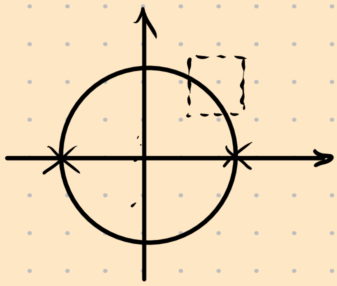
Глава XVIII

Неявные ф-ии и экстремумы ф-ий многих переменных

§1. Теорема о неявной ф-ии

$F(x,y)=0$

$x^2+y^2=1$ – не задаёт явной ф-ии



Теорема

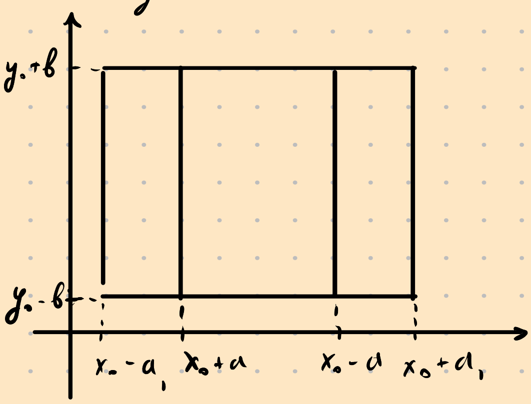
Пусть ф-ия 2-х переменных дифф. в $U(x,y)$. $F(x_0,y_0)$, $F'_y(x_0,y_0)\neq 0$. Тогда $\exists\, \Pi=\{x_0-a<x<x_0+a,\ y_0-b<y<y_0+b\}$ в к-ром ур-е $F(x,y)=0 \iff y=f(x)$.

· $f(x)$ непр. дифф. на $(x_0-a,\ x_0+a)$ и $f'(x)=-\dfrac{F'_x(x,f(x))}{F'_y(x,f(x))}$ на $(x_0-a,\ x_0+a)$

Д-во

① Не наруш. общ., $F'_y(x_0,y_0)>0$.

По лемме о сохр. знака, $\exists$ окр-ть (x_0,y_0) (в виде прямоуг. $\tilde{\Pi}=\{x_0-a_1\le x\le x_0+a_1,\ y_0-b\le y\le y_0+b\}$), причём такая, что $F'_y>0$ в $\tilde{\Pi}$.



$\varphi(y)=F(x_0,y)$

$\varphi(y_0)=0,\quad \varphi'_y=F'_y(x_0,y)>0,\ y\in[y_0-b,\ y_0+b]$

$\varphi(y)\uparrow$ строго

$\varphi(y_0+b)>0,\quad \varphi(y_0-b)<0 \Rightarrow$

$\Rightarrow F(x_0,y_0+b)>0$

$F(x_0,y_0-b)<0$

По лемме о сохр. знака (для F) $\exists A$: $\forall x\in(x_0-a,\ x_0+a)$ $\begin{cases}F(x,y_0-b)<0\\ F(x,y_0+b)>0\end{cases}$

Зафикс. $x^*\in[x_0-a,\ x_0+a]$

$\psi(y)=F(x^*,y)$

$\psi(y_0+b)>0,\quad \psi(y_0-b)<0$

По т. Б-К, $\exists\, y^*\in[y_0-b,\ y_0+b]:\ \psi(y^*)=0$

$\psi'(y)=F'_y(x^*,y)>0 \Rightarrow \psi(y)\uparrow$ строго $\Rightarrow$

$\Rightarrow$ Тогда: $\psi(y^*)=0$ - единств.

$\forall x^* \in [x_0-a, x_0+a]\ \exists!\ y^* \in [y_0-b, y_0+b]$

$F(x^*, y^*)=0$

$y^* = f(x^*)$ Первая ч. доказана

② Пусть $x \in [x_0-a, x_0+a]$, $y=f(x)$.

$F(x, y)=0$

Δx – приращ. x, Δy – соотв. приращ. y.

$F(x+\Delta x, y+\Delta y)=0$

По т. Лагранжа для ф-ии неск. пер-ых,

$0 = F(x+\Delta x, y+\Delta y) - F(x,y) = F'_x(x+\xi\Delta x, y+\xi\Delta y)\cdot\Delta x + F'_y(x+\xi\Delta x, y+\xi\Delta y)\Delta y,$

$\xi = \xi(\Delta x, \Delta y)$

$0<\xi<1$

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = -\frac{F'_x(x+\xi\Delta x, y+\xi\Delta y)}{F'_y(x+\xi\Delta x, y+\xi\Delta y)}$$

$\Pi = \{x_0-a < x < x_0+a,\ y_0-b < y < y_0+b\}$

$\bar{\Pi} = \{x_0-a \le x \le x_0+a,\ y_0-b \le y \le y_0+b\}$

$F(x,y)=0 \Leftrightarrow y=f(x)$ на $\bar{\Pi}$.

$\bar{\Pi}$ – компакт, т.е. $|F'_x| \le \alpha$ – огр.

$F'_y \ge \beta > 0$ – достиг. inf.

