

Теорема Ферма (необходимое условие существования локального экстремума).

Теоремы о среднем Ролля, Лагранжа, Коши.

Следствия из теоремы Лагранжа о среднем об
отсутствии разрывов первого рода у
производной дифференцируемой функции.

Теорема Дарбу о промежуточных значениях
производной. Формула Тейлора с остаточным
членом в формах Пеано и Лагранжа. Основные
разложения по формуле Тейлора. Правило
Лопиталя для раскрытия неопределенностей
вида $\frac{0}{0}$. Правило Лопиталя для раскрытия
неопределенностей вида $\frac{\infty}{\infty}$.

1 Теоремы о среднем

Определение 1.1 (Локальный максимум). Пусть $f: X \rightarrow \mathbb{R}$, $X \subset \mathbb{R}$, $X \neq \emptyset$, $x_0 \in X$. Будем говорить, что x_0 — точка нестрогого (строгого) локального максимума функции f , если $\exists \delta_0 > 0$:

$$\begin{aligned} f(x) &\leq f(x_0) \quad \forall x \in U_{\delta_0}(x_0) \cap X \\ \left(f(x) &< f(x_0) \quad \forall x \in \overset{\circ}{U}_{\delta_0}(x_0) \cap X \right) \end{aligned}$$

Определение 1.2 (Локальный минимум). Пусть $f: X \rightarrow \mathbb{R}$, $X \subset \mathbb{R}$, $X \neq \emptyset$, $x_0 \in X$. Будем говорить, что x_0 — точка нестрогого (строгого) локального минимума функции f , если $\exists \delta_0 > 0$:

$$\begin{aligned} f(x_0) &\leq f(x) \quad \forall x \in U_{\delta_0}(x_0) \cap X \\ \left(f(x_0) &< f(x) \quad \forall x \in \overset{\circ}{U}_{\delta_0}(x_0) \cap X \right) \end{aligned}$$

Определение 1.3 (Локальный экстремум). Пусть $f: X \rightarrow \mathbb{R}$, $X \subset \mathbb{R}$, $X \neq \emptyset$, $x_0 \in X$. Будем говорить, что x_0 — точка (строгого) локального экстремума функции f , если x_0 является точкой (строгого) локального максимума или точкой (строгого) локального минимума функции f .

Теорема 1.1 (Теорема Ферма). Пусть f определена в $U_{\delta_0}(x_0)$ и дифференцируема в точке x_0 . Если x_0 — точка локального экстремума функции f , то $f'(x_0) = 0$.

Доказательство. Докажем для случая локального максимума, так как в случае локального минимума доказательство аналогично. По определению локального максимума:

$$f(x) \leq f(x_0) \quad \forall x \in U_{\delta}(x_0)$$

Заметим, что при $x \in \overset{\circ}{U}_{\delta}^+(x_0)$ выполнено $x > x_0$, а значит, пользуясь полученным выше неравенством, получим:

$$\forall x \in \overset{\circ}{U}_{\delta}^+(x_0) \hookrightarrow \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} \leq 0$$

Тогда по теореме о предельном переходе в неравенстве:

$$\lim_{x \rightarrow x_0 + 0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} \leq 0$$

Но функция f дифференцируема в точке x_0 , а значит $\exists f'(x_0)$. Следовательно, существуют односторонние производные, откуда:

$$f'_+(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0 + 0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} \leq 0$$

По аналогии рассмотрев $x \in \overset{\circ}{U}_{\delta}^-(x_0)$ и знак того же выражения при этих x , а затем совершив предельных переход, получим:

$$f'_-(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0 - 0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} \geq 0$$

Но в силу существования $f'(x_0)$ получаем, что:

$$f'_+(x_0) = f'_-(x_0) = f'(x_0)$$

Значит

$$\begin{cases} f'(x_0) \geq 0 \\ f'(x_0) \leq 0 \end{cases} \implies f'(x_0) = 0$$

□

Определение 1.4. Множество функций, дифференцируемых в каждой точке числового множества X , будем обозначать $DIF(X)$.

Теорема 1.2 (Теорема Ролля). Пусть $f \in C([a, b])$, $f \in DIF((a, b))$ и $f(a) = f(b)$. Тогда:

$$\exists \xi \in (a, b) : f'(\xi) = 0$$

Доказательство. Пусть $f \equiv \text{const}$. Тогда в качестве ξ подойдёт любая точка интервала (a, b) .

Пусть $f \neq \text{const}$. Тогда в силу непрерывности на $[a, b]$ по теореме Вейерштрасса получаем, что f достигает своего максимума и минимума на $[a, b]$. Так как $f \neq \text{const}$, то $\exists \xi \in (a, b)$, которая является точкой локального экстремума f , и при этом $f(\xi) \neq f(a)$ (минимум и максимум не могут совпасть). Тогда по теореме Ферма $f'(\xi) = 0$, что и требовалось. \square

Теорема 1.3 (Теорема Коши о среднем). Пусть $f, g \in C([a, b])$, $f, g \in DIF((a, b))$. Пусть также $g'(x) \neq 0 \forall x \in (a, b)$. Тогда:

$$\exists \xi \in (a, b) : \frac{f(b) - f(a)}{g(b) - g(a)} = \frac{f'(\xi)}{g'(\xi)}$$

Замечание 1.1. Заметим, что $g(b) \neq g(a)$. Действительно, если бы от противного $g(b) = g(a)$, то для функции g справедлива теорема Ролля, а значит найдется точка из интервала (a, b) , в которой производная функции g равна 0, что невозможно в силу требования $g'(x) \neq 0 \forall x \in (a, b)$.

Доказательство. Положим

$$k = \frac{f(b) - f(a)}{g(b) - g(a)}$$

Рассмотрим функцию $h(x) = f(x) - kg(x)$. Ясно, что h непрерывна на $[a, b]$ и дифференцируема на (a, b) как разность непрерывных на $[a, b]$ и дифференцируемых на (a, b) функций. При этом:

$$h(b) - h(a) = (f(b) - kg(b)) - (f(a) - kg(a)) = (f(b) - f(a)) - k(g(b) - g(a))$$

