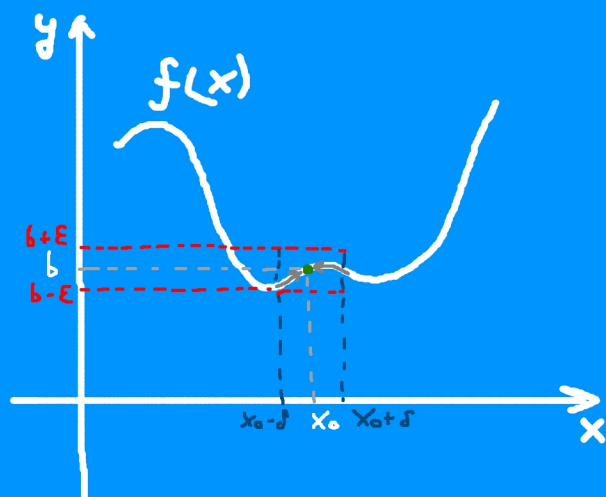


Real analysis I

$$\left[\left[\left[\frac{p}{q} \right] \right]_{\sqrt{2} \notin \mathbb{Q}} \right] \rightarrow$$

$$\sqrt{2}: 1.4, 1.41, 1.414, 1.4142, \dots$$

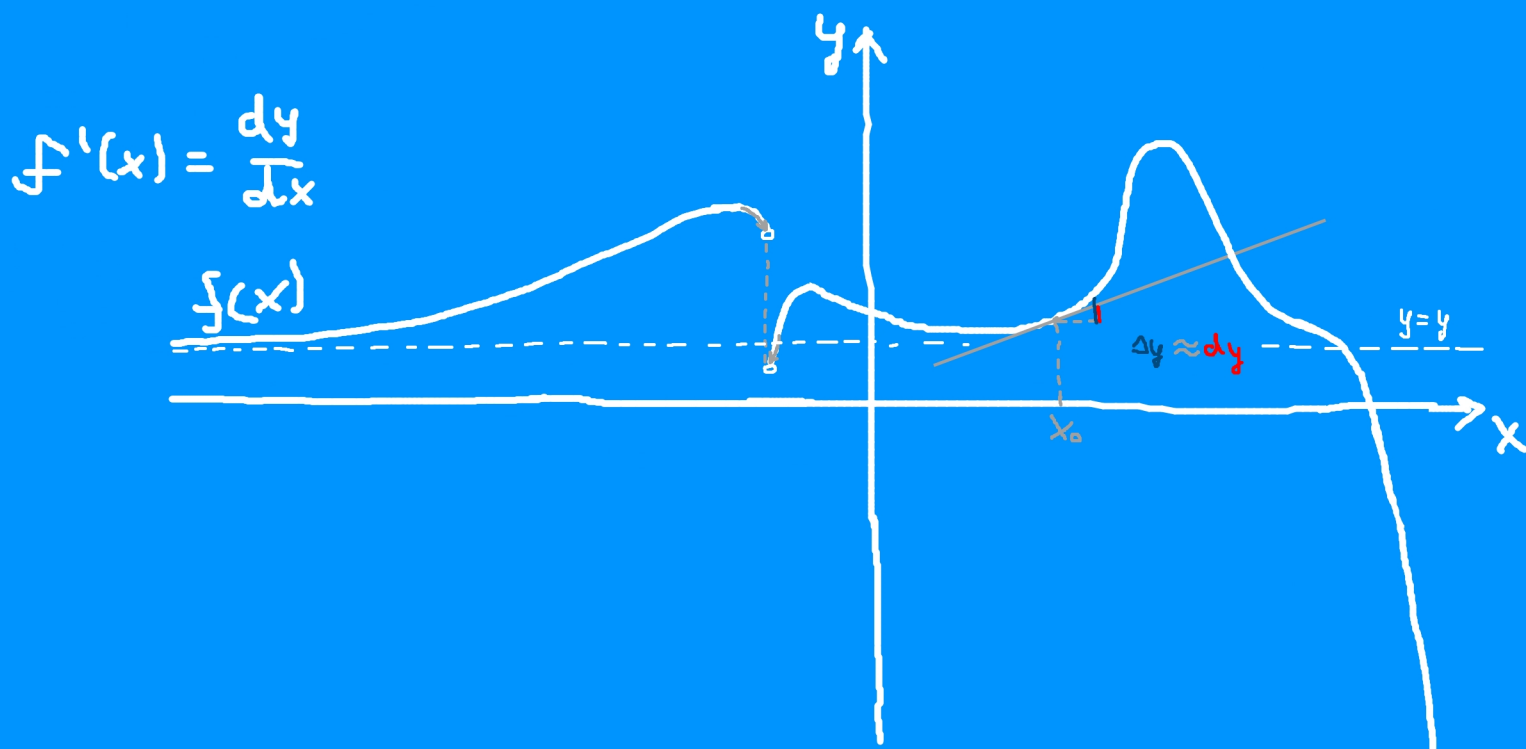


$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = b$$

$$\Leftrightarrow \forall \epsilon > 0: \exists \delta > 0: \forall x: 0 < |x - x_0| < \delta \Rightarrow |f(x) - b| < \epsilon$$

$$\sin x \sim x \quad x \rightarrow 0$$

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots + \frac{x^n}{n!} + o(x^n) \quad x \rightarrow 0$$



Зміст

1	Множина дійсних чисел	8
1.1	Аксіоматика множини дійсних чисел	8
1.2	Точкові межі	9
1.3	Принцип Архімеда та її наслідки	11
1.4	Топологія множини дійсних чисел	12
1.5	Основні твердження аналізу	17
3	Границі числової послідовності	20
3.1	Основні означення	20
3.2	Нескінченно малі/великі послідовності	22
3.3	Нерівності в границях	24
3.4	Монотонні послідовності	25
3.5	Число e	26
3.6	Підпослідовності	27
3.7	Фундаментальна послідовність	31
3.8	Теореми Штольца та Чезаро	32
4	Границі функції	38
4.1	Означення границь функцій	38
4.2	Односторонні границі та границі монотонних функцій	40
4.3	Основні властивості	42
4.4	Перша чудова границя	45
4.5	Складенно-показникова функція	45
4.6	Друга чудова границя	45
4.7	Порівняння функцій, відношення О-велике, о-маленьке та еквівалентності	47
5	Неперервність функції	50
5.1	Неперервність в точці	50
5.2	Неперервність функції на відрізку	52
5.3	Існування неперервної оберненої функції	53
5.4	Неперервність елементарних функцій	54
5.5	Рівномірна неперервність	55
6	Диференціювання	57
6.1	Основні означення	57
6.2	Похідні по один бік	60
6.3	Дотична та нормаль до графіку функції	61
6.4	Диференціал функції	62
6.5	Інваріантність форми першого диференціалу	62
6.6	Приблизне обчислення значень для диференційованих функцій	63
6.7	Похідна та диференціал вищих порядків	63
6.8	Неінваріантність форми другого диференціалу	65
6.9	Похідна від параметрично заданої функції	65
6.10	Основні теореми	65
6.11	Дослідження функції	67
6.11.1	На монотонність	67
6.11.2	На локальні екстремуми	68
6.11.3	На опуклість	69
6.11.4	На асимптоти	71
6.12	Правила Лопітала	72
6.13	Формула Тейлора	73

Необхідні тулзи для розвитку матана

Шкільні речі та трошки про те, як розвивати множину дійсних чисел

Уже з такими числами було більш-менш ознайомлено в школі. Починалось все з натуральних чисел:

$$\mathbb{N} = \{1, 2, 3, \dots\}$$

Далі пішли цілі числа:

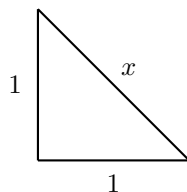
$$\mathbb{Z} = \{\dots, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots\}$$

Саме в цілих числах ми змогли визначити вже операцію $+$, але цього недостатньо. Потім раціональні числа:

$$\mathbb{Q} = \left\{ \frac{m}{n} \mid m \in \mathbb{Z}, n \in \mathbb{N} \right\}$$

А тут вже ми змогли визначити операцію \cdot , і цього теж мало. Насправді, всі ці множини та операції $+$, \cdot можна спробувати дуже строго формалізувати, проте цього робити не планую. Це не сильно вплине на якість вивчення матана.

Настав саме час дослідити поле дійсних чисел \mathbb{R} . Одна з головних мотивацій зробити \mathbb{R} – це прямокутний трикутник зі сторонами 1.



За теоремою Піфагора, ми вже знаємо, що $x^2 = 1^2 + 1^2 \implies x^2 = 2$. І от тут виникли проблеми:

Proposition 0.0.1 $\nexists x \in \mathbb{Q} : x^2 = 2$. Або, інакше кажучи, $\sqrt{2} \notin \mathbb{Q}$.

Proof.

Припустімо, що все ж таки $\exists x \in \mathbb{Q}$, тобто $x = \frac{m}{n}$, $m \in \mathbb{Z}, n \in \mathbb{N}$, нескоротимий дріб, для якого

$$x^2 = 2 \implies \frac{m^2}{n^2} = 2 \implies m^2 = 2n^2.$$

Оскільки $2n^2$ – це парне число, то m^2 – також парне, а тому m – парне, тоді таке число представимо у вигляді $m = 2k, k \in \mathbb{Z}$.

$$4k^2 = 2n^2 \implies 2k^2 = n^2$$

Оскільки $2k^2$ – це парне число, то n^2 – також парне, а тому n – парне, тоді таке число представимо у вигляді $n = 2l, l \in \mathbb{Z}$.

Проте m, n одночасно не можуть бути парними, оскільки ми отримаємо скоротимий дріб, а, за умовою, ми не брали таких. Суперечність!

Отже, наше припущення було невірним. ■

Саме це твердження є головною мотивацією розвивати нову множину. У грубому сенсі, це все означає, що множина \mathbb{Q} – неповна множина, тобто на числовій прямій є “дірки”. І саме \mathbb{R} прибирає ці самі “дірки”.

Множину \mathbb{R} можна конструювати як набір нескінченних десяткових дробів. Наприклад, число $\sqrt{2} = 1.41421356237\dots$. Там же можна визначити всі операції. Конструкцією \mathbb{R} займемося згодом.

Принцип математичної індукції

Definition 0.0.2 Числова множина E називається **індуктивною**, якщо

$$\forall x \in E : x + 1 \in E$$

Theorem 0.0.3 Множина натуральних чисел \mathbb{N} – мінімальна індуктивна множина, що містить 1.

Remark 0.0.4 Переформулюю математичною мовою дану теорему:
 $\forall E - \text{індуктивна: } 1 \in E \implies \mathbb{N} \subset E$.

Proof.

- 1) Те, що \mathbb{N} індуктивна, зрозуміло, тому що $\forall k \in \mathbb{N} : k + 1 \in \mathbb{N}$.
2) Оскільки $1 \in E$ і, більш того, вона є індуктивною, то $2 \in E, 3 \in E, \dots, k \in E$.
А тому $\forall k \in \mathbb{N} \Rightarrow k \in E$. Таким чином, $\mathbb{N} \subset E$. ■

Corollary 0.0.5 Принцип математичної індукції

Розглянемо числову множину $E = \{n \in \mathbb{N} : P(n)\}$. Тут $P(n)$ – це деяка умова.

Тоді якщо $1 \in E$ та індуктивна, то $E = \mathbb{N}$.

Авторське скорочення: МІ – математична індукція.

Proof.

За умовою наслідка, маємо, що $E \subset \mathbb{N}$. Оскільки $1 \in E$ та індуктивна, то за попередньою теоремою, $\mathbb{N} \subset E$. Отже, $E = \mathbb{N}$. ■

Про що цей наслідок: ми хочемо ствердитись, що $P(n)$ виконується при будь-яких $n \in \mathbb{N}$. Для цього треба зробити три кроки:

1. База індукції

Перевіряємо, що $P(1)$ виконується.

2. Крок індукції

Вважаємо, що $P(n)$ – виконано. Показуємо, що $P(n + 1)$ виконується.

Двома кроками доводимо, що наша множина E – індуктивна, що містить одиницю. Отже, МІ доведено, а тому $P(n)$ виконується завжди.

Example 0.0.6 Довести, що $1 + 2 + \dots + n = \frac{n(n+1)}{2}$.

Тут множина $E = \left\{ n \in \mathbb{N} : 1 + 2 + \dots + n = \frac{n(n+1)}{2} \right\}$.

1. База індукції

$$1 \in E \Rightarrow 1 = \frac{1(1+1)}{2} = 1$$

2. Крок індукції

Нехай $k \in E$, тобто $1 + 2 + \dots + k = \frac{k(k+1)}{2}$

Доведемо, що $k + 1 \in E$

$$1 + 2 + \dots + k + (k + 1) = \frac{k(k+1)}{2} + k = \frac{k(k+1) + 2k}{2} = \frac{(k+1)(k+2)}{2}$$

Отже, $k + 1 \in E$. А значить, $E = \mathbb{N}$, тобто наша формула виконується $\forall n \in \mathbb{N}$. МІ доведено.

Example 0.0.7 Довести, що $\forall n \in \mathbb{N} \setminus \{1\} : 2^n \geq n$.

Тут множина $E = \{n \in \mathbb{N} \setminus \{1\} : 2^n \geq n\}$.

1. База індукції

$$2 \in E \Rightarrow 2^2 \geq 2$$

2. Крок індукції

Нехай $k \in E$, тобто $2^k \geq k$.

Доведемо, що $k + 1 \in E$. Маємо

$$2^{k+1} = 2 \cdot 2^k \geq 2k = k + k > k + 1$$

Отже, $k + 1 \in E$, тобто $E = \mathbb{N} \setminus \{1\}$, тобто наше твердження виконується $\forall n \neq 1$. МІ доведено.

Основні нерівності

Theorem 0.0.8 Нерівність Бернуллі

Для всіх $x > -1$ виконано $(1 + x)^n \geq 1 + nx$, $\forall n \geq 1$.

Proof.

Доведення за МІ по n .

1. База індукції: при $n = 1$: $(1 + x)^1 \geq 1 + 1 \cdot x$. Нерівність виконується.

2. Крок індукції: нехай для фіксованого n нерівність виконується. Доведемо для значення $n + 1$.

$$(1 + x)^{n+1} = (1 + x)(1 + x)^n \geq (1 + x)(1 + nx) = 1 + (n + 1)x + nx^2 \geq 1 + (n + 1)x$$

Отже, така нерівність справедлива $\forall n \geq 1$.

МІ доведено. ■

Theorem 0.0.9 Нерівність Коші

Для всіх $a_1, \dots, a_n > 0$ виконано $\frac{a_1 + \dots + a_n}{n} \geq \sqrt[n]{a_1 \dots a_n}, \quad \forall n \geq 1$.

Proof.

Тимчасове перепозначення: $A_n = \frac{a_1 + \dots + a_n}{n}, \quad G_n = \sqrt[n]{a_1 \dots a_n}$.

Зрозуміло, що $\frac{A_n}{A_{n-1}} > 0 \implies \frac{A_n}{A_{n-1}} - 1 > -1$. Тоді за нерівністю Бернуллі,

$$\left(1 + \left(\frac{A_n}{A_{n-1}} - 1\right)\right)^n \geq 1 + n \cdot \left(\frac{A_n}{A_{n-1}} - 1\right) \implies \frac{(A_n)^n}{(A_{n-1})^n} \geq \frac{a_n}{A_{n-1}} \implies (A_n)^n \geq a_n (A_{n-1})^{n-1}, \forall n \geq 1.$$

Тоді $(A_n)^n \geq a_n (A_{n-1})^{n-1} \geq \dots \geq a_n a_{n-1} \dots a_1$.

Отже, $A_n \geq G_n$, що й хотіли довести. ■

Біноміальні коефіцієнти, біном Ньютона

Definition 0.0.10 Факторіалом натурального числа називають таке число:

$$n! = n \cdot (n - 1) \dots 2 \cdot 1$$

Домовленість: $0! = 1$.

Corollary 0.0.11 $(n + 1)! = (n + 1)n!$

Definition 0.0.12 Біноміальним коефіцієнтом назовемо ось таке число:

$$C_n^k = \frac{n!}{k!(n - k)!}$$

Інтерпретація того числа: серед n студентів обрати k студентів, що будуть відраховані. При цьому неважливо, у якому порядку k студентів стануть в ряд.

Proposition 0.0.13 $C_n^k + C_n^{k+1} = C_{n+1}^{k+1}$

Proof.

$$C_n^k + C_n^{k+1} = \frac{n!}{k!(n - k)!} + \frac{n!}{(k + 1)!(n - (k + 1))!} \quad \boxed{=}$$

За властивістю факторіала, $(n - k)! = (n - k - 1)!(n - k)$, а також $(k + 1)! = (k + 1)k!$

$$\boxed{=} \frac{n!}{k!(n - k)(n - k - 1)!} + \frac{n!}{k!(k + 1)(n - k - 1)!} = \frac{n!}{k!(n - k - 1)!} \left(\frac{1}{n - k} + \frac{1}{k + 1} \right) =$$

$$= \frac{n!}{k!(n - k - 1)!} \frac{n + 1}{(n - k)(k + 1)} \quad \boxed{=}$$

Знову за властивістю факторіала, $(n + 1)n! = (n + 1)!$, а також

$$(n - k)(n - k - 1)! = (n - k)!, \quad (k + 1)k! = (k + 1)!$$

$$\boxed{=} \frac{(n + 1)!}{(k + 1)!(n - k)!} = \frac{(n + 1)!}{(k + 1)!((n + 1) - (k + 1))!} = C_{n+1}^{k+1} \quad \blacksquare$$

Трикутник Паскаля

В школі були такі формули:

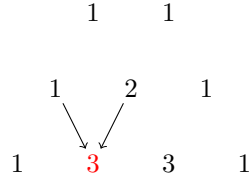
$$(a + b) = a + b$$

$$(a + b)^2 = a^2 + 2ab + b^2$$

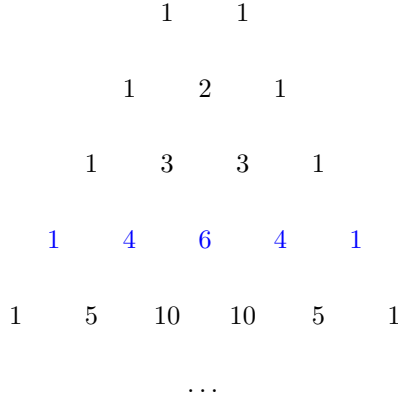
$$(a + b)^3 = a^3 + 3a^2b + 3ab^2 + b^3$$

$$(a + b)^4 = ?$$

Приберімо зараз літери a, b та отримаємо такий малюнок:



По краях трикутника ми будемо завжди з одиницями. Червоне число 3 взялося шляхом додавання двох чисел зверху: $1 + 2$. Якщо дотримуватись аналогічних міркувань, то ми зможемо розширити трикутник Паскаля:



Трикутник Паскаля

Із цього трикутника ми тепер можемо знайти $(a + b)^4$, якщо знати, як повернути літери:

$$(a + b)^4 = 1a^4 + 4a^3b + 6a^2b^2 + 4ab^3 + 1b^4$$

Формула починається з a^4 та b^0 . А далі степінь a зменшуємо на одиницю, а степінь b , навпаки, збільшуємо на одиницю. А тепер узагальнімо це:

Theorem 0.0.14 Біном Ньютона

$$(a + b)^n = C_n^0 a^n b^0 + C_n^1 a^{n-1} b + C_n^2 a^{n-2} b^2 + \dots + C_n^{n-1} a b^{n-1} + C_n^n a^0 b^n.$$

Якщо коротко, можна записати як $(a + b)^n = \sum_{k=0}^n C_n^k a^{n-k} b^k$.

Proof.

Дану формулу доведемо за МІ по числу $n \in \mathbb{N}$.

1. База індукції. $n = 1 \implies (a + b)^1 = C_1^0 a^1 b^0 + C_1^1 a^0 b^1 = a + b$

2. Крок індукції. Припустимо, що для фіксованого n формула виконана, тобто $(a + b)^n = \sum_{k=0}^n C_n^k a^{n-k} b^k$.

Перевіримо цю формулу для $n + 1$.

$$(a + b)^{n+1} = (a + b)(a + b)^n \stackrel{\text{припущення МІ}}{=} (a + b) \sum_{k=0}^n C_n^k a^{n-k} b^k = \sum_{k=0}^n C_n^k a^{n-k+1} b^k + \sum_{k=0}^n C_n^k a^{n-k} b^{k+1} =$$

$$\overset{\text{red}}{a^{n+1}} + \sum_{\substack{k=1 \\ \text{red}}}^n C_n^k a^{n-k+1} b^k + \sum_{k=0}^{\substack{n-1 \\ \text{red}}} C_n^k a^{n-k} b^{k+1} + \overset{\text{red}}{b^{n+1}} \boxed{=}$$

В другій сумі ми замінимо лічильник: $m = k + 1$

Було: $0, 1, 2, \dots, n - 1$

Стало: $1, 2, 3, \dots, n$

$$\boxed{=} a^{n+1} + \sum_{k=1}^n C_n^k a^{n-k+1} b^k + \sum_{m=1}^n C_n^{m-1} a^{n-(m-1)} b^{(m-1)+1} + b^{n+1} \boxed{=}$$

Замінімо літеру $m = k$, сума від цього не зміниться

$$\boxed{=} a^{n+1} + \sum_{k=1}^n C_n^k a^{n-k+1} b^k + \sum_{k=1}^n C_n^{k-1} a^{n-k+1} b^k + b^{n+1} = a^{n+1} + \sum_{k=1}^n a^{n-k+1} b^k (C_n^k + C_n^{k-1}) + b^{n+1} =$$

$$a^{n+1} + \sum_{k=1}^n a^{n-k+1} b^k C_{n+1}^k + b^{n+1} = C_{n+1}^0 a^{n+1} b^0 + \sum_{k=1}^n a^{n-k+1} b^k C_{n+1}^k + C_{n+1}^{n+1} a^0 b^{n+1} = \sum_{k=0}^{n+1} C_{n+1}^k a^{n-k+1} b^k =$$

$(a + b)^{n+1}$
МІ доведено.



1 Множина дійсних чисел

1.1 Аксиоматика множини дійсних чисел

Definition 1.1.1 Множину дійсних чисел позначають за \mathbb{R} . Визначимо її так, щоб ми мали ті самі операції додавання, множення та відношення порядку як раніше:

I. Додавання $+$.

$$\begin{aligned} a + b &= b + a && \text{— комутативність;} \\ a + (b + c) &= (a + b) + c && \text{— асоціативність;} \\ \exists 0 \in \mathbb{R} : a + 0 &= a && \text{— існування нейтрального елемента;} \\ \exists (-a) \in \mathbb{R} : a + (-a) &= 0 && \text{— існування оберненого елемента.} \end{aligned}$$

II. Множення \cdot .

$$\begin{aligned} a \cdot b &= b \cdot a && \text{— комутативність;} \\ (a \cdot b) \cdot c &= a \cdot (b \cdot c) && \text{— асоціативність;} \\ \exists 1 \in \mathbb{R} : a \cdot 1 &= a && \text{— існування нейтрального елемента;} \\ \exists \left(\frac{1}{a}\right) \in \mathbb{R} \setminus \{0\} : a \cdot \frac{1}{a} &= 1 && \text{— існування оберненого елемента;} \\ (a + b) \cdot c &= a \cdot c + b \cdot c && \text{— дистрибутивність.} \end{aligned}$$

III. Відношення порядку \leq .

$$\begin{aligned} a \leq b \text{ та } b \leq a &\implies a = b; \\ a \leq b \text{ та } b \leq c &\implies a \leq c; \\ a \leq b &\implies a + c \leq b + c; \\ a \leq b \text{ та } c > 0 &\implies ac \leq bc. \end{aligned}$$

IV. Аксиома неперервності.

Нехай є дві множини $A, B \subset \mathbb{R}$. Відомо, що $\forall a \in A, \forall b \in B : a \leq b$. Тоді $\exists c \in \mathbb{R} : a \leq c \leq b$.

На відміну від раціональних чисел \mathbb{Q} , в дійсних числах \mathbb{R} виникає нова аксіома неперервності. Завдяки ньому, ми прибираємо “дірки” з числової прямої. Зокрема $\sqrt{2}$ буде вже на числовій прямій.

Remark 1.1.2 Існують точно три варіанти, як строго побудувати множину дійсних чисел: через представлення числа в нескінченний десятковий дріб; через послідовності Коші; через переріз Дедекінда. Можливо, існують ще якісь. Займатися побудовою ми не стали, оскільки це абсолютно нудна робота.

Надалі також ми будемо іноді користуватись множиною дійсних чисел, до якої ми додамо “точки” $-\infty$ та $+\infty$. Якщо нас не цікавить знак, то будемо просто позначати ∞ .

$$\bar{\mathbb{R}} = \mathbb{R} \cup \{-\infty, +\infty\}$$

Це такі спеціальні точки, для яких виконуються такі властивості:

$$\begin{aligned} x + (\infty) &= (\infty) + x = \infty, && \text{якщо } x \neq \infty; \\ x \cdot \infty &= \infty \cdot x = \infty, && \text{якщо } x \neq \infty; \\ \forall x \in \mathbb{R} : &-\infty < x < +\infty. \end{aligned}$$

1.2 Точкові межі

Definition 1.2.1 Задано множини $A, B \subset \mathbb{R}$.

Множина A називається **обмеженою зверху**, якщо

$$\exists c \in \mathbb{R} : \forall a \in A : a \leq c$$

Множина B називається **обмеженою знизу**, якщо

$$\exists d \in \mathbb{R} : \forall b \in B : b \geq d$$

Множину всіх чисел, що обмежують множину зверху, позначу за $\text{Upper } A$, тобто

$$\text{Upper } A = \{c \in \mathbb{R} \mid \forall a \in A : a \leq c\}$$

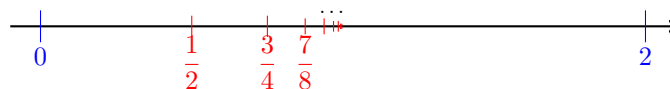
Множину всіх чисел, що обмежують множину знизу, позначу за $\text{Lower } B$, тобто

$$\text{Lower } B = \{d \in \mathbb{R} \mid \forall b \in B : b \geq d\}$$

Example 1.2.2 Задано множину $A = \{1 - 2^{-n} \mid n \in \mathbb{N}\} \stackrel{\text{або}}{=} \left\{ \frac{1}{2}, \frac{3}{4}, \frac{7}{8}, \dots \right\}$. Вона є:

обмеженою зверху числом $2 \in \mathbb{R}$, тобто $\forall a \in A : a < 2$;

обмеженою знизу числом $0 \in \mathbb{R}$, тобто $\forall a \in A : a > 0$.



Судячи з малюнку, ми розуміємо, що ми сильно грубо обмежили множину зверху та знизу. Ми хочемо більш точну межу. Для цього допоможе нам пара фактів.

Proposition 1.2.3 Якщо $c \in \text{Upper } A$ та $c_1 > c$, то $c_1 \in \text{Upper } A$.

Proposition 1.2.4 Якщо $d \in \text{Lower } B$ та $d_1 < d$, то $d_1 \in \text{Lower } B$.

Обидва твердження випливають з визначення множин $\text{Upper } A, \text{Lower } B$.

Remark 1.2.5 Множина $\text{Upper } A$ обмежена знизу; множина $\text{Lower } B$ обмежена зверху. Впливає з означень обмеженості.

Proposition 1.2.6 Для множини $\text{Upper } A$ існує найменший елемент, а для множини $\text{Lower } B$ існує найбільший елемент. Причому вони єдині.

Proof.

Доведення буде проводитися над множиною $\text{Upper } A$. Для множини $\text{Lower } B$ аналогічно.

I. Існування.

Маємо множину A та множину $\text{Upper } A$ – всі числа, що обмежують зверху множину A . Тобто $\forall a \in A : \forall c \in \text{Up} A : a \leq c$. За аксіомою неперервності, $\exists c' \in \mathbb{R} : a \leq c' \leq c \implies c' \in \text{Upper } A$.

$\forall c \in \text{Upper } A : c' \leq c \implies c' = \min \text{Upper } A$.

II. Єдиність.

Припустимо, що $\exists c'' = \min \text{Upper } A$. Але це автоматично неможливо, оскільки якщо $c'' > c'$, то c'' не є більше мінімальним елементом, а якщо $c'' < c'$, то вже c' не є мінімальним елементом. Суперечність! ■

Definition 1.2.7 Задано множини $A, B \subset \mathbb{R}$.

Точною верхньою межею (або **супремумом**) називають таке число:

$$\sup A = \min \text{Upper } A$$

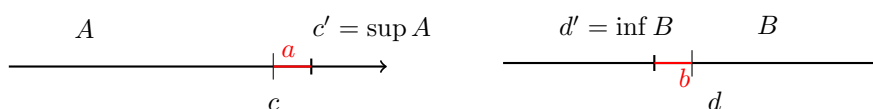
Тобто супремум – це найменше число, що обмежує множину A зверху. **Точною нижньою межею** (або **інфімумом**) називають таке число:

$$\inf B = \max \text{Lower } B$$

Тобто інфімум – це найбільше число, що обмежує множину B знизу.

Theorem 1.2.8 Критерій супремуму та інфімуму

$$c' = \sup A \iff \begin{cases} \forall a \in A : a \leq c' \\ \forall c < c' : \exists a \in A : a > c \end{cases} \quad d' = \inf B \iff \begin{cases} \forall b \in B : b \geq d' \\ \forall d > d' : \exists b \in B : b < d \end{cases}$$



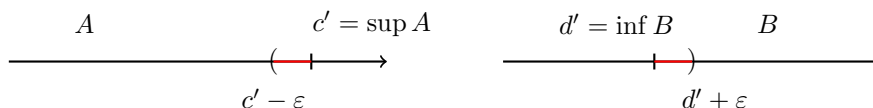
Proof.

\Rightarrow Дано: $c' = \sup A$. Тоді автоматично $c' \in \text{Upper } A$, тобто $\forall a \in A : a \leq c'$.
Оскільки $c' = \min \text{Upper } A$, то звідси $\forall c < c' : c \notin \text{Upper } A$, тоді $\exists a \in A : a > c$.
Остання умова – це заперечення того, що c обмежує множину A зверху.