$\left|\frac{\Delta y}{\Delta x}\right| \le \frac{\alpha}{\beta} = M$

$|\Delta y| \le M|\Delta x|$

$y=f(x)$ огр. на $[x_0-a, x_0+a]$

$\lim\limits_{\Delta x\to 0}\Delta y = 0 \quad (\forall \varepsilon>0 \to \exists\delta = \frac{\varepsilon}{M}>0)$

Тогда f – равномерно непр. на (x_0-a, x_0+a).

По т. о суперпозиции непр. ф-ий

$\lim\limits_{\Delta x\to 0}\frac{\Delta y}{\Delta x} = -\frac{F'_x(x, f(x))}{F'_y(x, f(x))}$ – непр. ЧТД

Теорема (общая)

① Пусть ф-ия $n+1$ переменной $F(x_1, \dots, x_n, y)$ непр. дифф. в нек-рой окр-ти т. $(x_1^0, \dots, x_n^0, y^0)$, причём $F(x_1^0, \dots, x_n^0, y^0) = 0$, $F'(x_1^0, \dots, x_n^0, y) \neq 0$. Тогда $\exists$ параллелепипед в $\mathbb{R}^{n+1}$:

$\Pi = \{(x_1, \dots, x_n, y) : x_i^0 - a < x_i < x_i^0 + a, \ i = 1, \dots, n, \ \ y^0 - b < y < y^0 + b\}$,

в к-ром $F(x_1, \dots, x_n, y) = 0 \iff y = f(x_1, \dots, x_n)$.

② f непр. дифф. в $\Pi' = \{(x_1, \dots, x_n, y) : x_i^0 - a < x_i < x_i^0 + a, \ i = 1, \dots, n\}$, причём в Π'

$$f'_{x_i} = - \frac{F'_{x_i}(x_1, \dots, x_n, f)}{F'_y(x_1, \dots, x_n, f)}, \quad i = 1, \dots, n.$$

Д-во:

① Док. также, только $\bar{x} = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^{n+1}$.

② Отличается:

По т. Лагранжа для ф-ии многих пер.,

$$0 = F(x_1 + \Delta x_1, \dots, x_n + \Delta x_n, y + \Delta y) - F(x_1, \dots, x_n, y) =$$

$$= F'_{x_1}(x_1 + \xi \Delta x_1, \dots, x_n + \xi \Delta x_n, y + \xi \Delta y)\Delta x_1 + \dots +$$
$$F'_{x_n}(x_1 + \xi \Delta x_1, \dots, x_n + \xi \Delta x_n, y + \xi \Delta y)\Delta x_n +$$
$$F'_y(x_1 + \xi \Delta x_1, \dots, x_n + \xi \Delta x_n, y + \xi \Delta y)\Delta y$$

$$\Delta y = - \frac{F'_{x_1}\Delta x_1 + \dots + F'_{x_n}\Delta x_n}{F'_y} \leq \frac{(\alpha_1 + \dots + \alpha_n)}{\beta} = M\rho \quad (|F'_{x_i}| \leq \alpha_i, \ |F'_y| \geq \beta)$$

$y = f(x_1, \dots, x_n)$ равном. непр. на $\overline{\Pi}'$

$$\lim_{\Delta x_i \to 0} \Delta y = 0$$

Пусть $\Delta x_2 = \dots = \Delta x_n = 0$

$$\frac{\Delta y}{\Delta x_1} = - \frac{F'_{x_1}(x_1 + \xi \Delta x_1, x_2, \dots, x_n, y + \xi \Delta y)}{F'_y(x_1 + \xi \Delta x_1, x_2, \dots, y + \xi \Delta y)}, \text{ т.е.}$$

$$\lim_{\Delta x_1 \to 0} \frac{\Delta y}{\Delta x_1} = \dots = - \frac{\partial f}{\partial x_1},$$ аналог. для $x_2, \dots, x_n$.

ЧТД.

§ 2. Теорема о сис-ме неявных ф-ий

Отобр. $u = u(x)$, $u \in R^m$, $x \in R^n$

$$\begin{cases} u_1 = u_1(x_1, \dots, x_n) \\ \vdots \\ u_m = u_n(x_1, \dots, x_n) \end{cases} \quad \text{— дифф. ф-ии}$$

Матрица Якоби — $D_u = \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$, $\begin{matrix} 1 \le i \le m \\ 1 \le j \le m \end{matrix}$

Если она квадратная, то сущ-ет определитель — Якобиан.

$$J(x_1, \dots, x_n) = \frac{D(u_1, \dots, u_n)}{D(x_1, \dots, x_n)} = \det \left| \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right|$$

<u>Теорема</u> (о системе)

Пусть $F_i(x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_m)$ непр. дифф. ф-ии в окр-ти $(\bar{x}_0, \bar{y}_0) \in R^{n+m}$

$F_i(\bar{x}_0, \bar{y}_0) = 0$

$$\left. \frac{D(F_1, \dots, F_m)}{D(y_1, \dots, y_m)} \right|_{(\bar{x}_0, \bar{y}_0)} \neq 0.$$

Тогда $\exists \Pi = \{ x_i^0 - a_i < x_i < x_i^0 + a_i, \ y_j^0 - b < y_j < y_j^0 + b \} \subset R^{n+m}$

в к-ром $\begin{cases} F_1(\bar{x}, \bar{y}) = 0 \\ \vdots \\ F_m(\bar{x}, \bar{y}) = 0 \end{cases} \iff \bar{y} = f(\bar{x})$, причём ф-ии

$y_i = f_i(\bar{x})$, $i = 1 \dots m$ — непр. дифф. на $\Pi' = \{ x_i^0 - a_i < x_i < x_i^0 + a_i \}$

§ 3. Теорема об обратном отображении.