Подставив в равенство выше значение k , получим, что $h(b) - h(a) = 0$, то есть $h(a) = h(b)$. Тогда по теореме Ролля для функции h имеем:

$$\exists \xi \in (a, b) : h'(\xi) = 0$$

Но

$$0 = h'(\xi) = f'(\xi) - kg'(\xi)$$

Значит окончательно получаем:

$$k = \frac{f'(\xi)}{g'(\xi)}$$

Вспомнив, чему равно k по определению, осознаём, что требуемое доказано. \square

Теорема 1.4 (Теорема Лагранжа о среднем). Пусть $f \in C([a, b])$, $f \in DIF((a, b))$. Тогда

$$\exists \xi \in (a, b) : f(b) - f(a) = f'(\xi)(b - a)$$

Доказательство. Пусть $g(x) = x$. Легко видеть, что $g \in C([a, b])$, $g \in DIF((a, b))$ и $\forall x \in (a, b) \hookrightarrow g'(x) = 1 \neq 0$. Тогда применим теорему Коши о среднем для функций f и g . Получим:

$$\exists \xi \in (a, b) : \frac{f(b) - f(a)}{b - a} = \frac{f'(\xi)}{1}$$

Несложно видеть, что получили требуемое. \square

2 Следствия из теорем о среднем

Теорема 2.1. Пусть $f \in C([a, b])$, $f \in DIF((a, b))$. Пусть также

$$\exists \lim_{x \rightarrow a+0} f'(x) \in \overline{\mathbb{R}}$$

Тогда

$$\exists f'_+(a) = \lim_{x \rightarrow a+0} f'(x)$$

Аналогичное утверждение справедливо и для левосторонней производной f в точке b .

Доказательство. По определению правосторонней производной:

$$f'_+(a) = \lim_{x \rightarrow a+0} \frac{f(x) - f(a)}{x - a}$$

Тогда $\forall x \in (a, b)$ применим теорему Лагранжа о среднем для функции f на отрезке $[a, x] \subset [a, b]$. Получим:

$$\exists \xi(x) \in (a, x) : \frac{f(x) - f(a)}{x - a} = f'(\xi(x))$$

При этом заметим, что $\forall x \in (a, b) \hookrightarrow \xi(x) \in (a, x)$, а значит $\xi(x) \neq a \forall x \in (a, b)$, то есть $\forall x \in (a, b)$ значение $\xi(x)$ лежит в проколотой правой полуокрестности a . Тогда можно воспользоваться теоремой о замене переменной при вычислении предела. Сделав это, получим:

$$f'_+(a) = \lim_{x \rightarrow a+0} \frac{f(x) - f(a)}{x - a} = \lim_{x \rightarrow a+0} f'(\xi(x)) = \lim_{\xi \rightarrow a+0} f'(\xi)$$

Из равенства выше очевидно, что требуемое доказано. \square

Теорема 2.2 (Следствие об отсутствии разрывов 1-ого рода). Если f дифференцируема на (a, b) , то f' не может иметь устранимых разрывов и разрывов 1-ого рода.

Доказательство. Пусть $x_0 \in (a, b)$. Так как $\exists f'(x_0) \in \mathbb{R}$, то

$$\begin{cases} \exists f'_-(x_0) \in \mathbb{R} \\ \exists f'_+(x_0) \in \mathbb{R} \end{cases}$$

При этом $f'_-(x_0) = f'_+(x_0) = f'(x_0)$. Покажем, что f' не может иметь устранимых разрывов. Предположим, что x_0 — точка устранимого разрыва f' , то есть:

$$\exists \lim_{x \rightarrow x_0} f'(x) \wedge f'(x_0) \neq \lim_{x \rightarrow x_0} f'(x)$$

Ясно, что:

$$\exists \lim_{x \rightarrow x_0} f'(x) = A \iff \begin{cases} \exists \lim_{x \rightarrow x_0+0} f'(x) = A \\ \exists \lim_{x \rightarrow x_0-0} f'(x) = A \end{cases}$$

Тогда по теореме 2.1 получаем:

$$\begin{cases} \exists f'_+(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0+0} f'(x) = \lim_{x \rightarrow x_0} f'(x) \\ \exists f'_-(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0-0} f'(x) = \lim_{x \rightarrow x_0} f'(x) \end{cases}$$

Но тогда:

$$f'(x_0) = f'_-(x_0) = f'_+(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0} f'(x)$$

Получаем противоречие, а значит требуемое доказано. Покажем теперь, что у f' не может быть разрывов 1-ого рода.

Предположим, что x_0 — точка разрыва 1-ого рода f' . Тогда по определению:

$$\begin{cases} \exists \lim_{x \rightarrow x_0+0} f'(x) \in \mathbb{R} \\ \exists \lim_{x \rightarrow x_0-0} f'(x) \in \mathbb{R} \end{cases} \wedge \lim_{x \rightarrow x_0+0} f'(x) \neq \lim_{x \rightarrow x_0-0} f'(x)$$

Но тогда по теореме 2.1:

$$\begin{cases} \exists f'_+(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0+0} f'(x) \in \mathbb{R} \\ \exists f'_-(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0-0} f'(x) \in \mathbb{R} \end{cases} \wedge f'_+(x_0) \neq f'_-(x_0)$$

Следовательно, не существует $f'(x_0)$. Получаем противоречие с тем, что f дифференцируема на всем интервале (a, b) , а значит требуемое доказано. \square

Замечание 2.1. Приведем пример функции f , которая дифференцируема на \mathbb{R} , и при этом f' имеет разрыв 2-ого рода.

$$f(x) = \begin{cases} x^2 \sin\left(\frac{1}{x^2}\right), & x \neq 0 \\ 0, & x = 0 \end{cases}$$

Если $x \neq 0$, то:

$$f'(x) = 2x \sin\left(\frac{1}{x^2}\right) - \frac{2}{x} \cos\left(\frac{1}{x^2}\right)$$

Если $x = 0$, то:

$$f'(0) = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x^2 \sin\left(\frac{1}{x^2}\right)}{x} = \lim_{x \rightarrow 0} x \sin\left(\frac{1}{x^2}\right) = 0$$

При этом ясно, что не существует $\lim_{x \rightarrow 0} f'(x)$ в силу того, что не существует $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{2}{x} \cos\left(\frac{1}{x^2}\right)$, что легко доказать, предъявив две последовательности Гейне в точке 0. Следовательно, f' имеет в нуле разрыв 2-ого рода.

