow$$

\Rightarrow правые части (12) и (13) отличаются only знаком. Но: они — неотрицательны (в силу неотрицательных левых частей) \Rightarrow Обе правые части равны

$0 \Rightarrow$ обе левые части равны 0, то есть:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m (x_{n+i}^* * y_i^*) = 0 \\ \sum_{j=1}^n (y_{m+j}^* * x_j^*) = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} x_{n+i}^* * y_i^* = 0 \\ y_{m+j}^* * x_j^* = 0 \end{cases} \quad (i = \overline{1, m}); (j = \overline{1, n})$$

■

Вывод:

Введённое соответствие между переменными — это соответствие между базисными переменными (как правило, ненулевыми) переменными оптимального решения одной из двойственных задач и свободными переменными оптимального решения другой задачи.

Рассмотренная теорема — это следствие следующей теоремы:

8.2.11 Вторая теорема двойственности

Компоненты оптимального решения двойственной задачи равны абсолютным значениям коэффициентов при соответствующих переменных целевой функции другой задачи, выраженной через свободные члены его оптимального решения.

(без доказательства)

Rem:

if в одной из задач оптимальное решение не единственное \Rightarrow then в другой задаче оптимальное решение вырожденное.

Так как неединственность оптимального решения \equiv в целевой функции отсутствует одна из свободных переменных (её коэффициент=0) \Rightarrow в оптимальном решении другой задачи соответствующая ей базисная переменная = 0, то есть вырожденность оптимального решения.

Rem:

1. С помощью теорем двойственности М., решив симплексным методом исходную задачу, найти оптимум и оптимальные решения двойственной задачи.
2. Иногда удобнее наоборот: симплексным методом решается двойственная задача, а затем с помощью теорем двойственности находятся оптимум и оптимальные решения исходной задачи — так называется "двой-

ственный симплексный метод" (f.e.: когда в исходной задаче а) первоначальное базисное решение не является допустимым или б) число ограничений больше числа переменных — $m > n$ (то есть \exists линейная зависимость ограничения))

ex: см. стр ???

Соответствие между переменными:

Первоначальные(исходной) — дополнительные(двойственной)

$$x_1 \leftrightarrow y_5$$

$$x_2 \leftrightarrow y_6$$

Теперь наоборот:

Дополнительные(исходной) — первоначальные(двойственной):

$$x_3 \leftrightarrow y_1$$

$$x_4 \leftrightarrow y_2$$

$$x_5 \leftrightarrow y_3$$

$$x_6 \leftrightarrow y_4$$

$$(n=4, m=4)$$

Оптимальное решение для исходной задачи (см. стр. ???)

$$F = 24 - 4/5x_3 - 3/5x_4 - 0x_5 - 0x_6 - 0x_1 - 0x_2$$

$$X^* = (6; 4; 0; 0; 1; 3);$$

$$F(X^*) = F_{max} = 24.$$

Оптимальное решение для двойственной задачи (см. стр. ???)

$$Z = 24 + 6y_5 + 4y_6 + 0y_1 + 0y_2 + 1y_3 + 3y_4$$

$$Y^* = (4/5; 3/5; 0; 0; 0; 0);$$

$$Z(Y^*) = Z_{min} = 24.$$

ex: см. стр ???

I(исходная задача)

$$F = x_1 + 2x_2 \rightarrow \max$$

$$\begin{cases} -2x_1 + x_2 \leq -1 \\ x_1 - 4x_2 \geq -24 \\ x_1 - x_2 \leq 3 \\ x_1 + x_2 \geq 5 \\ x_1, x_2 \geq 0 \end{cases}$$

II(двойственная задача)

$$F = -y_1 + 24y_2 + 3y_3 - 5y_4 \rightarrow \min$$

$$\begin{cases} -2y_1 + y_2 + y_3 - y_4 \geq -1 \\ y_1 + 4y_2 \geq 2 \\ y_1, y_2, y_3, y_4 \geq 0 \end{cases}$$

Допустим, мы эту задачу решили, тогда можно показать, что решение исходной задачи имеет вид:

$$F = 10 - 2/7x_3 - 3/7x_4$$

$$F_{\max} = 10$$

$$X^* = (4; 7; 0; 0; 6; 6)$$

Тогда решение двойственной задачи:

Первоначальные(исходной) — дополнительные(двойственной)

$$x_1 \leftrightarrow y_5$$

$$x_2 \leftrightarrow y_6$$

Теперь наоборот:

Дополнительные(исходной) — первоначальные(двойственной):

$$x_3 \leftrightarrow y_1$$

$$x_4 \leftrightarrow y_2$$

$$x_5 \leftrightarrow y_3$$

$$x_6 \leftrightarrow y_4$$

$$Z_{min} = F_{max} = 10$$

$$F = 10 - 0x_1 - 0x_2 - 2/7x_3 - 3/7x_4 - 0x_5 - 0x_6 \Rightarrow \\ \Rightarrow Y^* = (2/7; 3/7; 0; 0; 0; 0).$$

9 Лекция №9. Название лекции

9.1

10 Словарик выражений

1. get-уем — получаем
2. \div — соответствует
3. 've — имеем
4. зча — задача
5. зчи — задачи
6. зч — задач
7. Мцы — матрицы
8. if — если
9. Т.О. — таким образом
10. opt-ные — оптимальные
11. then — тогда
12. смы — системы
13. М. — можно
14. max-я — максимизация
15. min-я — минимизация
16. реш-я — решения
17. def-уем — определяем
18. def-ся — определяется
19. def-ть — определить
20. the end — конец
21. \forall — для всех
22. \exists — существует
23. only — только

24. ■ — что и требовалось доказать

25. Rem — замечание

26. т.н. — так называется

27. f.e. — for example (например)