$\varphi : R^n \to R^m$, дифф.

$\bar{u} = \varphi(\bar{x})$

Было доказано: если $\varphi : R^n \to R^m$, $F : R^m \to R^p$, тогда

$D_{F \circ \varphi} = D_F \cdot D_\varphi$.

Если есть $\bar{x} \in R^n$, $\bar{y} \in R^m$, $\bar{y} = \varphi(\bar{x})$, то

$D_{F\varphi}|_{\bar x} = D_F|_{\bar y} \cdot D\varphi|_{\bar x}$

Пусть $n = m = p$, тогда

$J_{F\varphi}|_{\bar x} = J_F|_{\bar y} \cdot J_\varphi|_{\bar x}$

Обратное отобр.:

$\Phi: G \to D \qquad G, D \subset \mathbb{R}^n$

$\Phi^{-1}: D \to D$

$\Phi\Phi^{-1} = \Phi^{-1}\Phi$ – тождественное отобр.

$J_{\Phi^{-1}} = J_\Phi^{-1}$ – если оба дифф.!

Если отобр. биективно и дифф., то обратное не обязано быть дифф.!

$n=1$:

$y = x^3$ – биект., дифф.

обратное недифф. в т. 0.

Биективность отобр.

$\not\Downarrow \quad \not\Uparrow$

$J \neq 0$

Опред.

Отобр. Φ – локально обратимо в обл-ти G, если $\forall \bar x_0 \in G \to \exists \delta > 0$: Φ обратимо в $U_\delta(\bar x_0)$.

Теорема об обратном отобр-ии

Пусть $\Phi: G \to \mathbb{R}^n$ непр. дифф. и $J_\Phi \neq 0$ в G ($G \subset \mathbb{R}^n$). Тогда Φ локально обратимо:

$\forall x_0 \in G \to \exists \Phi^{-1}$ – непр. дифф. обр. отобр. в $y_0 = \Phi(x_0)$.

Д-во:

Рас-им $F_j(y, x) = \Phi_j(x_1, \dots, x_n) - y_j$, $j = 1 \dots n$

$(y, x) \in \mathbb{R}^{2n}$

Оно непр. дифф. $\forall (y, x) \in \mathbb{R}^{2n}$ таких, что $x \in G$, $y \in \mathbb{R}^n$

$\frac{\partial F_j}{\partial x_i} = \frac{\partial \Phi_j}{\partial x_i}$, $i, j = 1 \dots n$

$$\frac{D(F_1, \dots, F_n)}{D(x_1, \dots, x_n)} = \frac{D(\Phi_1, \dots, \Phi_n)}{D(x_1, \dots, x_n)} \neq 0 \quad \forall (y_0, x_0)$$

По т. о сис-ме неявных ф-ий $\exists \Pi = \{(y, x) \in \mathbb{R}^{2n} : y_i^0 - a_i < y_i < y_i^0 + a_i,\ x_i^0 - b_i < x_i < x_i^0 + b_i\}$

в к-рой

$y_j = \Phi_j(x_1, ..., x_n) \Leftrightarrow F_j(y_1, ..., y_n, x_1, ..., x_n) = 0 \Leftrightarrow x_j = f_j(y_1, ..., y_n)$

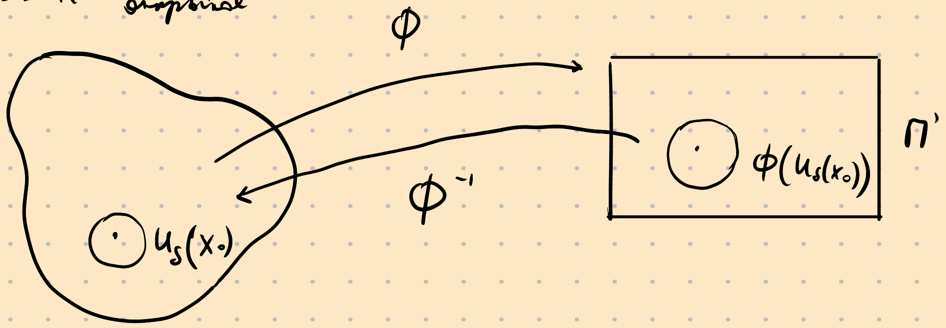
F_i непр. дифф. на $\Pi' = \{ y_i^0 - a_i < y_i < y_i^0 + a_i \} \in \mathbb{R}^n \Rightarrow$

$\Rightarrow \Phi$ биективно отображает нек-е мн-во $X \subset \mathbb{R}^n$ на Π'.

