

# Множественный регрессионный анализ

**Обозначения:**  $y$  - отклик  $y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_k)$

$x_1, x_2, \dots, x_k$  - факторы - модель

$$y_{\text{набл}} = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_k) + \varepsilon$$

**МНК** – метод наименьших квадратов

$$\sum (y_{\text{набл}} - y_{\text{мод}})^2 \rightarrow \min$$

Требования:

- 1)  $M(\varepsilon_i) = 0$
- 2)  $D(\varepsilon_i) = \sigma_\varepsilon^2$
- 3)  $M(\varepsilon_i \varepsilon_j) = 0 \quad i \neq j$
- 4)  $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)_{i = \overline{1, n}}$

# Множественная линейная регрессия

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k$$

- линейная модель

$y_i$  -  $i$ -ое наблюдаемое значение отклика

$x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}$  -  $i$ -ые наблюдаемые значения факторов

$$i = \overline{1, n}$$

$$y_i = b_0 + b_1x_{i1} + b_2x_{i2} + \dots + b_kx_{ik} + \varepsilon_i$$

МНК:  $\sum \varepsilon_i^2 \rightarrow \min$

# Множественная линейная регрессия

Модель:  $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k$

$x_0 \equiv 1 \Rightarrow y = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k$

Наблюдения:

$$y_i = b_0x_{i0} + b_1x_{i1} + b_2x_{i2} + \dots + b_kx_{ik} + \varepsilon_i \quad i = \overline{1, n}$$

$$y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix} \quad X = \begin{pmatrix} x_{10} & x_{11} & \dots & x_{1k} \\ x_{20} & x_{21} & \dots & x_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n0} & x_{n1} & \dots & x_{nk} \end{pmatrix} \quad b = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \dots \\ b_k \end{pmatrix} \quad \varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \dots \\ \varepsilon_n \end{pmatrix}$$

$$(n \times 1)$$

$$(n \times (k + 1))$$

$$((k + 1) \times 1)$$

$$(n \times 1)$$

# Множественная линейная регрессия

$$y = Xb + \varepsilon$$

$$\text{МНК: } \sum \varepsilon_i^2 \rightarrow \min$$

$$Q(b) = \sum \varepsilon_i^2 = \varepsilon^T \cdot \varepsilon = \left| \begin{array}{l} \varepsilon^T = (\varepsilon_1 \quad \varepsilon_2 \quad \dots \quad \varepsilon_n)^T \\ \varepsilon = y - Xb \end{array} \right.$$

$$= (y - Xb)^T (y - Xb) =$$

$$= (y^T - b^T X^T)(y - Xb) =$$

$$= y^T y - b^T X^T y - y^T Xb + b^T X^T Xb$$

# Множественная линейная регрессия

$$y = Xb + \varepsilon$$

$$\text{МНК: } \sum \varepsilon_i^2 \rightarrow \min$$

$$Q(b) = \sum \varepsilon_i^2 = y^T y - b^T X^T y - y^T Xb + b^T X^T Xb$$

$$\nabla_b Q(b) = -X^T y - X^T y + X^T Xb + X^T Xb = 0$$

$$X^T Xb = X^T y$$

$$\boxed{b = (X^T X)^{-1} X^T y}$$

$$\nabla_b c = \left( \frac{\partial c}{\partial b_0}, \frac{\partial c}{\partial b_1}, \dots, \frac{\partial c}{\partial b_k} \right)^T \quad \left| \quad \begin{array}{l} \nabla_b (b^T A) = A \quad \nabla_b (Ab) = A^T \\ \nabla_b (b^T Ab) = Ab + A^T b \end{array} \right.$$