\Leftarrow Дано: система з двох умов. Із першої умови, $c' \in \text{Upper } A$. Із другої умови, $c' = \min \text{Upper } A$.
Отже, $c' = \sup A$. ■

Corollary 1.2.9 Інший вигляд критерію

$$c' = \sup A \iff \begin{cases} \forall a \in A : a \leq c' \\ \forall \varepsilon > 0 : \exists a_\varepsilon \in A : a_\varepsilon > c' - \varepsilon \end{cases} \quad d' = \inf B \iff \begin{cases} \forall b \in B : b \geq d' \\ \forall \varepsilon > 0 : \exists b_\varepsilon \in B : b_\varepsilon < d' + \varepsilon \end{cases}$$



Другий пункт кожного критерію звучить так. Якщо я цей супремум зменшу на скільки завгодно малу (а може, й немалу) величину, то це не буде супремумом; а значить, знайдеться певний елемент, що буде його перевищувати. Аналогічно з інфімумом.

Це випливає з попередньої теореми.

Вказівка: $c = c' - \varepsilon$ для критерія з супремумом.

Example 1.2.10 Повернімось до множини $A = \{1 - 2^{-n} \mid n \in \mathbb{N}\} \stackrel{\text{або}}{=} \left\{\frac{1}{2}, \frac{3}{4}, \frac{7}{8}, \dots\right\}$. Доведемо, що $\sup A = 1$.

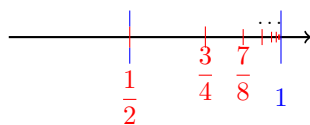
Дійсно, $\forall a \in A : a = 1 - \frac{1}{2^n} < 1$.

Нехай $c < 1$. Знайдемо таке число $a \in A$, щоб $a > c$.

$$1 - \frac{1}{2^n} > 1 - \frac{1}{2n} > c \iff \frac{1}{2n} < 1 - c \iff n > \frac{1}{2 - 2c}$$

Ця нерівність каже, що існує такий номер $n \in \mathbb{N}$, щоб взяти елемент $a \in A$, для якого, $a > c$. Але якщо точніше, ми можемо взяти $n = \left\lceil \frac{1}{2 - 2c} \right\rceil + 1$, проте про цю штуку $\lceil \cdot \rceil$ (це називається ціла частина числа) треба ще згодом поговорити.

Аналогічно доводиться, що $\inf A = \frac{1}{2}$.



Remark 1.2.11 До речі, у цьому прикладі $\inf A = \min A$, оскільки сам інфімум міститься на множині A . Водночас $\sup A \neq \max A$, тому що цей елемент не знаходиться на множині A .

Definition 1.2.12 Множина $F \subset \mathbb{R}$ називається **обмеженою**, якщо

F – обмежена зверху та знизу одночасно.

Remark 1.2.13 Означення того, що F – обмежена, можна переписати в більш зручному вигляді:

$$\exists p > 0 : \forall f \in F : |f| \leq p$$

Існує певна домовленість в особливих випадках. Зокрема:

якщо A не є обмеженою зверху, то вважаємо $\sup A = +\infty$;

якщо B не є обмеженою знизу, то вважаємо $\inf B = -\infty$.

1.3 Принцип Архімеда та її наслідки

Theorem 1.3.1 Множина натуральних чисел \mathbb{N} не є обмеженою зверху. Математично кажучи, $\forall a \in \mathbb{R} : \exists n \in \mathbb{N} : n > a$.

Proof.

Припустимо, що все ж таки обмежена зверху, тобто $\forall n \in \mathbb{N} : n \leq a$. Встановимо $\sup \mathbb{N} = u$. За критерієм, зокрема для $\varepsilon = 1 : \exists m \in \mathbb{N} : m > u - 1 \Rightarrow u < m + 1$. Проте маємо, що натуральне число $m + 1$ перевищує супремуму. Суперечність! ■

Corollary 1.3.2 Множина цілих чисел \mathbb{Z} не обмежена ані зверху, ані знизу.

Proof.

Зафіксуємо два числа $a, -a \in \mathbb{R}$. Тоді за попередньою теоремою, $\exists n \in \mathbb{N} \Rightarrow n \in \mathbb{Z} : n > a$.
 $\exists m \in \mathbb{N} : m > (-a) \Rightarrow -m < a$, тут вже $-m \in \mathbb{Z}$. ■

Theorem 1.3.3 Принцип Архімеда

$\forall x \in \mathbb{R} : \forall y > 0 : \exists k \in \mathbb{Z} : (k - 1)y \leq x < ky$



Принцип Архімеда каже, що знідеться така кількість червоних відрізків, яку можна відкласти на чорну лінію, щоб довжина була менше лінії, а при додаванні наступного відрізка довжина буде більше лінії. Якщо число від'ємне, то можна вважати, що ми йдемо в інший напрямок.

Proof.

Нехай маємо якийсь $x \in \mathbb{R}$, а також $y > 0$.
 Задамо множину $S = \{l \in \mathbb{Z} : x < ly\}$ – множина всіх цілих чисел, щоб чорна лінія x була менше за довжиною ніж сума червоних відрізків y з кількістю l . Перепишемо інакше: $S = \left\{l \in \mathbb{Z} : l > \frac{x}{y}\right\}$.
 Множина S – обмежена знизу; не порожня, тому що зверху не є обмеженою. Отже, можемо мати $\inf S = m$ (поки не знаємо, що це якесь ціле число). За критерієм інфімуму, $\exists k \in S \Rightarrow k \in \mathbb{Z} : m \leq k < m + 1$. А тому $k = \min S$.
 Таким чином, $k \in S$, отримали, що $k > \frac{x}{y} \Rightarrow x < ky$.
 Також тоді маємо, що $k - 1 \notin S$, тоді $k - 1 \leq \frac{x}{y} \Rightarrow x \geq (k - 1)y$.
 Остаточню: $(k - 1)y \leq x < ky$. ■

Definition 1.3.4 Цілою частиною числа $x \in \mathbb{R}$ називають таке число:

$$[x] = \max\{m \in \mathbb{Z} \mid m \leq x\}$$

У зарубіжній літературі це ще називають **floor** та позначають по-інакшому: $\lfloor x \rfloor$.

Remark 1.3.5 Саме завдяки принципу Архімеда, ми можемо визначити цілу частину числа.

Якщо маємо $x \in \mathbb{R}$ та встановимо $y = 1$, то тоді $\forall x \in \mathbb{R} : \exists k \in \mathbb{Z} : k \leq x < k + 1$. Нерівність каже, що k – це найбільше ціле число, для якого $k \leq x$, оскільки далі $k + 1 > x$, тож у нас існує $[x] = k$.

Corollary 1.3.6 $\forall \varepsilon > 0 : \exists n \in \mathbb{N} : \frac{1}{n} < \varepsilon$.

Proof.

Встановимо $x = 1, y = \varepsilon$. Тоді за принципом Архімеда, $(n - 1)\varepsilon \leq 1 < n\varepsilon \Rightarrow \frac{1}{n} < \varepsilon$. ■

Corollary 1.3.7 Задано таке число $a \geq 0$, для якого $\forall \varepsilon > 0 : a < \varepsilon$. Тоді $a = 0$.

Proof.

Припустимо, що $a \neq 0$, тобто $a > 0$. Тоді звідси $\frac{1}{a} > 0$. Тоді за щойно отриманим наслідком, $\exists n : \frac{1}{n} < a$. Проте ми також маємо, що для $a < \frac{1}{n} = \varepsilon$. Суперечність! ■

Corollary 1.3.8 Задано такі два числа $a, b \in \mathbb{R}$, що $a < b$. Тоді в інтервалі (a, b) знайдеться принаймні одне раціональне число.

Математично кажучи, $\exists q \in \mathbb{Q} : a < q < b$.

Proof.

Оскільки $a < b$, то звідси $b - a > 0$. Тоді $\exists n : \frac{1}{n} < b - a$.

Визначимо $q = \frac{[na] + 1}{n}$. Перевіримо, що таке раціональне число дійсно лежить в (a, b) .

$$q = \frac{[na] + 1}{n} > \frac{na - 1 + 1}{n} = a;$$

$$q = \frac{[na] + 1}{n} < \frac{na + 1}{n} = a + \frac{1}{n} < a + b - a = b.$$

Отже, дійсно, $\exists q \in (a, b)$. ■

Corollary 1.3.9 Задано такі два числа $a, b \in \mathbb{R}$, що $a < b$. Тоді в інтервалі (a, b) знайдеться принаймні одне ірраціональне число.

Математично кажучи, $\exists x \in \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q} : a < x < b$

Proof.

Оскільки $a < b$, то звідси $\frac{a}{\sqrt{2}} < \frac{b}{\sqrt{2}}$. За попереднім наслідком, $\exists q \in \mathbb{Q} : \frac{a}{\sqrt{2}} < q < \frac{b}{\sqrt{2}}$. Тоді якщо покласти $x = q\sqrt{2}$, то $a < x < b$. А число $x \in \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}$, бо квадратний корінь є ірраціональним. ■

1.4 Топологія множини дійсних чисел

Definition 1.4.1 ε -околом точки x будемо називати таку множину:

$$U_\varepsilon(x) = \{a \in \mathbb{R} : |x - a| < \varepsilon\} \stackrel{\text{або}}{=} (x - \varepsilon, x + \varepsilon)$$

Проколением ε -околом точки x будемо називати таку множину:

$$\overset{\circ}{U}_\varepsilon(x) = U_\varepsilon(x) \setminus \{x\}$$

Definition 1.4.2 Задамо множину $A \subset \mathbb{R}$ та елемент $a \in A$.

Точку a називають **внутрішньою**, якщо

$$\exists \varepsilon > 0 : U_\varepsilon(a) \subset A$$

Водночас множина A називається **відкритою**, якщо кожна її точка – внутрішня.

Example 1.4.3 Розглянемо множини: (a, b) , $[a, b]$, $(a, b]$, $[a, b)$, $(a, +\infty)$, $[a, +\infty)$, \emptyset , \mathbb{R} .

(a, b) – відкрита.

Справді, оскільки $\forall x \in (a, b) : \exists \varepsilon = \min\{|x - a|, |x - b|\} : U_\varepsilon(x) \subset (a, b)$. Тобто звідси кожна точка x – внутрішня точка.

$[a, b]$ – не відкрита.

Припустимо, що a – внутрішня точка, тоді $\exists \varepsilon > 0 : (a - \varepsilon, a + \varepsilon) \subset [a, b]$, проте $a - \frac{\varepsilon}{2} \in (a - \varepsilon, a + \varepsilon)$

і водночас $a - \frac{\varepsilon}{2} \notin [a, b]$, тому точка a не може бути внутрішньою. Суперечність!

Аналогічні міркування для b . Решта – внутрішні, задавши той самий ε , як попереднього разу.

Автоматично доводимо, що $(a, b]$, $[a, b)$ – не відкриті множини.

$(a, +\infty)$ – відкрита, тому що $\forall x : \exists \varepsilon = |x - a|$.

$[a, +\infty)$ – не відкрита через точка a : не є внутрішньою. Міркування аналогічні. Решта – внутрішні з тим самим ε .

\emptyset – відкрита.

Оскільки порожня множина не містить точок, ми не зможемо знайти точку в порожній множині, яка не є внутрішньою, щоб зруйнувати означення.

\mathbb{R} – відкрита

Дійсно, в кожній точці існує окіл, що автоматично всередині \mathbb{R} .

Proposition 1.4.4 Якщо $\{A_\lambda\}$ – сім'я злічених відкритих підмножин, то $\bigcup_\lambda A_\lambda$ – відкрита.

Proof.

Візьмемо довільну точку $a \in \bigcup_\lambda A_\lambda \implies$ принаймні одному з сімей множин $a \in A_\lambda$. Така множина є відкритою, а тому a – внутрішня точка.

Із нашого ланцюга отримаємо: $\forall a \in \bigcup_\lambda A_\lambda \implies a$ – внутрішня. Тобто $\bigcup_\lambda A_\lambda$ – відкрита. ■

Example 1.4.5 Маємо $A = (1, 2) \cup (4, 16) \cup (32, 64)$. Попередньо ми знаємо, що будь-який інтервал є відкритою множиною. Тому їхнє об'єднання, тобто A , буде відкритою множиною.

Proposition 1.4.6 Якщо $\{A_1, \dots, A_n\}$ – скінченна сім'я відкритих підмножин, то $\bigcap_{k=1}^n A_k$ – відкрита.

Proof.

Візьмемо довільну точку $a \in \bigcap_{k=1}^n A_k \implies a \in A_k$ при всіх $1 \leq k \leq n$. Всі ці множини A_k – відкриті, а тому a – внутрішня точка в A_k .

Тоді існують $\varepsilon_k > 0 : U_{\varepsilon_k}(a) \subset A_k$. Поклавши $\varepsilon = \min_{1 \leq k \leq n} \varepsilon_k$, отримаємо окіл $U_\varepsilon(a) \subset U_{\varepsilon_k}(a) \subset A_k \implies$

$U_\varepsilon(a) \subset \bigcap_{k=1}^n A_k \implies a$ – внутрішня. Тобто $\bigcap_{k=1}^n A_k$ – відкрита. ■

Remark 1.4.7 Приклад того, чого ми беремо тепер скінченну сім'ю.

Маємо сім'ю множин $A_n = \left(-\frac{1}{n}, \frac{1}{n}\right)$ – всі відкриті. Якщо ми зробимо перетин $\bigcap_{n=1}^\infty A_n = \{0\}$, то отримаємо одноточкову множину $\{0\}$, яка не є відкритою.

Definition 1.4.8 Задамо множину $A \subset \mathbb{R}$ та елемент $a \in \mathbb{R}$.

Точку a називають **граничною** множини A , якщо

$$\forall \varepsilon > 0 : \exists x \in A : x \in \overset{\circ}{U}_\varepsilon(a)$$

Водночас множина A називається **замкненою**, якщо вона містить всі граничні точки.

Поки приклад наводити не буду, оскільки таким означенням не завжди зручно перевіряти на замкненість певну множину. Тож потрібне інше означення.

Proposition 1.4.9 a – гранична точка $A \iff \forall \varepsilon > 0 : A \cap U_\varepsilon(a)$ – нескінченна множина.

Proof.

\Rightarrow Дано: a – гранична точка A .

Припустимо, що $\exists \varepsilon^* > 0 : A \cap (a - \varepsilon^*, a + \varepsilon^*)$ – скінченна, тобто

$$x_1, \dots, x_n \in A \cap (a - \varepsilon^*, a + \varepsilon^*) \implies \begin{cases} |x_1 - a| < \varepsilon^* \\ \vdots \\ |x_n - a| < \varepsilon^* \end{cases}.$$

Оскільки a – гранична т. A , то задамо $\varepsilon = \min_{i=1, n} |x_i - a|$. Тоді $\exists x \in A : x \neq a : x \in (a - \varepsilon, a + \varepsilon)$.

Проте це – неправда, оскільки ми отримали окіл ще менше, а при перетині ми не знайдемо жодної точки $x \neq a$. Суперечність!

\Leftarrow Дано: $\forall \varepsilon > 0 : A \cap U_\varepsilon(a)$ – нескінченна множина. Тоді $\forall \varepsilon > 0 : \exists x \in A \cap U_\varepsilon(a)$. Зокрема $\exists x = a - \frac{\varepsilon}{2} \in A : x \neq a : |x - a| < \varepsilon$. Отже, a – гранична точка A . ■

Example 1.4.10 Розглянемо множини: (a, b) , $[a, b]$, $(a, b]$, $[a, b)$, $(a, +\infty)$, $[a, +\infty)$, \emptyset , \mathbb{R} .

(a, b) – не замкнена.

Дійсно, розглянемо точку a . Вона є граничною для множини (a, b) , оскільки $\forall \varepsilon > 0 : \exists x \in (a, b) : x = a - \frac{\varepsilon}{2} : |x - a| < \varepsilon$. Для точки b аналогічні міркування. Але множина (a, b) не містить граничну т. a, b .

$[a, b]$ – замкнена.

Дійсно, $\forall x \in [a, b] : \forall \varepsilon > 0 : [a, b] \cap (x - \varepsilon, x + \varepsilon) = \begin{cases} [a, x + \varepsilon) \\ (x - \varepsilon, x + \varepsilon) \\ (x - \varepsilon, b] \\ [a, b] \end{cases}$ – всі вони нескінченні множини.

Автоматично доводимо, що $(a, b]$, $[a, b)$ – не замкнені множини.

$(a, +\infty)$ – не замкнена.

Дійсно, точка a – гранична для $(a, +\infty)$, але даній множині не належить.

$[a, +\infty)$ – замкнена (аналогічно).

\emptyset – замкнена.

Можна припустити, що існує гранична точка порожньої множини, яка не лежить в порожній множині. Далі прийдемо до суперечності. Тобто не існує точки, яка порушує означення замкненості.

\mathbb{R} – замкнена.

Беремо кожну точку та будь-який окіл, яка в перетині з \mathbb{R} має давати той самий окіл, яка сама є нескінченною множиною.

Example 1.4.11 Розглянемо множину $A = \left\{ \frac{1}{n} \mid n \in \mathbb{N} \right\}$. Знайдемо всі можливі граничні точки.



Ми будемо розглядати кілька можливих випадків.

I. $x = 0$.

Нехай $\varepsilon > 0$. Тоді за **Cr1. 1.3.6**, $\exists n \in \mathbb{N} : \frac{1}{n} < \varepsilon$, або інакше: $\left| \frac{1}{n} - 0 \right| < \varepsilon$. Отже, за означенням, $x = 0$ – гранична точка для A .

II. $x < 0$.

Існує $\varepsilon = -x$, такий, що $(x - \varepsilon, x + \varepsilon) \cap A = \emptyset$, тож жодна точка не буде граничною.

III. $x > 1$.

Існує $\varepsilon = x - 1$, такий, що $(x - \varepsilon, x + \varepsilon) \cap A = \emptyset$, тож жодна точка не буде граничною.

IV. $x \in [0, 1)$.

За принципом Архімеда, $\exists n \in \mathbb{N} : \frac{1}{n+1} < x \leq \frac{1}{n}$. Існує $\varepsilon = \min \left\{ x - \frac{1}{n+1}, \frac{1}{n} - x \right\}$ такий, що $(x - \varepsilon, x + \varepsilon) \cap A = \emptyset$ або $\frac{1}{n}$ – скінченна множина, тож жодна точка не буде граничною.

Остаточно, $x = 0$ – єдина гранична точка для A .

Proposition 1.4.12 A – відкрита множина $\iff \bar{A}$ – замкнена множина.

Proof.

\Rightarrow Дано: A – відкрита множина.

Припустімо, що \bar{A} – не замкнена множина, тобто вона містить не всі свої граничні точки, тобто $\exists a' \in A$, яка буде граничною для \bar{A} . Оскільки $a' \in A$, то вона є внутрішньою, тобто $\exists \varepsilon > 0 : (a' - \varepsilon, a' + \varepsilon) \subset A \Rightarrow (a' - \varepsilon, a' + \varepsilon) \cap \bar{A} = \emptyset$. Суперечність! Бо тут, навпаки, не має виконуватись рівність.

◁ Дано: \bar{A} – замкнена множина.

!Припустимо, що A – не відкрита множина, тобто $\exists a \in A$, яка не є внутрішньою, тобто $\forall \varepsilon > 0 : U_\varepsilon(a) \not\subset A \Rightarrow U_\varepsilon(a) \cap \bar{A} \neq \emptyset$, тобто a – гранична точка \bar{A} .

Оскільки \bar{A} – замкнена, то вона містить всі свої граничні точки, проте $a \notin \bar{A}$. Суперечність! ■

Proposition 1.4.13 Якщо $\{A_\lambda\}$ – сім'я замкнених підмножин, то $\bigcap_\lambda A_\lambda$ – замкнена.

Proposition 1.4.14 Якщо $\{A_1, \dots, A_n\}$ – скінченна сім'я замкнених підмножин, то $\bigcup_{k=1}^n A_k$ – замкнена.

Вказівка: у двох твердженнях застосувати правило де Моргана, а згодом Prp. 1.4.12.

Proposition 1.4.15 Задано $A \neq \emptyset$ – обмежена та замкнена множина. Тоді множина містить найбільше та найменше число.

Proof.

Оскільки A – непорожня та обмежена, то звідси існує $c = \sup A$. Ми доведемо, що $c = \max A$.

Нехай $\varepsilon > 0$. За критерієм супремума, існує точка $x_\varepsilon \in A$, для якої $c \geq x_\varepsilon > c - \varepsilon$. Звідси випливає, що $|c - x_\varepsilon| < \varepsilon$. Тим самим доводимо, що c – гранична точка A . Проте оскільки A – замкнена, то звідси $c \in A$.

Оскільки $\forall a \in A : c \geq a$ та $c \in A$, то отримали, що існує $c = \max A$.

Доведення з мінімумом буде аналогічно. ■

Proposition 1.4.16 \emptyset, \mathbb{R} – єдині множини, що є відкритими та замкненими одночасно.

Proof.

!Припустимо, що $\emptyset \subsetneq A \subsetneq \mathbb{R}$ – множина, яка відкрита та замкнена одночасно. Оберемо $a \in A$ та $b \in \mathbb{R} \setminus A$. Не втрачаючи загальності, ми припустимо $a < b$.

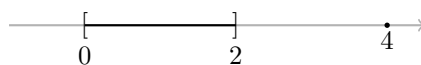
Розглянемо множину $A \cap [a, b]$. Така множина замкнена та обмежена, тому існує найбільше число $c \in A \cap [a, b]$. Зауважимо, що $(c, b] \subset \mathbb{R} \setminus A$. Із цього випливатиме, що $\mathbb{R} \setminus A$ – не замкнена, оскільки $c \notin \mathbb{R} \setminus A$, яка при цьому є граничною точкою $\mathbb{R} \setminus A$, за умовою вкладення. Значить, A – не відкрита. Суперечність! ■

Definition 1.4.17 Задано множину $A \subset \mathbb{R}$ та точку $x \in A$.

Точка x називається **ізолюваною**, якщо

$$\exists \varepsilon > 0 : U_\varepsilon(x) \cap A = \{x\}$$

Example 1.4.18 Маємо множину $A = [0, 2] \cup \{4\}$. Тут точка $x = 4 \in A$ – ізолювана.

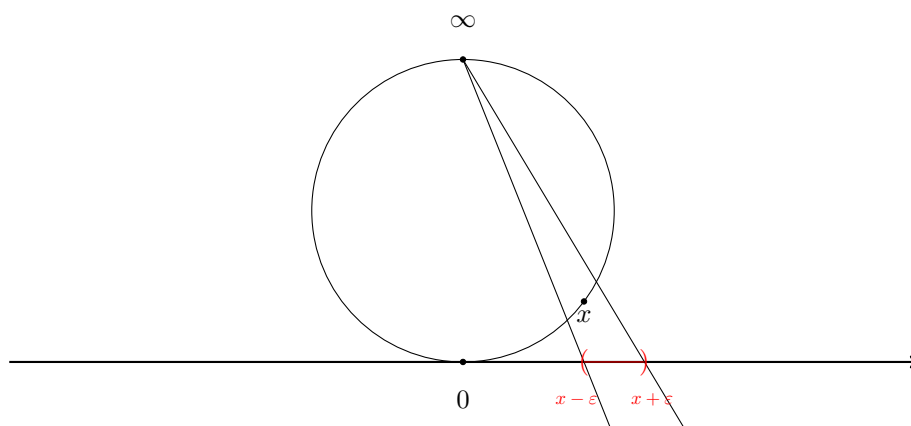


Якщо придивитись уважно на означення, то тут записано заперечення того, що x – гранична точка. Отже, маємо наслідок:

Corollary 1.4.19 Точка $x \in A$ – ізолювана $\iff x$ – не гранична для A .

Повернімось тепер до множини $\bar{\mathbb{R}}$. Самий час визначити, що таке ε -окіл для точок $+\infty, -\infty, \infty$. Хоча їх я буду називати E -околом для цих точок (просто для зручності, там воно буде ясніше чому).

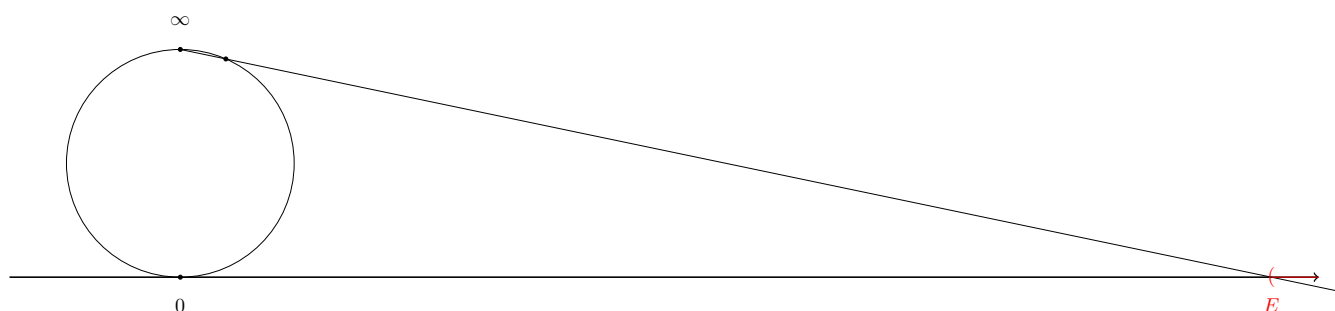
Розглянемо таку картину – коло Рімана. Нижній дотик кола буде відповідати точці 0, а верхня точка – точці ∞ .



Проведемо промінь так, щоб вона перетнула вісь. Кожна точка кола ставить у відповідність точку на вісі – отже, й окіл теж. На цьому малюнку окіл точки x кола ставить у відповідність звичайний окіл т. x , тобто

$$U_\varepsilon(x) = (x - \varepsilon, x + \varepsilon)$$

Візьмемо тепер окіл в нескінченності. Я розглядатиму праву частину півкола, де $+\infty$, для іншої аналогічно. Відступимо від $+\infty$ трошки праворуч. Нарешті, проведемо між двома точками пряму



Тоді якщо подивитись на малюнок, околom точки $+\infty$ визначається так

$$U_E(+\infty) = \{x \in \mathbb{R} : x > E\} \stackrel{\text{або}}{=} (E, +\infty)$$

Аналогічними міркуваннями визначається окіл точки $-\infty$.

$$U_E(-\infty) = \{x \in \mathbb{R} : x < -E\} \stackrel{\text{або}}{=} (-\infty, E)$$

І нарешті, якщо провести промені, відступивши від $+\infty$ праворуч та $-\infty$ ліворуч, отримаємо

$$U_E(\infty) = \{x \in \mathbb{R} : |x| > E\} \stackrel{\text{або}}{=} U_E(-\infty) \cup U_E(+\infty)$$

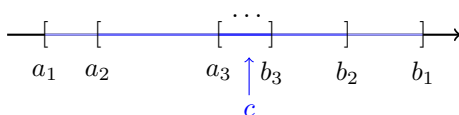
Додатково $+\infty, -\infty, \infty$ можуть бути внутрішніми, граничними точками певної множини, ніхто не забороняв. Просто ми на дослідження беремо окіл, який ми щойно отримали з геометричних міркувань.

1.5 Основні твердження аналізу

Theorem 1.5.1 Лема Кантора про вкладені відрізки

Задано відрізки таким чином: $\forall n \geq 1 : [a_n, b_n] \supset [a_{n+1}, b_{n+1}]$. Тоді справедливе наступне:

- 1) $\exists c \in \mathbb{R} : \forall n \geq 1 : c \in [a_n, b_n]$;
- 2) Якщо додатково $\forall \varepsilon > 0 : \exists N \in \mathbb{N} : b_N - a_N < \varepsilon$, то тоді така точка – єдина.



Proof.

Доведемо кожний пункт окремо.

1) Із умови випливає, що $\forall n, m \in \mathbb{N}$ справедливий такий ланцюг:

$$a_1 \leq a_2 \leq \dots \leq a_n \leq \dots < \dots \leq b_n \leq \dots \leq b_2 \leq b_1.$$

Отже, $\forall n, m \in \mathbb{N} : a_n \leq b_m$.

Розглянемо множини $A = \{a_1, \dots, a_n\}, B = \{b_1, \dots, b_m\}$. Тоді за аксіомою неперервності, $\exists c \in \mathbb{R} : \forall n, m \in \mathbb{N} : a_n \leq c \leq b_m$. Таким чином, $\forall n \geq 1 : c \in [a_n, b_n]$.

2) Розглянемо окремо, коли $\forall \varepsilon > 0 : \exists N : b_N - a_N < \varepsilon$.

Припустимо, що $\exists c' \in \mathbb{R} : \forall n \geq 1 : c' \in [a_n, b_n]$, але $c \neq c'$. Задамо число $\varepsilon = |c' - c| > 0$. Тоді $\exists N : b_N - a_N < \varepsilon$. Але $c, c' \in [a_N, b_N]$, тому $\varepsilon = |c' - c| < a_N - b_N < \varepsilon$. Суперечність!

Отже, така точка – єдина.

Лема Кантора доведена. ■

Theorem 1.5.2 Лема Больцано-Ваєрштраса

Задано множину A – обмежена множина з нескінченною кількістю елементів. Тоді вона містить принаймні одну граничну точку.

Proof.

Оскільки A – обмежена, то $\begin{cases} \exists a \in \mathbb{R} : \forall x \in A : x \geq a \\ \exists b \in \mathbb{R} : \forall x \in A : x \leq b \end{cases}$. Тобто маємо множину $[a, b] \supset A$.

Розіб'ємо множину $[a, b]$ навпіл: $\left[a, \frac{a+b}{2}\right]$ та $\left[\frac{a+b}{2}, b\right]$.

Оскільки A має нескінченну кількість чисел, то принаймні одна з множин $\left[a, \frac{a+b}{2}\right] \cap A$ або

$\left[\frac{a+b}{2}, b\right] \cap A$ – нескінченна множина. Ту половину позначимо за множину $[a_1, b_1]$ (якщо обидва нескінченні, то вибір довільний). Тоді $A \cap [a_1, b_1]$ – нескінченна множина.