3 Теорема Дарбу о промежуточных значениях производной

Лемма 3.1. Пусть f дифференцируема на (a, b) . Пусть

$$x_1, x_2 \in (a, b) : x_1 < x_2 \wedge f'(x_1) \cdot f'(x_2) < 0$$

Тогда

$$\exists \xi \in (x_1, x_2) : f'(\xi) = 0$$

Доказательство. Без ограничения общности считаем, что $f'(x_1) < 0$ и $f'(x_2) > 0$. Рассмотрим f на отрезке $[x_1, x_2] \subset (a, b)$. Ясно, что f дифференцируема на $[x_1, x_2]$, а значит f непрерывна на $[x_1, x_2]$. Но тогда по теореме Вейерштрасса f достигает максимума и минимума на этом отрезке (рассмотрено как-бы сужение f на $[x_1, x_2]$, на котором и понимается максимум и минимум). Пусть x_M — точка максимума f на $[x_1, x_2]$. Заметим, что $f'_+(x_M) \leq 0$ и $f'_-(x_M) \geq 0$. Но тогда x_M не может совпасть с точками x_1 и x_2 из неравенств выше. Значит $x_M \in (x_1, x_2)$. Следовательно, x_M — точка локального максимума. Тогда по теореме Ферма $f'(x_M) = 0$. Легко видеть, что получили требуемое. \square

Теорема 3.1 (Теорема Дарбу). Пусть f дифференцируема на интервале (a, b) . Пусть также $x_1, x_2 \in (a, b) : x_1 \neq x_2$. Пусть $f'(x_1) = A$ и $f'(x_2) = B$. Тогда:

$$\forall C \in (\min\{A, B\}, \max\{A, B\}) \exists x_C \in (x_1, x_2) : f'(x_C) = C$$

Доказательство. Для простоты считаем, что $A < B$. Фиксируем $C \in (A, B)$. Рассмотрим

$$h(t) = f(t) - C \cdot t$$

Заметим, что тогда:

$$h'(x_1)h'(x_2) = (A - C)(B - C) < 0$$

Значит по предыдущей лемме получаем, что:

$$x_C \in (x_1, x_2) : h'(x_C) = 0$$

Отсюда следует, что:

$$f'(x_C) = C$$

Легко видеть, что получили требуемое. □

4 Формула Тейлора

Определение 4.1. Полиномом Тейлора (многочленом Тейлора) степени n функции f с центром в точке x_0 будем называть следующий полином:

$$T_{x_0}^n[f](x) := \sum_{k=0}^n \frac{f^{(k)}(x_0)}{k!} (x - x_0)^k$$

Определение 4.2. Формальным остатком (остаточным членом) формулы Тейлора будем называть следующую величину:

$$r_{x_0}^n[f](x) := f(x) - T_{x_0}^n[f](x)$$

Замечание 4.1. При $n = 1$, если $f'(x_0) \in \mathbb{R}$, из определения дифференцируемости:

$$f(x) = \underbrace{f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0)}_{T_{x_0}^1[f](x)} + \underbrace{o(x - x_0)}_{r_{x_0}^1[f](x)}, \quad x \rightarrow x_0$$

Лемма 4.1. Рассмотрим функцию $\varphi_n(x) = (x - x_0)^n$, $n \in \mathbb{N}$, $x_0 \in \mathbb{R}$. Справедливо следующее:

$$\varphi_n^{(k)}(x) = \begin{cases} n(n-1) \dots (n-k+1)(x-x_0)^{n-k}, & 0 \leq k \leq n \\ 0, & k > n \end{cases} \quad (1)$$

$$\varphi_n^{(k)}(x_0) = \begin{cases} n!, & k = n \\ 0, & k \neq n \end{cases} \quad (2)$$

Доказательство. (1): Если $k > n$ очевидно. Далее $0 \leq k \leq n$. Покажем требуемое индукцией по k . База. При $k = 1$:

$$\varphi_n'(x) = n(x - x_0)^{n-1}$$

Шаг. Пусть при $k < n$ утверждение справедливо. Рассмотрим следующее:

$$\varphi_n^{(k+1)}(x) = \left(\varphi_n^{(k)}(x) \right)' = \left(n(n-1) \dots (n-k+1)(x-x_0)^{n-k} \right)' = n(n-1) \dots (n-k)(x-x_0)^{n-(k+1)}$$

Тривиально получаем требуемое.

(2): Если $k > n$ очевидно. Далее рассмотрим $0 \leq k < n$. Но тогда $n - k > 0$, откуда:

$$(x - x_0)^{n-k} \Big|_{x=x_0} = 0$$

Значит по доказанному утверждению (1) получаем, что:

$$\varphi_n^{(k)}(x) \Big|_{x=x_0} = 0, \quad 0 \leq k < n$$

При этом, рассмотрев $k = n$, получим:

$$\varphi_n^{(n)}(x) \Big|_{x=x_0} = n \cdot (n-1) \cdot \dots \cdot 1 \cdot (x - x_0)^0 = n!$$

Очевидно, что требуемое доказано. □

Лемма 4.2. Пусть $\exists f^{(n)}(x_0) \in \mathbb{R}$. Тогда:

$$(r_{x_0}^n[f](x))^{(k)} \Big|_{x=x_0} = 0 \quad \forall k \in \{0, \dots, n\}$$

Доказательство. По определению формального остатка:

$$r_{x_0}^n[f](x) = f(x) - \sum_{j=0}^n \frac{f^{(j)}(x_0)}{j!} (x - x_0)^j$$

Зафиксируем $k \in \{1, \dots, n\}$, так как при $k = 0$ очевидно, и, вспомнив о линейности k -ой производной, рассмотрим k -ую производную формального остатка в точке x_0 :

$$(r_{x_0}^n[f](x))^{(k)} \Big|_{x=x_0} = f^{(k)}(x_0) - \left(\sum_{j=0}^n \frac{f^{(j)}(x_0)}{j!} (x - x_0)^j \right)^{(k)} \Big|_{x=x_0}$$

При подстановке $x = x_0$ все слагаемые при $j > k$ сократятся. Значит:

$$(r_{x_0}^n[f](x))^{(k)} \Big|_{x=x_0} = f^{(k)}(x_0) - \sum_{j=0}^k \frac{f^{(j)}(x_0)}{j!} ((x - x_0)^j)^{(k)} \Big|_{x=x_0}$$

Более того, при $j < k$ по лемме 4.1 все слагаемые также будут нулевыми, а при $j = k$ по той же самой лемме производная, вычисленная при $x = x_0$, будет равна $n!$. Тогда получим:

$$(r_{x_0}^n[f](x))^{(k)} \Big|_{x=x_0} = f^{(k)}(x_0) - \frac{f^{(k)}(x_0)}{k!} k! = 0$$

□

Теорема 4.1 (Формула Тейлора с остаточным членом в форме Пеано). Пусть $\exists f^{(n)}(x_0) \in \mathbb{R}$. Тогда:

$$r_{x_0}^n[f](x) = o((x - x_0)^n), \quad x \rightarrow x_0$$

Доказательство. Для того, чтобы доказать требуемое утверждение, достаточно показать, что:

$$\frac{r_{x_0}^n[f](x)}{(x - x_0)^n} \rightarrow 0, \quad x \rightarrow x_0$$

Это, в свою очередь, равносильно:

$$\frac{r_{x_0}^n[f](x)}{\varphi_n(x)} \rightarrow 0, \quad x \rightarrow x_0$$

Тривиально видеть, что:

$$\begin{cases} r_{x_0}^n[f](x_0) = 0 \\ \varphi_n(x_0) = 0 \end{cases}$$

Тогда:

$$\frac{r_{x_0}^n[f](x)}{\varphi_n(x)} = \frac{r_{x_0}^n[f](x) - r_{x_0}^n[f](x_0)}{\varphi_n(x) - \varphi_n(x_0)} \quad (*)$$