$X = \Phi^{-1}(\Pi')$

Π' - откр. мн-во, полный прообраз откр. мн-ва при непр. отоб. есть откр. мн-во $\Rightarrow$

$\Rightarrow X$ - открытое



$X = \Phi^{-1}(\Pi')$

$\forall x_0 \in X \to \exists \delta > 0 : U_\delta(x_0) \in X$

$\forall x_0 \in X \to \exists U_\delta(x_0)$ в к-рой отобр. яв-ся обратимым. ЧТД

§4. Экстремумы ф-ий нескольких переменных

Опр-е

$x^0 \in \mathbb{R}^n$ наз-ся точкой макс. локального экстремума ф-ии $y = f(x_1, ..., x_n) \Leftrightarrow$

$\Leftrightarrow \exists \delta > 0 : f(x)$ опред. в $U_\delta(x^0)$ и $\forall x \in \overset{\circ}{U}_\delta(x_0) \to f(x) > f(x_0)$

Аналогично для мин. лок. экстр.

Необходимое ус. локального экстремума

Если $f(x)$ дифф. в x^0 и x^0 яв-ся т. лок. экстр., то $df(x^0) = 0 \Leftrightarrow$

$\Leftrightarrow \frac{\partial f}{\partial x_1}(x^0) = ... = \frac{\partial f}{\partial x_n}(x_0) = 0$ (стационарные точки)

Д-во:

Рас-им ф-ию $\varphi(x_1) = f(x_1, x_2^0, ..., x_n^0)$.

Ясно, что x_1^0 - лок. экстремум того же типа. Тогда

$\frac{d\varphi}{dx_1}(x_1^0) = 0 \Rightarrow \frac{\partial f}{\partial x_1}(x^0) = 0$ Аналогично дальше

ЧТД

$$K(x) = \sum_{i=1}^{n} b_i x_i^2 + 2\sum_{\substack{i=1 \\ j\neq i}}^{n} b_{ij} x_i x_j$$

Положит. опред.: $\forall x \neq 0 \to K(x) > 0$

Отриц. опред.: $\forall x \neq 0 \to K(x) < 0$

Неопред.: $\exists x_1, x_2 : K(x_1) > 0, K(x_2) < 0$

Положит. полуопред.: $\forall x \to K(x) \geq 0, \exists x \neq 0 : K(x) = 0$

Отриц. полуопред.: $\forall x \to K(x) \leq 0, \exists x \neq 0 : K(x) = 0$

Если $K(x) \equiv 0$, то она положит. и отриц. полуопред., больше пересечений типов нет.

Пусть f дважды непр. дифф. в $G \in \mathbb{R}^n$, т.е. имеет все непр. частные произв. второго порядка, при этом ч.п. в разном порядке совп. $(f''_{yx} = f''_{xy})$

$$d^2 f(x^0) = \sum_{i=1}^{n} f''_{x_i x_i}(x^0)\, dx_i^2 + 2\sum_{\substack{i=1 \\ j\neq i}}^{n} f''_{x_i x_j}(x^0)\, dx_i dx_j$$ – кв. форма от вектора $(dx_1, \dots, dx_n)$

Достаточное усл-е локального экстремума

Пусть $f(x)$ дважды непр. дифф. в $U_\delta(x^0)$ и x^0 – стац. точка. Тогда $K(x) = d^2 f(x^0)$ – кв. форма. Тогда:

1. если $K(x)$ положит. определена, то x^0 – т. строгого лок. максимума
2. если $K(x)$ отриц. опред., то x^0 – т. строгого лок. минимума
3. если $K(x)$ неопред., то x^0 не яв-ся т. лок. экстремума.
4. если $K(x)$ полуопред., то нужно доп. исследование.

Лемма

Пусть $K(x)$ в $\mathbb{R}^n$ положит. опред., тогда $\exists C > 0 : \forall x \in \mathbb{R}^n \to K(x) \geq C|x|^2$

Если отриц. опред., то $\exists C > 0 : \forall x \in \mathbb{R}^n \to K(x) \leq -C|x|^2$

Д-во 1 пункта:

Заметим, что $K(x)$ можно определить в точечном $\mathbb{R}^n$, т.е. $K(x)$ – значение на векторе с такими же координатами.

$K(x_1, \dots, x_n)$ – непр. на $\mathbb{R}^n$.

$S = \{x_1^2 + \dots + x_n^2 = 1\}$ – огр. и замкнутое. – компакт

Тогда ф-ия, непр. на компакте, достигает inf на S.

$K(x) > 0$ на $S \Rightarrow \inf\limits_S K = C > 0$.

$\forall x \in S \to K(x) \geq C$.