Розіб'ємо множину $[a_1, b_1]$ навпіл: $\left[a_1, \frac{a_1+b_1}{2}\right]$ та $\left[\frac{a_1+b_1}{2}, b_1\right]$.

І за аналогічними міркуваннями одна з множин нескінченна, позначу за $[a_2, b_2]$. Тоді $A \cap [a_2, b_2]$ – нескінченна множина.

Розіб'ємо множину $[a_2, b_2]$ навпіл: $\left[a_2, \frac{a_2+b_2}{2}\right]$ та $\left[\frac{a_2+b_2}{2}, b_2\right]$.

⋮

В результаті матимемо вкладені відрізки: $[a, b] \supset [a_1, b_1] \supset [a_2, b_2] \supset \dots$, де $\forall n \geq 1 : b_n - a_n = \frac{b-a}{2^n}$.

Зафіксуємо $\varepsilon > 0$ та перевіримо, чи існує N , що $b_N - a_N < \varepsilon$.

$$\text{Маємо: } b_N - a_N = \frac{b-a}{2^N} < \frac{b-a}{N} < \varepsilon \implies N > \frac{b-a}{\varepsilon}$$

Отже, маємо $N = \left\lceil \frac{b-a}{\varepsilon} \right\rceil + 1$, для якого нерівність $b_N - a_N < \varepsilon$ виконано. Тоді за лемою Кантора, $\exists! c \in \mathbb{R} : \forall n \geq 1 : c \in [a_n, b_n]$.

А далі покажемо, що c – дійсно гранична точка множини A .

Зафіксуємо $\varepsilon > 0$. Знайдемо, чи існує N , щоб $b_N - a_N = \frac{b-a}{2^N} < \frac{\varepsilon}{2} \implies \dots \implies N > \frac{2(b-a)}{\varepsilon}$

Тоді $[a_N, b_N] \subset (c - \varepsilon, c + \varepsilon)$, оскільки $c - a_N \leq \frac{\varepsilon}{2}$ та $b_N - c \leq \frac{\varepsilon}{2}$. І це все виконується $\forall \varepsilon > 0$.

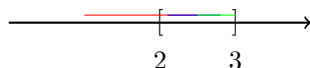
Таким чином, $A \cap (c - \varepsilon, c + \varepsilon) \supset A \cap [a_n, b_n]$ – нескінченна множина. Отже, c – гранична точка A . ■

Definition 1.5.3 Задано множину $A \subset \mathbb{R}$.

Сім'я множин $\{U_\alpha\}$ називається **покриттям** множини A , якщо

$$A \subset \bigcup_{\alpha} U_\alpha$$

Example 1.5.4 Відрізок $[2, 3]$ може мати покриття $\{(1, 2.5), [2.1, 2.8), [2.5, 3]\}$.



Theorem 1.5.5 Лема Гайне-Бореля

Будь-який відрізок можна покрити скінченною кількістю відкритих інтервалів.

Proof.

Задано відрізок $[a, b]$. Треба довести, що є набір $U_k, k = \overline{1, n}$, що покриває $[a, b]$.

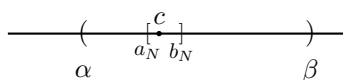
Припустимо, що $[a, b]$ покривається лише нескінченною кількістю інтервалів.

Ідея доведення є майже аналогічним з лемою Больцано-Ваєрштраса. Ми ділимо відрізок навпіл. Після ділення ми обираємо той відрізок, який покривається нескінченною кількістю інтервалів. Із обраним відрізком робимо те саме.

Матимемо знову вкладені відрізки $[a, b] \supset [a_1, b_1] \supset [a_2, b_2] \supset \dots$. Причому, $b_n - a_n = \frac{b-a}{2^n}$. Ми вже доводили, що $\exists! c \in \mathbb{R} : \forall n \geq 1 : c \in [a_n, b_n]$.

Оскільки $c \in [a_1, b_1]$, то тоді знайдеться інтервал $U = (\alpha, \beta) \ni c$ – один із інтервалів покриття.

Нехай задамо $\varepsilon = \min\{c-\alpha, \beta-c\}$. Тоді ми можемо завжди знайти номер N , щоб $b_N - a_N = \frac{b-a}{2^N} < \varepsilon$ (аналогічна процедура).



Звідси випливає, що $[a_N, b_N] \subset (\alpha, \beta)$. Тобто відрізок покривається одним інтервалом. Проте ми казали, що це неможливо. Суперечність! ■

Theorem 1.5.6 Множина дійсних чисел \mathbb{R} – незліченна.

Proof.

Для початку перевіримо, що відрізок $I = [0, 1]$ – незліченна множина.

Припустимо, що $I = \{x_1, x_2, x_3, \dots\}$, тобто зліченна множина.

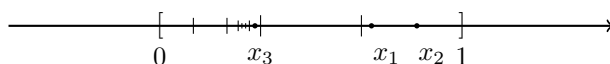
Розіб'ємо I на три (не обов'язково рівні) частини. Тоді принаймні в одному з розбитті не потрапить число x_1 . Саме число x_1 може бути або в одному з трьох відрізків, або навіть одночасно в двох.

Саме тому ми ділимо на три частини. Тому позначимо той відрізок, що не має x_1 як відрізок I_1 . Розіб'ємо I_1 на три частини. Аналогічно, знайдеться відрізок, де не буде числа x_2 . Позначимо цей відрізок I_2 .

Розіб'ємо I_2 на три частини. І знову, є відрізок I_3 , куди не потрапило число x_3 .

⋮

Отримали систему вкладених відрізків $I \subset I_1 \subset I_2 \subset I_3 \subset \dots$



Тоді за лемою Кантора, знайдемо якусь т. c , яка належить будь-якому відрізку.

$c \in I_1 \implies c \neq x_1, c \in I_2 \implies c \neq x_2, c \in I_3 \implies c \neq x_3, \dots$

Можна зробити висновок, що $\forall n \geq 1 : c \neq x_n$, а тому точка c не має нумерації. Суперечність!

Отже, $[0, 1]$ – незліченна множина, а тому тим паче $\mathbb{R} \supset [0, 1] \subset \mathbb{R}$ – незліченна множина. ■

Корень n -го степеня

Зараз строго варто пояснити, що таке $\sqrt[n]{a}$. Перед цим хочу залишити корисну нерівність:

Lemma 0.5.7 Нехай $a > 0, n \in \mathbb{N}$ та число $0 < b < \frac{a}{2n}$. Тоді $(a + b)^n \leq a^n + 2na^{n-1}b$.

Можна довести це методом *MI*.

Theorem 0.5.8 Нехай $a > 0$ та $n \in \mathbb{N}$. Тоді $\exists! x > 0 : x^n = a$.

Proof.

Якщо $a = 1$, то тоді покладемо $x = 1$, тоді буде $x^n = a$. Цілком ясно, що це єдиний можливий x .

Якщо $n = 1$, то тоді покладемо $x = a$, тоді теж буде $x^n = a$.

Нарешті, нехай $a \neq 1, n > 1$. Розглянемо множину $A = \{y > 0 \mid y^n < a\}$. Множина $A \neq \emptyset$, бо:

при $a < 1$ маємо $a^n < a$, звідси випливає $a \in A$;

при $a > 1$ маємо $1^n = 1 < a$, звідси випливає $1 \in A$.

Також A обмежена зверху числом $c = \max\{a, 1\}$. Справді:

якщо $y \in A, y \leq 1$, то звідси $y \leq c$;

якщо $y \in A, y > 1$, то маємо $y < y^n < a$, тож звідси $y \leq c$.

Таким чином, існує $\sup A = x$. Причому варто зауважити, що $x > 0$.

Припустимо, що $x^n > a$. Для зручності покладемо $\Delta = x^n - a > 0$. Оберемо таке число $m' \in \mathbb{N}$, щоб $\frac{1}{m'} < x$. Також оберемо таке число $m'' \in \mathbb{N}$, щоб $\frac{1}{m''} < \frac{\Delta}{nx^{n-1}}$ (не сильно поки ясно чому, але зараз все проясниться). Якщо покласти $m = \max\{m', m''\}$, то ми отримаємо, що одночасно $m > \frac{nx^{n-1}}{\Delta}$

та $m > \frac{1}{x}$. Коротко кажучи, ми підбрали таке $m \in \mathbb{N}$, щоб $m > \max\left\{\frac{nx^{n-1}}{\Delta}, \frac{1}{x}\right\}$. Тоді

$$\left(x - \frac{1}{m}\right)^n \underset{\text{нер-ть Бернуллі}}{>} x^n - \frac{nx^{n-1}}{m} > x^n - \Delta = a.$$

Таким чином, $x - \frac{1}{m} \notin A$. Тобто звідси $\forall z > x - \frac{1}{m} : z \notin A$. Власне, звідси $x \leq x - \frac{1}{m}$ – суперечність!

Припустимо, що $x^n < a$. Для зручності покладемо $\delta = a - x^n > 0$. Аналогічними міркуваннями оберемо таке $m \in \mathbb{N}$, щоб $m > \max\left\{\frac{2n}{x}, \frac{2nx^{n-1}}{\delta}\right\}$. Тоді

$$\left(x + \frac{1}{m}\right)^n < x^n + \frac{2nx^{n-1}}{m} < x^n + \delta = a.$$

Таким чином, $x + \frac{1}{m} \in A$ та при цьому $x + \frac{1}{m} > x$ – суперечність!

Залишився лише випадок $x^n = a$. Оскільки супремум єдиний, то це закінчує доведення. ■

Definition 0.5.9 Нехай $a > 0$ та $n \in \mathbb{N}$.

Коренем n -го степеня з числа a називається число $x > 0$, для якого

$$x^n = a$$

Позначення: $x = \sqrt[n]{a}$.

Також покладемо $\sqrt[n]{0} = 0$.

Remark 0.5.10 Насправді, коли степінь n – непарний, то ми можемо також допускати випадок $a < 0$. Якщо в нас $a < 0$ та n – непарний, то все одно існує єдиний $x < 0$, для якого $x^n = a$ (це можна легко показати через щойно доведену теорему).

3 Границі числової послідовності

3.1 Основні означення

Definition 3.1.1 Неформально **числовою послідовністю** називають якийсь набір чисел

$$\{a_1, a_2, a_3, \dots\} \stackrel{\text{скорочено}}{=} \{a_n, n \geq 1\}.$$

А формально називають це відображенням $a: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$, де $a(n) = a_n$. Тобто кожному номеру послідовності ставиться в відповідність єдине дійсне число.

Example 3.1.2 Розглянемо декілька прикладів, де послідовності по-різному задаються:

1. $\{a_n, n \geq 1\} = \{1, 2, -1, 3, 0, \dots\}$ – якась випадкова послідовність;
2. $\{b_n, n \geq 1\}$, де $b_n = \frac{1}{n}$ – послідовність, що задається формулою;
3. $\{c_n, n \geq 1\}$, де $c_1 = 1$, а також $c_{n+1} = \frac{c_n}{n+1}$ – рекурентна послідовність.

Example 3.1.3 Така штука $a_n = \frac{1}{n-2024}$ не задаватиме числову послідовність, допоки ми не визначимо, чому дорівнює a_{2024} .

Definition 3.1.4 Задано послідовність $\{a_n, n \geq 1\}$.

Число $a \in \mathbb{R}$ називається **границею числової послідовності**, якщо

$$\forall \varepsilon > 0 : \exists N(\varepsilon) \in \mathbb{N} : \forall n \geq N : |a_n - a| < \varepsilon$$

Позначення: $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$ або $a_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} a$.

У такому разі послідовність називається **збіжною**. Якщо границі не існує, то тоді послідовність називається **розбіжною**.

Proposition 3.1.5 Задано $\{a_n, n \geq 1\}$ – збіжна послідовність. Тоді існуюча границя – єдина.

Proof.

Припустимо, що задано збіжну числову послідовність $\{a_n, n \geq 1\}$, для якої існують дві границі: $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a_1$, $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a_2$. Ми вважатимемо, що $a_1 < a_2$, оскільки для $a_1 > a_2$ міркування є аналогічними.

Оскільки границі існують, ми можемо задати $\varepsilon = \frac{a_2 - a_1}{3} > 0$. Тоді за означенням,

$$\exists N_1 : \forall n \geq N_1 : |a_n - a_1| < \frac{a_2 - a_1}{3} \implies a_n < a_1 + \frac{a_2 - a_1}{3}$$

$$\exists N_2 : \forall n \geq N_2 : |a_n - a_2| < \frac{a_2 - a_1}{3} \implies a_n > a_2 - \frac{a_2 - a_1}{3}$$

Аби обидві нерівності працювали одночасно, ми зафіксуємо новий $N = \max\{N_1, N_2\}$. Тоді

$$\forall n \geq N : a_n < \frac{a_1 + (a_1 + a_2)}{3} < \frac{a_2 + (a_1 + a_2)}{3} < a_n.$$

У цьому ланцюгу нерівностей суперечність!

Отже, два різних ліміти не можуть існувати одночасно, тим самим доводимо єдиність. ■

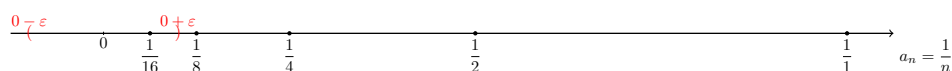
Example 3.1.6 Доведемо за означенням, що $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} = 0$. (**важливо!**)

Задане довільне $\varepsilon > 0$. Необхідно знайти таке N , щоб $\forall n \geq N : \left| \frac{1}{n} - 0 \right| < \varepsilon$.

$$\left| \frac{1}{n} - 0 \right| < \varepsilon \iff \frac{1}{n} < \varepsilon \iff n > \frac{1}{\varepsilon}.$$

Зафіксуємо $N = \left\lceil \frac{1}{\varepsilon} \right\rceil + 1$. Тоді маємо: $\forall \varepsilon > 0 : \exists N = \left\lceil \frac{1}{\varepsilon} \right\rceil + 1 : \forall n \geq N : n > \frac{1}{\varepsilon} \implies \left| \frac{1}{n} - 0 \right| < \varepsilon$.

Отже, означення виконується, тому $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} = 0$.



Тут на малюнку я обрав $\varepsilon = 0.1$. Також я не всі елементи послідовності позначив. Тоді, починаючи з $n = 11$ (або з 12, 13, ...), всі решта члени не покидатимуть червоні дужки. Якщо члени не будуть покидати ці лінії для будь-якого заданого ε , то тоді границя існує.

Example 3.1.7 Доведемо за означенням, що $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{n} = 1$. (**важливо!**)

Знову задамо довільне $\varepsilon > 0$. Знову необхідно знайти N , щоб $\forall n \geq N : |\sqrt[n]{n} - 1| < \varepsilon$.
 $|\sqrt[n]{n} - 1| < \varepsilon \iff \sqrt[n]{n} < 1 + \varepsilon$.

Використовуючи нерівність Коші, ми отримаємо таку оцінку:

$$\sqrt[n]{n} = \sqrt[n]{\sqrt{n} \cdot \sqrt{n} \cdot 1 \cdots 1} \leq \frac{\sqrt{n} + \sqrt{n} + 1 + \cdots + 1}{n} = \frac{2\sqrt{n} + n - 2}{n} = \frac{2}{\sqrt{n}} + 1 - \frac{2}{n} < \frac{2}{\sqrt{n}} + 1.$$

Тоді отримаємо такий ланцюг:

$$\sqrt[n]{n} < \frac{2}{\sqrt{n}} + 1 < 1 + \varepsilon \iff \frac{2}{\sqrt{n}} < \varepsilon \iff n > \frac{4}{\varepsilon^2}$$

Тепер зафіксуємо $N = \left\lceil \frac{4}{\varepsilon^2} \right\rceil + 2024$. Тоді $\forall n \geq N$ всі нерівності виконуються, зокрема $|\sqrt[n]{n} - 1| < \varepsilon$.

Остаточно: $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{n} = 1$.

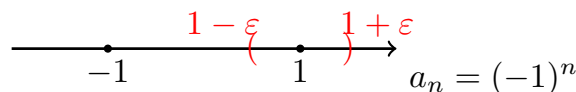
Example 3.1.8 Доведемо, що не існує $\lim_{n \rightarrow \infty} (-1)^n$.

Запишемо заперечення до означення збіжної границі. Воно виглядає ось так:

$\exists \varepsilon^* > 0 : \forall N : \exists n(N) \geq N : |a_n - a| \geq \varepsilon^*$.

Встановимо $\varepsilon^* = |1 + a| > 0$. Тоді $\forall N : \exists n = 2N + 1$, для яких $|(-1)^n - a| = |-1 - a| = |1 + a| \geq \varepsilon$.

Отже, ми порушили означення. Тобто, дійсно, маємо розбіжну послідовність.



Тут на малюнку я встановив границю $a = 1$. Лише для деяких ε всі члени потраплятимуть всередину. Однак, скажімо, не для $\varepsilon = 0.5$ як на малюнку - ось чому ліміт не може бути рівним 1. І так для кожного a .

Definition 3.1.9 Послідовність $\{a_n, n \geq 1\}$ називається **обмеженою**, якщо

$$\exists C > 0 : \forall n \geq 1 : |a_n| \leq C$$

Theorem 3.1.10 Будь-яка збіжна послідовність $\{a_n, n \geq 1\}$ є обмеженою.

Proof.

Нехай задана збіжна послідовність $\{a_n, n \geq 1\}$, тобто для неї

$$\exists \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a \stackrel{\text{def}}{\iff} \forall \varepsilon > 0 : \exists N(\varepsilon) : \forall n \geq N : |a_n - a| < \varepsilon.$$

Оскільки ліміт існує, то задамо $\varepsilon = 1$. Тоді: $\forall n \geq N : |a_n - a| < 1$.

Спробуємо оцінити вираз $|a_n|$ для нашого бажаного:

$|a_n| = |a_n - a + a| \leq |a_n - a| + |a| < 1 + |a|$ - це виконується $\forall n \geq N$. Інакше кажучи, всі числа, починаючи з N , є обмеженими.

Покладемо $C = \max\{|a_1|, |a_2|, \dots, |a_{N-1}|, 1 + |a|\}$. Тоді отримаємо, що $\forall n \geq 1 : |a_n| \leq C$.

Отже, числова послідовність – обмежена. ■

Remark 3.1.11 Обернене твердження не є вірним. Тобто обмежена послідовність $\{a_n, n \geq 1\}$ не обов'язково збіжна (див. **Ех. 3.1.8**).

Definition 3.1.12 Послідовність $\{a_n, n \geq 1\}$ має **границю** ∞ , якщо:

$$\forall E > 0 : \exists N(E) \in \mathbb{N} : \forall n \geq N : |a_n| > E$$

Позначення: $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \infty$.

Послідовність $\{a_n, n \geq 1\}$ матиме границю $+\infty$, якщо виконується $a_n > E$ (замість $|a_n| > E$).

Послідовність $\{a_n, n \geq 1\}$ матиме границю $-\infty$, якщо виконується $a_n < -E$ (замість $|a_n| > E$).

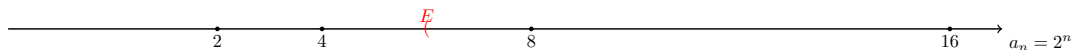
Коли послідовність матиме границю $\infty, +\infty, -\infty$, то така послідовність **теж розбіжна**.

Example 3.1.13 Доведемо за означенням, що $\lim_{n \rightarrow \infty} 2^n = +\infty$.

Задане довільне $E > 0$. Необхідно знайти N , для якого $\forall n \geq N : 2^n > E$.

Раніше доводили, що $2^n \geq n$. Вимагатимемо тепер, щоб $n > E$.

Фіксуємо $N = [E] + 2$. Тоді $\forall n \geq N : n > E$, а тим паче $2^n > n > E$.
Тому $\lim_{n \rightarrow \infty} 2^n = +\infty$.



Тут на малюнку $E = 6$. Тоді, починаючи з $n = 3$ (або з 4, 5, ...), всі решта члени будуть правіше за червону лінію.

Example 3.1.14 Доведемо, що $\lim_{n \rightarrow \infty} (-1)^n 2^n = \infty$.

Задамо довільне $E > 0$. Необхідно знайти N , для якого $\forall n \geq N : |(-1)^n 2^n| = 2^n > E$. Але це ми вже доводили зверху.

Важливо тут те, що не можна визначитись, чи $+\infty$, чи $-\infty$ через знаочередованість.

3.2 Нескінченно малі/великі послідовності

Definition 3.2.1 Задана послідовність $\{a_n, n \geq 1\}$.

Послідовність називається **нескінченно малою (н.м.)**, якщо

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0.$$

Послідовність називається **нескінченно великою (н.в.)**, якщо

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \infty.$$

Example 3.2.2 Зокрема $a_n = \frac{1}{n}$ є нескінченно малою та а $a_n = 2^n$ є нескінченно великою, враховуючи приклади вище.

Definition 3.2.3 Послідовність $\{a_n, n \geq 1\}$ назвемо **таку, що віддалена від нуля**, якщо

$$\exists \delta > 0 : \forall n \geq 1 : |p_n| \geq \delta$$

Theorem 3.2.4 Арифметика нескінченно малих та нескінченно великих послідовностей

Задані п'ять послідовностей: $\{a_n\}$, $\{b_n\}$, $\{c_n\}$, $\{d_n\}$, $\{p_n\}$ – відповідно н.м., н.м., обмежена, н.в.; така, що віддалена від нуля. Тоді:

- | | |
|--|--|
| 1) $\{a_n + b_n\}$ – н.м. | 4) $\left\{ \frac{1}{a_n} \right\}$ – н.в. |
| 2) $\forall C \in \mathbb{R} : \{C a_n\}$ – н.м. | 5) $\left\{ \frac{1}{d_n} \right\}$ – н.м. |
| 3) $\{c_n \cdot a_n\}$ – н.м. | 6) $\{p_n \cdot d_n\}$ – н.в. |

Proof.

$$1) \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0, \lim_{n \rightarrow \infty} b_n = 0 \stackrel{\text{def}}{\iff}$$

$$\forall \varepsilon > 0 : \exists N_1(\varepsilon) : \forall n \geq N_1 : |a_n - 0| = |a_n| < \frac{\varepsilon}{2}$$

$$\forall \varepsilon > 0 : \exists N_2(\varepsilon) : \forall n \geq N_2 : |b_n - 0| = |b_n| < \frac{\varepsilon}{2}$$

Нехай існує $N = \max\{N_1, N_2\}$. Тоді $\forall n \geq N : |a_n + b_n - 0| = |a_n + b_n| \leq |a_n| + |b_n| < \varepsilon$.

Отже, $\{a_n + b_n, n \geq 1\}$ – н.м.

$$3) \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0 \stackrel{\text{def}}{\iff} \forall \varepsilon > 0 : \exists N(\varepsilon) : \forall n \geq N : |a_n - 0| = |a_n| < \frac{\varepsilon}{M}$$

де $M > 0$ – таке число, що $\forall n \geq 1 : |c_n| \leq M$ – означення обмеженості.

Тоді $\forall n \geq N : |a_n \cdot c_n - 0| = |a_n \cdot c_n| = |a_n| \cdot |c_n| < \varepsilon$.

Отже, $\{a_n \cdot c_n, n \geq 1\}$ – н.м.

$$4) \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0 \stackrel{\text{def}}{\iff} \forall \varepsilon > 0 : \exists N(\varepsilon) : \forall n \geq N : |a_n - 0| = |a_n| < \varepsilon$$

Зафіксуємо $\varepsilon = \frac{1}{E}$ для всіх $E > 0$. Тоді $\exists N(E) : \forall n \geq N : |a_n| < \frac{1}{E} \iff \left| \frac{1}{a_n} \right| > E$.

Отже, $\left\{ \frac{1}{a_n}, n \geq 1 \right\}$ - н.в.

2), 6) доводиться як 3). 5) доводиться аналогічно як 4) ■

Example 3.2.5 Розглянемо декілька прикладів:

$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2^n} = 0$, тому що $a_n = 2^n$ - н.в., а тому $\frac{1}{a_n} = \frac{1}{2^n}$ - н.м.

$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(-1)^n}{n} = 0$, тому що $a_n = (-1)^n$ - обмежена та $b_n = \frac{1}{n}$ - н.м.

Theorem 3.2.6 Про характеристику збіжності послідовності

Задано послідовність $\{a_n, n \geq 1\}$.

Послідовність $\{a_n, n \geq 1\}$ - збіжна \iff існує $\{\alpha_n, n \geq 1\}$ - така н.м. послідовність, що $a_n = a + \alpha_n$.

Proof.

\Rightarrow Дано: $\{a_n, n \geq 1\}$ - збіжна, тобто $\forall \varepsilon > 0 : \exists N : \forall n \geq N : |a_n - a| < \varepsilon$.

Позначимо $a_n - a = \alpha_n$. Тоді $a_n = a + \alpha_n$ та послідовність $\{\alpha_n, n \geq 1\}$ - н.м., оскільки $|\alpha_n - 0| = |\alpha_n| = |a_n - a| < \varepsilon$.

\Leftarrow Дано: $\{\alpha_n, n \geq 1\}$ - н.м., де $a_n = a + \alpha_n$. Тоді $\forall \varepsilon > 0 : \exists N : \forall n \geq N : |\alpha_n| < \varepsilon \implies |a_n - a| < \varepsilon$.
Отже, $\{a_n, n \geq 1\}$ - збіжна. ■

Theorem 3.2.7 Арифметика границь

Задані $\{a_n, n \geq 1\}$, $\{b_n, n \geq 1\}$ - збіжні та $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$, $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} b_n = b$. Тоді:

- 1) $\{a_n + b_n, n \geq 1\}$ - збіжна та $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} (a_n + b_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n + \lim_{n \rightarrow \infty} b_n$;
- 2) $\forall C \in \mathbb{R} : \{C \cdot a_n, n \geq 1\}$ - збіжна та $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} C \cdot a_n = C \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} a_n$;
- 3) $\{a_n \cdot b_n, n \geq 1\}$ - збіжна та $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} (a_n \cdot b_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} b_n$;
- 4) $\left\{ \frac{a_n}{b_n}, n \geq 1 \right\}$ - збіжна при $b_n \neq 0, b \neq 0$ та $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n} = \frac{\lim_{n \rightarrow \infty} a_n}{\lim_{n \rightarrow \infty} b_n}$.

Proof.

Обидві послідовності збіжні за умовою. Тоді за попередньою теоремою, $a_n = a + \alpha_n$ та $b_n = b + \beta_n$, де $\{\alpha_n\}, \{\beta_n\}$ - н.м. послідовності. Тоді:

1) $a_n + b_n = a + \alpha_n + b + \beta_n = (a + b) + (\alpha_n + \beta_n)$, причому $\{\alpha_n + \beta_n\}$ - н.м.

Отже, послідовність $\{a_n + b_n, n \geq 1\}$ - збіжна та має границю $\lim_{n \rightarrow \infty} (a_n + b_n) = a + b = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n + \lim_{n \rightarrow \infty} b_n$.

2) Це зрозуміло.

3) $a_n b_n - ab = (a + \alpha_n)(b + \beta_n) - ab = \alpha_n b + \alpha_n \beta_n + a \beta_n = \gamma_n$, причому послідовність $\{\gamma_n = \alpha_n b + \alpha_n \beta_n + a \beta_n\}$ - н.м.

Отже, послідовність $\{a_n b_n, n \geq 1\}$ - збіжна та має границю $\lim_{n \rightarrow \infty} (a_n \cdot b_n) = ab = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} b_n$.

4) У принципі, це є наслідком 3), якщо представити послідовність $\frac{a_n}{b_n} = a_n \cdot \frac{1}{b_n}$. Треба лишень довести, що $\frac{1}{b_n} \rightarrow \frac{1}{b}, n \rightarrow \infty$.

Відомо, що $b_n \rightarrow b \iff \forall \varepsilon > 0 : \exists N' : \forall n \geq N' : |b_n - b| < \varepsilon$.

Зафіксуємо $\varepsilon = \frac{|b|}{2}$, тоді $\exists N'' : \forall n \geq N'' : |b| = |b - b_n + b_n| \leq |b - b_n| + |b_n| < \frac{|b|}{2} + |b_n| \implies |b_n| > \frac{|b|}{2}$.

Я хочу одночасно $|b_n| > \frac{|b|}{2}$ та $|b_n - b| < \varepsilon$, тож нехай $N = \max\{N', N''\}$. Це вже $N = N(\varepsilon)$, тоді

$$\forall n \geq N : \left| \frac{1}{b_n} - \frac{1}{b} \right| = \frac{|b_n - b|}{|b_n||b|} < \frac{\varepsilon}{\frac{|b|}{2}|b|} = \frac{2}{|b|^2} \varepsilon.$$

Таким чином, можна твердити, що $\frac{1}{b_n} \rightarrow \frac{1}{b}, n \rightarrow \infty \implies \frac{a_n}{b_n} \rightarrow \frac{a}{b}$, тобто $\left\{ \frac{a_n}{b_n}, n \geq 1 \right\}$ - збіжна. ■

Example 3.2.8 Знайти границю $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(-1)^n + \frac{1}{n}}{\frac{1}{n^2} - (-1)^n}$.

Як робити неправильно: $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(-1)^n + \frac{1}{n}}{\frac{1}{n^2} - (-1)^n} = \frac{\lim_{n \rightarrow \infty} \left((-1)^n + \frac{1}{n} \right)}{\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{n^2} - (-1)^n \right)} = \frac{\lim_{n \rightarrow \infty} (-1)^n + \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n}}{\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n^2} - \lim_{n \rightarrow \infty} (-1)^n} = \dots$

Проблема тут полягає в тому, що $(-1)^n + \frac{1}{n}$ та $\frac{1}{n^2} - (-1)^n$ - це розбіжні послідовності. Тому я не можу використати арифметику границі в частках.

