Пример. $\langle a, b \rangle \quad f : \langle a, b \rangle \to \mathbb{R}$

$\forall n \in \mathbb{N} x^n$ — непрерывно

Любой многочлен непрерывен, выражение вида

$$\frac{a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \ldots + a_0}{b_m x^m + b_{m-1} x^{m-1} + \ldots + b_0}$$

тоже непрерывно на области определения.

Теорема 1. О непрерывности композиции $f : D \subset X \to Y \quad g : E \subset Y \to Z \quad f(D) \subset E$

f — непр. в $x_0 \in D$, g — непр. в $f(x_0)$

Тогда $g \circ f$ непр. в x_0

Доказательство. По Гейне.

Проверяем, что $\forall (x_n) : x_n \in D, x_n \to x_0 \quad g(f(x_n)) \overset{?}{\to} g(f(x_0))$

$y_n := f(x_n) \xrightarrow[n \to +\infty]{} f(x_0)$

$y_n \in E$

$\Rightarrow g(y_n) \to g(y_0)$ □

Примечание. $f(x) = x \sin \frac{1}{x}$

$g(x) = |sign(x)|$

$x \to 0 \;\; f(x) \to 0$

$y \to 0 \;\; g(y) \to 1$

$x \to 0 \;\; g(f(x)) \to 1?$ — неверно

Но: $x_n = \frac{1}{\pi n} \to 0 \;\; f(x_n) = 0 \;\; g(f(x_n)) \to 0$

Теорема 2. О пределе композиции

$f : D \subset X \to Y \quad g : E \subset Y \to Z \quad f(D) \subset E$

a — предельн. точка $D \quad f(x) \xrightarrow[x \to a]{} A$

A — предельн. точка $E \quad g(y) \xrightarrow[y \to A]{} B$

$\exists V(a) \quad \forall x \in \dot{V}(a) \cap D \quad f(x) \neq A \quad (*)$

Тогда $g(f(x)) \xrightarrow[x \to a]{} B$

Доказательство. По Гейне.

Проверяем, что $\forall (x_n) : \substack{x_n \in D \\ x_n \to a \\ x_n \neq a} \quad g(f(x_n)) \xrightarrow{?} B$

$y_n := f(x_n) \xrightarrow[n \to +\infty]{} A$

$y_n \in E$

При больших $N \quad y_n \in V(a) \Rightarrow y_n \neq A$

$\Rightarrow g(y_n) \to B$ □

Примечание. Вместо $(*)$ можно рассмотреть условие $A \in E \quad g$ — непр. в A.

Теорема 3. Топологическое определение непрерывности

$f : X \to Y$ — непр. на $X \Leftrightarrow \forall G \subset Y$, откр. $f^{-1}(G)$ — откр. в X.

Доказательство. "$\Rightarrow$" $x_0 \in f^{-1}(G) \quad ?\exists V(x_0) \subset f^{-1}(G)$

f — непр. в $x_0 \quad \forall U(f(x_0)) \quad W(x_0) \quad \forall x \in W \quad f(x) \in U$

$f(x_0) \in G$ — откр. $\Rightarrow \exists U_1(f(x_0)) \subset G$

Для $U_1 \quad \exists W(x_0) : x \in W \quad f(x) \in U_1 \subset G$

$W(x_0) \subset f^{-1}(G)$

"$\Leftarrow$" $x_0 \in X$? непр. f в x_0

$\forall U(f(x_0)) \quad \exists W(x_0) \quad \forall x \in W \quad \forall f(x) \in U$ — надо проверить

$U(f(x_0))$ — откр. $\Rightarrow$ $f^{-1}(U(f(x_0)))$ — откр., а $x_0 \in f^{-1}(U(f(x_0)))$, значит $\exists W(x_0) \subset f^{-1}(U(f(x_0)))$

Для любого $x \in W(x_0)$ будет выполняться $f(x) \in U(f(x_0))$ □

Примечание. $f : [0, 2] \to \mathbb{R}$

$f(x) = x$

$f^{-1}((1, +\infty)) = (1, 2]$ — открыто в $[0, 2]$

Теорема 4. Вейерштрасса о непрерывном образе компакта. $f : X \to Y$ — непр. на X

Если X — комп., то $f(X)$ — комп.

Лемма 1. $A \subset \mathbb{R}, A$ — ограничено и замкнуто $\Rightarrow \sup A \in A$

Доказательство. По техническому описанию $\sup A$ если $\sup A \notin A \Rightarrow \sup A$ — предельная точка A.