Пусть $x \neq 0 \in R^n$. Рас-им $z = \frac{x}{|x|}$ $\equiv 1 \Rightarrow K(z) \geq C$

$K\left(\frac{x}{|x|}\right) = \frac{1}{|x|^2} K(x) \geq C$

$K(x) \geq C|x|^2$ ЧТД

Д-во теоремы

1. $f(x)$ дважды непр. диффер в $U_\delta(x^0) \Rightarrow$ применим ф-лу Тейлора (Пеано):

$\forall x \in U_\delta(x^0) \to f(x) = f(x^0) + df(x^0) + \frac{1}{2} d^2 f(x^0) + o(\rho^2)$, $\rho^2 = dx_1^2 + \ldots + dx_n^2 = |dx|^2$

$df \equiv 0$ – т. стац.

$d^2 f$ – полож. опред.

Т.е. $f(x) \geq f(x_0) + \frac{1}{2} C|dx|^2 + o(|dx|^2) =$ | $dx \to (0, \ldots, 0)$ $\lim\limits_{dx \to (0,\ldots,0)} \varepsilon(dx) = 0$

$= f(x^0) + \frac{C}{2}|dx|^2 + \varepsilon(dx) \cdot |dx|^2 =$

$= f(x^0) + |dx|^2 \cdot \left(\frac{C}{2} + \varepsilon(dx)\right)$

$\frac{C}{2} + \varepsilon(dx) > 0$ в $U_\delta(x^0) \Rightarrow f(x) \geq f(x^0)$ $\forall x \in U_\delta(x^0)$.

Т.е. x^0 – т. строгого лок. минимума.

2. Аналогично

3. $d^2 f(x^0)$ – неопр. кв. форма.

$\exists z \neq 0 : K(z) > 0$.

Рас-им вектор приращения $dx = \lambda z$, $\lambda \neq 0$ (приращ. $\parallel z$).

$d^2 f = K(dx) = \lambda^2 K(z) = \lambda^2 \frac{K(z)}{|z|^2} |z|^2$

$\beta > 0$

$f(x) = f(x^0) + df(x^0) + \frac{1}{2} d^2 f(x^0) + \varepsilon(dx) \cdot |dx|^2 = f(x^0) + \frac{1}{2}\beta |z|^2 + \varepsilon(dx)\lambda^2 z^2 =$

$= f(x^0) + \frac{1}{2}\beta + \varepsilon(dx)\lambda^2 z^2$

$\frac{1}{2}\beta + \varepsilon(dx)\lambda^2 z^2 > 0$ при дост. малых $\varepsilon(dx)$

Т.е. $f(x) > f(x^0)$ на $x \parallel z$

$\exists z' \neq 0 : K(z') < 0$

Аналогично если $dx = \lambda z'$, то при достаточно малых $\varepsilon(dx)$ $f(x) < f(x^0)$.

x^0 – не т. лок. экстремума.

Пример: $z = x^4 + y^4$, $z'_x = 4x^3$, $z'_y = 4y^3$, стац. т. $(0,0)$, $z''_x = 12x^2$, $z''_y = 12y^2$, $z''_{xy} = 0$, $d^2 z(0,0) = 0$.

Надо смотреть $\Delta z(0,0)$: $z(\Delta x, \Delta y) - z(0,0) > 0$ если $\Delta x^2 + \Delta y^2 > 0$ – лок. мин.

§ 5. Условный (относительный) экстремум

$z = xy$ (седло)

$z_x' = y, \quad z_y' = x \qquad$ (ст. т. $(0,0)$)

$z''_{xx} = z''_{yy} = 0, \quad z''_{xy} = 1$

$d^2 z$ – неопр. кв. ф. – нелок. экстр.

При усл. $x + y = 1$: $z = x(1-x)$, лок. макс. в $\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)$.

<u>Опр</u>

Т. x^0 наз-ют т. строгого условного минимума ф-ии $u = f(x_1, \dots, x_n)$ при выполнении условий связи $\varphi_1(x) = 0, \dots, \varphi_m(x) = 0$, если $\exists \delta > 0$: $\forall x \in \mathring{U}_\delta(x^0)$ при вып. усл. связи $\to f(x) > f(x^0)$

Если из усл. связи можно явно выразить одни переменные через другие, то возникнет задача на обычный экстремум ф-ии меньшего числа переменных.

А если нет, то применяется ф-ия Лагранжа.

Пусть $\lambda_1, \dots, \lambda_m \in \mathbb{R}^m$, тогда ф-ия Лагранжа $\mathcal{L}(x_1, \dots, x_n) = f(x_1, \dots, x_n) + \lambda_1 \varphi_1(x_1, \dots, x_n) + \dots + \lambda_m \varphi_m(x)$

При вып. усл-я связи $\mathcal{L} = f$, $\forall \lambda_i$. – усл. экстр. f и $\mathcal{L}$ совпадают.

Необходимые усл-ия относ. экстремума

Пусть $f(x)$, $\varphi_i(x)$ $(i = 1 \dots n)$ непр. дифф. в $U_\delta(x^0)$. Пусть x^0 – т. относ. экстремума $f(x)$ при $\varphi_i(x) = 0$, причём $rg\left(\frac{\partial \varphi_i}{\partial x_j}\right)_{\substack{i = 1 \dots m \\ j = 1 \dots n}} = m$ (градиенты ф-ий φ_i линейно независимы).