Як робити правильно: $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(-1)^n + \frac{1}{n}}{\frac{1}{n^2} - (-1)^n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1 + \frac{1}{(-1)^n n}}{\frac{1}{(-1)^n n^2} - 1} \stackrel{=}{=} \frac{\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{(-1)^n n} \right)}{\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{(-1)^n n^2} - 1 \right)} \stackrel{=}{=} \frac{\lim_{n \rightarrow \infty} 1 + \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{(-1)^n n}}{\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{(-1)^n n^2} - \lim_{n \rightarrow \infty} 1} = \frac{1 + 0}{0 - 1} = -1$

Рівність $\stackrel{=}{=}$ коректна: оскільки кожна послідовність чисельника - збіжна, то їхня сума теж збіжна. Знаменник аналогічно. Тоді рівність $\stackrel{=}{=}$ теж коректна: через збіжність, маємо, що частка збіжна.

3.3 Нерівності в границях

Theorem 3.3.1 Граничний перехід в нерівності

Задано дві збіжні числові послідовності $\{a_n, n \geq 1\}, \{b_n, n \geq 1\}$ таким чином, що $\exists N' : \forall n \geq N' : a_n \leq b_n$. Тоді $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n \leq \lim_{n \rightarrow \infty} b_n$.

Proof.

Задано дві збіжні послідовності, для яких $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a, \lim_{n \rightarrow \infty} b_n = b$.

Припустимо, що $a > b$ та розглянемо $\varepsilon = \frac{a-b}{2}$. Тоді за означенням границі,

$\exists N_1 : \forall n \geq N_1 : |a_n - a| < \varepsilon \Rightarrow a_n > a - \varepsilon$

$\exists N_2 : \forall n \geq N_2 : |b_n - b| < \varepsilon \Rightarrow b_n < b + \varepsilon$.

Задамо $N = \max\{N_1, N_2\}$. Тоді $b_n < b + \varepsilon = b + \frac{a-b}{2} = \frac{a+b}{2} = a - \frac{a-b}{2} = a - \varepsilon < a_n$
 $\Rightarrow b_n < a_n$. Суперечність! ■

Corollary 3.3.2 Задано збіжну числову послідовність $\{b_n, n \geq 1\}$ таким чином, що $\exists N' : \forall n \geq N' : a \leq b_n$, де $a \in \mathbb{R}$. Тоді $a \leq \lim_{n \rightarrow \infty} b_n$.

Вказівка: розглянути послідовність $\{a_n = a, n \geq 1\}$ - так звана, стаціонарна послідовність.

Remark 3.3.3 Для нерівності \geq аналогічно все. А також ця теорема спрацює для $<$ або $>$, проте нерівність з границями залишається нестрогою.

Наприклад, $a_n = \frac{1}{n^2}, b_n = \frac{1}{n}$. Зрозуміло, що $a_n < b_n$. Але звідси $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} b_n = 0$.

Theorem 3.3.4 Теорема про 3 послідовності

Задані три послідовності: $\{a_n, n \geq 1\}, \{b_n, n \geq 1\}, \{c_n, n \geq 1\}$ так, що $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} b_n = a$. Більш того, $\exists N' : \forall n \geq N' : a_n \leq c_n \leq b_n$. Тоді $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} c_n = a$.

Proof.

$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a \stackrel{\text{def}}{\iff} \forall \varepsilon > 0 : \exists N_1(\varepsilon) : \forall n \geq N_1 : |a_n - a| < \varepsilon \Rightarrow a_n > a - \varepsilon$

$\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = a \stackrel{\text{def}}{\iff} \forall \varepsilon > 0 : \exists N_2(\varepsilon) : \forall n \geq N_2 : |b_n - a| < \varepsilon \Rightarrow b_n < a + \varepsilon$

Зафіксуємо $N = \max\{N_1, N_2, N'\}$. Тоді $\forall n \geq N : a - \varepsilon < a_n \leq c_n \leq b_n < a + \varepsilon \Rightarrow |c_n - a| < \varepsilon$.

Отже, $\lim_{n \rightarrow \infty} c_n = a$. ■

Example 3.3.5 (важливо!) Знайти границю $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a}$, де число $a > 0$.

Розглянемо $a > 1$. Тоді існує $N = [a] + 1$ такий, що $\forall n \geq N : 1 \leq \sqrt[n]{a} \leq \sqrt[n]{n}$.

$\lim_{n \rightarrow \infty} 1 = 1$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{n} = 1$. Тоді за теоремою про двох поліцаїв, маємо, що $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a} = 1$.

Якщо $0 < a < 1$, то тоді зробимо заміну: $b = \frac{1}{a}, b > 1$. Тоді $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{b} = 1 \implies$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt[n]{b}} = 1.$$

Остаточно, $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a} = 1, a > 0$.

Remark 3.3.6 Всі ці теореми спрацювують для випадків, коли ліміти є нескінченностями.

3.4 Монотонні послідовності

Definition 3.4.1 Послідовність $\{a_n, n \geq 1\}$ називається:

строго монотонно зростаючою, якщо $\forall n \geq 1 : a_{n+1} > a_n$;

монотонно не спадною, якщо $\forall n \geq 1 : a_{n+1} \geq a_n$;

строго монотонно спадною, якщо $\forall n \geq 1 : a_{n+1} < a_n$;

монотонно не зростаючою, якщо $\forall n \geq 1 : a_{n+1} \leq a_n$.

Example 3.4.2 Дослідимо послідовність $\{a_n = \sqrt{n}, n \geq 1\}$ на монотонність.

$$a_{n+1} - a_n = \sqrt{n+1} - \sqrt{n} = \frac{n+1-n}{\sqrt{n+1} + \sqrt{n}} = \frac{1}{\sqrt{n+1} + \sqrt{n}} > 0$$

$\implies a_{n+1} > a_n$, тобто дана послідовність зростає.

Theorem 3.4.3 Теорема Ваєрштраса

Будь-яка обмежена зверху та монотонно неспадна, починаючи з деякого номеру (обмежена знизу та монотонно не зростаюча, починаючи з деякого номеру), послідовність є збіжною.

Proof.

Нехай задано послідовність $\{a_n, n \geq 1\}$, яка є обмеженою зверху та монотонно неспадною. Оскільки вона монотонна, а ще - обмежена, то $\exists \sup_{n \geq 1} \{a_n\} = a < +\infty$.

$$\forall n \geq 1 : a_n \leq a;$$

За критерієм \sup , маємо, що: $\forall \varepsilon > 0 : \exists N(\varepsilon) : a_N > a - \varepsilon$.

Отримаємо наступний ланцюг нерівностей: $\forall n \geq N :$

$$a - \varepsilon < a_N \leq a_n \leq a < a + \varepsilon \implies |a_n - a| < \varepsilon.$$

Отже, $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \sup_{n \geq 1} \{a_n\}$.

Для інших випадків монотонності все аналогічно. ■

Remark 3.4.4 Теорема Ваєрштраса дозволяє випадок необмеженої послідовності.

Наприклад, $\{a_n, n \geq 1\}$ монотонно неспадає, але також необмежена зверху, тоді $a_n \rightarrow +\infty, n \rightarrow \infty$.

Example 3.4.5 Довести, що для послідовності $\left\{a_n = \frac{2000^n}{n!}, n \geq 1\right\}$ існує границя та обчислити її.

Перевірмо на монотонність:

$$\frac{a_{n+1}}{a_n} = \frac{2000^{n+1}n!}{(n+1)!2000^n} = \frac{2000}{n+1}.$$

Отримаємо, що $a_{n+1} < a_n$ принаймні $\forall n \geq 2000$. Тоді за Ваєрштрасом, $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$.

Тоді також $\lim_{n \rightarrow \infty} a_{n+1} = a$.

$$\text{Отже, } \lim_{n \rightarrow \infty} a_{n+1} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2000}{n+1} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2000}{n+1} \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0.$$

Remark 3.4.6 Такими самими міркуваннями можна довести, що $\frac{n^k}{b^n} (b > 1), \frac{b^n}{n!} (b > 0), \frac{n!}{n^n}$ - всі вони будуть нескінченно малими, якщо $n \rightarrow \infty$.

Example 3.4.7 Дізнатись, який вираз більший при надто великих n : 2^n або n^{1000} .

Відомо, що $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^{1000}}{2^n} = 0$. Якщо зафіксуємо $\varepsilon = 1$, то $\exists N : \forall n \geq N : \frac{n^{1000}}{2^n} < 1$.

Значить, $2^n > n^{1000}$ для дуже великих n .

3.5 Число e

Розглянемо послідовність $\left\{a_n = \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n, n \geq 1\right\}$. Спробуємо для неї знайти границю.

I. $\{a_n, n \geq 1\}$ – монотонно зростаюча.

Дійсно, розглянемо для цього відношення $\frac{a_{n+1}}{a_n}$. Отримаємо такий ланцюг:

$$\begin{aligned}\frac{a_{n+1}}{a_n} &= \frac{\left(1 + \frac{1}{n+1}\right)^{n+1}}{\left(1 + \frac{1}{n}\right)^n} = \left(1 + \frac{1}{n+1}\right) \left(\frac{1 + \frac{1}{n+1}}{1 + \frac{1}{n}}\right)^n = \frac{n+2}{n+1} \cdot \left(\frac{n(n+2)}{(n+1)^2}\right)^n = \\ &= \frac{n+2}{n+1} \cdot \left(1 - \frac{1}{(n+1)^2}\right)^n = \frac{\frac{n+2}{n+1}}{1 - \frac{1}{(n+1)^2}} \cdot \left(1 - \frac{1}{(n+1)^2}\right)^{n+1} = \frac{n+2}{n+1} \cdot \frac{(n+1)^2}{n^2+2n} \cdot \left(1 - \frac{1}{(n+1)^2}\right)^{n+1} \quad \boxed{\geq}\end{aligned}$$

Тут ми маємо право на третю дужку використати нерівність Бернуллі, оскільки $-\frac{1}{(n+1)^2} > -1$.

$$\boxed{\geq} \frac{n+2}{n+1} \cdot \frac{(n+1)^2}{n^2+2n} \cdot \left(1 - \frac{1}{(n+1)^2}\right) = \frac{n+1}{n} \left(1 - \frac{1}{n+1}\right) = 1$$

Коротше, $\frac{a_{n+1}}{a_n} \geq 1 \Rightarrow a_{n+1} \geq a_n$. Тобто наша послідовність дійсно монотонно зростає.

II. $\{a_n, n \geq 1\}$ – обмежена зверху.

Для цього треба розглянути $\left\{b_n = \left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n+1}\right\}$ і довести, що:

а) $\forall n \geq 1 : a_n < b_n$;

б) $\{b_n, n \geq 1\}$ – монотонно спадає.

а) Перший пункт зрозумілий, оскільки $\left(1 + \frac{1}{n}\right)^n < \left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n+1}$ через однакову основу степені, що є більше одинички.

б) Другий пункт менш очевидний. Розпишемо $\frac{b_{n-1}}{b_n}$ – отримаємо такий ланцюг:

$$\frac{b_{n-1}}{b_n} = \frac{\left(1 + \frac{1}{n-1}\right)^n}{\left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n+1}} = \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{n}\right)} \cdot \left(\frac{n^2}{n^2-1}\right)^n = \frac{n}{n+1} \cdot \left(1 + \frac{1}{n^2-1}\right)^n \quad \boxed{\geq}$$

За аналогічними причинами я можу скористатися нерівністю Бернуллі для другої дужки.

$$\boxed{\geq} \frac{n}{n+1} \left(1 + \frac{n}{n^2-1}\right) = \frac{n}{n+1} + \frac{n^2}{(n+1)(n^2-1)} = \frac{n^3 + n^2 - n}{n^3 + n^2 - n - 1} > 1$$

Коротше, $\frac{b_{n-1}}{b_n} > 1 \Rightarrow b_n < b_{n-1}$. Тобто ця послідовність дійсно монотонно спадає.

У результаті всього можемо отримати наступну обмеженість:

$$2 = a_1 \leq a_2 \leq \dots \leq a_n < b_n \leq \dots \leq b_2 \leq b_1 = 4.$$

Остаточно, за теоремою Ваєрштраса, для послідовності $\left\{a_n = \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n, n \geq 1\right\}$ існує границя:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n \stackrel{\text{позн.}}{=} e \approx 2.71\dots$$

До речі, для $\left\{b_n = \left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n+1}, n \geq 1\right\}$ така сама границя, оскільки виконується така рівність:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n+1} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right) = e \cdot 1 = e.$$

Тепер, оскільки $\{a_n\}$ зростає, а $\{b_n\}$ спадає та обидва обмежені, то $\forall n \geq 1 : a_n < e < b_n$.

$$\left(1 + \frac{1}{n}\right)^n < e < \left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n+1}.$$

На цьому етапі припускається, що відоме таке поняття як логарифм. У школі робилося позначення: $\log_e a = \ln a$. Якщо прологарифмувати всі частини нерівності, отримаємо наступне:

$$n \ln \left(1 + \frac{1}{n}\right) < 1 < (n+1) \ln \left(1 + \frac{1}{n}\right)$$

В результаті ми можемо отримати цікаву оцінку:

$$\frac{1}{1+n} < \ln \left(1 + \frac{1}{n}\right) < \frac{1}{n}$$

3.6 Підпоследовності

Definition 3.6.1 Последовністю натуральних чисел називають ось таку строго зростаючу последовність:

$$\{n_k, k \geq 1\} \subset \mathbb{N}$$

Example 3.6.2 Последовність $\{n_k = k^2, k \geq 1\} \subset \mathbb{N}$ та строго зростає. Тобто це – последовність натуральних чисел.

Lemma 3.6.3 Задано последовність натуральних чисел $\{n_k, k \geq 1\}$. Тоді $\forall k \geq 1 : n_k \geq k$.

Proof.

Доведення буде за МІ по числу k .

База індукції: при $k = 1$ маємо або $n_1 = 1$, або $n_1 > 1$ – все чудово.

Припущення індукції: нерівність $n_m \geq m$ виконана для $k = m$.

Крок індукції: доведемо дану нерівність для $k = m + 1$.

Якщо $n_m = m$, то автоматично $n_{m+1} \geq m + 1$.

Якщо $n_m > m$, то тоді $n_m \geq m + 1$. Оскільки строго зростає последовність, то $n_{m+1} > n_m \geq m + 1$.

Отже, $\forall k \geq 1 : n_k \geq k$.

МІ доведено. ■

Corollary 3.6.4 Будь-яка последовність натуральних чисел $\{n_k, k \geq 1\}$ – н.в. Тобто $\lim_{k \rightarrow \infty} n_k = +\infty$.

Вказівка: попередня лема.

Definition 3.6.5 Задано последовність $\{a_n, n \geq 1\}$ та последовність натуральних чисел $\{n_k, k \geq 1\}$. Последовність

$$\{a_{n_k}, k \geq 1\}$$

називається **підпоследовністю**.

Формально кажучи, ми пам'ятаємо, що последовність – це відображення. Ми маємо два відображення $f: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ та $g: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$, де в кожному випадку $f(k) = n_k$ та $g(n) = a_n$. Тоді підпоследовністю називають композицію $g \circ f: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$, де в нашому випадку $g \circ f(k) = a_{n_k}$.

Definition 3.6.6 Якщо підпоследовність $\{a_{n_k}, k \geq 1\}$ числової последовності $\{a_n, n \geq 1\}$ матиме границю, то цю границю називають **частковою границею последовності** $\{a_n, n \geq 1\}$.

Example 3.6.7 Маємо последовність натуральних чисел $\{n_k = 2k, k \geq 1\} = \{2, 4, 6, 8, \dots\} \subset \mathbb{N}$. Також маємо последовність $\{a_n = (-1)^n, n \geq 1\}$. Тоді якщо використати нашу последовність натуральних чисел, отримаємо підпоследовність $\{a_{n_k} = a_{2k} = (-1)^{2k} = 1, k \geq 1\}$.

Зокрема $\{a_{n_k} = a_{2k}, k \geq 1\}$ матиме границю $\lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k} = 1$. – це часткова границя $\{a_n\}$.

Proposition 3.6.8 Якщо для последовності $\{a_n, n \geq 1\}$ існує $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$, то для кожної підпоследовності $\{a_{n_k}, k \geq 1\}$ також існує $\lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k} = a$.

Proof.

$$\exists \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a \iff \forall \varepsilon > 0 : \exists N(\varepsilon) : \forall n \geq N : |a_n - a| < \varepsilon.$$

Візьмемо підпоследовність $\{a_{n_k}, k \geq 1\}$. Оскільки последовність $\{n_k, k \geq 1\}$ – строга зростаюча последовність натуральних чисел, то $\exists \lim_{k \rightarrow \infty} n_k = +\infty$. Тоді для $E = N(\varepsilon) : \exists K(\varepsilon) : \forall k \geq K : n_k > N$.

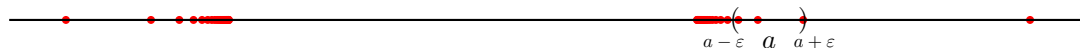
Зокрема оскільки $n_k > N$, то одразу $|a_{n_k} - a| < \varepsilon \implies \lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k} = a$. ■

Theorem 3.6.9 Характеризація часткової границі

$a \in \mathbb{R}$ – часткова границя послідовності $\{a_n, n \geq 1\} \iff \forall \varepsilon > 0 : \forall N \in \mathbb{N} : \exists n \geq N : |a_n - a| < \varepsilon$.

Remark 3.6.10 Трактуювання цієї теореми буде простіше, якщо взяти заперечення:

$a \in \mathbb{R}$ – не часткова границя для $\{a_n, n \geq 1\} \iff \exists \varepsilon^* > 0 : \exists N : \forall n \geq N : |a_n - a| \geq \varepsilon^*$.



Якщо a – не є частковою границею, то це означає, що знайдеться такий окіл і номер, починаючи з якого всі члени послідовності будуть за межами цього околу.

Proof.

\Rightarrow Дано: a – часткова границя для $\{a_n, n \geq 1\}$, тобто $\exists \{a_{n_k}, k \geq 1\} : \lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k} = a$.

Нехай $\varepsilon > 0$. Тоді $\exists K' : \forall k \geq K' : |a_{n_k} - a| < \varepsilon$. А далі нехай $N \in \mathbb{N}$.

Водночас ми маємо, що $n_k \rightarrow +\infty$, тобто для $E = N : \exists K'' : \forall k \geq K'' : n_k > N$.

Якщо встановити $K = \max\{K', K''\}$, то тоді $n_K > N$. Тому $\exists n = n_K : |a_n - a| < \varepsilon$.

\Leftarrow Дано: $\forall \varepsilon > 0 : \forall N \in \mathbb{N} : \exists n \geq N : |a_n - a| < \varepsilon$.

Якщо $\varepsilon = 1$ та $N = 1$, то існує $n_1 \geq 1$, для якого $|a_{n_1} - a| < 1$.

Якщо $\varepsilon = \frac{1}{2}$ та $N = n_1 + 1$, то існує $n_2 > n_1$, для якого $|a_{n_2} - a| < \frac{1}{2}$.

\vdots

Отримали підпослідовність $\{a_{n_k}, k \geq 1\}$, де $|a_{n_k} - a| < \frac{1}{k}$. Спрямуємо $k \rightarrow \infty \implies a_{n_k} \rightarrow a$. ■

Theorem 3.6.11 Теорема Больцано-Ваєрштраса

Для будь-якої обмеженої послідовності існує збіжна підпослідовність.

Proof.

Розглянемо послідовність $\{a_n, n \geq 1\}$. Існують два випадки за кількістю елементів.

I. Послідовність – скінченна (як в Ех. 2.6.3.).

Тоді одне із значень послідовності буде прийматись нескінченну кількість разів. Отримаємо стаціонарну підпослідовність, яка є збіжною.

II. Послідовність – нескінченна (як в Ех. 2.6.8.).

Нехай A – множина всіх можливих значень послідовності. Оскільки вона є обмеженою, то за левою Больцано-Ваєрштраса, у неї існує гранична точка b_* $\iff \forall \varepsilon > 0 : A \cap (b_* - \varepsilon, b_* + \varepsilon)$ – нескінченна множина.

Розглянемо $\varepsilon = \frac{1}{k}$ при $k \in \mathbb{N}$.

$k = 1 : A \cap (b_* - 1, b_* + 1) \ni a_{n_1}$

$k = 2 : A \cap (b_* - \frac{1}{2}, b_* + \frac{1}{2}) \ni a_{n_2}$, вимагаємо $n_2 > n_1$. Це можна робити, бо всього n_1 членів, індекс яких не більший за n_1 . А у нас нескінченна множина.

\vdots

Побудували підпослідовність $\{a_{n_k}, k \geq 1\}$ таким чином, що $b_* - \frac{1}{k} < a_{n_k} < b_* + \frac{1}{k}$. А далі спрямуємо k до нескінченності. В результаті чого отримаємо:

$$b_* - \frac{1}{k} < a_{n_k} < b_* + \frac{1}{k}, \quad k \rightarrow \infty$$

$\searrow \quad \downarrow \quad \swarrow$
 $\quad \quad b_* \quad$

Тоді за теоремою про 2 поліця, $\exists \lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k} = b_*$. ■

Corollary 3.6.12 Для обмеженої послідовності множина часткових границь на множині \mathbb{R} – непорожня. Таку множину позначу за X .

Theorem 3.6.13 Для будь-якої необмеженої послідовності існує н.в. підпослідовність.

Proof.

Задано $\{a_n, n \geq 1\}$ – необмежена зверху $\implies \forall C > 0 : \exists n \geq 1 : a_n > C$.

Нехай $C = 1$. Тоді $\exists n = n_1 \geq 1 : a_{n_1} > 1$

Нехай $C = 2$. Тоді $\exists n = n_2 > n_1 : a_{n_2} > 2$

\vdots

Нехай $C = k$. Тоді $\exists n = n_k > \dots > n_2 > n_1 : a_{n_k} > k$

Отже, маємо підпослідовність $\{a_{n_k}, k \geq 1\}$, де $\forall k \geq 1 : a_{n_k} > k \implies 0 < \frac{1}{a_{n_k}} < \frac{1}{k}$. Якщо $k \rightarrow +\infty$, то $\frac{1}{a_{n_k}} \rightarrow 0$. Отже, $a_{n_k} \rightarrow +\infty$.

Для необмеженої знизу послідовності теж існуватиме н.в. підпослідовність (аналогічно). ■

Definition 3.6.14 Задано послідовність $\{a_n, n \geq 1\}$.

Верхньою границею називають число:

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n = \sup X$$

Нижньою границею називають число:

$$\underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n = \inf X$$

Часто ще $\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n$ позначають за $\limsup_{n \rightarrow \infty} a_n$; $\underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n$ позначають за $\liminf_{n \rightarrow \infty} a_n$.

Example 3.6.15 Знайдемо часткові границі для послідовності $\{a_n, n \geq 1\}$, де $a_n = (-1)^{n-1} \left(2 + \frac{3}{n}\right)$.

Якщо $n = 2k - 1$, то маємо підпослідовність $\left\{a_{n_k} = 2 + \frac{3}{2k-1}\right\}$, $\lim_{k \rightarrow \infty} \left(2 + \frac{3}{2k-1}\right) = 2$.

Якщо $n = 2k$, то маємо підпослідовність $\left\{a_{n_k} = -2 - \frac{3}{2k}\right\}$, $\lim_{k \rightarrow \infty} \left(-2 - \frac{3}{2k}\right) = -2$.

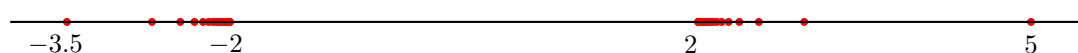
Але це не всі можливі підпослідовності. Я можу, наприклад, перші 10 членів взяти з непарним номером, а решта – з парним номером, яка буде прямувати до вже існуючих часткових границь.

А можна навіть виділити підпослідовність $\{a_{4k-3}, k \geq 1\}$, для якого не існує часткової границі.

Постає питання, чи є ще інші часткові границі. Інтуїтивно, ні (нижче буде строго).

Множина часткових границь: $X = \{-2, 2\}$. Тоді звідси $\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n = 2$, $\underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n = -2$. Зауважимо

одразу, що $\sup_{n \geq 1} \{a_n\} = 5$ та $\inf_{n \geq 1} \{a_n\} = -3.5$.



Більш строго пояснити, чому не має інших часткових границь, можна ось так.

Якщо $-2 < a < 2$, то тоді беремо $\varepsilon^* = \min\{|a - 2|, |a - (-2)|\}$ та $N^* = 1$.

Якщо $a > 2$, то тоді $\exists \varepsilon^* < a - 2$. А якщо розглянути лише непарні елементи, то $\inf = 2$, тобто $\exists N : a_N < 2 + \varepsilon^*$. Парні члени тим паче будуть менше. Отже, $\forall n \geq N : |a_n - a| \geq \varepsilon^*$;

- якщо $a < -2$, то майже аналогічні міркування, але тепер розглядаються парні елементи.

Example 3.6.16 Є ще така послідовність $\left\{0, 1, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{3}{4}, \frac{1}{8}, \frac{3}{8}, \frac{5}{8}, \frac{7}{8}, \dots\right\}$. У неї множина часткових границь задається так: $X = [0, 1]$. Доведемо це.

$a = 0$ – часткова границя, тому що є підпослідовність $\left\{1, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \dots\right\}$.

$a = 1$ – часткова границя, тому що є підпослідовність $\left\{1, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}, \frac{7}{8}, \dots\right\}$.

Тепер нехай $a \in (0, 1)$ – (TODO: обміркувати)

Remark 3.6.17 Вищезгадане означення працює лише тоді, коли послідовність обмежена – у нас тоді $X \neq \emptyset$, а тому можна визначати $\sup X, \inf X$. Проте якщо послідовність $\{a_n, n \geq 1\}$ не є обмеженою:

зверху, то домовляємося $\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} = +\infty$;
знизу, то домовляємося $\underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} = -\infty$.

Як бачимо, будь-яка обмежена послідовність має максимум та мінімум (на основі прикладів). Наступна теорема це підтверджує:

Theorem 3.6.18 Будь-яка обмежена послідовність має верхню/нижню границю.

Remark 3.6.19 Інакше кажучи, $\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n \in X$, $\underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n \in X$ для послідовності $\{a_n, n \geq 1\}$.

Proof.

Позначимо $x_* = \inf X$. Оскільки X - множина часткових границь, то

$$\forall \varepsilon > 0 : \exists x_\varepsilon \in X : x_* \leq x_\varepsilon < x_* + \frac{\varepsilon}{2}.$$

Оскільки $x_\varepsilon \in X$, то тоді це - часткова границя для послідовності $\{a_n, n \geq 1\}$, тобто

$$\begin{aligned} \exists \{a_{n_m}^{(\varepsilon)}, m \geq 1\} : \lim_{m \rightarrow \infty} a_{n_m}^{(\varepsilon)} = x_\varepsilon &\implies \exists M(\varepsilon) : \forall m \geq M : |a_{n_m}^{(\varepsilon)} - x_\varepsilon| < \varepsilon, \text{ зокрема } |a_{n_m}^{(\varepsilon)} - x_*| < \varepsilon. \\ \implies |a_{n_m}^{(\varepsilon)} - x_*| = |a_{n_m}^{(\varepsilon)} - x_\varepsilon + x_\varepsilon - x_*| &\leq |a_{n_m}^{(\varepsilon)} - x_\varepsilon| + |x_\varepsilon - x_*| < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon. \end{aligned}$$

$$\text{При } \varepsilon = 1 \text{ маємо: } |a_{n_{M(1)}}^{(1)} - x_*| < 1$$

$$\text{При } \varepsilon = \frac{1}{2} \text{ маємо: } |a_{n_{M(\frac{1}{2})}}^{(\frac{1}{2})} - x_*| < \frac{1}{2}$$

⋮

А тепер розглянемо підпослідовність $\{a_{n_k}, k \geq 1\}$, таку, що $a_{n_k} = a_{n_{M(\frac{1}{k})}}^{(\frac{1}{k})}$.

$$\begin{array}{ccc} \text{За побудовою, } |a_{n_k} - x_*| < \frac{1}{k} & \implies & x_* - \frac{1}{k} < a_{n_k} < x_* + \frac{1}{k}, \quad k \rightarrow \infty \\ & \searrow \quad \downarrow \quad \swarrow & & \\ & & x_* & \end{array}$$

Таким чином, для $\{a_{n_k}, k \geq 1\}$ існує $\lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k} = x_* = \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n$.

Для точної верхньої границі аналогічно. ■

Theorem 3.6.20 Задано $\{a_n, n \geq 1\}$ - обмежена та $L^* \in \mathbb{R}$. Наступні твердження еквівалентні:

- 1) $L^* = \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n$;
- 2) $\forall \varepsilon > 0$: проміжок $(L^* + \varepsilon, +\infty)$ містить скінченну кількість елементів та проміжок $(L^* - \varepsilon, +\infty)$ містить нескінченну кількість елементів;
- 3) Нехай задано послідовність $\{b_m, m \geq 1\}$, де $b_m = \sup_{n \geq m} \{a_n\}$. Тоді $\exists \lim_{m \rightarrow \infty} b_m = L^*$.

Proof.

1) \Rightarrow 2) Дано: умова 1).

Тоді $L^* = \sup X$. За попередньою теоремою, $L^* \in X$, тож існує $\{a_{n_k}, k \geq 1\}$, для якої

$$\lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k} = L^* \implies \forall \varepsilon > 0 : \exists K : \forall k \geq K : L^* - \varepsilon < a_{n_k} < L^* + \varepsilon.$$

Звідси ми вже маємо, що на проміжку $(L^* - \varepsilon, +\infty)$ маємо нескінченну кількість елементів.

!А далі припустимо, що $\exists \varepsilon^* > 0$: проміжок $(L^* + \varepsilon^*, +\infty)$ має НЕскінченну кількість елементів.

Тобто знайдеться підпослідовність $\{a_{n_m}, m \geq 1\}$, для яких $a_{n_m} > L^* + \varepsilon$. Ця послідовність досі

обмежена, тому за теоремою Больцано-Вейєрштраса, маємо збіжну підпідпослідовність

$\{a_{n_{m_l}}, l \geq 1\}$, для якої $\lim_{l \rightarrow \infty} a_{n_{m_l}} = L^{**}$. Для підпідпослідовності досі $a_{n_{m_l}} > L^* + \varepsilon$. Тоді звідси, за

граничним переходом нерівності, $L^{**} \geq L^* + \varepsilon^*$. Тобто $L^{**} > L^*$, але L^* - верхня границя. Суперечність!