# Множественная линейная регрессия

$$X^T X b = X^T y \quad \text{- система нормальных уравнений}$$

$$X^T X = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ x_{11} & x_{21} & \dots & x_{n1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{1k} & x_{2k} & \dots & x_{nk} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{nk} \end{pmatrix}$$

$$X^T X = \begin{pmatrix} n & \sum x_{i1} & \dots & \sum x_{ik} \\ \sum x_{i1} & \sum x_{i1}^2 & \dots & \sum x_{i1} x_{ik} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum x_{ik} & \sum x_{i1} x_{ik} & \dots & \sum x_{ik}^2 \end{pmatrix}$$

# Множественная линейная регрессия

$$X^T X b = X^T y \quad \hat{b} = \left( X^T X \right)^{-1} X^T y$$

$$X^T X b = \begin{pmatrix} n & \sum x_{i1} & \dots & \sum x_{ik} \\ \sum x_{i1} & \sum x_{i1}^2 & \dots & \sum x_{i1} x_{ik} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum x_{ik} & \sum x_{i1} x_{ik} & \dots & \sum x_{ik}^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \dots \\ b_k \end{pmatrix}$$

$$X^T Y = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ x_{11} & x_{21} & \dots & x_{n1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{1k} & x_{2k} & \dots & x_{nk} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum y_i \\ \sum x_{i1} y_i \\ \dots \\ \sum x_{ik} y_i \end{pmatrix}$$

# Множественная линейная регрессия

$$X^T X b = X^T y \quad \hat{b} = \left( X^T X \right)^{-1} X^T y$$

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2$$

$$\begin{cases} nb_0 + b_1 \sum x_{i1} + b_2 \sum x_{i2} = \sum y_i \\ b_0 \sum x_{i1} + b_1 \sum x_{i1}^2 + b_2 \sum x_{i1} x_{i2} = \sum x_{i1} y_i \\ b_0 \sum x_{i2} + b_1 \sum x_{i1} x_{i2} + b_2 \sum x_{i2}^2 = \sum x_{i2} y_i \end{cases}$$



# Интервальные оценки

$$y = Xb + \varepsilon$$

$$\hat{b} = \left( X^T X \right)^{-1} X^T y$$

Оценка остаточной дисперсии

$$S_{\varepsilon}^2 = \frac{Q(\hat{b})}{n - (k + 1)}$$

$$S_{\varepsilon}^2 = \frac{1}{n - (k + 1)} \sum_{i=1}^n \left( y_i - \left( \hat{b}_0 + \hat{b}_1 x_{i1} + \dots + \hat{b}_k x_{ik} \right) \right)^2$$

$$b_i = \hat{b}_i \pm t_{табл} \cdot S_{\hat{b}_i} \quad S_{\hat{b}_i} = S_{\varepsilon} \cdot \sqrt{c_{ii}} \quad i = \overline{1, n}$$

$$t_{табл} = t \left( \frac{\alpha}{2}; n - (k + 1) \right) \quad C = \left( X^T X \right)^{-1}$$

# Множественная линейная регрессия

## Адекватность модели

$$y = Xb + \varepsilon$$

Оценка остаточной дисперсии

$$S_{\varepsilon}^2 = \frac{Q(\hat{b})}{n - (k + 1)}$$

$$S_{\varepsilon}^2 = \frac{1}{n - (k + 1)} \sum_{i=1}^n \left( y_i - \left( \hat{b}_0 + \hat{b}_1 x_{i1} + \dots + \hat{b}_k x_{ik} \right) \right)^2$$

Оценка общей дисперсии

$$S_y^2 = \frac{1}{n - 1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

$$H_0 : D_y = D_{\varepsilon}$$

$$H_1 : D_y > D_{\varepsilon}$$

$$\frac{S_y^2}{S_{\varepsilon}^2} \sim F(n-1; n-(k+1))$$

# Полиномиальная регрессия

$$y = b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 + \dots + b_kx^k$$

Замена:  $x \rightarrow x_1$   $x^2 \rightarrow x_2$   $\dots$   $x^k \rightarrow x_k$