Тогда $\exists \lambda_1, \dots, \lambda_m$: x^0 – т. обычного экстремума $\mathcal{L}(x)$.

Необх. решить сис-му $\begin{cases} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_1} = \dots = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_n} = 0 \\ \varphi_1 = \dots = \varphi_m = 0 \end{cases}$ – сис-ма $n+m$ ур-ий с $n+m$ неизв. $(x_1, \dots, x_n, \lambda_1, \dots, \lambda_m)$.

Д-во:

$$\Phi = \begin{pmatrix} \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial \varphi_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial \varphi_m}{\partial x_n} \end{pmatrix}^{m \times n}, \quad rg\,\Phi = m, \quad x^0 = (x_1^0, \dots, x_n^0)$$

$\exists$ минор порядка $n \neq 0$. Для опр-ти 1-й минор:

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_n} \\ & \dots & \\ \frac{\partial \varphi_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial \varphi_m}{\partial x_m} \end{vmatrix} \neq 0 \qquad \frac{D(\varphi_1, \dots, \varphi_m)}{D(x_1, \dots, x_n)} \neq 0 \text{ в т. } x^0 \Rightarrow \text{ в } U_\delta(x^0) \text{ в силу непр.}$$

$$\begin{cases} \varphi_1(x_1, \dots, x_m, x_{m+1}, \dots, x_n) = 0 \\ \dots \\ \varphi_m(x_1, \dots, x_m, x_{m+1}, \dots, x_n) = 0 \end{cases}$$

По т. о неявной ф-ии $\exists$ окр-ть x^0, в к-рой сис-ма эквивалентна усл. связи:

$$* \begin{cases} x_1 = g_1(x_{m+1}, \dots, x_n) \\ \dots \\ x_m = g_m(x_{m+1}, \dots, x_m) \end{cases}$$

$x_{m+1}, \dots, x_n$ – незав. ф-ии

$x_1, \dots, x_m$ – зависимые

Ф-ия g_i непр. дифф. в окр-ти $\tilde{x}^0 = (x^0_{m+1}, \dots, x^0_n)$. Продифф. усл. связи:

$$** \begin{cases} dx_1 = \frac{\partial g_1}{\partial x_{m+1}} dx_1 + \dots + \frac{\partial g_1}{\partial x_n} dx_n \\ \dots \\ dx_m = \frac{\partial g_m}{\partial x_{m+1}} dx_1 + \dots + \frac{\partial g_m}{\partial x_n} dx_n \end{cases}$$

$dx_1, \dots, dx_m$ – зав. дифф-лы

$dx_{m+1}, \dots, dx_n$ – незав. дифф-лы

При выполнении усл-ий связи для $f(x)$:

$$f(x)\big|_* = f(g_1(x_{m+1}, \dots, x_n), \dots, g_m(x_{m+1}, \dots, x_n), x_{m+1}, \dots, x_n) = f_0(\tilde{x})$$

$$\mathcal{L}(x)\big|_* = \mathcal{L}(g_1(x_{m+1}, \dots, x_n), \dots, g_m(x_{m+1}, \dots, x_n), x_{m+1}, \dots, x_n) = \mathcal{L}_0(\tilde{x})$$

$$\mathcal{L}(x)\big|_* = f(x)\big|_* \quad \forall \lambda_i$$

$$\mathcal{L}_0(\tilde{x}) = f_0(\tilde{x}) \quad \forall \lambda_i$$

$d\mathcal{L}(\tilde{x}^0) = df_0(\tilde{x}^0) = 0$ (т.к. это точка относ. экстремума) $\forall \lambda_i$

В силу инвариантности дифф-ла относ. замены переменной:

$$d\mathcal{L}_0(\tilde{x}^0) = d\left(\mathcal{L}(x)\big|_*\right) \underset{\text{инвариантность формы}}{=} d\mathcal{L}(x)\big|_{**}$$ – дифф-ал ф-ии n переменных

(дифф-ал ф-ии $n-m$ пер-ых)

$$d\mathcal{L}(x)\big|_{**} = \underbrace{\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_1} dx_1 + \dots + \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_m} dx_m}_{\text{зависим.}} + \underbrace{\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_{m+1}} dx_{m+1} + \dots + \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_n} dx_n}_{\text{независ.}}$$

До сих пор λ_i – произв. Подберём λ_i так, что $\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_1}(x^0) = \dots = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_m}(x^0) = 0$.

$$\mathcal{L} = f + \lambda_1 \varphi_1 + \dots + \lambda_m \varphi_m$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_1} = \begin{cases} \frac{\partial f}{\partial x_1}(x^0) + \lambda_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_1}(x^0) + \dots + \lambda_m \frac{\partial \varphi_m}{\partial x_1}(x^0) = 0 \\ \dots \\ \frac{\partial f}{\partial x_m}(x^0) + \lambda_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_m}(x^0) + \dots + \lambda_m \frac{\partial \varphi_m}{\partial x_m}(x^0) = 0 \end{cases}$$

– сис-ма лин. ур-ий, её опред.:

$$\Delta = \frac{D(\varphi_1, \dots, \varphi_m)}{D(x_1, \dots, x_m)}\Big|_{x^0} \neq 0 \Rightarrow \exists! \text{ реш-е}$$

λ_i найдены.