Висновок: $\forall \varepsilon > 0$: проміжок $(L^* + \varepsilon, +\infty)$ має скінченну кількість елементів.

2) \Rightarrow 3) Дано: умова 2).

Для початку розглянемо $\{b_m, m \geq 1\}$ та покажемо, що в неї дійсно є границя.

$b_{m+1} \leq b_m$, тобто $\sup_{n \geq m+1} \{a_n\} \leq \sup_{n \geq m} \{a_n\}$. Справді:

- якщо $\sup \{a_m, a_{m+1}, a_{m+2}, \dots\} = a_m$, то тоді одразу $\sup \{a_{m+1}, a_{m+2}, \dots\} \leq a_m$, тобто $b_{m+1} \leq b_m$;

- якщо $\sup \{a_m, a_{m+1}, a_{m+2}, \dots, a_{m+l}, \dots\} = a_{m+l}$, то тоді $b_{m+1} = b_{m+2} = \dots = b_{m+l} = a_{m+l}$;

- або якщо $\sup \{a_m, a_{m+1}, \dots\} = s$, то тоді $\sup \{a_{m+1}, \dots\} = s$. Тобто $b_{m+1} = b_m$.

Отже, дійсно, $\forall m \geq 1 : b_{m+1} \leq b_m$ - спадає.

Оскільки $\{a_n, n \geq 1\}$, обмежена, а тому й знизу, то $\exists C \in \mathbb{R} : \forall n \geq 1 : a_n \geq C$. Зокрема $\forall m \geq 1 : \forall n \geq m : a_n \geq C \implies \sup_{n \geq m} \{a_n\} = b_m \geq C$, тобто $\{b_m, m \geq 1\}$ - обмежена знизу.

Отже, за Ваєрштрасом, $\exists \lim_{m \rightarrow \infty} b_m$.

Оскільки $(L^* + \frac{\varepsilon}{2}, +\infty)$ має скінченну кількість елементів, то $\exists M : \forall m \geq M : a_m \leq L^* + \frac{\varepsilon}{2}$.

Для послідовності $\{a_M, a_{M+1}, \dots\}$ число $L^* + \frac{\varepsilon}{2}$ - число, що обмежує послідовність зверху, тоді $\sup\{a_M, a_{M+1}, \dots\} = b_M \leq L^* + \frac{\varepsilon}{2}$. Оскільки $\{b_m, m \geq 1\}$ спадна, то $\forall m \geq M : b_m \leq b_M \leq L^* + \frac{\varepsilon}{2}$.

Тоді $\forall m \geq M : b_m < L^* + \varepsilon$.

Також оскільки $(L^* - \varepsilon, +\infty)$ має нескінченну кількість елементів, то $b_m > L^* - \varepsilon, \forall m \geq 1$.

Остаточно, $\forall \varepsilon > 0 : \exists M : \forall m \geq M : |b_m - L^*| < \varepsilon$. Отже, $\lim_{m \rightarrow \infty} b_m = L^*$.

3) \Rightarrow 1) Дано: умова 3).

Заздалегідь зауважимо, що ми там брали підпослідовності послідовності $\{b_m, m \geq 1\}$, які також будуть прямувати до L^* .

Нехай $x \in X$, тоді існує підпослідовність $\{a_{n_k}, k \geq 1\}$, для якої $a_{n_k} \rightarrow x$ при $k \rightarrow \infty$. Зауважимо, що $a_{n_k} \leq b_{n_k} \xrightarrow{k \rightarrow \infty} x \leq L^*$.

Далі маємо $b_1 = \sup_{n \geq 1} \{a_n\}$, тоді за критерієм супремума, $\exists n_1 \geq 1 : b_1 \geq a_{n_1} > b_1 - 1$.

Маємо $b_{n_1+1} = \sup_{n \geq n_1+1} \{a_n\}$, тоді за критерієм супремума, $\exists n_2 > n_1 : b_{n_1+1} \geq a_{n_2} > b_{n_1+1} - \frac{1}{2}$.

Маємо $b_{n_2+1} = \sup_{n \geq n_2+1} \{a_n\}$, тоді за критерієм супремума, $\exists n_3 > n_2 : b_{n_2+1} \geq a_{n_3} > b_{n_2+1} - \frac{1}{3}$.

\vdots

В результаті отримаємо підпослідовність $\{a_{n_k}, k \geq 1\}$, для якої $b_{n_{k-1}+1} \geq a_{n_k} > b_{n_{k-1}+1} - \frac{1}{k}$.

Якщо $k \rightarrow \infty$, то тоді $a_{n_k} \rightarrow L^*$.

Таким чином, отримали, що $L^* = \sup X = \overline{\lim_{n \rightarrow \infty} a_n}$. ■

Theorem 3.6.21 Задано $\{a_n, n \geq 1\}$ - обмежена та $L_* \in \mathbb{R}$. Наступні твердження еквівалентні:

- 1) $L_* = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n$;
- 2) $\forall \varepsilon > 0$: проміжок $(-\infty, L_* - \varepsilon)$ містить скінченну кількість елементів та проміжок $(-\infty, L_* + \varepsilon)$ містить нескінченну кількість елементів;
- 3) Нехай задано послідовність $\{b_m, m \geq 1\}$, де $b_m = \inf_{n \geq m} \{a_n\}$. Тоді $\exists \lim_{m \rightarrow \infty} b_m = L_*$.

Доведення є аналогічним.

3.7 Фундаментальна послідовність

Definition 3.7.1 Послідовність $\{a_n, n \geq 1\}$ називається **фундаментальною**, якщо

$$\forall \varepsilon > 0 : \exists N \in \mathbb{N} : \forall n, m \geq N : |a_n - a_m| < \varepsilon$$

У англomовній літературі це називають **послідовністю Коші** через критерій нижче.

Remark 3.7.2 Означення фундаментальної послідовності можна записати й таким чином:

$$\forall \varepsilon > 0 : \exists N \in \mathbb{N} : \forall n \geq N : \forall p \geq 1 : |a_{n+p} - a_n| < \varepsilon$$

Theorem 3.7.3 Критерій Коші

Послідовність $\{a_n, n \geq 1\}$ є збіжною \iff послідовність $\{a_n, n \geq 1\}$ є фундаментальною.

Перед початком доведення наведу корисну лему.

Lemma 3.7.4 Задано $\{a_n, n \geq 1\}$ - фундаментальна. Тоді вона - обмежена.

Proof.

Маємо $\{a_n, n \geq 1\}$ – фундаментальна, тобто $\forall \varepsilon > 0 : \exists N \in \mathbb{N} : \forall n, m \geq N : |a_n - a_m| < \varepsilon$.

Для $\varepsilon = 1 : \exists N : \forall n \geq N, m = N : |a_n - a_N| < 1$

$$\Rightarrow |a_n| = |a_n - a_N + a_N| \leq |a_n - a_N| + |a_N| < 1 + |a_N|.$$

Задамо $C = \max\{|a_1|, \dots, |a_{N-1}|, |1| + |a_N|\}$. Тоді $\forall n \geq 1 : |a_n| \leq C$, тобто обмежена. ■

Тепер можемо довести даний критерій.

Proof.

\Rightarrow Дано: $\{a_n, n \geq 1\}$ – збіжна, тобто: $\forall \varepsilon > 0 : \exists N :$

$$\forall n \geq N : |a_n - a| < \frac{\varepsilon}{2}$$

$$\forall m \geq N : |a_m - a| < \frac{\varepsilon}{2}$$

А тоді отримаємо $|a_n - a_m| = |a_n - a + a - a_m| \leq |a_n - a| + |a_m - a| < \varepsilon$.

Отже, послідовність є фундаментальною.

\Leftarrow Дано: $\{a_n, n \geq 1\}$ – фундаментальна, тобто $\forall \varepsilon > 0 : \exists N \in \mathbb{N} : \forall n, m \geq N : |a_n - a_m| < \varepsilon$.

Оскільки наша послідовність обмежена (за лемою), виділимо збіжну підпослідовність $\{a_{n_k}, k \geq 1\}$,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_{n_k} = a \Rightarrow \forall \varepsilon > 0 : \exists K : \forall k \geq K : |a_{n_k} - a| < \frac{\varepsilon}{2}.$$

Покладемо $N_* = \max\{N, K\}$. Тоді маємо:

$$\forall n \geq N_* : |a_n - a| = |a_n - a_{n_{N_*}} + a_{n_{N_*}} - a| \leq |a_n - a_{n_{N_*}}| + |a_{n_{N_*}} - a| < \varepsilon.$$

Тобто $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$. ■

Example 3.7.5 Розглянемо послідовність $\{a_n, n \geq 1\}$, де $a_n = \frac{\sin 1}{1^2} + \frac{\sin 2}{2^2} + \dots + \frac{\sin n}{n^2}$. Довести збіжність.

$$\begin{aligned} |x_{n+p} - x_n| &\leq \frac{1}{(n+1)^2} + \dots + \frac{1}{(n+p)^2} \leq \frac{1}{n(n+1)} + \dots + \frac{1}{(n+p-1)(n+p)} = \\ &= \frac{1}{n} - \frac{1}{n+1} + \dots + \frac{1}{n+p-1} - \frac{1}{n+p} = \frac{1}{n} - \frac{1}{n+p} \leq \frac{1}{n} < \varepsilon \Rightarrow n > \frac{1}{\varepsilon} \end{aligned}$$

Встановимо $N = \left\lceil \frac{1}{\varepsilon} \right\rceil + 1$. Тоді $\forall n \geq N : \forall p \geq 1 : |x_{n+p} - x_n| < \varepsilon$.

Отже, наша послідовність – фундаментальна, а тому збіжна.

3.8 Теореми Штольца та Чезаро

Theorem 3.8.1 Теорема Штольца

Задано дві послідовності $\{a_n, n \geq 1\}, \{b_n, n \geq 1\}$, які мають ось такі властивості:

- 1) $\{b_n\}$ – н.в. та монотонно строго зростає (можливо, з якогось номера);
- 2) $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1} - a_n}{b_{n+1} - b_n} = L$.

Тоді $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n} = L$.

Proof.

I. Випадок при $|L| < \infty$.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1} - a_n}{b_{n+1} - b_n} = L \Rightarrow \forall \varepsilon > 0 : \exists N_1 : \forall n \geq N_1 : \left| \frac{a_{n+1} - a_n}{b_{n+1} - b_n} - L \right| < \varepsilon \Rightarrow L - \varepsilon < \frac{a_{n+1} - a_n}{b_{n+1} - b_n} < L + \varepsilon.$$

Оскільки $\{b_n\}$ – н.м., то $\exists N_2 : \forall n \geq N_2 : b_n > 0$.

Щоб виконувались ці нерівності одночасно, я зафіксую $N = \max\{N_1, N_2\}$.

Оскільки $\{b_n\}$ – монотонно зростає, то ми домножимо на $b_{n+1} - b_n > 0$, отримаємо:

$$(L - \varepsilon)(b_{n+1} - b_n) < a_{n+1} - a_n < (L + \varepsilon)(b_{n+1} - b_n).$$

Зафіксуємо $k > N$ та просумуємо це до k . Матимемо після винесення дужок $(L - \varepsilon), (L + \varepsilon)$:

$$(b_{N+1} - b_N) + (b_{N+2} - b_{N+1}) + \dots + (b_{k+1} - b_k) = b_{k+1} - b_N.$$

$$\text{Аналогічно } (a_{N+1} - a_N) + (a_{N+2} - a_{N+1}) + \dots + (a_{k+1} - a_k) = a_{k+1} - a_N.$$

$$\Rightarrow (L - \varepsilon)(b_{k+1} - b_N) < a_{k+1} - a_N < (L + \varepsilon)(b_{k+1} - b_N)$$

Поділимо на $b_{k+1} > 0$ – буде:

$$(L - \varepsilon) \left(1 - \frac{b_N}{b_{k+1}}\right) < \frac{a_{k+1}}{b_{k+1}} - \frac{a_N}{b_{k+1}} < (L + \varepsilon) \left(1 - \frac{b_N}{b_{k+1}}\right)$$

$$\Rightarrow (L - \varepsilon) \left(1 - \frac{b_N}{b_{k+1}}\right) + \frac{a_N}{b_{k+1}} < \frac{a_{k+1}}{b_{k+1}} < (L + \varepsilon) \left(1 - \frac{b_N}{b_{k+1}}\right) + \frac{a_N}{b_{k+1}}.$$

Спрямуємо $k \rightarrow \infty$, тоді за теоремою про нерівність та з урахуванням тим, що $\{b_n\}$ – н.в., маємо:

$$(L - \varepsilon) \leq \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{a_{k+1}}{b_{k+1}} \leq (L + \varepsilon) \Rightarrow \left| \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{a_{k+1}}{b_{k+1}} - L \right| \leq \varepsilon, \forall \varepsilon > 0$$

Остаточно отримаємо: $\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{a_{k+1}}{b_{k+1}} = L$.

II. Випадок при $L = +\infty$.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1} - a_n}{b_{n+1} - b_n} = +\infty \Rightarrow \text{для } E = 1 : \exists N : \forall n \geq N : a_{n+1} - a_n > b_{n+1} - b_n \Rightarrow a_{n+1} > a_n.$$

Зафіксуємо $k > N$ та просумуємо нерівність $a_{n+1} - a_n > b_{n+1} - b_n$ до k .

$$\Rightarrow a_{k+1} - a_N > b_{k+1} - b_N \Rightarrow a_{k+1} > a_N - b_N + b_{k+1} \Rightarrow \lim_{k \rightarrow \infty} a_k = +\infty.$$

Отже, маємо $\{a_n\}$ – н.в. та монотонно строго зростаюча.

$$\text{Також } \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{b_{n+1} - b_n}{a_{n+1} - a_n} = 0. \text{ Звідси } \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{b_n}{a_n} = 0 \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n} = +\infty.$$

III. Випадок при $L = -\infty$.

Насправді, все що треба зробити, – це розглянути послідовність $\{-a_n\}$. ■

Theorem 3.8.2 Теорема Штольца 2

Задано дві послідовності $\{a_n, n \geq 1\}, \{b_n, n \geq 1\}$, які мають ось такі властивості:

1) $\{a_n\}, \{b_n\}$ – н.м. та монотонно строго зростає (можливо, з якогось номера);

$$2) \exists \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1} - a_n}{b_{n+1} - b_n} = L.$$

$$\text{Тоді } \exists \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n} = L.$$

Доведення є аналогічним.

Remark 3.8.3 Можна замість строго зростаючої послідовності брати строго спадну послідовність.

Example 3.8.4 Знайдемо границю $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1^k + 2^k + \dots + n^k}{n^{k+1}}, k \in \mathbb{N}$.

Маємо зверху послідовність $\{a_n = 1^k + 2^k + \dots + n^k, n \geq 1\}$, що строго монотонно зростає, а також є н.в. Знайдемо одну границю як в теоремі Штольца. Перед цим ми маємо ще послідовність $\{b_n = n^{k+1}, n \geq 1\}$.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1} - a_n}{b_{n+1} - b_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(n+1)^k}{(n+1)^{k+1} - n^{k+1}} \quad \boxed{=}$$

Скористаємось тотожністю:

$$x^n - y^n = (x - y)(x^{n-1} + x^{n-2}y + \dots + xy^{n-2} + y^{n-1})$$

$$\begin{aligned} & \boxed{=} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(n+1)^k}{(n+1-n)((n+1)^k + (n+1)^{k-1}n + \dots + (n+1)n^{k-1} + n^k)} = \\ & = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{1 + \frac{n}{(n+1)} + \dots + \frac{n^{k-1}}{(n+1)^{k-1}} + \frac{n^k}{(n+1)^k}} = \frac{1}{1 + 1 + \dots + 1} = \frac{1}{k+1} \end{aligned}$$

$$\text{Тоді за теоремою Штольца, } \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1^k + 2^k + \dots + n^k}{n^{k+1}} = \frac{1}{k+1}, k \in \mathbb{N}.$$

Corollary 3.8.5 Теорема Чезаро

Справедливі наступні твердження:

$$1) \text{ Якщо } \exists \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = L, \text{ то } \exists \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_1 + \dots + a_n}{n} = L;$$

$$2) \text{ Якщо } \exists \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = L, \text{ то } \exists \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_1 \dots a_n} = L. \text{ Причому } \forall n \geq 1 : a_n > 0;$$

$$3) \text{ Якщо } \exists \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} = L, \text{ то } \exists \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} = L. \text{ Причому } \forall n \geq 1 : a_n > 0.$$

Proof.

Доведемо кожне твердження окремо.

$$1) \text{ Зафіксуємо послідовність } \{S_n = a_1 + \dots + a_n, n \geq 1\}. \text{ Тоді маємо } \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{S_n}{n} \stackrel{\text{Th. Штольца}}{=} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{S_{n+1} - S_n}{(n+1) - n} = \lim_{n \rightarrow \infty} a_{n+1} = L.$$

$$2) \exists \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_1 + \dots + a_n}{n} = L \Rightarrow \forall \varepsilon > 0 : \exists N : \forall n : \left| \frac{a_1 + \dots + a_n}{n} - L \right| < \varepsilon \Rightarrow \left| \sqrt[n]{a_1 \dots a_n} - L \right| \leq \left| \frac{a_1 + \dots + a_n}{n} - L \right| < \varepsilon \Rightarrow \exists \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_1 \dots a_n} = L.$$

3) Зафіксуємо послідовність $\{b_1 = a_1, b_n = \frac{a_n}{a_{n-1}}, n \geq 2\}$. Тоді маємо:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{a_{n-1}} = \lim_{n \rightarrow \infty} b_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{b_1 \dots b_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_1 \frac{a_2}{a_1} \dots \frac{a_n}{a_{n-1}}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} = L.$$

Всі твердження доведені. ■

Example 3.8.6 Знайти границю $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{\sqrt[n]{n!}}$.

Трошки перепишемо границю ось так: $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{\sqrt[n]{n!}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{\frac{n^n}{n!}}$.

За третім пунктом теореми Чезаро, спробуємо обчислити границю. Маємо:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(n+1)^{n+1}}{n^n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(n+1)^n}{n^n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n = e.$$

$$\text{Тоді } \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{\sqrt[n]{n!}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{\frac{n^n}{n!}} = e.$$

Зведення в дійсний степінь

Починалось зі зведення числа в натуральний степінь:

$$a^n = \underbrace{a \cdot a \cdot \dots \cdot a}_{n \text{ разів}}, \quad n \in \mathbb{N}$$

Потім виник цілий степінь, із обмеженням $a \neq 0$:

$$a^{-n} = \frac{1}{a^n}, \quad n \in \mathbb{Z}$$

А далі в школі мали розглядати раціональний степінь:

$$a^{\frac{m}{n}} = \sqrt[n]{a^m}, \quad \frac{m}{n} = q \in \mathbb{Q}$$

Причому не має значення, яким чином я представляю раціональний дріб.

Дійсно, нехай $\frac{m}{n}$ - нескоротимий, тоді $\frac{m}{n} = \frac{mk}{nk}$, $k \in \mathbb{N}$, звідси

$$a^{\frac{m}{n}} = \sqrt[n]{a^m} = \sqrt[nk]{a^{mk}} = a^{\frac{mk}{nk}}.$$

А якщо ми маємо два дроби $\frac{m_1}{n_1} = \frac{m_2}{n_2}$, які є скоротимими до $\frac{m}{n}$, то тоді

$$\begin{cases} a^{\frac{m_1}{n_1}} = a^{\frac{m}{n}} \\ a^{\frac{m_2}{n_2}} = a^{\frac{m}{n}} \end{cases} \implies a^{\frac{m_1}{n_1}} = a^{\frac{m_2}{n_2}}$$

Зазначимо, що саме в цьому моменті ми вимагаємо, щоб основа $a > 0$, оскільки виникає суперечність з раціональними степенями. Наприклад:

$$\sqrt[3]{-2} = (-2)^{\frac{1}{3}} = (-2)^{\frac{2}{6}} = \sqrt[6]{(-2)^2} = \sqrt[6]{4} = \sqrt[3]{2}.$$

У всіх зберігається один клас властивостей:

- 1) $q_1 > q_2 \implies \begin{cases} a^{q_1} > a^{q_2}, a > 1 \\ a^{q_1} < a^{q_2}, 0 < a < 1 \end{cases};$
- 2) $a^{q_1} a^{q_2} = a^{q_1+q_2};$
- 3) $(a^{q_1})^{q_2} = a^{q_1 q_2};$
- 4) $(a_1 a_2)^q = a_1^q a_2^q.$

Тепер ми хочемо навчитися зводити в дійсний степінь певне число, але наведу спочатку корисні твердження.

Lemma 0.8.7 Задано послідовність $\{q_n, n \geq 1\} \subset \mathbb{Q}$, де $q_n \rightarrow 0$. Тоді $a^{q_n} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 1$.

Proof.

Згадаємо, що $\sqrt[n]{a} \rightarrow 1$. Далі розіб'ємо лему на кілька випадків:

I. $a > 1$.

Нехай $\varepsilon > 0$. Тоді $\exists N_1 : \forall n \geq N_1 : |a^{\frac{1}{n}} - 1| < \varepsilon$. Зокрема $|a^{\frac{1}{N_1}} - 1| < \varepsilon$.

Водночас оскільки $q_n \rightarrow 0$, то тоді $\exists N_2 : \forall n \geq N_2 : |q_n| < \frac{1}{N_1}$.

Тому $\forall n \geq N_2 : |a^{|q_n|} - 1| = a^{|q_n|} - 1 < |a^{\frac{1}{N_1}} - 1| < \varepsilon$. Отже, $a^{|q_n|} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 1$.

А далі згадаємо, що $-|q_n| \leq q_n \leq |q_n|$, тоді в силу $a > 1$ маємо $a^{-|q_n|} = \frac{1}{a^{|q_n|}} \leq a^{q_n} \leq a^{|q_n|}$.

Таким чином, за теоремою про двох поліцаїв, $a^{q_n} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 1$.

II. $0 < a < 1$

Тоді встановимо $b = \frac{1}{a}, b > 1$. Звідси $b^{q_n} \rightarrow 1 \implies \left(\frac{1}{b}\right)^{q_n} = \frac{1}{b^{q_n}} \rightarrow \frac{1}{1} \implies a^{q_n} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 1$.

III. $a = 1$ (зрозуміло). ■

Theorem 0.8.8 Для кожного дійсного числа знайдеться збіжна до неї послідовність раціональних чисел.

Proof.

Спочатку випадок, коли $q \in \mathbb{Q}$. Тоді будемо стаціонарну послідовність $\{q_n = q, n \geq 1\}$ – готово.

Тепер $x \in \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}$. Розглянемо числа $x - \frac{1}{n}, x + \frac{1}{n} \in \mathbb{R}, \forall n \geq 1$. Тоді за щільністю раціональних чисел,

$\exists q_n \in \mathbb{Q} : x - \frac{1}{n} < q_n < x + \frac{1}{n}$. Тепер спрямуємось $n \rightarrow \infty$.

Тоді за теоремою про двох поліцаїв, для послідовності $\{q_n, n \geq 1\} \subset \mathbb{Q} : \exists \lim_{n \rightarrow \infty} q_n = x$. ■

Example 0.8.9 Зокрема для $\sqrt{2}$ можна побудувати послідовність $\{1, 1.4, 1.41, 1.414, 1.4142, \dots\}$

Definition 0.8.10 Задано $x \in \mathbb{R}, a > 0$ та послідовність $\{q_n, n \geq 1\} \subset \mathbb{Q} : q_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} x$.

Зведення числа до дійсного степіння визначається ось так:

$$a^x = \lim_{n \rightarrow \infty} a^{q_n}$$

Там, де це буде необхідно, я надалі буду розглядати випадок, коли $a > 1$. Якщо $0 < a < 1$, то робимо заміну $b = \frac{1}{a}$, де само число $b > 1$. Випадок $a = 1$ зрозумілий.

Виникає віднині дуже багато питань, які треба розв'язати.

Існування границі

Розглянемо послідовність раціональних чисел $\{r_n, n \geq 1\}$ таке, що $r_n \rightarrow x$ та є монотонно зростаючою, тобто $\forall n \geq 1 : r_{n+1} > r_n$. Тоді $\forall n \geq 1 : a^{r_{n+1}} > a^{r_n}$.

Ба більше, оскільки $\forall n \geq 1 : r_n < x < [x] + 1$, то звідси $\forall n \geq 1 : a^{r_n} < a^{[x]+1}$.

Тобто ми отримали послідовність $\{a^{r_n}, n \geq 1\}$ – монотонно зростаюча та обмежена зверху. Отже, за теоремою Ваєрштраса, $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} a^{r_n}$.

А тепер розглянемо довільну послідовність $\{q_n, n \geq 1\} \subset \mathbb{Q}$, де $q_n \rightarrow x$. Тоді

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a^{q_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} a^{q_n - r_n + r_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} a^{q_n - r_n} \lim_{n \rightarrow \infty} a^{r_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} a^{r_n}$$

Таким чином, ми довели, що границя існує.

Незалежність від послідовності раціональних чисел

Задано $q_n \rightarrow x$ та $q'_n \rightarrow x$. Доведемо, що $\lim_{n \rightarrow \infty} a^{q_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} a^{q'_n}$.

Зауважимо, що $q_n - q'_n \rightarrow 0$, тоді $a^{q_n - q'_n} \rightarrow 1$. А звідси $a^{q_n} = a^{q_n - q'_n + q'_n} = a^{q_n - q'_n} a^{q'_n} \rightarrow a^{q'_n}$.

Таким чином, ми довели, що границя не залежить від послідовності раціональних чисел.

Що буде, коли степінь – раціональний

Ми тоді беремо стаціонарну послідовність $\{q_n = q, q \geq 1\}$ - все.

Example 0.8.11 Хочемо порахувати $3^{\sqrt{2}}$.

Беремо якусь послідовність, наприклад, $\{1, 1.4, 1.41, 1.414, 1.4142, \dots\}$, яка прямує до $\sqrt{2}$.

Тоді будемо послідовність $\{3^1, 3^{1.4}, 3^{1.41}, 3^{1.414}, 3^{1.4142}, \dots\}$, яка буде прямувати до числа $3^{\sqrt{2}}$.

Настав час тепер показати, що властивості степеней зберігаються.

$$1) x > y \implies \begin{cases} a^x > a^y, a > 1 \\ a^x < a^y, 0 < a < 1 \end{cases}$$

Proof.

Зафіксуємо два раціональних числа $q_1, q_2 \in \mathbb{Q}$, щоб була ситуація $y < q_1 < q_2 < x$.

Розглянемо послідовності $\{x_n\} \subset \mathbb{Q}$, щоб всі члени були правіші за q_2 , та $\{y_n\} \subset \mathbb{Q}$, щоб всі члени були лівіші за q_1 , таким чином, щоб $x_n \rightarrow x, y_n \rightarrow y$. Тоді

$a^{y_n} < a^{q_1} < a^{q_2} < a^{x_n}$. Тоді за граничним переходом, $a^y \leq a^{q_1} < a^{q_2} \leq a^x \implies a^x > a^y$. ■

2) $a^x a^y = a^{x+y}$

Proof.

Розглянемо $\{x_n\} \subset \mathbb{Q}, \{y_n\} \subset \mathbb{Q}$ так, щоб $x_n \rightarrow x, y_n \rightarrow y$. Причому зауважу, що $x_n + y_n \rightarrow x + y$.
Тоді $a^x a^y = \lim_{n \rightarrow \infty} a^{x_n} \lim_{n \rightarrow \infty} a^{y_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} a^{x_n} a^{y_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} a^{x_n + y_n} = a^{x+y}$. ■

$$3) (a^x)^y = a^{xy}$$

Proof.

Розглянемо послідовності $\{x_n\} \subset \mathbb{Q}, \{y_m\} \subset \mathbb{Q}$ такі, що $x_n \rightarrow x, y_m \rightarrow y$

Рівність $(a^{x_n})^{y_m} = a^{x_n y_m}$ справедлива. Оскільки показникова функція – неперервна (це буде доведено в розділі 5), то тоді

$$n \rightarrow \infty \implies (a^x)^{y_m} = a^{x y_m} \quad m \rightarrow \infty \implies (a^x)^y = a^{xy}$$

Або можна навпаки прямувати. ■

$$4) (a_1 a_2)^x = a_1^x a_2^x$$

Proof.

$$(a_1 a_2)^x = \lim_{n \rightarrow \infty} (a_1 a_2)^{x_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} a_1^{x_n} \lim_{n \rightarrow \infty} a_2^{x_n} = a_1^x a_2^x$$

■

Example 0.8.12 Спростимо вираз $((a^\pi + b^\pi)^2 - (a^\pi - b^\pi)^2)^{\frac{1}{\pi}}$.

$$((a^\pi + b^\pi)^2 - (a^\pi - b^\pi)^2)^{\frac{1}{\pi}} = ((a^\pi + b^\pi - a^\pi + b^\pi)(a^\pi + b^\pi + a^\pi - b^\pi))^{\frac{1}{\pi}} = (2b^\pi)^{\frac{1}{\pi}} (2a^\pi)^{\frac{1}{\pi}} = 2b \cdot 2a = 4ab.$$

Постскриптум: саме після цього моменту уже визначаються такі поняття як логарифм $\log_a b$ – це таке x , що $a^x = b$. Також зустрічається така узгодженість:

$$\log_{10} a \stackrel{\text{позн}}{=} \lg a \quad \log_e a \stackrel{\text{позн}}{=} \ln a.$$

4 Границі функції

Залишу для початку загублену теорему, яка нам знадобиться надалі.

Theorem 4.0.1 Задано множину $A \subset \mathbb{R}$.

a – гранична точка $A \iff \exists \{a_n, n \geq 1\} \subset A : \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$, причому $\forall n \geq 1 : a_n \neq a$.

Proof.

\Rightarrow Дано: a – гранична точка A , тоді $\forall \varepsilon > 0 : (a - \varepsilon, a + \varepsilon) \cap A$ – нескінченна множина.