Далее считаем, что $n \geq 2$, так как при $n = 1$ формула Тейлора переходит в определение дифференцируемости. Заметим, что в силу дифференцируемости $r_{x_0}^n[f]$ в окрестности точки x_0 получаем, что $r_{x_0}^n[f]$ непрерывен в этой окрестности (коль скоро функция дважды дифференцируема, её первая производная должна существовать уже в целой окрестности точки). Более того, так как φ_n суть полином, то он тоже непрерывен в окрестности точки x_0 . Тогда в частности $r_{x_0}^n[f]$ и φ_n непрерывны на $[x_0, x] \forall x \in U_\delta(x_0)$. Кроме того, эти функции дифференцируемы на интервале (x_0, x) (или, понятное дело, на (x, x_0) , в зависимости от расположения точки $x \in U_\delta(x_0)$) из рассуждений выше, а также производная φ_n не обнуляется на (x_0, x) в силу леммы 4.1 и того, что $n \geq 2$. Тогда по теореме Коши о среднем для $r_{x_0}^n[f]$ и φ_n на $[x_0, x]$ получаем:

$$\exists \xi_1 \in (x_0, x) : \frac{r_{x_0}^n[f](x)}{\varphi_n(x)} = \frac{r_{x_0}^n[f](x) - r_{x_0}^n[f](x_0)}{\varphi_n(x) - \varphi_n(x_0)} = \frac{(r_{x_0}^n[f])'(\xi_1(x))}{\varphi_n'(\xi_1(x))}$$

Теперь увидим, что таким образом можно продолжить равенство выше. Действительно, по леммам 4.1 и 4.2:

$$\begin{cases} (r_{x_0}^n[f])^{(k)}(x_0) = 0 \\ (\varphi_n)^{(k)}(x_0) = 0 \end{cases} \quad \forall k \in \{0, \dots, n-1\}$$

Тогда:

$$\frac{(r_{x_0}^n[f])^{(k)}(\xi_k)}{(\varphi_n)^{(k)}(\xi_k)} = \frac{(r_{x_0}^n[f])^{(k)}(\xi_k) - (r_{x_0}^n[f])^{(k)}(x_0)}{(\varphi_n)^{(k)}(\xi_k) - (\varphi_n)^{(k)}(x_0)}$$

Значит, коль скоро $k < n-1$, можно применять далее теорему Коши о среднем (так как все производные до $(n-2)$ -ой включительно непрерывны в целой окрестности точки x_0 в силу существования $(n-1)$ -ой производной также в целой окрестности точки, которая существует в целой окрестности, в свою очередь, потому, что по условию существует n -ая производная в точке x_0). Тогда:

$$\exists \xi_{k+1} \in (x_0, \xi_k) : \frac{(r_{x_0}^n[f])^{(k)}(\xi_k)}{(\varphi_n)^{(k)}(\xi_k)} = \frac{(r_{x_0}^n[f])^{(k)}(\xi_k) - (r_{x_0}^n[f])^{(k)}(x_0)}{(\varphi_n)^{(k)}(\xi_k) - (\varphi_n)^{(k)}(x_0)} = \frac{(r_{x_0}^n[f])^{(k+1)}(\xi_{k+1})}{(\varphi_n)^{(k+1)}(\xi_{k+1})}$$

Значит, применяя теорему Коши о среднем $n-1$ раз, получим:

$$\exists \xi_{n-1}(x) \in (x_0, x) : \frac{r_{x_0}^n[f](x)}{\varphi_n(x)} = \frac{(r_{x_0}^n[f])^{(n-1)}(\xi_{n-1}(x))}{(\varphi_n)^{(n-1)}(\xi_{n-1}(x))}$$

Но тогда по лемме 4.1 получаем:

$$\frac{r_{x_0}^n[f](x)}{\varphi_n(x)} = \frac{(r_{x_0}^n[f])^{(n-1)}(\xi_{n-1}(x))}{(\varphi_n)^{(n-1)}(\xi_{n-1}(x))} = \frac{1}{n!} \frac{(r_{x_0}^n[f])^{(n-1)}(\xi_{n-1}(x))}{\xi_{n-1}(x) - x_0}$$

При этом заметим, что по лемме 4.2 выполнено:

$$(r_{x_0}^n[f])^{(n-1)}(x_0) = 0$$

Значит:

$$\frac{r_{x_0}^n[f](x)}{\varphi_n(x)} = \frac{1}{n!} \frac{(r_{x_0}^n[f])^{(n-1)}(\xi_{n-1}(x)) - (r_{x_0}^n[f])^{(n-1)}(x_0)}{\xi_{n-1}(x) - x_0} \quad (**)$$

Более того, $\xi_{n-1}(x) \neq x_0 \forall x \in (x_0, x)$, а также $\xi_{n-1}(x) \rightarrow x_0$, $x \rightarrow x_0$ по теореме о двух милиционерах. Тогда, переходя к пределу в (**) при $x \rightarrow x_0$, по теореме о замене переменной при вычислении предела получим:

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{r_{x_0}^n[f](x)}{\varphi_n(x)} &= \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{1}{n!} \frac{(r_{x_0}^n[f])^{(n-1)}(\xi_{n-1}(x)) - (r_{x_0}^n[f])^{(n-1)}(x_0)}{\xi_{n-1}(x) - x_0} = \\ &= \lim_{\xi \rightarrow x_0} \frac{1}{n!} \frac{(r_{x_0}^n[f])^{(n-1)}(\xi) - (r_{x_0}^n[f])^{(n-1)}(x_0)}{\xi - x_0} = \frac{(r_{x_0}^n[f])^{(n)}(x_0)}{n!} = 0 \end{aligned}$$

Поняв, что последнее равенство справедливо по лемме 4.2, заключаем, что требуемое доказано. \square

Замечание 4.2. Формула Тейлора с остаточным членом в форме Пеано при $x_0 = 0$ называется формулой Маклорена.