Для $\varepsilon = \frac{1}{n} \quad \exists x_n \in A : \sup A - \frac{1}{n} < x_n \leq \sup A$, т.е. $x_n \to \sup A$ □

Доказательство. $?f(X)$ — комп.

$f(X) \subset \bigcup G_\alpha \quad G_\alpha$ — откр. в Y.

$X \subset \bigcup f^{-1}(G_\alpha)$ — откр. т.к. f — непр. $\xRightarrow[X\text{ — комп.}]{}$

$$\exists \alpha_1 \dots \alpha_n \quad X \subset \bigcup_{i=1}^{n} f^{-1}(G_{\alpha_i}) \Rightarrow f(X) \subset \bigcup_{i=1}^{n} G_{\alpha_i}$$

□

Следствие 4.1. Непрерывный образ компакта замкнут и ограничен.

Следствие 4.2. *(1-я теорема Вейерштрасса)*

$f : [a, b] \to \mathbb{R}$ — непр.

Тогда f — огр.

Следствие 4.3. $f : X \to \mathbb{R}$

X — комп., f — непр. на X

Тогда $\exists \max\limits_X f, \min\limits_X f$

$\exists x_0, x_1 : \forall x \in X \quad f(x_0) \le f(x) \le f(x_1)$

Следствие 4.4. $f : [a, b] \to \mathbb{R}$ — непр.

$\exists \max f, \min f$

1 O-символика

Определение. $f, g : D \subset X \to \mathbb{R}\ \ x_0$ — пр. точка D

Если $\exists V(x_0)\ \ \exists \varphi : V(x_0) \cap D \to \mathbb{R} \quad f(x) = g(x)\varphi(x)$ при $x \in V(x_0) \cap D$

1. φ — ограничена. Тогда говорят $f = O(g)$ при $x \to x_0$

   “f **ограничена** по сравнению с g при $x \to x_0$”

2. $\varphi(x) \xrightarrow[x \to x_0]{} 0 \quad f$ — **беск. малая** по отношению к g при $x \to x_0$, $f = o(g)$

3. $\varphi(x) \xrightarrow[x \to x_0]{} 1 \quad f$ **и** g **экв.** при $x \to x_0 \quad f \underset{x \to x_0}{\sim} g$

$g, f : D \subset X \to \mathbb{R}$

Определение. $\exists c > 0\ \ \forall x \in D\ \ f = O(g)\ \ |f(x)| < c|g(x)|$ — f **ограничена** по сравнению с g на множестве D.

Определение. В условиях прошлых определений $f = O(g), g = O(f) \Leftrightarrow f \asymp g$ — асимптотически сравнимы на множестве D, "величины одного порядка".

Примечание. Первое определение $\Leftrightarrow f = O(g)$ на $V(x_0) \cap D$ в смысле второго определения $\Leftrightarrow \frac{f}{g}$ — огр. на $V(x_0) \cap D$ *(если* $g \neq 0$*)*

Второе определение $\underset{g \neq 0}{\Longleftrightarrow} \frac{f}{g} \to 0$

Третье определение $\frac{f}{g} \to 1$ *(если* $g \neq 0$*)*

Следствие 4.5. 1. $f \sim g, x \to x_0 \Leftrightarrow f = g + o(g), x \to x_0 \Leftrightarrow f = g + o(f), x \to x_0$

Доказательство.

$$\frac{f}{g} \to 1, x \to x_0$$
$$\frac{f(x)}{g(x)} = 1 + \alpha(x)$$
$$\alpha(x) \xrightarrow[x \to 0]{} 0$$
$$f(x) = g(x) + \alpha(x)g(x) = g(x) + o(x)$$

□

Аналогично для $\frac{g}{f} = 1$.

2. $f = o(g) \Rightarrow f = O(g)$

Доказательство. $f(x) = \alpha(x)g(x) \quad \alpha(x) = 0 \Rightarrow \alpha(x)$ — огр. □

3. $\alpha \neq 0 \quad f \underset{x \to x_0}{\sim} \alpha g$. Тогда $f \asymp g, x \to x_0$

Доказательство.

$$\varepsilon := \frac{\alpha}{2} \quad \exists V(x_0) \quad \forall x \in V(x_0) \cap D \quad \frac{\alpha}{2} < \frac{f(x)}{g(x)} < \frac{3}{2}\alpha$$

□

Пример. 1.

$$\frac{\sin x}{x} \xrightarrow[x \to 0]{} 1 \quad \sin x = x + o(x), x \to 0$$

2.