$\varepsilon = 1 : \exists a_1 \in (a - 1, a + 1) \cap A$

$\varepsilon = \frac{1}{2} : \exists a_2 \in \left(a - \frac{1}{2}, a + \frac{1}{2}\right) \cap A$

\vdots

Побудували послідовність $\{a_n, n \geq 1\}$, таку, що $a_n \in \left(a - \frac{1}{n}, a + \frac{1}{n}\right) \cap A$. Тобто $a - \frac{1}{n} < a_n < a + \frac{1}{n}$.

За теоремою про двох поліцаїв, якщо $n \rightarrow \infty$, то отримаємо, що $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$.

\Leftarrow Дано: $\exists \{a_n, n \geq 1\} \subset A : \forall n \geq 1 : a_n \neq a : \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$. Тобто за умовою,

$\forall \varepsilon > 0 : \exists N : \forall n \geq N : |a_n - a| < \varepsilon \implies a_n \in (a - \varepsilon, a + \varepsilon)$. А отже, $(a - \varepsilon, a + \varepsilon) \cap A$ – нескінченна множина, тож a – гранична точка. ■

4.1 Означення границь функцій

Definition 4.1.1 Задано функцію $f : A \rightarrow \mathbb{R}$ та $x_0 \in \mathbb{R}$ – гранична точка для A .

Число b називається **границею функції в точці** x_0 , якщо

$$\forall \varepsilon > 0 : \exists \delta(\varepsilon) > 0 : \forall x \in A : x \neq x_0 : |x - x_0| < \delta \implies |f(x) - b| < \varepsilon \quad \text{означення Коші}$$

$$\forall \{x_n, n \geq 1\} \subset A : \forall n \geq 1 : x_n \neq x_0 : \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x_0 \implies \lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = b \quad \text{означення Гайне}$$

Позначення: $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = b$.

Theorem 4.1.2 Означення Коші \iff Означення Гайне.

Proof.

\Rightarrow Дано: означення Коші, тобто $\forall \varepsilon > 0 : \exists \delta > 0 : \forall x \in A : x \neq x_0 : |x - x_0| < \delta \implies |f(x) - b| < \varepsilon$.

Зафіксуємо послідовність $\{x_n, n \geq 1\} \subset A$ таку, що $\forall n \geq 1 : x_n \neq x_0 : \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x_0$. На це ми мали права, оскільки x_0 – гранична точка A .

Нехай $\varepsilon > 0$. Тоді для нашого заданого $\exists \delta$, а для нього $\exists N : \forall n \geq N : |x_n - x_0| < \delta \implies |f(x_n) - b| < \varepsilon$.

Таким чином, $\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = b$ – тим самим виконано означення Гайне.

\Leftarrow Дано: означення Гайне, або $\forall \{x_n, n \geq 1\} \subset A : x_n \neq x_0 : \forall n \geq 1 : \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x_0 \implies \lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = b$.

Припустимо, що означення Коші не виконується, тобто виконується заперечення означення:

$\exists \varepsilon^* > 0 : \forall \delta > 0 : \exists x_\delta \in A : x_\delta \neq x_0 : |x_\delta - x_0| < \delta \implies |f(x_\delta) - b| \geq \varepsilon^*$.

Зафіксуємо $\delta = \frac{1}{n}$. Тоді побудуємо послідовність $\{x_n, n \geq 1\}$ таким чином, що $x_n \in A, x_n \neq x_0$, а

також $|x_n - x_0| < \frac{1}{n} \implies \exists \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x_0$ за теоремою про поліцаїв, але водночас $|f(x_n) - b| \geq \varepsilon^*$.

Отже, суперечність! ■

Remark 4.1.3 Границя функції має єдине значення.

Впливає з означення Гайне, оскільки границя числової послідовності – єдина.

Example 4.1.4 Задано функцію $f : \mathbb{R} \setminus \{2\} \rightarrow \mathbb{R}, f(x) = \frac{x^3 - 2x^2}{x - 2}$. Довести, що $\lim_{x \rightarrow 2} \frac{x^3 - 2x^2}{x - 2} = 4$.

За означенням Коші, ми хочемо, щоб $\forall \varepsilon > 0 : \exists \delta > 0 : \forall x : x \neq 2 : |x - 2| < \delta \implies \left| \frac{x^3 - 2x^2}{x - 2} - 4 \right| < \varepsilon$.

$$\left| \frac{x^3 - 2x^2}{x - 2} - 4 \right| = \left| \frac{x^2(x - 2)}{x - 2} - 4 \right| = |x^2 - 4| = |x - 2||x + 2| \quad \boxed{<}$$

Необхідно якось обмежити $|x + 2|$, щоб було все чудово. Можемо попросити, щоб $|x - 2| < \frac{1}{\delta^*}$. Тоді $-1 < x - 2 < 1 \Rightarrow |x + 2| < 5$.

$$\boxed{<} 5|x - 2| \boxed{<}$$

А щоб отримати бажану оцінку, ми додатково просимо, щоб $|x - 2| < \frac{\varepsilon}{5}$.

$$\boxed{<} \varepsilon$$

Ми використали одночасно нерівності $|x - 2| < 1$, а також $|x - 2| < \frac{\varepsilon}{5}$. Тому щоб дістатись до оцінки

$\left| \frac{x^3 - 2x^2}{x - 2} - 4 \right| < \varepsilon$, необхідно вказати $\delta = \min \left\{ 1, \frac{\varepsilon}{5} \right\}$ – тоді наше означення Коші буде виконаним.

Отже, $\lim_{x \rightarrow 2} \frac{x^3 - 2x^2}{x - 2} = 4$.

Example 4.1.5 Задано функцію $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, $f(x) = \frac{|x|}{x}$. Довести, що не існує границі $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{|x|}{x}$.

За означенням та запереченням Гайне, зафіксуємо наступну послідовність: $\left\{ x_n = \frac{(-1)^n}{2n}, n \geq 1 \right\}$,

де $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = 0$. Але $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{|x_n|}{x_n} = \begin{cases} 1, n = 2k \\ -1, n = 2k - 1 \end{cases}$ – не збіжна, бо має різні часткові границі.

Таким чином, прийшли до висновку: границі не існує.

Definition 4.1.6 Задано функцію $f: A \rightarrow \mathbb{R}$ та $x_0 \in \mathbb{R}$ – гранична точка для A . Функція **прямує до нескінченності в точці** x_0 , якщо:

$$\forall E > 0 : \exists \delta(E) > 0 : \forall x \in A : x \neq x_0 : |x - x_0| < \delta \Rightarrow |f(x)| > E \quad \text{означення Коші}$$

$$\forall \{x_n, n \geq 1\} \subset A : \forall n \geq 1 : x_n \neq x_0 : \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x_0 \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = \infty \quad \text{означення Гайне}$$

Позначення: $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \infty$.

Якщо виконується $f(x) > E$ (це більш сильна вимога за $|f(x)| > E$), то тоді $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \infty$.

Якщо виконується $f(x) < -E$ (це більш сильна вимога за $|f(x)| > E$), то тоді $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = -\infty$.

Example 4.1.7 Задано функцію $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, $f(x) = \frac{1}{x^2}$. Доведемо, що $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^2} = +\infty$.

За означенням Коші, що ми хочемо, щоб $\forall E > 0 : \exists \delta > 0 : \forall x : x \neq 0 : |x| < \delta \Rightarrow \frac{1}{x^2} > E$.

Із останньої нерівності, $x^2 < \frac{1}{E}$, тому одразу встановимо $\delta = \frac{1}{\sqrt{E}}$.

Отже, $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^2} = +\infty$.

Example 4.1.8 Можна довести, що $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x} = \infty$. Однак не можна визначити, чи $+\infty$ або $-\infty$.

Definition 4.1.9 Задано функцію $f: A \rightarrow \mathbb{R}$ та ∞ – гранична точка для A . Число b називається **границею функції** при $x \rightarrow \infty$, якщо

$$\forall \varepsilon > 0 : \exists \Delta(\varepsilon) > 0 : \forall x \in \mathbb{R} : |x| > \Delta \Rightarrow |f(x) - b| < \varepsilon \quad \text{означення Коші}$$

$$\forall \{x_n, n \geq 1\} \subset \mathbb{R} : \forall n \geq 1 : \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \infty \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = b \quad \text{означення Гайне}$$

Позначення: $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = b$.

Якщо $x \rightarrow +\infty$, то ми вимагаємо $x > \Delta$ замість $|x| > \Delta$.

Якщо $x \rightarrow -\infty$, то ми вимагаємо $x < -\Delta$ замість $|x| > \Delta$.

Example 4.1.10 Задано функцію $f: \mathbb{R} \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{R}$, $f(x) = \frac{1}{x}$. Доведемо, що $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{x} = 0$.

За означенням Коші, ми вимагаємо, щоб $\forall \varepsilon > 0 : \exists \Delta > 0 : \forall x : x > \Delta \Rightarrow \left| \frac{1}{x} \right| < \varepsilon$.

Із цієї оцінки ми можемо встановити $\Delta = \frac{1}{\varepsilon}$. А тому $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{x} = 0$. Аналогічними міркуваннями можна довести, що $\lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{1}{x} = 0$.

Remark 4.1.11 Аналогічними міркуваннями можна самостійно записати означення Коші та означення Гайне для випадку, коли в нас $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = \infty$.

Remark 4.1.12 Для інших варіацій границь функції: $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \infty$, $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = b$, $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = \infty$ – еквівалентність двох означень, за Коші та за Гайне, також залишається в силі.

Remark 4.1.13 Надалі всюди я буду розглядати лише $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)$, де $x_0 \in \mathbb{R}$ – гранична точка деякої множини; а чому дорівнює – неважливо. Для випадку $x \rightarrow \infty$ (або $+\infty$, або $-\infty$) аналогічно.

Definition 4.1.14 Задано функцію $f: A \rightarrow \mathbb{R}$ та $x_0 \in \mathbb{R}$ – гранична точка для A . Якщо $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \infty$, то функцію $f(x)$ називають **нескінченно великою (н.в.) в т. x_0** . Якщо $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = 0$, то функцію $f(x)$ називають **нескінченно малою (н.м.) в т. x_0** .

Definition 4.1.15 Задано функцію $f: A \rightarrow \mathbb{R}$ та $x_0 \in \mathbb{R}$ – гранична точка для A . Функція f називається **обмеженою в точці x_0** , якщо

$$\exists C > 0 : \exists \delta > 0 : \forall x \in A : x \neq x_0 : |x - x_0| < \delta \Rightarrow |f(x)| \leq C$$

Або ще можна так сказати:

$$\forall \{x_n, n \geq 1\} \subset A : \forall n \geq 1 : x_n \neq x_0 : \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x_0 \Rightarrow \{f(x_n), n \geq 1\} - \text{обмежена}$$

Theorem 4.1.16 Обидва означення є еквівалентними.

Proof.

\Rightarrow Дано: $\exists C > 0 : \exists \delta > 0 : \forall x \in A : x \neq x_0 : |x - x_0| < \delta \Rightarrow |f(x)| \leq C$.

Оскільки x_0 – гранична точка A , то створимо послідовність $\{x_n, n \geq 1\} \subset A$, щоб $x_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} x_0$. Тоді для нашого $\delta > 0 : \exists N : \forall n \geq N : |x_n - x_0| < \delta \Rightarrow |f(x_n)| \leq C$. Отже $\{f(x_n), n \geq 1\}$ – обмежена.

\Leftarrow Дано: $\forall \{x_n, n \geq 1\} \subset A : \forall n \geq 1 : x_n \neq x_0 : \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x_0 \Rightarrow \{f(x_n), n \geq 1\}$ – обмежена.

Припустимо, що перше означення не виконане, тобто

$$\forall C > 0 : \forall \delta > 0 : \exists x_\delta \in A : x_\delta \neq x_0 : |x_\delta - x_0| < \delta \Rightarrow |f(x_\delta)| > C.$$

Нехай $C > 0$ та $\delta = \frac{1}{n}$. Тоді $\exists x_n \in A : x_n \neq x_0 : |x_n - x_0| < \frac{1}{n}$, тож $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x_0$, тоді за дано, маємо, що $\{f(x_n), n \geq 1\}$ – обмежена. Проте ми побудували таку послідовність, щоб $|f(x_n)| > C$, а це свідчить про необмеженість. Суперечність! ■

4.2 Односторонні границі та границі монотонних функцій

Definition 4.2.1 Задано функцію $f: A \rightarrow \mathbb{R}$, та $x_0 \in \mathbb{R}$ – гранична точка для A .

Числом b називають **границю справа**, якщо

$$\begin{aligned} \forall \varepsilon > 0 : \exists \delta(\varepsilon) > 0 : \forall x \in A : x_0 < x < x_0 + \delta \Rightarrow |f(x) - b| < \varepsilon & \text{означення Коші} \\ \forall \{x_n, n \geq 1\} \subset A : \forall n \geq 1 : x_n > x_0 : \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x_0 \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = b & \text{означення Гайне} \end{aligned}$$

Позначення: $\lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x) \stackrel{\text{або}}{=} \lim_{x \rightarrow x_0+0} f(x) = b$.

Числом \tilde{b} називають **границю зліва**, якщо

$$\begin{aligned} \forall \varepsilon > 0 : \exists \delta(\varepsilon) > 0 : \forall x \in A : x_0 - \delta < x < x_0 \Rightarrow |f(x) - \tilde{b}| < \varepsilon & \text{означення Коші} \\ \forall \{x_n, n \geq 1\} \subset A : \forall n \geq 1 : x_n < x_0 : \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x_0 \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = \tilde{b} & \text{означення Гайне} \end{aligned}$$

Позначення: $\lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x) \stackrel{\text{або}}{=} \lim_{x \rightarrow x_0-0} f(x) = \tilde{b}$.

Theorem 4.2.2 Задано функцію $f: A \rightarrow \mathbb{R}$, та $x_0 \in \mathbb{R}$ – внутрішня та гранична точка для A .

$$\exists \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = b \iff \exists \begin{cases} \lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x) = b \\ \lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x) = b \end{cases}$$

Proof.

$$\exists \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = b \iff \forall \varepsilon > 0 : \exists \delta : \forall x \in A : |x - x_0| < \delta \Rightarrow |f(x) - b| < \varepsilon$$

$$\iff \forall \varepsilon > 0 : \exists \delta : \forall x \in A : |x - x_0| < \delta \Rightarrow \begin{cases} x - x_0 < \delta \\ x_0 - x < \delta \end{cases} \Rightarrow |f(x) - b| < \varepsilon \iff \exists \begin{cases} \lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x) = b \\ \lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x) = b \end{cases} \quad \blacksquare$$

Remark 4.2.3 Для функції $f(x) = \sqrt{x}$ є границя $\lim_{x \rightarrow 0+0} \sqrt{x} = 0$, але не існує $\lim_{x \rightarrow 0-0} \sqrt{x}$. Тобто не існує $\lim_{x \rightarrow 0} \sqrt{x}$ – звісно, ні. Ми маємо $\lim_{x \rightarrow 0} \sqrt{x} = \lim_{x \rightarrow 0+0} \sqrt{x} = 0$.

Справа в тому, що попередню теорему можна застосовувати, коли точка $x_0 = 0$ була б визначена одночасно десь лівіше й правіше. А область визначення $A = [0, +\infty)$, тобто ми вже не можемо розглядати границі зліва.

Example 4.2.4 Повернімось до функції $f(x) = \frac{|x|}{x}$. Ми довели, що границя в точці $x = 0$ не існує,

$$\text{проте } \lim_{x \rightarrow 0+0} \frac{|x|}{x} = 1 \quad \lim_{x \rightarrow 0-0} \frac{|x|}{x} = -1.$$

Definition 4.2.5 Задано функцію $f: (a, b) \rightarrow \mathbb{R}$.

Функцію f називають **монотонно**:

строго зростаючою, якщо $\forall x_1, x_2 \in (a, b) : x_1 > x_2 \Rightarrow f(x_1) > f(x_2)$;
не спадною, якщо $\forall x_1, x_2 \in (a, b) : x_1 > x_2 \Rightarrow f(x_1) \geq f(x_2)$;
строго спадною, якщо $\forall x_1, x_2 \in (a, b) : x_1 > x_2 \Rightarrow f(x_1) < f(x_2)$;
не зростаючою, якщо $\forall x_1, x_2 \in (a, b) : x_1 > x_2 \Rightarrow f(x_1) \leq f(x_2)$.

Зростаюча або спадна строго або нестрого функція f називається просто **монотонною**.

Example 4.2.6 Зокрема $f(x) = \sqrt{x}$ монотонно строго зростає. Дійсно нехай $x_1, x_2 \in [0, +\infty)$ підібрані так, що $x_1 > x_2$. Тоді маємо такий ланцюг:

$$f(x_1) - f(x_2) = \sqrt{x_1} - \sqrt{x_2} = \frac{x_1 - x_2}{\sqrt{x_1} + \sqrt{x_2}} > 0 \implies f(x_1) > f(x_2).$$

Definition 4.2.7 Функція $f: A \rightarrow \mathbb{R}$ називається **обмеженою** (на множині A), якщо

$$\exists M > 0 : \forall x \in A : |f(x)| \leq M$$

Theorem 4.2.8 Задано функцію $f: (a, b) \rightarrow \mathbb{R}$ – монотонна. Тоді $\exists \lim_{x \rightarrow b^-} f(x) = d$ та $\exists \lim_{x \rightarrow a^+} f(x) = c$.

Proof.

Доведемо лише першу границю і будемо вважати, що функція строго спадна. Для решти аналогічно.

Отже, нехай f – строго спадає, тобто $\forall x_1, x_2 \in (a, b) : x_1 > x_2 \implies f(x_1) < f(x_2)$. У нашому випадку $d = \inf_{x \in (a, b)} f(x)$. У інфімумі виникає кілька випадків.

I. $\inf_{x \in (a, b)} f(x)$ – скінченне.

Доведемо, що вона є границею зліва. За критерієм \inf , маємо наступне:

1) $\forall x \in (a, b) : f(x) \geq d$;

2) $\forall \varepsilon > 0 : \exists x_\varepsilon \in (a, b) : f(x_\varepsilon) < d + \varepsilon$.

Оберемо $\delta = b - x_\varepsilon > 0$. Тоді $\forall x \in (a, b) : b - x < \delta \Rightarrow x > b - (b - x_\varepsilon) = x_\varepsilon \implies f(x) < f(x_\varepsilon)$.

Звідси справедлива нерівність $d - \varepsilon < d \leq f(x) < f(x_\varepsilon) < d + \varepsilon \Rightarrow |f(x) - d| < \varepsilon$.

Остаточно, за означенням Коші, $\exists \lim_{x \rightarrow b^-} f(x) = d$.

II. $\inf_{x \in (a, b)} f(x) = -\infty$.

Тоді функція f – необмежена знизу на $(a, b) \implies \forall E > 0 : \exists x_E \in (a, b) : f(x_E) < -E$.

Оберемо $\delta = b - x_E > 0$. Тоді $\forall x \in (a, b) : b - \delta < x < b \implies f(x) < f(x_E) < -E$.

Остаточно, за означенням Коші, $\exists \lim_{x \rightarrow b^-} f(x) = -\infty$.

Допускається випадок, коли $a = -\infty$ та/або $b = +\infty$. Окремо це розписувати не буду, проте доведення буде цілком аналогічним, просто трошки інше означення границі треба застосувати. ■

Example 4.2.9 Розглянемо декілька прикладів.

1) $f(x) = e^{-x}$ — монотонно спадає на \mathbb{R} , тому існують такі границі:

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} e^{-x} = \inf_{x \in \mathbb{R}} e^{-x} = 0, \quad \lim_{x \rightarrow -\infty} e^{-x} = \sup_{x \in \mathbb{R}} e^{-x} = +\infty;$$

2) $f(x) = \operatorname{arctg} x$ — монотонно зростає на \mathbb{R} , тому існують такі границі:

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \operatorname{arctg} x = \sup_{x \in \mathbb{R}} \operatorname{arctg} x = \frac{\pi}{2}, \quad \lim_{x \rightarrow -\infty} \operatorname{arctg} x = \inf_{x \in \mathbb{R}} \operatorname{arctg} x = -\frac{\pi}{2}.$$

4.3 Основні властивості

Theorem 4.3.1 Арифметичні властивості нескінченно малих та великих функцій

Задані функції $f, g, h: A \rightarrow \mathbb{R}$ — відповідно н.м., н.в., обмежена в $x_0 \in \mathbb{R}$ — гранична точка для A .

1) $f(x) \cdot h(x)$ — н.м. в точці x_0 ;

2) $\frac{1}{f(x)}$ — н.в. в точці x_0 ;

3) $\frac{1}{g(x)}$ — н.м. в точці x_0 .

Proof.

Зафіксуємо $\{x_n, n \geq 1\}$, таку, що $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x_0$. Тоді за Гайне, $\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = 0$, $\lim_{n \rightarrow \infty} g(x_n) = \infty$, отже:

$\{f(x_n), n \geq 1\}$ — н.м.;

$\{g(x_n), n \geq 1\}$ — н.в.;

$\{h(x_n), n \geq 1\}$ — обмежена.

За властивостями границь послідовності, $\{f(x_n) \cdot h(x_n)\}$ — н.м., $\left\{\frac{1}{f(x_n)}\right\}$ — н.в., $\left\{\frac{1}{g(x_n)}\right\}$ — н.м.

Ну а тому існують відповідні границі: $\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n)h(x_n) = 0$, $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{f(x_n)} = \infty$, $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{g(x_n)} = 0$.

За Гайне, отримаємо бажане: $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)h(x) = 0$, $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{1}{f(x)} = \infty$, $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{1}{g(x)} = 0$. ■

Example 4.3.2 Знайти границю $\lim_{x \rightarrow 0} x \cos \frac{1}{x}$.

Маємо функцію $f(x) = x$ — н.м. в т. $x_0 = 0$. Маємо функцію $h(x) = \cos \frac{1}{x}$ — обмежена в т. $x_0 = 0$, бо

$|h(x)| \leq 1$. Тоді за щойно доведеними властивостями, $f(x)h(x)$ — н.м., тобто $\lim_{x \rightarrow 0} x \cos \frac{1}{x} = 0$.

Theorem 4.3.3 Задано функцію $f: A \rightarrow \mathbb{R}$, що містить границю в т. x_0 . Тоді вона є обмеженою в околі т. x_0 .

Proof.

$\exists \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = b \implies \forall \varepsilon > 0 : \exists \delta : \forall x \in A : x \neq x_0 : |x - x_0| < \delta \Rightarrow |f(x) - b| < \varepsilon$

Зафіксуємо $\varepsilon = 1$, тоді $|f(x) - b| < 1$.

$|f(x)| = |f(x) - b + b| \leq |f(x) - b| + |b| < 1 + |b|$.

Покладемо $c = 1 + |b|$. А тому отримаємо $\forall x \in A : |x - x_0| < \delta \Rightarrow |f(x)| < c$. Отже, обмежена. ■

Example 4.3.4 Зокрема функція $f(x) = x \cos \frac{1}{x}$ — обмежена в околі т. $x = 0$, тому що містить там границю.

Theorem 4.3.5 Арифметика границь

Задано функції $f, g: A \rightarrow \mathbb{R}$, такі, що $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = b_1$, $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = b_2$. Тоді:

1) $\forall c \in \mathbb{R} : \exists \lim_{x \rightarrow x_0} cf(x) = cb_1$;

2) $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} (f(x) + g(x)) = b_1 + b_2$;

3) $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} f(x)g(x) = b_1b_2$;

$$4) \exists \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} = \frac{b_1}{b_2} \text{ при } b_2 \neq 0.$$

Впливають з властивостей границь числової послідовності, якщо доводити за Гайне. Доведу лише перший підпункт для прикладу.

Proof.

$$\forall \{x_n, n \geq 1\} \subset A : \forall n \geq 1 : x_n \neq x_0 : \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x_0 \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = b.$$

$$\text{Тоді } \forall c \in \mathbb{R} : \lim_{n \rightarrow \infty} cf(x_n) = c \lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = cb_1. \text{ Таким чином, } \exists \lim_{x \rightarrow x_0} cf(x) = cb_1. \quad \blacksquare$$

Example 4.3.6 Обчислити границю: $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{x^2 - 1}{2x^2 - 2x - 1}$.

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{x^2 - 1}{2x^2 - 2x - 1} = \frac{\lim_{x \rightarrow 0} (x^2 - 1)}{\lim_{x \rightarrow 0} (2x^2 - 2x - 1)} = \frac{\lim_{x \rightarrow 0} x^2 - \lim_{x \rightarrow 0} 1}{2 \lim_{x \rightarrow 0} x^2 - \lim_{x \rightarrow 0} 2x - \lim_{x \rightarrow 0} 1} = \frac{0 - 1}{0 - 0 - 1} = 1$$

Ми пояснюємо ці рівності рівність справа наліво, як було з послідовностями.

Theorem 4.3.7 Задані функцію $f: A \rightarrow \mathbb{R}$ та $x_0 \in \mathbb{R}$ – гранична точка для A . Відомо, що в околі т. x_0 функція $f(x) < c$ та $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = b$. Тоді $b \leq c$.

Proof.

За Гайне, $\forall \{x_n, n \geq 1\} \subset A : \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x_0 \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = b$. За властивостями границь числової послідовності, $b \leq c$. ■

Corollary 4.3.8 Задані функції $f, g: A \rightarrow \mathbb{R}$ такі, що в околі т. $x_0 \in \mathbb{R}$ – гранична точка для A – справедлива $f(x) \leq g(x)$. Також $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = b_1$, $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = b_2$. Тоді $b_1 \leq b_2$.

Вказівка: розглянути функцію $h(x) = f(x) - g(x)$.

Theorem 4.3.9 Теорема про 3 функції

Задані функції $f, g, h: A \rightarrow \mathbb{R}$ та $x_0 \in \mathbb{R}$ – гранична точка для A . Відомо, що в околі т. x_0 виконується: $f(x) \leq g(x) \leq h(x)$ та $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \lim_{x \rightarrow x_0} h(x) = a$. Тоді $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = a$.

Впливає з теореми про поліцаїв числової послідовності.

Remark 4.3.10 Теорема спрацьовує для границь, що дорівнюють нескінченностям. Хоча можна й без цього. Наступний приклад це покаже.

Example 4.3.11 Обчислити $\lim_{x \rightarrow +\infty} [x]$.

Для початку обчислимо $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{[x]}$. А далі згадаємо оцінку: $x - 1 < [x] < x$.

А отже, $\frac{1}{x} < \frac{1}{[x]} < \frac{1}{x-1}$, це виконано для скільки завгодно великих x .

Оскільки $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{x} = 0$, $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{x-1} = 0$, то за теоремою про двох поліцаїв, $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{[x]} = 0$.

Остаточно, $\lim_{x \rightarrow +\infty} [x] = +\infty$.

Theorem 4.3.12 Критерій Коші

Задано функцію $f: A \rightarrow \mathbb{R}$ та $x_0 \in \mathbb{R}$ – гранична точка для A .

$$\exists \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) \iff \forall \varepsilon > 0 : \exists \delta(\varepsilon) : \forall x_1, x_2 \in A : x_1, x_2 \neq x_0 : \begin{cases} |x_1 - x_0| < \delta \\ |x_2 - x_0| < \delta \end{cases} \Rightarrow |f(x_1) - f(x_2)| < \varepsilon.$$

Proof.

\Rightarrow Дано: $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = b$, тобто за означенням Коші, маємо наступне:

$$\forall \varepsilon > 0 : \exists \delta : \forall x \in A : x \neq x_0 : |x - x_0| < \delta \Rightarrow |f(x) - b| < \frac{\varepsilon}{2}.$$

Тоді $\forall x_1, x_2 \in A : |x_1 - x_0| < \delta$ і одночасно $|x_2 - x_0| < \delta \Rightarrow$

$$|f(x_1) - f(x_2)| = |f(x_1) - b + b - f(x_2)| \leq |f(x_1) - b| + |f(x_2) - b| < \varepsilon.$$

Отримали праву частину критерія.

$$\Leftarrow \text{Дано: } \forall \varepsilon > 0 : \exists \delta(\varepsilon) : \forall x_1, x_2 \in A : x_1, x_2 \neq x_0 : \begin{cases} |x_1 - x_0| < \delta \\ |x_2 - x_0| < \delta \end{cases} \Rightarrow |f(x_1) - f(x_2)| < \varepsilon.$$

Розглянемо послідовність $\{t_n, n \geq 1\}$, таку, що $\lim_{n \rightarrow \infty} t_n = x_0$.

Тоді за означенням, $\exists N : \forall n, m \geq N : \begin{cases} |t_n - x_0| < \delta \\ |t_m - x_0| < \delta \end{cases} \Rightarrow |f(t_n) - f(t_m)| < \varepsilon$.

Отримаємо, що $\{f(t_n), n \geq 1\}$ – фундаментальна послідовність, тому збіжна, тобто $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} f(t_n) = b$.

А тепер час відповісти на питання, чи буде границя функції залежати від вибору послідовності. Бо критерій Коші дає відповідь на збіжність, але не знає куди.

Припустимо, що є послідовність $\{s_n, n \geq 1\}$, таку, що $\lim_{n \rightarrow \infty} s_n = x_0$. Тоді за аналогічними міркуваннями, $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} f(s_n) = a$, уже інша границя.

Побудуємо послідовність $\{p_n, n \geq 1\}$ таким чином, що $p_{2k} = t_k, p_{2k-1} = s_k$. Тобто $\{s_1, t_1, s_2, t_2, \dots\}$. Тут $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} p_n = x_0$. Тоді знову за аналогічними міркуваннями, $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} f(p_n)$, але чому буде дорівнювати, зараз побачимо.

Оскільки $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} f(p_n)$, то одночасно $\exists \lim_{k \rightarrow \infty} f(p_{2k}) = b, \exists \lim_{k \rightarrow \infty} f(p_{2k-1}) = a$.

У збіжній послідовності є лише одна часткова послідовність, тому $a = b$. Суперечність!