Теорема 4.2 (формула Тейлора с остаточным членом в форме Лагранжа). Пусть

$$\exists f^{(n+1)}(x) \in \mathbb{R} \quad \forall x \in U_\delta(x_0)$$

Тогда:

$$\exists \xi \in (\min\{x_0, x\}, \max\{x_0, x\}) : f(x) = T_{x_0}^n[f](x) + \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!} (x - x_0)^{n+1} \quad \forall x \in U_\delta(x_0)$$

Доказательство. Рассмотрим вновь следующее выражение:

$$\frac{r_{x_0}^n[f](x)}{(x - x_0)^{n+1}}$$

По аналогии с предыдущим доказательством применяем теорему Коши о среднем $(n+1)$ раз (это можно сделать просто потому, что $(n+1)$ -ая производная существует в целой окрестности точки x_0 , а значит все производные от 0 до n -ой включительно непрерывны в этой окрестности). Итого получим:

$$\exists \xi \in (\min\{x_0, x\}, \max\{x_0, x\}) : \frac{r_{x_0}^n[f](x)}{(x - x_0)^{n+1}} = \frac{(r_{x_0}^n[f])^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!}$$

Но $(r_{x_0}^n[f])^{(n+1)}(\xi) = f^{(n+1)}(\xi)$ по лемме 4.2. Тогда окончательно:

$$\frac{r_{x_0}^n[f](x)}{(x - x_0)^{n+1}} = \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!}$$

Легко видеть, что получили то, что и требовалось. \square

Теорема 4.3 (Теорема единственности). Пусть $\exists f^{(n)}(x_0) \in \mathbb{R}$. Пусть

$$f(x) = \sum_{k=0}^n a_k (x - x_0)^k + o((x - x_0)^n), \quad x \rightarrow x_0 \quad (\star)$$

Тогда

$$a_k = \frac{f^{(k)}(x_0)}{k!} \quad \forall k \in \{0, \dots, n\}$$

Замечание 4.3. Если априори не требовать существования $f^{(n)}(x_0)$, то утверждение теоремы единственности неверно. Действительно, рассмотрим следующую функцию (\mathcal{D} — функция Дирихле)

$$f(x) = x^4 \cdot \mathcal{D}(x)$$

Заметим, что:

$$f'(0) = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x) - f(0)}{x - 0} = \lim_{x \rightarrow 0} x^3 \cdot \mathcal{D}(x) = 0$$

При этом f разрывна в любой точке $x \neq 0$. Тогда в любой точке $x \neq 0$ не существует $f'(x)$. Но тогда не может существовать вторая производная f в нуле, так как для этого первая должна существовать в целой окрестности нуля. Значит нельзя раскладывать f в нуле по формуле Тейлора до второго порядка просто по условию теоремы. Но при этом очевидно, что:

$$f(x) = x^4 \cdot \mathcal{D}(x) = o(x^2), \quad x \rightarrow 0$$

Это означает, что:

$$f(x) = 0 + 0 \cdot x + 0 \cdot x^2 + o(x^2), \quad x \rightarrow 0$$

Но из этого не следует, что коэффициенты вышеописанного полинома равны соответственно коэффициентам многочлена Тейлора из условия теоремы единственности хотя бы потому, что вторая производная f в нуле просто не существует.

Доказательство. Ясно, что (\star) справедливо в некоторой $U_\delta(x_0)$. Подставим в (\star) $x = x_0$:

$$f(x_0) = a_0 = \frac{f^{(0)}(x_0)}{0!}$$

Тогда получим, что:

$$\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} = a_1 + a_2(x - x_0) + \dots$$

Взяв предел при $x \rightarrow x_0$ от обеих частей равенства выше, получим:

$$\frac{f^{(1)}(x_0)}{1!} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} = a_1$$

Из соотношений выше легко видеть, что требуемое доказано для коэффициентов a_0 и a_1 . Далее заметим, что в силу $\exists f^{(n)}(x_0) \in \mathbb{R}$ справедлива формула Тейлора с остаточным членом в форме Пеано:

$$f(x) = \sum_{k=0}^n \frac{f^{(k)}(x_0)}{k!} (x - x_0)^k + o((x - x_0)^n), \quad x \rightarrow x_0 \quad (\star\star)$$

Тогда, приравняв (\star) и $(\star\star)$ и вспомнив, что для коэффициентов a_0 и a_1 требуемое доказано, получим:

$$\sum_{k=2}^n a_k (x - x_0)^k + o((x - x_0)^n) = \sum_{k=2}^n \frac{f^{(k)}(x_0)}{k!} (x - x_0)^k + o((x - x_0)^n), \quad x \rightarrow x_0$$

Поделим обе части равенства выше на $(x - x_0)^2$ и перейдём к пределу при $x \rightarrow x_0$. Тогда по аналогии с доказательством требуемого для a_0 и a_1 получим:

$$a_2 = \frac{f^{(2)}(x_0)}{2!}$$

Продолжив вышеописанную процедуру по индукции, получим то, что и требовалось. \square

Теорема 4.4 (Теорема о почленном дифференцировании). Пусть $\exists f^{(n)}(x_0) \in \mathbb{R}$. Пусть

$$f(x) = \sum_{k=0}^n a_k (x - x_0)^k + o((x - x_0)^n), \quad x \rightarrow x_0$$

Тогда

$$f'(x) = \sum_{k=1}^n k \cdot a_k (x - x_0)^{k-1} + o((x - x_0)^{n-1}), \quad x \rightarrow x_0$$

Доказательство. По теореме единственности:

$$a_k = \frac{f^{(k)}(x_0)}{k!} \quad \forall k \in \{0, \dots, n\}$$

С другой стороны, применим формулу Тейлора с остаточным членом в форме Пеано к f' (ясно, что можно разложить до $n - 1$ порядка):

$$f'(x) = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(f')^{(k)}(x_0)}{k!} (x - x_0)^k + o((x - x_0)^{n-1}), \quad x \rightarrow x_0$$

Ясно, что $(f')^{(k)}(x_0) = f^{(k+1)}(x_0)$. Далее положим $j = k + 1$ (сдвиг индекса суммирования) и получим:

$$f'(x) = \sum_{j=1}^n \frac{f^{(j)}(x_0)}{(j-1)!} (x - x_0)^{j-1} + o((x - x_0)^{n-1}), \quad x \rightarrow x_0$$

Легко видеть, что:

$$\frac{f^{(j)}(x_0)}{(j-1)!} = j \cdot a_j$$

Подставляя это выражение в полученное выше разложение производной и заменяя индекс суммирования для удобства на k , окончательно имеем:

$$f'(x) = \sum_{k=1}^n k \cdot a_k (x - x_0)^{k-1} + o((x - x_0)^{n-1}), \quad x \rightarrow x_0$$

Смотрим, и получаем удовольствие. □

Теорема 4.5 (Теорема о почленном интегрировании). Пусть $\exists f^{(n+1)}(x_0) \in \mathbb{R}$. Пусть

$$f'(x) = \sum_{k=0}^n a_k (x - x_0)^k + o((x - x_0)^n), \quad x \rightarrow x_0$$

Тогда

$$f(x) = f(x_0) + \sum_{k=0}^n \frac{a_k}{k+1} (x - x_0)^{k+1} + o((x - x_0)^{n+1}), \quad x \rightarrow x_0$$