При найд. λ_i:

$$d\mathcal{L}_0(\tilde{x}^0) = \underbrace{\frac{\partial \mathcal{L}_1}{\partial x_1}(x^0)dx_1}_{=0} + \ldots + \underbrace{\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_m}(x^0)dx_m}_{=0} + \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_{m+1}}(x^0)dx_{m+1} + \ldots + \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_n}(x^0)dx_n$$

Но $\left.\begin{array}{l} d\mathcal{L}_0(\tilde{x}^0) = 0 \\ dx_{m+1}, \ldots, dx_n \text{ - произв.} \end{array}\right\} \Rightarrow \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_{m+1}}(x^0) = \ldots = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_n}(x^0) = 0 \Rightarrow$ при найд. λ_i x^0 - стац. т. ф-ии Лагранжа.

ЧТД.

Для проверки необх. усл-я относ. экстремума нужно решить сис-му:

$$(\mathrm{I}) \begin{cases} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_1} = \ldots = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_n} = 0 \\ \varphi_1 = \ldots = \varphi_m = 0 \end{cases}$$

$n+m$ ур-ий, $n+m$ неизв.

Достаточное условие относительного экстремума

Пусть $f(x)$, $\varphi_i(x)$, $i=1,\ldots,m<n$ - дважды непр. дифф. ф-ия в окр-ти x^0, причём ранг матрицы Якоби $\left(\frac{\partial \varphi_i}{\partial x_j}\right)_{\substack{i=1..m \\ j=1..n}}$ равен m в т. x^0.

Пусть коор-ты x^0 и λ_i, $i=1\ldots n$ удовл. сис-ме (I). Тогда в т. x^0 рас-ивается квадр. форма $d^2\mathcal{L}(x^0)\Big|_{**}$ - кв. форма от $n-m$ незав. дифф. (обозначение те же, что и в док-ве пред. теоремы).

Тогда если эта форма положит. опред., то x^0 - т. строгого усл. минимума f при вып. (*)

отриц. опред., то x^0 - т. строгого усл. максимума f

неопред., то x^0 - не яв-ся т. относ. экстремума.

Примечание Если $d^2\mathcal{L}(x^0)$ - полож. или отриц. опред. форма n дифф-ов (до подстановки), то после подстановки (**) она такой останется.

Иначе нужно делать подстановку (**).

Если после подстановки (**) форма полуопред., нужно доп. исследование.

Пример: $f = xy$ при усл. $x+y=1$

$\mathcal{L} = xy + \lambda(x+y-1)$

$$\begin{cases} \mathcal{L}'_x = y + \lambda = 0 \\ \mathcal{L}'_y = x + \lambda = 0 \end{cases} \Rightarrow \lambda = -\frac{1}{2},\quad x = y = \frac{1}{2}$$

$L''_{x}=0$, $\quad L''_{y}=0$ $\qquad d^2 L = 2dx\,dy$ – неопр. кв. форма от dx, dy

Продифф. ур. связи: $dx + dy = 0 \Rightarrow dy = -dx$

$d^2 L|_{x^*} = -2dx^2$ – отриц. опред. кв. форма от одного dx

Значит $\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)$ – усл. минимума.

Справка $d^2 f$ не обл-ет инв. формой относ. замены переменных:

$f = f(x_1, \dots, x_n)$ – дважды непр. дифф.

$$d^2 f = d(df) = d\left(\sum_{k=1}^{n} \frac{\partial f}{\partial x_k} dx_k\right) = \sum_{k=1}^{n} \frac{\partial f}{\partial x_k} d(dx_k) + \sum_{k=1}^{n} dx_k\, d\left(\frac{\partial f}{\partial x_k}\right) =$$

$$= \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial f}{\partial x_k} d^2 x_k + \sum_{k=1}^{n} dx_k \left(\sum_{j=1}^{n} \frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_k} dx_j\right) = \sum_{k,j=1}^{n} \frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_k} dx_k dx_j + \sum_{k=1}^{n} \frac{\partial f}{\partial x_k} d^2 x_k$$

Если $x_1, \dots, x_n$ – незав. переменные, то $d^2 x_k = 0$

$$d^2 f = \sum_{j,k=1}^{n} \frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_k} dx_j dx_k = \sum_{k=1}^{n} \frac{\partial^2 f}{\partial x_k^2} dx_k + 2\sum_{\substack{j,k=1 \\ j<k}}^{n} \frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_k} dx_j dx_k$$

Эта запись имеет место также в том случае, если $\frac{\partial f}{\partial x_k} = 0$ в нек-ой т.

(в стац. т.) – **квазиинвариантность формы $d^2 f$ относ. замены пер-ных в стац. точке**

Д-во

Сохраняем все выводы и обозн-я пред. теоремы.