Це означає, що границя не залежить від вибору послідовності. Тому за Гайне, отримаємо, що $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = b$. ■

Theorem 4.3.13 Границя від композиції функції

Задано функції $f: A \rightarrow B, g: B \rightarrow \mathbb{R}$ та композиція $h = g(f(x))$. Більш того, $x_0, y_0 \in \mathbb{R}$ – граничні точки відповідно для A, B та $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = y_0$ та $\exists \lim_{y \rightarrow y_0} g(y) = b$. Тоді $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} h(x) = b$.

Це ще називають “заміною в границях”

Proof.

$\exists \lim_{y \rightarrow y_0} g(y) = b \stackrel{\text{def}}{\Rightarrow} \forall \varepsilon > 0 : \exists \delta : \forall y \in B : y \neq y_0 : |y - y_0| < \delta \Rightarrow |g(y) - b| < \varepsilon$

$\exists \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = y_0 \stackrel{\text{def}}{\Rightarrow} \forall \delta > 0 : \exists \tilde{\delta} : \forall x \in A : x \neq x_0 : |x - x_0| < \tilde{\delta} \Rightarrow |f(x) - y_0| < \delta$

Таким чином, можемо отримати: $\forall \varepsilon > 0 : \exists \delta > 0 \Rightarrow \exists \tilde{\delta} : \forall x \in A : x \neq x_0 : |x - x_0| < \tilde{\delta} \Rightarrow$

$|f(x) - y_0| = |y - y_0| < \delta \Rightarrow |g(y) - b| = |g(f(x)) - b| = |h(x) - b| < \varepsilon$

Отже, $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} h(x) = b$. ■

Example 4.3.14 Обчислити границю: $\lim_{x \rightarrow 1} \frac{x^3 - 2x^8 + 1}{x^{40} - 3x^{10} + 2}$.

Ми не розпишемо це арифметичними властивостями, тому що (поки що за означенням Коші) ліміт чисельника – нуль, ліміт знаменника – нуль. І це – невизначеність.

Проведемо заміну: $x = t + 1$. Оскільки $x \rightarrow 1$, то тоді $t \rightarrow 0$. А далі порахуємо таку границю:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow 0} \frac{(t+1)^3 - 2(t+1)^8 + 1}{(t+1)^{40} - 3(t+1)^{10} + 2} &\stackrel{\text{Ф-ла бінома}}{=} \lim_{t \rightarrow 0} \frac{(t^3 + 3t^2 + 3t + 1) - 2(t^8 + 8t^7 + \dots + 8t + 1) + 1}{(t^{40} + 40t^{39} + \dots + 40t + 1) - 3(t^{10} + 10t^9 + \dots + 10t + 1) + 2} = \\ &= \lim_{t \rightarrow 0} \frac{(t^3 + 3t^2 + 3t) - 2(t^8 + 8t^7 + \dots + 8t)}{(t^{40} + 40t^{39} + \dots + 40t) - 3(t^{10} + 10t^9 + \dots + 10t)} = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{(t^2 + 3t + 3) - 2(t^7 + 8t^6 + \dots + 8)}{(t^{39} + 40t^{38} + \dots + 40) - 3(t^9 + 10t^8 + \dots + 10)} = \\ &= \frac{3 - 2 \cdot 8}{40 - 3 \cdot 10} = -\frac{13}{10} \end{aligned}$$

Отже, $\lim_{x \rightarrow 1} \frac{x^3 - 2x^8 + 1}{x^{40} - 3x^{10} + 2} = -\frac{13}{10}$.

Більш детально, як тут використалась теорема про композицію. У нас $h(x) = g(f(x)) = \frac{x^3 - 2x^8 + 1}{x^{40} - 3x^{10} + 2}$,

від якої ми шукаємо ліміт. Далі, $f(x) = x - 1, \quad g(y) = \frac{(y+1)^3 + 2(y+1)^8 + 1}{(y+1)^{40} - 3(y+1)^{10} + 2}$.

Знаємо, що $\lim_{x \rightarrow 1} f(x) = 0$, тобто $y \rightarrow 0$.

Знаємо, що $\lim_{y \rightarrow 0} g(y) = -\frac{13}{10}$ – цей ліміт ми вже рахували через арифметичні властивості.

Тому початковий ліміт, тобто $\lim_{x \rightarrow 0} h(x) = -\frac{13}{10}$. Надалі такі деталі розписувати не будемо.

4.4 Перша чудова границя

Розглянемо такий геометричний малюнок:

Відокремимо з малюнку наступні дані: $|AB| = \sin x$, $|AC| = x$, $|KC| = \operatorname{tg} x$.

Зрозуміло, що $|AB| < |AC| < |KC| \implies \sin x < x < \operatorname{tg} x$.

Розглянемо обидві сторони нерівності:

$$\sin x < x \implies \frac{\sin x}{x} < 1.$$

$$x < \operatorname{tg} x = \frac{\sin x}{\cos x} \implies \frac{\sin x}{x} > \cos x = 1 - 2\sin^2 \frac{x}{2} > 1 - 2\frac{x^2}{4} = 1 - \frac{x^2}{2}.$$

$$1 - \frac{x^2}{2} < \frac{\sin x}{x} < 1.$$

Можна розширити інтервал до $\left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$, оскільки нерівність не змінюється. Тому за теоремою про 3 функції, маємо наступне:

Theorem 4.4.1 I чудова границя

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} = 1.$$

Corollary 4.4.2 Наслідки I чудової границі

$$1) \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\operatorname{tg} x}{x} = 1 \quad 2) \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\arcsin x}{x} = 1 \quad 3) \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\operatorname{arctg} x}{x} = 1$$

1) Вказівка: $\operatorname{tg} x = \frac{\sin x}{\cos x}$. Необхідно знати про неперервність $\cos x$. (буде в наступному розділі)

2) Вказівка: $\arcsin x = t$.

3) Вказівка: $\operatorname{arctg} x = t$.

4.5 Складенно-показникова функція

Definition 4.5.1 Задано функції $f, g: A \rightarrow \mathbb{R}$ так, що $f(x) > 0$. Задано число $a > 0, a \neq 1$.

Степенево-показниковою функцією називають функцію такого вигляду:

$$f(x)^{g(x)} = a^{g(x) \log_a f(x)}$$

Proposition 4.5.2 Степенево-показникова функція не залежить від основи правої частини.

Proof.

Зафіксуємо числа $a, b > 0, a, b \neq 1$. Тоді

$$a^{g(x) \log_a f(x)} = a^{g(x) \frac{\log_b f(x)}{\log_b a}} = a^{g(x) \log_b f(x) \log_a b} = (a^{\log_a b})^{g(x) \log_b f(x)} = b^{g(x) \log_b f(x)}.$$

Таким чином, байдуже, що обирати, все чудово працює. ■

Зазвичай степенево-показникову функцію визначають через число Ойлера, тобто через e :

$$f(x)^{g(x)} = e^{g(x) \ln f(x)}$$

Example 4.5.3 Зокрема маємо такі приклади: $f(x) = x^x, g(x) = \left(1 + \frac{1}{x}\right)^x, h(x) = x^{\sqrt{2}}$.

Степенеvu функцію $y = x^\alpha, \alpha \in \mathbb{R}$ можна визначити як $y = e^{\alpha \ln x}$ при $x > 0$.

4.6 Друга чудова границя

Доведемо, що існує $\lim_{x \rightarrow +\infty} \left(1 + \frac{1}{[x]}\right)^{[x]} = e$ за Гайне.

Ми знаємо той факт, що $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n = e$, тобто $\forall \varepsilon > 0 : \exists N : \forall n \geq N : \left|\left(1 + \frac{1}{n}\right)^n - e\right| < \varepsilon$.

Нехай є послідовність $\{x_n, n \geq 1\}$ така, що $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = +\infty$. Тоді $\lim_{n \rightarrow \infty} [x_n] = +\infty$

Тоді $\exists N' : \forall n \geq N' : [x_n] > N$, а оскільки $[x_n] \in \mathbb{N}$, то тоді $\left|\left(1 + \frac{1}{[x_n]}\right)^{[x_n]} - e\right| < \varepsilon$.

Отже, $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = +\infty \implies \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{[x_n]}\right)^{[x_n]} = e$. За Гайне, $\lim_{x \rightarrow +\infty} \left(1 + \frac{1}{[x]}\right)^{[x]} = e$

Наступне відомо, що $\forall x \in \mathbb{R}$ справедлива нерівність: $[x] \leq x < [x] + 1$.

Тоді можна дійти до цієї нерівності:

$$\left(1 + \frac{1}{[x] + 1}\right)^{[x]} < \left(1 + \frac{1}{x}\right)^x < \left(1 + \frac{1}{[x]}\right)^{[x]+1}.$$

Нехай $x \rightarrow +\infty$, тоді відповідно $[x] \rightarrow +\infty$ та $[x] + 1 \rightarrow +\infty$.

$$\left(1 + \frac{1}{[x] + 1}\right)^{[x]} = \frac{\left(1 + \frac{1}{[x] + 1}\right)^{[x]+1}}{1 + \frac{1}{[x] + 1}} \rightarrow \frac{e}{1} = e$$

$$\left(1 + \frac{1}{[x]}\right)^{[x]+1} = \left(1 + \frac{1}{[x]}\right)^{[x]} \left(1 + \frac{1}{[x]}\right) \rightarrow e \cdot 1 = e.$$

І це все при $x \rightarrow +\infty$. Тоді за теоремою про поліцаїв, отримаємо ще одну чудову границю:

Theorem 4.6.1 II чудова границя

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \left(1 + \frac{1}{x}\right)^x = e$$

Corollary 4.6.2 Наслідки II чудової границі

$$\begin{aligned} 1) \lim_{x \rightarrow -\infty} \left(1 + \frac{1}{x}\right)^x &= e & 2) \lim_{x \rightarrow 0} (1+x)^{\frac{1}{x}} &= e & 3) \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\ln(1+x)}{x} &= 1 \\ 4) \lim_{x \rightarrow 0} \frac{e^x - 1}{x} &= 1 & 5) \lim_{x \rightarrow 0} \frac{(1+x)^\alpha - 1}{x} &= \alpha. \end{aligned}$$

Proof.

$$\begin{aligned} 1) \lim_{x \rightarrow -\infty} \left(1 + \frac{1}{x}\right)^x &\stackrel{x=-t}{=} \lim_{t \rightarrow +\infty} \left(1 - \frac{1}{t}\right)^{-t} = \lim_{t \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{t-1}\right)^t \stackrel{t-1=y}{=} \lim_{y \rightarrow +\infty} \left(1 + \frac{1}{y}\right)^{y+1} = \\ &= \lim_{y \rightarrow +\infty} \left(1 + \frac{1}{y}\right) \lim_{y \rightarrow +\infty} \left(1 + \frac{1}{y}\right)^y = 1 \cdot e = e \end{aligned}$$

$$2) \text{ Вказівка: } \frac{1}{x} = t.$$

3) Вказівка: використати властивість логарифма. Необхідно знати про неперервність $\ln x$.

$$4) \text{ Вказівка: } x = \ln(1+t).$$

$$5) \text{ Вказівка: } 1+x = e^t.$$

Example 4.6.3 Обчислити границю $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\ln(\cos 2x)}{\ln(\cos 3x)}$ – універсальний приклад.

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\ln(\cos 2x)}{\ln(\cos 3x)} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\ln(1 + (\cos 2x - 1))}{\ln(1 + (\cos 3x - 1))} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\frac{\ln(1 + (\cos 2x - 1))}{\cos 2x - 1}}{\frac{\ln(1 + (\cos 3x - 1))}{\cos 3x - 1}} \cdot \frac{\cos 2x - 1}{\cos 3x - 1} =$$

$$= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\ln(1 + (\cos 2x - 1))}{\cos 2x - 1} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\cos 2x - 1}{\cos 3x - 1} \stackrel{\square}{=} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\ln(1 + (\cos 3x - 1))}{\cos 3x - 1}$$

Заміна для першої границі: $\cos 2x - 1 = t$. Оскільки $x \rightarrow 0$, то звідси $t \rightarrow 0$.

Заміна для другої границі: $\cos 3x - 1 = t$. Оскільки $x \rightarrow 0$, то звідси $t \rightarrow 0$.

Звели ці ліміти до II чудових границь.

$$\stackrel{\square}{=} \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\ln(1+t)}{t} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\cos 2x - 1}{\cos 3x - 1} = \frac{1}{1} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\cos 2x - 1}{\cos 3x - 1} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - \cos 2x}{1 - \cos 3x} =$$

$$= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{2 \sin^2 x}{2 \sin^2 \frac{3x}{2}} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\frac{\sin^2 x}{x^2}}{\frac{\sin^2 \frac{3x}{2}}{\frac{9x^2}{4}}} \cdot \frac{x^2}{\frac{9x^2}{4}} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\frac{\sin^2 x}{x^2}}{\frac{\sin^2 \frac{3x}{2}}{\frac{9x^2}{4}}} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x^2}{\frac{9x^2}{4}} = \frac{\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x}}{\frac{\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin \frac{3x}{2}}{\frac{3x}{2}} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin \frac{3x}{2}}{\frac{3x}{2}}} \cdot \frac{4}{9} \stackrel{\square}{=} \frac{4}{9}$$

Заміна для границь в знаменнику: $\frac{3x}{2} = t$. Оскільки $x \rightarrow 0$, то звідси $t \rightarrow 0$.

Звели ці ліміти до І чудових границь.

$$\boxed{=} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} \cdot \frac{4}{9} = \frac{1 \cdot 1}{1 \cdot 1} \cdot \frac{4}{9} = \frac{4}{9}$$

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{\sin t}{t} \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\sin t}{t}$$

4.7 Порівняння функцій, відношення О-велике, о-маленьке та еквівалентності

Definition 4.7.1 Задано функції $f, g: A \rightarrow \mathbb{R}$ та $x_0 \in \mathbb{R}$ – гранична точка для A .

Функція f називається **порівнянною** з функцією g , якщо

$$\exists L > 0 : \exists \delta > 0 : \forall x \in A : x \neq x_0 : |x - x_0| < \delta \Rightarrow |f(x)| \leq L|g(x)|$$

Позначення: $f(x) = O(g(x)), x \rightarrow x_0$.

Інакше називають, що f **обмежена відносно g** при $x \rightarrow x_0$. Або просто кажуть, що f є **О-великою від g** при $x \rightarrow x_0$.

Theorem 4.7.2 Властивості

Маємо наступні властивості:

- 1) $f(x) = O(g(x)), x \rightarrow x_0 \iff \frac{f(x)}{g(x)}$ – обмежена в околі точки x_0 .
- 2) Якщо $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} = c$, то $f(x) = O(g(x)), x \rightarrow x_0$.
- 3) Нехай $f_1(x) = O(g(x)), f_2(x) = O(g(x))$. Тоді всюди при $x \rightarrow x_0$ маємо:
 - а) $f_1(x) + f_2(x) = O(g(x))$;
 - б) $\forall \alpha \in \mathbb{R} : \alpha f_1(x) = O(g(x))$;
 - в) $\forall \alpha \neq 0 : f_1(x) = O(\alpha g(x))$.
- 4) Нехай $f(x) = O(g(x)), g(x) = O(h(x))$. Тоді $f(x) = O(h(x)), x \rightarrow x_0$.

Proof.

Доведу лише 3) а). Інші зрозуміло.

$$f_1(x) = O(g(x)) \Rightarrow \exists L_1 : \exists \delta_1 : \forall x : |x - x_0| < \delta_1 \Rightarrow |f_1(x)| \leq L_1|g(x)|$$

$$f_2(x) = O(g(x)) \Rightarrow \exists L_2 : \exists \delta_2 : \forall x : |x - x_0| < \delta_2 \Rightarrow |f_2(x)| \leq L_2|g(x)|$$

$$\text{Тоді } \exists \delta = \min\{\delta_1, \delta_2\} : \forall x : |x - x_0| < \delta \Rightarrow$$

$$|f(x_1) + f(x_2)| \leq |f(x_1)| + |f(x_2)| \leq (L_1 + L_2)|g(x)|.$$

$$\text{А тому } f_1(x) + f_2(x) = O(g(x)).$$

■

Example 4.7.3 Довести, що $x + x^2 = O(x), x \rightarrow 0$.

Знайдемо наступну границю:

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{x + x^2}{x} = \lim_{x \rightarrow 0} (1 + x) = 1. \text{ Отже, } x + x^2 = O(x), x \rightarrow 0.$$

Remark 4.7.4 В математичному аналізі О-велике не використовується часто, це більше вже для дослідження алгоритмів в комп'ютерних науках. Зокрема існує такий алгоритм Binary Search для пошуку елемента в відсортованому масиві. Складність алгоритму оцінюється в $O(\log_2 n)$, де n – кількість елементів.

Definition 4.7.5 Задано функції $f, g: A \rightarrow \mathbb{R}$ та $x_0 \in \mathbb{R}$ – гранична точка для A .

Функція f називається **знехтувально малою** відносно g , якщо

$$\forall \varepsilon > 0 : \exists \delta > 0 : \forall x \in A : x \neq x_0 : |x - x_0| < \delta \Rightarrow |f(x)| < \varepsilon|g(x)|$$

Позначення: $f(x) = o(g(x)), x \rightarrow x_0$.

Інакше кажуть, що f – **нескінченно мала більш високого порядку, ніж g** при $x \rightarrow x_0$. Або просто кажуть, що f є **о-малою від g** при $x \rightarrow x_0$.

Theorem 4.7.6 Властивості

Маємо наступні властивості:

- 1) $f(x) = o(g(x)), x \rightarrow x_0 \iff \exists \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} = 0$.
- 2) Нехай $f_1(x) = o(g(x)), f_2(x) = o(g(x))$. Тоді всюди при $x \rightarrow x_0$ маємо:

- а) $f_1(x) + f_2(x) = o(g(x))$;
 б) $\forall \alpha \in \mathbb{R} : \alpha f_1(x) = o(g(x))$;
 в) $\forall \alpha \neq 0 : f_1(x) = o(\alpha g(x))$.
 3) Нехай $f(x) = o(g(x))$, $g(x) = o(h(x))$. Тоді $f(x) = o(h(x))$, $x \rightarrow x_0$.

Proof.

Доведемо лише 1), інші зрозуміло.

$$f(x) = o(g(x)), x \rightarrow x_0 \iff \forall \varepsilon > 0 : \exists \delta : \forall x \in A : |x - x_0| < \delta \Rightarrow |f(x)| < \varepsilon |g(x)| \iff$$

$$\left| \frac{f(x)}{g(x)} - 0 \right| < \varepsilon \iff \exists \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} = 0. \quad \blacksquare$$

Example 4.7.7 Довести, що $x^3 - x^2 - x + 1 = o(x - 1)$, $x \rightarrow 1$.

Знайдемо наступну границю:

$$\lim_{x \rightarrow 1} \frac{x^3 - x^2 - x + 1}{x - 1} = \lim_{x \rightarrow 1} \frac{x^2(x - 1) - (x - 1)}{x - 1} = \lim_{x \rightarrow 1} (x^2 - 1) = 0.$$

Отже, $x^3 - x^2 - x + 1 = o(x - 1)$, $x \rightarrow 1$.

Theorem 4.7.8 Інші властивості

Додатково справедливі такі властивості:

- 1) Нехай $f(x) = o(g(x))$ та $g(x) = O(h(x))$. Тоді $f(x) = o(h(x))$, $x \rightarrow x_0$.
 2) Нехай $f(x) = O(g(x))$ та $g(x) = o(h(x))$. Тоді $f(x) = o(h(x))$, $x \rightarrow x_0$.
 3) Нехай $f(x) = o(g(x))$. Тоді $f(x) = O(g(x))$, $x \rightarrow x_0$.

Proof.

1), 2) для обох випадків

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{h(x)} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} \cdot \frac{g(x)}{h(x)} = (\text{обм} * \text{н.м.}) = 0 \Rightarrow f(x) = o(h(x)), x \rightarrow x_0.$$

3) Випливає з властивості 2) *О-великого*. \blacksquare

Definition 4.7.9 Задано функції $f, g : A \rightarrow \mathbb{R}$ та $x_0 \in \mathbb{R}$ – гранична точка для A . Функція f називається **еквівалентною** до g , якщо

$$\exists \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} = 1$$

Позначення: $f(x) \sim g(x)$, $x \rightarrow x_0$.

Тобто функції $f(x)$ та $g(x)$ в околі т. x_0 мають однакову поведінку.

Theorem 4.7.10 $f(x) \sim g(x)$, $x \rightarrow x_0 \iff f(x) - g(x) = o(g(x))$

Proof.

$$f(x) \sim g(x), x \rightarrow x_0 \iff \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} = 1 \iff \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - g(x)}{g(x)} = 0 \iff f(x) - g(x) = o(g(x)) \quad \blacksquare$$

Theorem 4.7.11 Граничний перехід

Задано $f_1(x) \sim g_1(x)$ та $f_2(x) \sim g_2(x)$, $x \rightarrow x_0$. Тоді:

$$1) \lim_{x \rightarrow x_0} f_1(x)f_2(x) = \lim_{x \rightarrow x_0} g_1(x)g_2(x);$$

$$2) \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f_1(x)}{f_2(x)} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{g_1(x)}{g_2(x)}.$$

За умовою, що принаймні один з чотирьох лімітів існує, не обов'язково скінченний.

Proof.

Із початкових умов отримаємо, що:

$$\exists \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f_1(x)}{g_1(x)} = 1, \exists \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f_2(x)}{g_2(x)} = 1. \text{ Тоді маємо:}$$

$$1) \lim_{x \rightarrow x_0} f_1(x)f_2(x) = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f_1(x)f_2(x)g_1(x)g_2(x)}{g_1(x)g_2(x)} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f_1(x)f_2(x)}{g_1(x)g_2(x)} \lim_{x \rightarrow x_0} g_1(x)g_2(x) = \lim_{x \rightarrow x_0} g_1(x)g_2(x).$$

$$2) \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f_1(x)}{f_2(x)} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f_1(x)g_1(x)g_2(x)}{f_2(x)g_1(x)g_2(x)} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f_1(x)g_2(x)}{f_2(x)g_1(x)} \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{g_1(x)}{g_2(x)} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{g_1(x)}{g_2(x)}. \quad \blacksquare$$

Remark 4.7.12 Еквівалентні функції дійсно задають відношення еквівалентності.

Використовуючи всі наслідки від чудових границь, ми можемо отримати наступні еквівалентні функції, коли $x \rightarrow 0$.

$$\begin{array}{ll} \sin x \sim x & \ln(1+x) \sim x \\ \operatorname{tg} x \sim x & e^x - 1 \sim x \\ \arcsin x \sim x & (1+x)^\alpha - 1 \sim \alpha x \\ \operatorname{arctg} x \sim x & a^x - 1 \sim x \ln a \end{array}$$

Example 4.7.13 Обчислити границю $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\arcsin x \cdot (e^x - 1)}{1 - \cos x}$.

Маємо, з таблиці еквівалентності:

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\arcsin x \cdot (e^x - 1)}{1 - \cos x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x \cdot x}{2 \sin^2 \frac{x}{2}} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x \cdot x}{2 \frac{x^2}{4}} = 2.$$

Remark 4.7.14 Узагальнене зауваження:

$f(x) = O(1), x \rightarrow x_0 \iff f(x)$ — обмежена в околі т. x_0 .

$f(x) = o(1), x \rightarrow x_0 \iff f(x)$ — н.м. функція в околі т. x_0 .

5 Неперервність функції

5.1 Неперервність в точці

Definition 5.1.1 Задано функцію $f: A \rightarrow \mathbb{R}$ та точка $x_0 \in A$.

Функція $f(x)$ називається **неперервною в точці** x_0 , якщо

$$\forall \varepsilon > 0 : \exists \delta(\varepsilon) > 0 : \forall x \in A : |x - x_0| < \delta \Rightarrow |f(x) - f(x_0)| < \varepsilon \quad \text{означення Коші}$$

$$\forall \{x_n, n \geq 1\} \subset A : \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x_0 \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = f(x_0) \quad \text{означення Гайне}$$

Definition 5.1.2 Задано функцію $f: A \rightarrow \mathbb{R}$ та $x_0 \in \mathbb{R}$ – гранична точка для A .

Число b називається **границею функції в точці** x_0 , якщо

Позначення: $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = b$.

Theorem 5.1.3 Означення Коші \iff Означення Гайне.

Доведення є аналогічним з означеннями Коші, Гайне в границях.

Proposition 5.1.4 Задано функцію $f: A \rightarrow \mathbb{R}$ та $x_0 \in A$ – ізолювана. Тоді f – неперервна в точці x_0 .

Proof.

Якщо x_0 – ізолювана, то $\exists \delta^* > 0 : U_{\delta^*} \cap A = \{x_0\}$.

Нехай $\varepsilon > 0$. Тоді $\exists \delta = \delta^* > 0 : \forall x \in A : |x - x_0| < \delta \Rightarrow |f(x) - f(x_0)| < \varepsilon$.

Якщо $x \in A$ та $|x - x_0| < \delta$, то звідси $x = x_0$. А для нього $|f(x) - f(x_0)| = 0 < \varepsilon$. ■

Proposition 5.1.5 Стандартне означення неперервності функції в точці

Задано функцію $f: A \rightarrow \mathbb{R}$ та $x_0 \in A$ – гранична точка.

f – неперервна в точці $x_0 \iff \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = f(x_0)$.

Proof.

\Leftarrow Дано: f – неперервна в т. x_0 .

Нехай $\varepsilon \in \{x_n, n \geq 1\}$, причому $\forall n \geq 1 : x_n \neq x_0$, оскільки $x_0 \in A$ – гранична, та $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x_0$. Тоді $f(x_n) \rightarrow f(x_0)$. Отже, за Гайне, $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = f(x_0)$.

\Rightarrow Дано: $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = f(x_0)$. Тоді за Коші, $\forall \varepsilon > 0 : \exists \delta > 0 : \forall x \in A : 0 < |x - x_0| < \delta \Rightarrow |f(x) - f(x_0)| < \varepsilon$. За Коші означення неперервності, отримали, що f – неперервна в т. x_0 . ■

Example 5.1.6 Пояснювальний приклад, навіщо ми створили нестандартне означення.

Маємо функцію $f(x) = \sqrt{x^2(x^2 - 1)}$, яка визначена на $(-\infty, -1] \cup [1, +\infty)$, а також в точці $x = 0$.

І ось точка $x_0 = 0$ – ізолювана точка. Отже, можна вважати, що f – неперервна в точці x_0 .

Example 5.1.7 Розглянемо функцію $f(x) = \begin{cases} \frac{\sin x}{x}, & x \neq 0 \\ 1, & x = 0 \end{cases}$. У точці x_0 функція $f(x)$ є неперервною, оскільки $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} \stackrel{\text{чудова границя}}{=} 1 = f(0)$.

Definition 5.1.8 Задана функція $f: A \rightarrow \mathbb{R}$ та точка $x_0 \in A$.

Функція f називається **розривною в точці** x_0 , якщо в цій точці функція не є неперервною. А сама точка x_0 називається **точкою розриву**.

Remark 5.1.9 Лише граничні точки можуть бути точками розриву, а в ізолюваній завжди функція неперервна.

Класифікації точок розриву

I роду

- **усувна**, якщо $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) \neq f(x_0)$;

- **стрибок**, якщо $\exists \lim_{x \rightarrow x_0+0} f(x), \exists \lim_{x \rightarrow x_0-0} f(x)$, але при цьому $\lim_{x \rightarrow x_0+0} f(x) \neq \lim_{x \rightarrow x_0-0} f(x)$.

II роду

якщо виконується один з 4 випадків:

- 1) $\lim_{x \rightarrow x_0-0} f(x) = \infty$ 3) $\nexists \lim_{x \rightarrow x_0-0} f(x)$ (якщо лівіше точка x_0 функція визначена)
2) $\lim_{x \rightarrow x_0+0} f(x) = \infty$ 4) $\nexists \lim_{x \rightarrow x_0+0} f(x)$ (якщо правіше точка x_0 функція визначена).

Example 5.1.10 Розглянемо тепер функцію $f(x) = \begin{cases} \frac{\sin x}{x}, x \neq 0 \\ 0, x = 0 \end{cases}$.

У цьому випадку точка x_0 буде розривом I роду, зокрема усувною, оскільки

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} \stackrel{\text{I чудова границя}}{=} 1 \neq f(0) = 0.$$

Example 5.1.11 Розглянемо функцію $f(x) = \begin{cases} 2x - \frac{x-2}{|x-2|}, x \neq 2 \\ 2, x = 2 \end{cases}$.

Тут проблема виникає в т. $x_0 = 2$. Розглянемо границі в різні сторони:

$$\lim_{x \rightarrow 2-0} \left(2x - \frac{x-2}{2-x} \right) = \lim_{x \rightarrow 2-0} (2x - 1) = 3$$

$$\lim_{x \rightarrow 2+0} \left(2x - \frac{x-2}{x-2} \right) = \lim_{x \rightarrow 2+0} (2x + 1) = 5$$

Обидва ліміти не рівні, а отже, $x_0 = 2$ – розрив I роду, зокрема стрибок.

Example 5.1.12 Маємо функцію $f(x) = \frac{1}{x+1}$ та $f(-1) = 0$. Проблема в точці $x_0 = -1$. Але при-

наймні по одну сторону, наприклад $\lim_{x \rightarrow -1+0} \frac{1}{x+1} = +\infty$, матимемо нескінченність. Тому одразу точка $x_0 = -1$ – розрив II роду.

До речі, якби функція f була визначена на $\mathbb{R} \setminus \{-1\}$, то f була би, технічно кажучи, неперервною. І не треба було би досліджувати на точки розриву.

Theorem 5.1.13 Арифметичні властивості неперервних функцій

Задано функції $f, g: A \rightarrow \mathbb{R}$ та $x_0 \in A$. Відомо, що f, g – неперервні в точці x_0 . Тоді:

- 1) $\forall c \in \mathbb{R} : (cf)(x)$ – неперервна в точці x_0 ;
- 2) $(f+g)(x)$ – неперервна в точці x_0 ;
- 3) $(fg)(x)$ – неперервна в точці x_0 ;
- 4) $\frac{f}{g}(x)$ – неперервна в точці x_0 при $g(x_0) \neq 0$.

1), 2), 3), 4) – всі вони випливають із означення. Але в 4) більш детально розпишу одну штуку.