Доказательство. По теореме единственности:

$$a_k = \frac{(f')^{(k)}(x_0)}{k!} = \frac{f^{(k+1)}(x_0)}{k!} \quad \forall k \in \{0, \dots, n\}$$

Теперь применим формулу Тейлора с остаточным членом в форме Пеано для f (очевидно, что можем разложить до $n + 1$ порядка):

$$f(x) = \sum_{k=0}^{n+1} \frac{f^{(k)}(x_0)}{k!} (x - x_0)^k + o((x - x_0)^{n+1}), \quad x \rightarrow x_0$$

Выпишем отдельно от основной суммы слагаемое при $k = 0$, а затем вновь выполним сдвиг индекса суммирования, положив $j = k - 1$:

$$f(x) = f(x_0) + \sum_{j=0}^n \frac{f^{(j+1)}(x_0)}{(j+1)!} (x - x_0)^{j+1} + o((x - x_0)^{n+1}), \quad x \rightarrow x_0$$

Осталось лишь заменить для удобства индекс суммирования обратно на k и заметить, что:

$$\frac{f^{(k+1)}(x_0)}{(k+1)!} = \frac{a_k}{k+1}$$

Отсюда окончательно:

$$f(x) = f(x_0) + \sum_{k=0}^n \frac{a_k}{k+1} (x - x_0)^{k+1} + o((x - x_0)^{n+1}), \quad x \rightarrow x_0$$

Получили то, что и требовалось. □

Лемма 4.3. Пусть f дифференцируема в некоторой окрестности нуля. Тогда, если f чётная, то f' нечётная. Если f нечётная, то f' чётная. В частности, если f чётная, то $f'(0) = 0$.

Доказательство. Рассмотрим случай чётной f , так как для нечётной доказательство аналогично. Зафиксируем произвольный $x \in U_\delta(0)$. Далее рассмотрим:

$$f'(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x}$$

В силу чётности f преобразуем равенство выше следующим образом:

$$f'(x) = - \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(-x - \Delta x) - f(-x)}{-\Delta x}$$

Если $\Delta x \rightarrow 0$, то и $-\Delta x \rightarrow 0$. Положим тогда $h = -\Delta x$ и по теореме о замене переменной при вычислении предела получим:

$$f'(x) = - \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(-x + h) - f(-x)}{h} = -f'(-x)$$

Получили, что:

$$\forall x \in U_\delta(0) \hookrightarrow f'(x) = -f'(-x)$$

Значит f' нечётная, что и требовалось.

Поймём теперь, что если f чётная, то $f'(0) = 0$. В самом деле:

$$f'_+(0) = \lim_{h \rightarrow +0} \frac{f(h)}{h} = \lim_{h \rightarrow +0} \frac{f(-h)}{h} = - \lim_{h \rightarrow +0} \frac{f(-h)}{-h} = -f'_-(0)$$

Но f дифференцируема в нуле, откуда, пользуясь полученным выше равенством, имеем:

$$f'(0) = f'_+(0) = f'_-(0) = -f'(0) \implies f'(0) = 0$$

Легко видеть, что получили требуемое. □

Теорема 4.6 (Следствие). Пусть $f: U_\delta(0) \rightarrow \mathbb{R}$ — чётная. Пусть $\exists f^{(2n)}(0) \in \mathbb{R}$. Тогда:

$$f(x) = \sum_{k=0}^n \frac{f^{(2k)}(0)}{(2k)!} x^{2k} + o(x^{2n}), \quad x \rightarrow 0$$

Аналогично, если f — нечётная и $\exists f^{(2n+1)}(0) \in \mathbb{R}$, то:

$$f(x) = \sum_{k=0}^n \frac{f^{(2k+1)}(0)}{(2k+1)!} x^{2k+1} + o(x^{2n+1}), \quad x \rightarrow 0$$

Доказательство. Докажем для случая чётной f , так как для второго случая доказательство аналогично. По предыдущей лемме получаем следующую цепочку:

$$f \text{ — чётная} \implies f' \text{ — нечётная} \implies f'' \text{ — чётная} \implies \dots \implies f^{(2n-1)} \text{ — нечётная}$$

Более того, по той же лемме имеем (она применима потому, что $\exists f^{(2n)}(0)$, а значит все производные от 0 до $2n-1$ включительно существуют уже в целой окрестности нуля):

$$f'(0) = f^{(3)}(0) = \dots = f^{(2n-1)}(0) = 0$$

Следовательно, по формуле Тейлора с остаточным членом в форме Пеано получаем то, что и требовалось. \square

5 Основные разложения по формуле Тейлора

1. Ясно, что $(e^x)^{(k)} \Big|_{x=0} = 1$. Из этого немедленно получаем:

$$e^x = \sum_{k=0}^n \frac{x^k}{k!} + o(x^n), \quad x \rightarrow 0 \quad (3)$$

2. По определению: $\operatorname{sh} x = \frac{e^x - e^{-x}}{2}$. Значит функция $\operatorname{sh} x$ — нечётная. При этом $(\operatorname{sh} x)^{(2k+1)} \Big|_{x=0} = 1$.

Значит по теореме 4.6 получаем:

$$\operatorname{sh} x = \sum_{k=0}^n \frac{x^{2k+1}}{(2k+1)!} + o(x^{2n+2}), \quad x \rightarrow 0 \quad (4)$$

3. По определению: $\operatorname{ch} x = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$. Значит функция $\operatorname{ch} x$ — чётная. При этом $(\operatorname{ch} x)^{(2k)} \Big|_{x=0} = 1$.

Значит по теореме 4.6 получаем:

$$\operatorname{ch} x = \sum_{k=0}^n \frac{x^{2k}}{(2k)!} + o(x^{2n+1}), \quad x \rightarrow 0 \quad (5)$$

4. Функция $\sin x$ — нечётная. При этом

$$(\sin x)^{(2k+1)} \Big|_{x=0} = \sin \left(x + \frac{\pi(2k+1)}{2} \right) \Big|_{x=0} = (-1)^k$$

Тогда по теореме 4.6 получаем:

$$\sin x = \sum_{k=0}^n (-1)^k \frac{x^{2k+1}}{(2k+1)!} + o(x^{2n+2}), \quad x \rightarrow 0 \quad (6)$$

5. Функция $\cos x$ — чётная. При этом

$$(\cos x)^{(2k)} \Big|_{x=0} = \cos \left(x + \frac{2\pi k}{2} \right) \Big|_{x=0} = (-1)^k$$

Тогда по теореме 4.6 получаем:

$$\cos x = \sum_{k=0}^n (-1)^k \frac{x^{2k}}{(2k)!} + o(x^{2n+1}), \quad x \rightarrow 0 \quad (7)$$