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k$$

$$x_0 \equiv 1 \quad y = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k$$

В матричной форме  $y_{\text{мод}} = Xb$   $y_{\text{набл}} = Xb + \varepsilon$

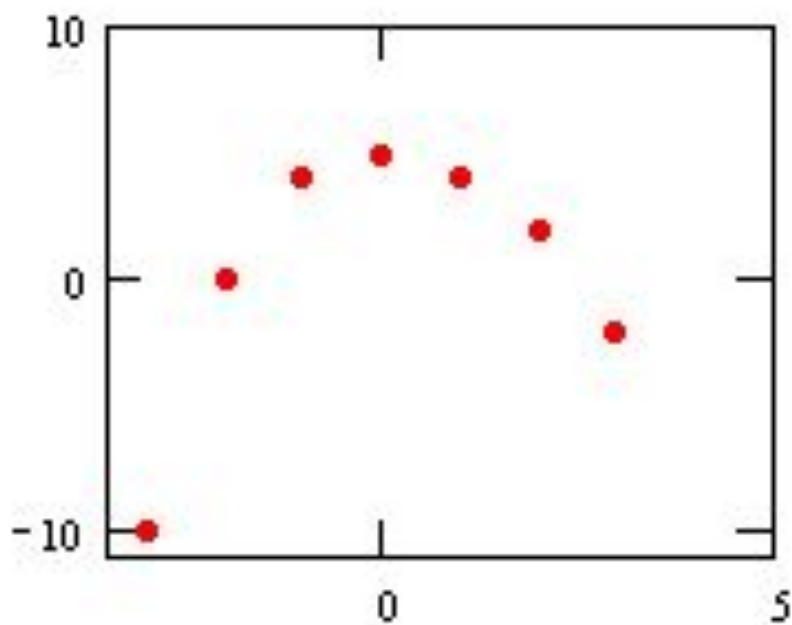
МНК:  $\sum \varepsilon_i^2 \rightarrow \min$

$$\hat{b} = \left( X^T X \right)^{-1} X^T y$$

# Полиномиальная регрессия

Пример. Найти оценки параметров модели, проверить ее адекватность  $y = b_0 + b_1x + b_2x^2$

$x$	-3	-2	-1	0	1	2	3
$y$	-10	0	4	5	4	2	-2



$$x \rightarrow x_1 \quad x^2 \rightarrow x_2$$

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$$

$$y = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2$$

$$(x_0 \equiv 1)$$

Пример  
(продолжение).

$x$	-3	-2	-1	0	1	2	3
$y$	-10	0	4	5	4	2	-2

Перейдем к  
матричной форме

$$y = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2$$

$$y = Xb + \varepsilon$$

$$y = \begin{pmatrix} -10 \\ 0 \\ 4 \\ 5 \\ 4 \\ 2 \\ -2 \end{pmatrix} \quad X = \begin{pmatrix} 1 & -3 & 9 \\ 1 & -2 & 4 \\ 1 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 4 \\ 1 & 3 & 9 \end{pmatrix}$$

$$\hat{b} = \left( X^T X \right)^{-1} X^T y$$

$$X^T X = \begin{pmatrix} 7 & 0 & 28 \\ 0 & 28 & 0 \\ 28 & 0 & 196 \end{pmatrix}$$

Пример

(продолжение).