Докажем, что $\begin{matrix} x_1 = g_1(x_{m+1}, \dots, x_n) \\ \dots \\ x_m = g_m(x_{m+1}, \dots, x_n) \end{matrix}$ – дважды непр. дифф. в окр-ти $\tilde{x}^0$

$\varphi_i(g_1(x_{m+1}, \dots, x_n), \dots, g_m(x_{m+1}, \dots, x_n), x_{m+1}, \dots, x_n) = 0 \quad (i = 1 \dots m)$

Продифф. рав-во по x_j:

$$\frac{\partial \varphi_i}{\partial g_1} \cdot \frac{\partial g_1}{\partial x_j} + \dots + \frac{\partial \varphi_i}{\partial g_m} \cdot \frac{\partial g_m}{\partial x_j} + \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_j} = 0, \quad i = 1 \dots m$$

При фикс. j, $m+1 \le j \le n$ – это сис-ма m лин. ур-ий с m незав. $\frac{\partial g_i}{\partial x_j}$.

$\Delta = \frac{D(\varphi_1, \dots, \varphi_m)}{D(x_1, \dots, x_m)} \ne 0$ в окр-ти $\tilde{x}^0$

Выраж. $\frac{\partial g_i}{\partial x_j}$ через $\frac{\partial \varphi_i}{\partial x_k}$, знамен. $\ne 0$

$\frac{\partial \varphi_i}{\partial x_k}$ непр. дифф. $\Rightarrow$ $\frac{\partial g_i}{\partial x_j}$ непр. дифф. $\Rightarrow$ g_i – дважды непр. дифф. $\Rightarrow$

$\Rightarrow$ можно писать d^2 с соотв. ур-ями

В силу квазиинв-ти формы $d^2 L(x^0)$ (все $\frac{\partial L}{\partial x_i}(x^0) = 0$)

$d^2 \mathcal{L}(x^0) = \sum\limits_{j,k=1}^{n} \dfrac{\partial^2 \mathcal{L}(x^0)}{\partial x_j \partial x_k} dx_j dx_k$ (незав. от того, яв-ся $dx_j dx_k$ дифф-лами незав. переменных или дифф-лами ф-ий).

$\mathcal{L}(x)\big|_* = \mathcal{L}_0(\tilde{x}^0)$

в силу эквивалентн.

$d^2 \mathcal{L}_0(\tilde{x}^0) = d^2\left(\mathcal{L}(x^0)\big|_*\right) = d^2 \mathcal{L}(x^0)\big|_{**}$

второй дифф. ф-ии n-m пер-ых — второй дифф. ф-ии n перем-ых

$\parallel$

$d^2 f(\tilde{x}^0)$

$df_0(\tilde{x}^0) = d\mathcal{L}_0(\tilde{x}^0) = d\mathcal{L}(x^0)\big|_{**} = 0$ (в силу сис-мы I) $\Rightarrow \tilde{x}^0$ - стац. т. $f_0(\tilde{x}^0)$

Характер экстремума в этой т. опред. кв. формой

$d^2 f_0(\tilde{x}^0) = d^2 \mathcal{L}(x^0)\big|_{**}$

Характер экстремума опред. знакоопр. этой формы.

ЧТД

Глава XIX

Кратные интегралы

§1. Определение. Критерий интегрируемости Дарбу.

Пусть G - измеримое мн-во, $G \subset R^n$, $G \neq \varnothing$.

R - разбиение G на произв. изм. мн-ва G_i: $G = \bigcup\limits_{i=1}^{N} G_i$

$\forall i \neq j \to \mu(G_i \cap G_j) = 0$

Мелкость разбиения $|R| = \max\limits_{i=1\ldots N} \operatorname{diam} G_i$

Считаем, что $f(x)$ опр. на G. Рас-им $M_i = \sup\limits_{G_i} f(x)$, $m_i = \inf\limits_{G_i} f(x)$

Опр-е

Верхняя и нижняя суммы Дарбу:

$$S^*_R = \sum_{i=1}^{N} M_i \, \mu G_i \qquad S_{*R} = \sum_{i=1}^{R} m_i \, \mu G_i$$

Сумма Римана

$\forall i = 1 \ldots N \to \xi_i \in G_i$

$$\sigma_R = \sum_{i=1}^{N} f(\xi_i) \, \mu G_i$$

Для фикс. R_N: $S_{*R} \leq \sigma_R \leq S^*_R$

Колебания ф-ии

$$\omega_R = S^*_R - S_{*R} = \sum_{i=1}^{N} \omega_i \, \mu G_i, \quad \omega_i = M_i - m_i$$

Разбиение R_2 следует за R_1 $(R_2 \geqslant R_1)$ <=>

$R_1: G = \bigcup\limits_{i=1}^{N_1} G_i$ $\qquad \forall G_i$ - объединение нескольких из G_j

$R_2: G = \bigcup\limits_{j=1}^{N_2} G_j$

Утв

Если $R_2 \geqslant R_1$, то

$$S^*_{R_2} \leq S^*_{R_1}, \quad S_{*R_2} \geq S_{*R_1}, \quad \omega_{R_2} \leq \omega_{R_1}.$$