6. Рассмотрим теперь функцию $(1+x)^\alpha$, $x \in (-1, 1)$, $\alpha \in \mathbb{R}$. Положим по определению:

$$C_\alpha^k := \frac{\alpha(\alpha-1)\dots(\alpha-k+1)}{k!}$$

Далее заметим, что:

$$((1+x)^\alpha)^{(k)} \Big|_{x=0} = \alpha(\alpha-1)\dots(\alpha-k+1)(1+x)^{\alpha-k} \Big|_{x=0} = k! \cdot C_\alpha^k \cdot (1+x)^{\alpha-k} \Big|_{x=0} = k! \cdot C_\alpha^k$$

Тогда по формуле Тейлора с остаточным членом в форме Пеано немедленно получаем:

$$(1+x)^\alpha = \sum_{k=0}^n C_\alpha^k \cdot x^k + o(x^n), \quad x \rightarrow 0 \quad (8)$$

7. В частности, из (8) следует, что:

$$\frac{1}{1+x} = \sum_{k=0}^n (-1)^k x^k + o(x^n), \quad x \rightarrow 0 \quad (9)$$

8. Из (9) по теореме о почленном интегрировании получаем:

$$\ln(1+x) = \sum_{k=0}^n (-1)^k \frac{x^{k+1}}{k+1} + o(x^{n+1}), \quad x \rightarrow 0 \quad (10)$$

9. Для функций $\arcsin x$, $\arccos x$, $\arctan x$ и $\operatorname{arctg} x$ достаточно по аналогии с пунктом выше разложить по формуле Тейлора с остаточным членом в форме Пеано их производные, а затем воспользоваться теоремой о почленном интегрировании.

6 Правила Лопиталья

Теорема 6.1 (Правило Лопиталья $\frac{0}{0}$). Пусть функции f и g дифференцируемы на (a, b) , где $-\infty < a < b < +\infty$. Пусть

$$\exists \lim_{x \rightarrow a+0} f(x) = 0 \quad \wedge \quad \exists \lim_{x \rightarrow a+0} g(x) = 0$$

Пусть

$$\forall x \in (a, b) \hookrightarrow g'(x) \neq 0 \quad \wedge \quad \exists \lim_{x \rightarrow a+0} \frac{f'(x)}{g'(x)} = C \in \overline{\mathbb{R}}$$

Тогда

$$\exists \lim_{x \rightarrow a+0} \frac{f(x)}{g(x)} = C$$

Доказательство. Так как у функций f и g существуют правосторонние пределы в точке a , равные 0, то доопределим $f(a) = g(a) = 0$. Значит $f, g \in C([a, b))$. Тогда $\forall x \in (a, b)$ выполнено, что $f, g \in C([a, x])$ и f и g дифференцируемы на (a, x) , а также $g'(x) \neq 0$. Применяя тогда теорему Коши о среднем для функций f и g на $[a, x]$ и учитывая, что $f(a) = g(a) = 0$, получим:

$$\exists \xi(x) \in (a, x) : \frac{f(x)}{g(x)} = \frac{f(x) - f(a)}{g(x) - g(a)} = \frac{f'(\xi(x))}{g'(\xi(x))}$$

При этом $\forall x \in (a, b) \hookrightarrow \xi(x) \neq a$ и $\xi(x) \rightarrow a+0$, $x \rightarrow a+0$ по теореме о двух милиционерах. Тогда, переходя к пределу при $x \rightarrow a+0$ в равенстве выше, по теореме о замене переменной при вычислении предела получим:

$$\exists \lim_{x \rightarrow a+0} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{\xi \rightarrow a+0} \frac{f'(\xi)}{g'(\xi)} = C$$

□

Теорема 6.2 (Правило Лопиталя $\frac{0}{0}$ для луча). Пусть функции f и g дифференцируемы на луче $(A, +\infty)$, $A > 0$. Пусть

$$\exists \lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = 0 \quad \wedge \quad \exists \lim_{x \rightarrow +\infty} g(x) = 0$$

Пусть

$$\forall x \in (A, +\infty) \hookrightarrow g'(x) \neq 0 \quad \wedge \quad \exists \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f'(x)}{g'(x)} = C \in \overline{\mathbb{R}}$$

Тогда

$$\exists \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{g(x)} = C$$

Доказательство. Рассмотрим функцию $t(x) = \frac{1}{x}$. Если $x \in (A, +\infty)$, то $t(x) \in \left(0, \frac{1}{A}\right)$. При этом $x(t) = \frac{1}{t}$. Рассмотрим тогда функции

$$\tilde{f}(t) = f(x(t)) = f\left(\frac{1}{t}\right), \quad \tilde{g}(t) = g(x(t)) = g\left(\frac{1}{t}\right)$$

Ясно, что функция $\frac{1}{t}$ дифференцируема на $\left(0, \frac{1}{A}\right)$. Но тогда \tilde{f} и \tilde{g} дифференцируемы на $\left(0, \frac{1}{A}\right)$ как композиции дифференцируемых на этом интервале функций. Значит по теореме о замене переменной при вычислении предела получим:

$$\lim_{t \rightarrow +0} \tilde{f}(t) = \lim_{t \rightarrow +0} f\left(\frac{1}{t}\right) = \lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = 0$$

$$\lim_{t \rightarrow +0} \tilde{g}(t) = \lim_{t \rightarrow +0} g\left(\frac{1}{t}\right) = \lim_{x \rightarrow +\infty} g(x) = 0$$

При этом заметим, что по условию $\forall t \in \left(0, \frac{1}{A}\right) \hookrightarrow g'\left(\frac{1}{t}\right) \neq 0$. Тогда отсюда:

$$\forall t \in \left(0, \frac{1}{A}\right) \hookrightarrow \tilde{g}'(t) = g'\left(\frac{1}{t}\right) \cdot \left(-\frac{1}{t^2}\right) \neq 0$$

Тогда по теореме 6.1, применительно для функций \tilde{f} и \tilde{g} на $\left(0, \frac{1}{A}\right)$, получаем:

$$\lim_{t \rightarrow +0} \frac{\tilde{f}(t)}{\tilde{g}(t)} = \lim_{t \rightarrow +0} \frac{f\left(\frac{1}{t}\right)}{g\left(\frac{1}{t}\right)} = \lim_{t \rightarrow +0} \frac{\tilde{f}'(t)}{\tilde{g}'(t)} = \lim_{t \rightarrow +0} \frac{f'\left(\frac{1}{t}\right)}{g'\left(\frac{1}{t}\right)}$$

Тогда вновь по теореме о замене переменной при вычислении предела получим:

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{t \rightarrow +0} \frac{f\left(\frac{1}{t}\right)}{g\left(\frac{1}{t}\right)} = \lim_{t \rightarrow +0} \frac{f'\left(\frac{1}{t}\right)}{g'\left(\frac{1}{t}\right)} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f'(x)}{g'(x)} = C$$