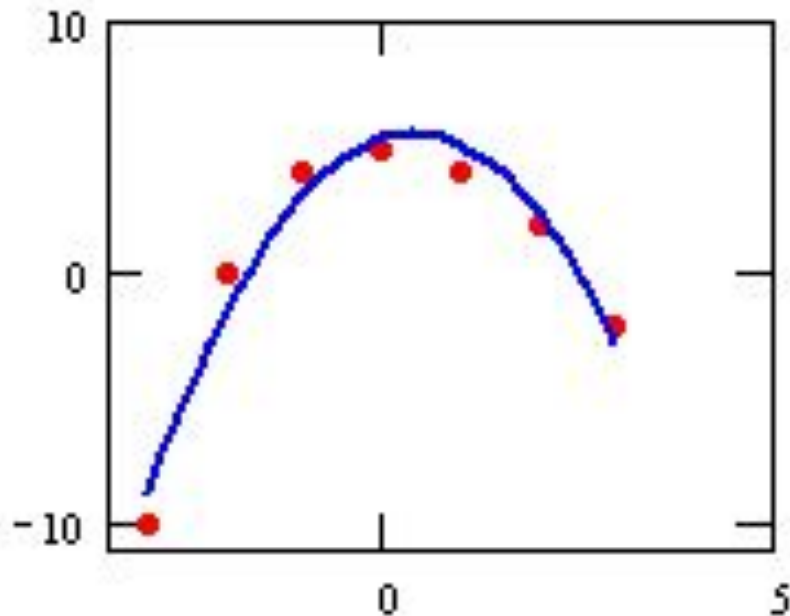
$$X^T X = \begin{pmatrix} 7 & 0 & 28 \\ 0 & 28 & 0 \\ 28 & 0 & 196 \end{pmatrix} \quad C = \left( X^T X \right)^{-1}$$

$$C = \begin{pmatrix} 0.33 & 0 & 0.05 \\ 0 & 0.04 & 0 \\ 0.05 & 0 & 0.01 \end{pmatrix}$$

$$\hat{b} = \left( X^T X \right)^{-1} X^T y$$

$$\hat{b} = \begin{pmatrix} 5.38 \\ 1 \\ -1.24 \end{pmatrix}$$

$$y = b_0 + b_1 x + b_2 x^2$$



$$y = 5.38 + x - 1.24x^2$$

Пример  
(продолжение)

## Интервальные оценки

$$y = 5.38 + x - 1.24x^2$$

$$b_i = \hat{b}_i \pm t_{табл} \cdot s_{\hat{b}_i}$$

$$s_{b_0} = 2.78 \cdot 1.3 \cdot \sqrt{0.33}$$

$$b_0 \in (3.29; 7.47)$$

$$s_{b_1} = 2.78 \cdot 1.3 \cdot \sqrt{0.04}$$

$$b_1 \in (0.31; 1.69)$$

$$s_{b_2} = 2.78 \cdot 1.3 \cdot \sqrt{0.01}$$

$$b_2 \in (-1.64; -0.84)$$

$$\hat{b} = (5.38 \quad 1 \quad -1.24)^T$$

$$C = \begin{pmatrix} 0.33 & 0 & 0.05 \\ 0 & 0.04 & 0 \\ 0.05 & 0 & 0.01 \end{pmatrix}$$

$$S_{\varepsilon}^2 = \frac{Q(\hat{b})}{n - (k + 1)}$$

$$S_{\varepsilon}^2 = \frac{6.78}{7 - (3)}$$

$$S_{\varepsilon}^2 = 1.695$$

$$S_{\varepsilon} = 1.3$$

$$t_{табл} = 2.78$$

$$\alpha = 0.05 \quad \nu = 4$$

Пример  
(продолжение)

## Адекватность модели

$$y = 5.38 + x - 1.24x^2$$

$$H_0: D_y = D_\varepsilon$$

$$H_1: D_y > D_\varepsilon$$

$$S_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

$$\frac{S_y^2}{S_\varepsilon^2} \sim F(n-1; n-(k+1))$$

Вывод: модель адекватна

$$S_\varepsilon^2 = \frac{Q(\hat{b})}{n - (k+1)}$$

$$S_\varepsilon^2 = \frac{6,78}{7 - (3)}$$

$$S_\varepsilon^2 = 1.695$$

$$S_y^2 = \frac{163.71}{7-1} = 27.285$$

$$F_{\text{набл}} = 16.09$$

$$F_{\text{табл}} = 6.16$$