$$\frac{1 - \cos x}{x^2} \xrightarrow[x \to 0]{} \frac{1}{2} \quad \cos x = 1 - \frac{x^2}{2} + o(x^2)$$
$$\frac{1 - \cos x}{x^2} = \frac{1}{2} + o(\frac{1}{2}), x \to 0$$
$$\cos x = 1 - \frac{1}{2}x^2 + x^2 o(\frac{1}{2})$$

3.
$$\frac{e^x - 1}{x} \xrightarrow[x \to 0]{} 1 \quad e^x = 1 + x + o(x)$$

4.
$$\frac{\ln(1+x)}{x} \xrightarrow[x \to 0]{} 1 \quad \ln(1+x) = x + o(x)$$

5.
$$(1+x)^\alpha = 1 + \alpha o(x), x \to 0$$

Пример. Таблица эквивалентных для $x \to 0$:

$$\begin{aligned}
\sin x &\sim x \\
\operatorname{sh} x &\sim x \\
\operatorname{tg} x &\sim x \\
\operatorname{arctg} x &\sim x \\
1 - \cos x &\sim \frac{x^2}{2} \\
\operatorname{ch} x - 1 &\sim \frac{x^2}{2} \\
e^x - 1 &\sim x \\
\ln(1+x) &\sim x \\
(1+x)^\alpha - 1 &\sim \alpha x \\
a^x - 1 &\sim x \ln a
\end{aligned}$$

Теорема 5. $f, \tilde{f}, g, \tilde{g} : D \subset X \to \mathbb{R}$

x_0 — предельная точка D

$f \sim \tilde{f}, g \sim \tilde{g}$ при $x \to x_0$

Тогда
$$\lim_{x \to x_0} f(x)g(x) = \lim_{x \to x_0} \tilde{f}(x)\tilde{g}(x)$$
, т.е. если $\exists$ один из пределов, то $\exists$ и второй и имеет место равенство
$$\lim_{x \to x_0} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{x \to x_0} \frac{\tilde{f}(x)}{\tilde{g}(x)}$$
, если x_0 лежит в области определения $\frac{f}{g}$

Доказательство.
$$f(x)g(x) = \tilde{f}(x)\tilde{g}(x)\frac{f}{\tilde{f}}\frac{g}{\tilde{g}} \to \tilde{f}(x)\tilde{g}(x) \cdot 1 \cdot 1$$
□

Примечание. В условиях теоремы $\lim\limits_{x \to x_0} f + g \neq \lim\limits_{x \to x_0} (\tilde{f} + \tilde{g})$

1.1 Асимптотическое разложение

Определение. $g_n : D \subset X \to \mathbb{R} \quad x_0$ – пред. точка D

$\forall n \quad g_{n+1}(x) = o(g_n), x \to x_0$

Пример. $g_n(x) = x^n, n = 0, 1, 2 \ldots \quad x \to 0 \quad g_{n+1} = xg_n, x \to 0$

(g_n) называется **шкала асимптотического разложения**.

$f : D \to \mathbb{R}$

Если $f(x) = c_0g_0(x) + c_1g_1(x) + \ldots + c_ng_n(x) + o(g_n)$, то это асимптотическое разложение f по шкале (g_n)

Теорема 6. О единственности асимптотического разложения

$f, g_n : D \subset X \to \mathbb{R} \quad x_0$ – предельная точка D

$\forall n \;\; g_{n+1} = o(g_n), x \to x_0$

$\exists U(x_0) \;\; \forall x \in \dot{U}(x_0) \cap D \;\; \forall i \;\; g_i(x) \neq 0$

Если $f(x) = c_0g_0(x) + \ldots + c_ng_n(x) + o(g_n(x))$

$f(x) = d_0g_0(x) + \ldots + d_mg_m(x) + o(g_m(x))$

$]n \leq m$

Тогда $\forall i \;\; c_i = d_i$

Доказательство. $k := min\{i : c_i \neq d_i\}$

$$f(x) = c_0g_0 + \ldots + c_{k-1}g_{k-1} + c_kg_k + o(g_k)$$

$$f(x) = c_0g_0 + \ldots + c_{k-1}g_{k-1} + d_kg_k + o(g_k)$$

$$0 = (c_k - d_k)g_k + o(g_k)$$

$$d_k - c_k = \frac{o(g_k)}{g_k(x)} \xrightarrow[x \to x_0]{} 0$$

$\square$

Пример. Пусть $f(x) = Ax + B + o(1), x \to +\infty$

Прямая $y = Ax + B$ — наклонная асимптота к графику f при $x \to +\infty$