□

Теорема 6.3 (Правило Лопиталя $\frac{\infty}{\infty}$). Пусть функции f и g дифференцируемы на (a, b) , где $-\infty < a < b < +\infty$. Пусть

$$\exists \lim_{x \rightarrow a+0} |f(x)| = \infty \quad \wedge \quad \exists \lim_{x \rightarrow a+0} |g(x)| = \infty$$

Пусть

$$\forall x \in (a, b) \hookrightarrow g'(x) \neq 0 \quad \wedge \quad \exists \lim_{x \rightarrow a+0} \frac{f'(x)}{g'(x)} = C \in \overline{\mathbb{R}}$$

Тогда

$$\exists \lim_{x \rightarrow a+0} \frac{f(x)}{g(x)} = C$$

Доказательство. Зафиксируем $\varepsilon \in (0, 1)$ и найдём $a_\varepsilon \in (a, b)$ такой, что:

$$\forall x \in (a, a_\varepsilon) \hookrightarrow \frac{f'(x)}{g'(x)} \in U_\varepsilon(C) \quad \wedge \quad f(x) \neq 0 \quad \wedge \quad g(x) \neq 0$$

Такое $a_\varepsilon \in (a, b)$ существует по определению предела и также потому, что при $x \rightarrow a + 0$ функции f и g по модулю бесконечно большие, а значит, если потребуется, можно уменьшить a_ε таким образом, чтобы дополнительно стало выполняться $f(x) \neq 0$ и $g(x) \neq 0$. Далее фиксируем произвольный $x \in (a, a_\varepsilon)$. Заметим, что f и g дифференцируемы на $[x, a_\varepsilon]$, а значит $f, g \in C([x, a_\varepsilon])$. При этом $\forall x_0 \in [x, a_\varepsilon] \hookrightarrow g'(x_0) \neq 0$. Тогда применим теорему Коши о среднем для функций f и g на $[x, a_\varepsilon]$:

$$\exists \xi(x) \in (x, a_\varepsilon) : \frac{f(x) - f(a_\varepsilon)}{g(x) - g(a_\varepsilon)} = \frac{f'(\xi(x))}{g'(\xi(x))}$$

В силу того, что $f(x) \neq 0$ и $g(x) \neq 0$, вынесем $\frac{f(x)}{g(x)}$ в левой части равенства:

$$\frac{f(x)}{g(x)} \cdot \frac{1 - \frac{f(a_\varepsilon)}{f(x)}}{1 - \frac{g(a_\varepsilon)}{g(x)}} = \frac{f'(\xi(x))}{g'(\xi(x))}$$

Теперь выберем $x \in (a, a_\varepsilon)$ так, что:

$$\frac{|f(a_\varepsilon)|}{|f(x)|} < \frac{\varepsilon}{3} \quad \wedge \quad \frac{|g(a_\varepsilon)|}{|g(x)|} < \frac{\varepsilon}{3}$$

Тогда:

$$\frac{f(x)}{g(x)} = \frac{f'(\xi(x))}{g'(\xi(x))} \cdot \frac{1 - \frac{g(a_\varepsilon)}{g(x)}}{1 - \frac{f(a_\varepsilon)}{f(x)}} \quad (*)$$

При этом заметим, что:

$$1 - \varepsilon < \frac{1 - \frac{\varepsilon}{3}}{1 + \frac{\varepsilon}{3}} < \frac{1 - \frac{g(a_\varepsilon)}{g(x)}}{1 - \frac{f(a_\varepsilon)}{f(x)}} < \frac{1 + \frac{\varepsilon}{3}}{1 - \frac{\varepsilon}{3}} < 1 + \varepsilon \quad (**)$$

Рассмотрим тогда несколько случаев:

1. $C \in \mathbb{R}$. Значит, учитывая $(*)$ и $(**)$ и то, как выбиралось a_ε , получим:

$$\frac{f(x)}{g(x)} \in ((C - \varepsilon)(1 - \varepsilon), (C + \varepsilon)(1 + \varepsilon))$$

Упрощая выражение выше, получим:

$$\frac{f(x)}{g(x)} \in (C - C \cdot \varepsilon + \varepsilon^2, C + C \cdot \varepsilon + \varepsilon^2)$$

Исходя из этого заключаем, что для всякого $\varepsilon > 0$ найдено a_ε такое, что для всех x , достаточно близких к a , выполнено условие выше, откуда по определению предела немедленно получаем, что:

$$\lim_{x \rightarrow a+0} \frac{f(x)}{g(x)} = C$$

2. $C = +\infty$. Учитывая по аналогии с пунктом выше все полученные оценки и равенства, имеем:

$$\frac{f(x)}{g(x)} \in \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon}, +\infty \right)$$

Из этого также по аналогии с пунктом выше получаем, что:

$$\lim_{x \rightarrow a+0} \frac{f(x)}{g(x)} = C$$

При $C = -\infty$ рассуждения аналогичны рассуждениям в этом пункте.

Из всего вышеописанного легко видеть, что требуемое доказано. \square

Теорема 6.4 (Правило Лопиталя $\frac{\infty}{\infty}$ для луча). Пусть функции f и g дифференцируемы на луче $(A, +\infty)$, $A > 0$. Пусть

$$\exists \lim_{x \rightarrow +\infty} |f(x)| = \infty \quad \wedge \quad \exists \lim_{x \rightarrow +\infty} |g(x)| = \infty$$

Пусть

$$\forall x \in (A, +\infty) \hookrightarrow g'(x) \neq 0 \quad \wedge \quad \exists \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f'(x)}{g'(x)} = C \in \overline{\mathbb{R}}$$

Тогда

$$\exists \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{g(x)} = C$$

Доказательство. Доказательство аналогично доказательству правила Лопиталя $\frac{0}{0}$ для луча, то есть выполняется редукция к предыдущей теореме посредством замены $x(t) = \frac{1}{t}$. \square

Пример 6.1. Пусть $n \in \mathbb{N}$. Найти:

$$\lim_{x \rightarrow +0} \frac{e^{-\frac{1}{x}}}{x^n}$$

Решение. Несложно видеть, что имеем неопределённость вида $\frac{0}{0}$. Так как работаем в проколотой окрестности нуля, то сделаем замену $t = \frac{1}{x}$. По теореме о замене переменных при вычислении предела получим:

$$\lim_{x \rightarrow +0} \frac{e^{-\frac{1}{x}}}{x^n} = \lim_{t \rightarrow +\infty} t^n e^{-t} = \lim_{t \rightarrow +\infty} \frac{t^n}{e^t} = [\text{Лопиталь } n \text{ раз}] = 0$$

\square