Переконаємось, що все буде коректно визначено в 4). g – неперервна в x_0 , тобто $\forall \varepsilon > 0 : \exists \delta : \forall x \in A : |x - x_0| < \delta \Rightarrow |g(x) - g(x_0)| < \varepsilon$.

Оберемо $\varepsilon = \frac{|g(x_0)|}{2}$. Тоді $g(x_0) - \varepsilon < g(x) < g(x_0) + \varepsilon$.

Якщо $g(x_0) > 0$, то $\varepsilon = \frac{g(x_0)}{2} \Rightarrow 0 < g(x) < \frac{3}{2}g(x_0)$.

Якщо $g(x_0) < 0$, то $\varepsilon = -\frac{g(x_0)}{2} \Rightarrow \frac{3}{2}g(x_0) < g(x) < \frac{1}{2}g(x_0) < 0$.

Тобто $\exists \delta : \forall x \in A : |x - x_0| < \delta \Rightarrow g(x) \neq 0$. Отже, наше означення є коректним.

Theorem 5.1.14 Неперервність композицій

Задано функції $f: A \rightarrow B, g: B \rightarrow \mathbb{R}$ та $h = g \circ f$. Відомо, що f неперервна в точці $x_0 \in A$; та g – неперервна в точці $f(x_0) = y_0 \in B$. Тоді h – неперервна в точці x_0 .

Випливає з означення та властивості композицій.

Definition 5.1.15 Функція $f: A \rightarrow \mathbb{R}$ називається неперервною на множині A , якщо

$$f \text{ – неперервна } \forall x \in A.$$

Позначення: $C(A)$ – множина неперервних функцій в A .

5.2 Неперервність функції на відрізку

Надалі ми розглядаємо лише функції $f \in C([a, b])$, тобто неперервні функції на відрізку. Саме для них будуть працювати нижчезгадані теореми.

Theorem 5.2.1 Теорема Ваєрштраса 1

Задано функцію $f \in C([a, b])$. Тоді вона є обмеженою на $[a, b]$.

Proof.

Припустимо, що f не є обмеженою, тобто $\forall n \geq 1 : \exists x_n \in [a, b] : |f(x_n)| > n$. Отримаємо послідовність $\{x_n, n \geq 1\}$. Є два випадки, тому виділимо 2 підпослідовності:

- 1) $\{x_{n_k}, k \geq 1\} : f(x_{n_k}) > n_k$;
- 2) $\{x_{n_m}, m \geq 1\} : f(x_{n_m}) < -n_m$.

Розглянемо другу. Вона є обмеженою, оскільки $\{x_{n_m}, m \geq 1\} \subset [a, b]$. Тоді за Ваєрштрасом, для підпослідовності $\{x_{n_{m_p}}, p \geq 1\} : \exists \lim_{n \rightarrow \infty} x_{n_{m_p}} = x_*$. Тому за означенням Гайне і за неперервністю, $\exists \lim_{p \rightarrow \infty} f(x_{n_{m_p}}) = f(x_*)$. Але водночас ми маємо, що функція не є обмеженою знизу, тобто $\exists \lim_{p \rightarrow \infty} f(x_{n_{m_p}}) = -\infty$. Суперечність!

Для першого пункту все аналогічно і теж буде суперечність.

Отже, f – все ж таки обмежена на $[a, b]$. ■

Theorem 5.2.2 Теорема Ваєрштраса 2

Задано функцію $f \in C([a, b])$. Тоді f досягає найбільшого та найменшого значень. Тобто:

$$\exists x_* \in [a, b] : f(x_*) = \min_{x \in [a, b]} f(x);$$

$$\exists x^* \in [a, b] : f(x^*) = \max_{x \in [a, b]} f(x).$$

Proof.

Доведемо, що f досягає найменшого значення. Для найбільшого буде аналогічно.

Нехай $\inf_{x \in [a, b]} f(x) = c$. За критерієм \inf , отримаємо наступне:

$$\forall x \in [a, b] : f(x) \geq c;$$

$$\forall \varepsilon > 0 : \exists x_\varepsilon \in [a, b] : f(x_\varepsilon) < c + \varepsilon.$$

Зафіксуємо $\varepsilon = \frac{1}{n}$. Тоді $\exists x_n \in [a, b] : c \leq f(x_n) < c + \frac{1}{n}$. Ми також маємо обмежену послідовність $\{x_n, n \geq 1\} \subset [a, b]$. Тому за Ваєрштрасом, для послідовності $\{x_{n_k}, k \geq 1\}$ існує $\lim_{n \rightarrow \infty} x_{n_k} = x_*$. Отже, за Гайне і за неперервністю, $\exists \lim_{k \rightarrow \infty} f(x_{n_k}) = f(x_*)$.

Але водночас $\exists x_{n_k} \in [a, b] : c \leq f(x_{n_k}) < c + \frac{1}{n_k}$. Коли $k \rightarrow \infty$, то за теоремою про поліцаїв, $\exists \lim_{k \rightarrow \infty} f(x_{n_k}) = c$. Таким чином, отримали, що $c = f(x_*) = \inf_{x \in [a, b]} f(x) = \min_{x \in [a, b]} f(x)$. ■

Theorem 5.2.3 Теорема Больцано-Коші про нульове значення

Задано функцію $f \in C([a, b])$, причому $f(a) \cdot f(b) < 0$. Тоді $\exists x_0 \in (a, b) : f(x_0) = 0$.

Proof.

Будемо доводити випадок, коли $f(a) < 0, f(b) > 0$. Маємо відрізок $[a, b]$.

Встановимо середину $c = \frac{a+b}{2}$. Розіб'ємо відрізок навпіл: $[a, c], [c, b]$. Якщо $f(c) = 0$, то доведено. Інакше два випадки: або $f(c) < 0$ – тоді беремо відрізок $[c, b]$; або $f(c) > 0$ – тоді беремо відрізок $[a, c]$.

Обраний відрізок позначимо за $[a_1, b_1]$, для якої $f(a_1) < 0, f(b_1) > 0$.

Встановимо $c_1 = \frac{a_1+b_1}{2}$. Розіб'ємо знову навпіл: $[a_1, c_1], [c_1, b_1]$. Аналогічно якщо $f(c_1) = 0$, доведено. Інакше знову два випадки: або $f(c_1) < 0$ – тоді беремо відрізок $[c_1, b_1]$; або $f(c_1) > 0$ – тоді беремо відрізок $[a_1, c_1]$.

Обраний відрізок позначимо за $[a_2, b_2]$, для якої $f(a_2) < 0, f(b_2) > 0$.

⋮

В результаті маємо вкладені відрізки $[a, b] \supset [a_1, b_1] \supset [a_2, b_2] \supset \dots$. Довжина кожного з відрізків $\frac{b-a}{2^n}$, а також $\forall n \geq 1 : f(a_n) < 0, f(b_n) > 0$.

За теоремою Кантора, $\exists! x_0 \in \mathbb{R} : \forall n \geq 1 : x_0 \in [a_n, b_n]$. Значить,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = x_0 \implies \lim_{n \rightarrow \infty} f(a_n) = f(x_0) \leq 0$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = x_0 \implies \lim_{n \rightarrow \infty} f(b_n) = f(x_0) \geq 0.$$

Отже, $f(x_0) = 0$. ■

Corollary 5.2.4 Теорема Больцано-Коші про проміжкове значення

Задано функцію $f \in C([a, b])$. Тоді $\forall L \in \left[\begin{smallmatrix} [f(a), f(b)] \\ [f(b), f(a)] \end{smallmatrix} \right] : \exists x_L \in [a, b] : f(x_L) = L$.

Вказівка: розглянути функцію $g(x) = f(x) - L$.

5.3 Існування неперервної оберненої функції

Lemma 5.3.1 Задано функцію $f \in C([a, b])$ та строго монотонно зростаюча. Тоді $E(f) = [c, d]$, де $c = f(a)$, $d = f(b)$.

Для строго спадної функції всі леми знизу (і ця лема в тому числі) будуть аналогічними.

Proof.

Маємо множину $E(f) = \{f(x) : x \in [a, b]\}$. Якщо $y \in E(f)$, то тоді $\exists x \in [a, b] : y = f(x)$. А оскільки $a < x < b$, то тоді $f(a) < y < f(b) \implies y \in [f(a), f(b)]$. Отже, $E(f) \subset [f(a), f(b)]$.

Якщо $y \in [f(a), f(b)]$, то тоді за теоремою про проміжне значення, $\exists x \in [a, b] : y = f(x) \implies y \in E(f)$. Отже, $[f(a), f(b)] \subset E(f)$.

А це означає, що $E(f) = [f(a), f(b)]$. ■

Lemma 5.3.2 Задано функцію $f \in C([a, b])$ та строго монотонно зростаюча. Тоді f – бієкція.

Proof.

Припустимо, що $\forall y : \exists x_1, x_2 \in [a, b] : y = f(x_1), y = f(x_2)$, але при цьому $x_1 \neq x_2$.

Якщо $x_1 > x_2$, то тоді $f(x_1) > f(x_2)$, що не можливо.

Якщо $x_1 < x_2$, то тоді $f(x_1) < f(x_2)$, що не можливо.

Виникає суперечність! Тому $\forall y : \exists! x \in [a, b] : y = f(x)$. Отже, f – бієкція. ■

Із цих двох лем ми отримали обернену функцію $g : [c, d] \rightarrow [a, b]$, для якої спрацьовують такі леми:

Lemma 5.3.3 Задано функцію $f \in C([a, b])$ та строго монотонно зростаюча. Тоді $g = f^{-1}$ також строго монотонно зростаюча.

Proof.

Зафіксуємо $y_1, y_2 \in [c, d]$ так, щоб $y_1 > y_2$.

Припустимо, що $g(y_1) \leq g(y_2)$. Тоді отримаємо $y_1 = f(g(y_1)) \leq f(g(y_2)) = y_2$. Суперечність!

Отже, $y_1 > y_2 \implies g(y_1) > g(y_2)$, тобто g – строго монотонно зростає. ■

Lemma 5.3.4 Задано функцію $f \in C([a, b])$ та строго монотонно зростаюча. Тоді $g \in C([c, d])$.

Proof.

Припустимо, що $\exists y_0 = f(x_0) \in [c, d]$, де функція g не є неперервною, тоді за Гайне, $\exists \{y_n, n \geq 1\} \subset [c, d] : \forall n \geq 1 : y_n \neq y_0 : \lim_{n \rightarrow \infty} y_n = y_0$, але $\lim_{n \rightarrow \infty} g(y_n) \neq g(y_0)$, тобто

$$\exists \delta^* > 0 : \forall N : \exists n \geq N : |g(y_n) - g(y_0)| \geq \delta^*.$$

Тут $g(y_n) = x_n$ та $g(y_0) = x_0$, тоді $|x_n - x_0| \geq \delta^*$

Зокрема для $N = 1 : \exists n_1 \geq N$, для $N = n_1 + 1 : \exists n_2 > n_1, \dots$

Коротше, є підпоследовність $\{x_{n_k}, k \geq 1\}$, для якої $|x_{n_k} - x_0| \geq \delta^*$

Оскільки $\{y_n\} \subset [c, d]$, то тоді $\{x_n\} \subset [a, b]$, ну й $\{x_{n_k}\} \subset [a, b]$ – обмежена. Тоді за Больцано-Ваєрштрасом, $\exists \{x_{n_{k_m}}, m \geq 1\}$ така, що $\lim_{m \rightarrow \infty} x_{n_{k_m}} = x_{00}$. За граничним переходом, маємо, що $|x_{00} - x_0| \geq \delta^*$.

Оскільки $f \in C([a, b])$, то звідси, $\lim_{m \rightarrow \infty} f(x_{n_{k_m}}) = \lim_{m \rightarrow \infty} f(g(y_{n_{k_m}})) = \lim_{m \rightarrow \infty} y_{n_{k_m}} = y_0 = f(x_0) = f(x_{00})$.

Виходить, що $x_{00} \neq x_0$, але $f(x_{00}) = f(x_0)$. Але ж f – бієкція. Суперечність! ■

Склеюючи всі чотири леми, ми сформуємо одну теорему

Theorem 5.3.5 Задано функцію $f : [a, b] \rightarrow [c, d]$ – строго монотонна і неперервна. Тоді існує функція $g : [c, d] \rightarrow [a, b]$ – строго монотонна (як і f) і неперервна, яка є оберненою до f .

Remark 5.3.6 Така теорема працює, якщо відрізок $[a, b]$ замінити на $(a, b]$, $[a, b)$, (a, b) , навіть не обов'язково скінченні числа.

5.4 Неперервність елементарних функцій

0) Задано функцію $f(x) = x$. Тоді $f \in C(\mathbb{R})$.

Proof.

$$\forall \varepsilon > 0 : \exists \delta = \varepsilon : \forall x : |x - x_0| < \delta \Rightarrow |f(x) - f(x_0)| = |x - x_0| < \delta = \varepsilon \Rightarrow f(x) = x \in C(\mathbb{R}). \quad \blacksquare$$

1) Задано функцію $f(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n$ (многочлен). Тоді $f \in C(\mathbb{R})$.

Proof.

Оскільки $x \in C(\mathbb{R})$, то $x^n = x \cdot \dots \cdot x \in C(\mathbb{R})$ як добуток функцій $\forall n \geq 1$. Отже, $f(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n \in C(\mathbb{R})$ як сума неперервних функцій, помножених на константу. \blacksquare

2) Задано функцію $f(x) = \sin x$. Тоді $f \in C(\mathbb{R})$.

Proof.

Вже відома давно нерівність:

$$1 - \frac{x^2}{2} < \frac{\sin x}{x} < 1 \Rightarrow x - \frac{x^3}{2} < \sin x < x.$$

Якщо $x \rightarrow 0$, то за теоремою про 2 поліцая, $\lim_{x \rightarrow 0} \sin x = 0 = \sin 0$ – неперервна лише в т. 0.

Перевіримо неперервність в т. $x_0 \in \mathbb{R}$:

$$\lim_{x \rightarrow x_0} (\sin x - \sin x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0} 2 \sin \frac{x - x_0}{2} \cos \frac{x + x_0}{2} \stackrel{=}{=} \quad \square$$

Проведемо заміну: $\frac{x - x_0}{2} = t$. Тоді $t \rightarrow 0$

$$\stackrel{=}{=} \lim_{t \rightarrow 0} 2 \sin t \cos(t + x_0) \stackrel{\text{н.м.} * \text{обм.}}{=} 0 \Rightarrow \lim_{x \rightarrow x_0} \sin x = \sin x_0 \Rightarrow f(x) = \sin x \in C(\mathbb{R}). \quad \blacksquare$$

3) Задано функцію $f(x) = \cos x$. Тоді $f \in C(\mathbb{R})$.

Proof.

Розпишемо $\cos x = \sin\left(\frac{\pi}{2} - x\right)$. Оскільки $\frac{\pi}{2} - x \in C(\mathbb{R})$ та $\sin x \in C(\mathbb{R})$, то звідси $\cos x \in C(\mathbb{R})$ як композиція. \blacksquare

4) Задано функцію $f(x) = \operatorname{tg} x$. Тоді $f \in C\left(\mathbb{R} \setminus \left\{\frac{\pi}{2} + \pi k, k \in \mathbb{Z}\right\}\right)$.

5) Задано функцію $f(x) = \operatorname{ctg} x$. Тоді $f \in C\left(\mathbb{R} \setminus \{\pi k, k \in \mathbb{Z}\}\right)$.

Proof.

Розпишемо $\operatorname{tg} x = \frac{\sin x}{\cos x}$. Оскільки $\sin x \in \mathbb{R}$, $\cos x \in \mathbb{R}$, то врахуючи умову $\cos x \neq 0$

$$\Rightarrow x \neq \frac{\pi}{2} + \pi k, k \in \mathbb{Z}, \text{ маємо } \operatorname{tg} x \in C\left(\mathbb{R} \setminus \left\{\frac{\pi}{2} + \pi k, k \in \mathbb{Z}\right\}\right) \text{ як частка.}$$

Для $\operatorname{ctg} x$ аналогічні міркування. \blacksquare

6) Задано функцію $f(x) = \arcsin x$. Тоді $f \in C([-1, 1])$.

Proof.

Маємо функцію $g(x) = \sin x$, що визначена на $\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$. На цьому проміжку вона монотонно строго зростає, неперервна. Отже, за теоремою про існування оберненої функції, $g^{-1}(x) = f(x) = \arcsin x \in C([-1, 1])$. \blacksquare

7) Задано функцію $f(x) = \arccos x$. Тоді $f \in C([-1, 1])$.

$$\text{Вказівка: } \arcsin x + \arccos x = \frac{\pi}{2}.$$

8) Задано функцію $f(x) = \operatorname{arctg} x$. Тоді $f \in C(\mathbb{R})$.

Proof.

Маємо функцію $g(x) = \operatorname{tg} x$, що визначена на $\left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$. На цьому проміжку вона монотонно строго зростає, неперервна. Отже, за теоремою про існування оберненої функції, $g^{-1}(x) = f(x) = \operatorname{arctg} x \in C(\mathbb{R})$. \blacksquare

9) Задано функцію $f(x) = \operatorname{arctg} x$. Тоді $f \in C(\mathbb{R})$.

Вказівка: $\operatorname{arctg} x + \operatorname{arctg} x = \frac{\pi}{2}$.

10) Задано функцію $f(x) = a^x$. Тоді $f \in C(\mathbb{R})$.

Proof.

Перш за все покажемо, що $\lim_{x \rightarrow 0} a^x = 1$. Нехай $\varepsilon > 0$. Розглядаємо випадок $a > 1$.

Оскільки $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a} = 1$, то $\exists N_1 : \forall n \geq N_1 : |a^{\frac{1}{n}} - 1| < \varepsilon$. Зокрема $|a^{\frac{1}{N_1}} - 1| < \varepsilon$.

Нехай є послідовність $\{x_n, n \geq 1\}$, де $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = 0$. Тоді $\exists N_2 : \forall n \geq N_2 : |x_n| < \frac{1}{N_1}$.

Тоді $\forall n \geq N_2 : |a^{|x_n|} - 1| < |a^{\frac{1}{N_1}} - 1| < \varepsilon$. Отже, $\lim_{n \rightarrow \infty} a^{|x_n|} = 1$. Для $0 < a < 1$ маємо $b = \frac{1}{a}$.

А далі оскільки $-|x_n| \leq x_n \leq |x_n|$, то звідси $a^{-|x_n|} \leq a^{x_n} \leq a^{|x_n|}$, тоді за теоремою про двох поліцаїв, $\lim_{n \rightarrow \infty} a^{x_n} = 1$.

Тоді за Гайне, отримаємо, що $\lim_{x \rightarrow 0} a^x = 1 = a^0$ - неперервна в т. $x = 0$.

$\lim_{x \rightarrow x_0} a^x = \lim_{x \rightarrow x_0} a^{x-x_0} a^{x_0} = a^{x_0} \implies a^x \in C(\mathbb{R})$. ■

11) Задано функцію $f(x) = \log_a x$. Тоді $f \in C((0, +\infty))$.

Вказівка: теорема про існування оберненої функції.

12) Задано функцію $f(x) = \sqrt[n]{x^m}$. Тоді $f \in C([0, +\infty))$.

Proof.

Оскільки $x^n \in C(\mathbb{R})$, як наслідок $x^n \in C([0, +\infty))$, то тоді $\sqrt[n]{x} \in C([0, +\infty))$ як обернена функція. Отже, $\sqrt[n]{x^m} \in C([0, +\infty))$ як добуток. ■

13) Задані функції $f, g: A \rightarrow \mathbb{R}$, причому $f(x) > 0$. Відомо, що $f, g \in C(A)$. Тоді $f^g \in C(A)$.

Proof.

Розпишемо $f(x)^{g(x)} = e^{g(x) \ln f(x)}$.

Маємо $f(x) \in C(A) \implies \ln f(x) \in C(A)$. Далі $g(x) \in C(A) \implies g(x) \ln f(x) \in C(A)$. Нарешті, $e^x \in C(A) \implies e^{g(x) \ln f(x)} = f(x)^{g(x)} \in C(A)$. ■

14) Задано функцію $f(x) = x^\alpha, \alpha \in \mathbb{R}$. Тоді $f \in C((0, +\infty))$.

Впливає з пункту 13).

5.5 Рівномірна неперервність

Definition 5.5.1 Функція $f: A \rightarrow \mathbb{R}$ називається **рівномірно неперервною на множині A** , якщо

$$\forall \varepsilon > 0 : \exists \delta(\varepsilon) > 0 : \forall x_1, x_2 \in A : |x_1 - x_2| < \delta \implies |f(x_1) - f(x_2)| < \varepsilon$$

Позначення: $C_{\text{unif}}(A)$ - множина рівномірно неперервних функцій на A .

Proposition 5.5.2 Задано функцію $f \in C_{\text{unif}}(A)$. Тоді $f \in C(A)$.

Впливає з означення рівномірної неперервності.

Example 5.5.3 Доведемо, що функція $f(x) = \sqrt{x} \in C_{\text{unif}}([0, +\infty))$.

Розглянемо нерівність для точок $x_1, x_2 \in [0, +\infty)$ так, щоб $|x_1 - x_2| < \delta$.

$|f(x_1) - f(x_2)| = |\sqrt{x_1} - \sqrt{x_2}| = \sqrt{|\sqrt{x_1} - \sqrt{x_2}|^2} \leq \sqrt{|\sqrt{x_1} - \sqrt{x_2}| |\sqrt{x_1} + \sqrt{x_2}|} = \sqrt{|x_1 - x_2|} < \sqrt{\delta} = \varepsilon$.
Якщо зафіксуємо $\delta = \varepsilon^2$, то отримаємо, що $f \in C_{\text{unif}}([0, +\infty))$.

Example 5.5.4 Розглянемо функцію $f(x) = \ln x$, де $x \in (0, 1)$. Доведемо, що $f(x) \notin C_{\text{unif}}((0, 1))$.

Заперечення рівномірної неперервності має такий вигляд:

$\exists \varepsilon^* > 0 : \forall \delta > 0 : \exists x_{1\delta}, x_{2\delta} \in A : |x_{1\delta} - x_{2\delta}| < \delta$, але $|f(x_{1\delta}) - f(x_{2\delta})| \geq \varepsilon^*$.

Маємо ось що:

$$|\ln x_{1\delta} - \ln x_{2\delta}| = \left| \ln \frac{x_{1\delta}}{x_{2\delta}} \right| \geq 1 = \varepsilon^*, \text{ якщо } \frac{x_{1\delta}}{x_{2\delta}} \geq e.$$

Ми вже зафіксували $\varepsilon^* = 1$, а тепер лишилось надати $x_{1\delta}, x_{2\delta}$.

Маємо $x_{1\delta} \geq ex_{2\delta}$, а також $|x_{1\delta} - x_{2\delta}| < \delta$.

Оскільки δ в нас довільне, то $\exists n : \frac{1}{n} < \delta$. Оберемо $x_{1\delta} = \frac{e}{3n}, x_{2\delta} = \frac{1}{3n}$. $x_{1\delta} \geq ex_{2\delta}$ буде виконана.

$$|x_{1\delta} - x_{2\delta}| = \frac{e}{3n} - \frac{1}{3n} = \frac{e-1}{3n} < \frac{1}{n} < \delta.$$

Що ми отримали:

$$\exists \varepsilon^* = 1 : \forall \delta : \exists n : \exists x_{1\delta} = \frac{e}{3n}, x_{2\delta} = \frac{1}{3n} : |x_{1\delta} - x_{2\delta}| < \frac{1}{n} < \delta, \text{ але } |f(x_{1\delta}) - f(x_{2\delta})| \geq 1.$$

Що й доводить те, що функція НЕ є рівномірно неперервною.

Проте в зворотному напрямку твердження буде працювати, якщо зробити додаткове обмеження. Це буде записано в наступній теоремі:

Theorem 5.5.5 Теорема Кантора

Задано функцію $f \in C([a, b])$. Тоді $f \in C_{\text{unif}}([a, b])$.

Proof.

Припустимо, що вона не є рівномірно неперервною, тобто

$$\exists \varepsilon^* > 0 : \forall \delta : \exists x_{1\delta}, x_{2\delta} \in [a, b] : |x_{1\delta} - x_{2\delta}| < \delta \Rightarrow |f(x_{1\delta}) - f(x_{2\delta})| \geq \varepsilon^*.$$

Розглянемо $\delta = \frac{1}{n}$. Тоді $x_{1\delta}, x_{2\delta} = x_{1n}, x_{2n}$.

Створимо послідовність $\{x_{1n}, n \geq 1\}$ - обмежена, бо всі в відрізку $[a, b]$, тому для $\{x_{1n_k}, k \geq 1\}$:

$$\exists \lim_{k \rightarrow \infty} x_{1n_k} = x_0.$$

Оскільки $|x_{1n} - x_{2n}| < \frac{1}{n}$, то маємо, що $|x_{1n_k} - x_{2n_k}| < \frac{1}{n_k}$. Тоді $x_{1n_k} - \frac{1}{n_k} < x_{2n_k} < x_{1n_k} + \frac{1}{n_k}$.

Якщо $k \rightarrow \infty$, то за теоремою про поліцаї, $\exists \lim_{k \rightarrow \infty} x_{2n_k} = x_0$.

За умовою неперервності, отримаємо, що $\lim_{k \rightarrow \infty} f(x_{1n_k}) = \lim_{k \rightarrow \infty} f(x_{2n_k}) = f(x_0)$.

Але $\varepsilon \leq |f(x_{1n_k}) - f(x_{2n_k})| \rightarrow 0$, коли $k \rightarrow \infty$. Суперечність! ■

Example 5.5.6 Функція $\arcsin x \in C([-1, 1])$, тоді за теоремою Кантора, $\arcsin x \in C_{\text{unif}}([-1, 1])$.

6 Диференціювання

6.1 Основні означення

Definition 6.1.1 Задано функцію $f: A \rightarrow \mathbb{R}$ та $x_0 \in A$ – гранична точка для A . Функцію f називають **диференційованою** в т. x_0 , якщо

$$\exists L \in \mathbb{R} : f(x) - f(x_0) = L(x - x_0) + o(x - x_0), x \rightarrow x_0$$

Proposition 6.1.2 Задано f – диференційована в точці x_0 . Тоді f – неперервна в точці x_0 .

Proof.

$$\lim_{x \rightarrow x_0} (f(x) - f(x_0)) = \lim_{x \rightarrow x_0} (L(x - x_0) + o(x - x_0)) = 0 \implies \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = f(x_0). \quad \blacksquare$$

Proposition 6.1.3 Функція f – диференційована в точці $x_0 \iff \exists \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} \stackrel{\text{позн.}}{=} f'(x_0) = L$.

Definition 6.1.4 Число $f'(x_0)$ називають **похідною** функції в точці x_0 , якщо ліміт існує.

Proof.

$$\begin{aligned} f \text{ – диференційована в т. } x_0 &\stackrel{\text{def}}{\iff} \exists L : f(x) - f(x_0) = L(x - x_0) + o(x - x_0), x \rightarrow x_0 \iff \\ &\iff \exists L : o(x - x_0) = f(x) - f(x_0) - L(x - x_0), x \rightarrow x_0 \iff \\ &\iff \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0) - L(x - x_0)}{x - x_0} = 0 \iff \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} = L = f'(x_0). \quad \blacksquare \end{aligned}$$

Remark 6.1.5 Задамо $\Delta x = x - x_0$, яку називають **прирістом аргумента**. Тоді похідну функції в точці x_0 можна записати іншою формулою: $f'(x_0) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x}$.
А диференційованість ось так: $f(x_0 + \Delta x) - f(x_0) = L\Delta x + o(\Delta x), \Delta x \rightarrow 0$.

Proposition 6.1.6 Арифметичні властивості

Задано функції f, g – диференційовані в точці x_0 , причому $f'(x_0), g'(x_0)$ – їхні похідні. Тоді:

- 1) $\forall c \in \mathbb{R} : cf$ – диференційована в точці x_0 , а її похідна $(cf)'(x_0) = cf'(x_0)$;
- 2) $f \pm g$ – диференційована в точці x_0 , а її похідна $(f + g)'(x_0) = f'(x_0) + g'(x_0)$;
- 3) $f \cdot g$ – диференційована в точці x_0 , а її похідна $(f \cdot g)'(x_0) = f'(x_0)g(x_0) + f(x_0)g'(x_0)$;
- 4) $\frac{f}{g}$ – диференційована в точці x_0 при $g(x_0) \neq 0$, а її похідна $\left(\frac{f}{g}\right)'(x_0) = \frac{f'(x_0)g(x_0) - f(x_0)g'(x_0)}{(g(x_0))^2}$.

Proof.

Оскільки f, g – диференційовані в точці x_0 , то маємо при $x \rightarrow x_0$

$$f(x) - f(x_0) = f'(x_0)(x - x_0) + o(x - x_0);$$

$$g(x) - g(x_0) = g'(x_0)(x - x_0) + o(x - x_0).$$

Доведемо по чергово кожний пункт.

$$\begin{aligned} 1) \quad (cf)(x) - (cf)(x_0) &= cf(x) - cf(x_0) = c(f(x) - f(x_0)) = c(f'(x_0)(x - x_0) + o(x - x_0)) = \\ &= c f'(x_0)(x - x_0) + o(x - x_0) \end{aligned}$$

Отже, cf – диференційована в точці x_0 та має похідну в червоному.

$$\begin{aligned} 2) \quad (f + g)(x) - (f + g)(x_0) &= (f(x) + g(x)) - (f(x_0) + g(x_0)) = (f(x) - f(x_0)) + (g(x) - g(x_0)) = \\ &= f'(x_0)(x - x_0) + o(x - x_0) + g'(x_0)(x - x_0) + o(x - x_0) = (f'(x_0) + g'(x_0))(x - x_0) + o(x - x_0) \end{aligned}$$

Отже, $f + g$ – диференційована в точці x_0 та має похідну в червоному.

$$\begin{aligned} 3) \quad (fg)(x) - (fg)(x_0) &= f(x)g(x) - f(x_0)g(x_0) = f(x)g(x) - f(x)g(x_0) + f(x)g(x_0) - f(x_0)g(x_0) = \\ &= f(x)(g(x) - g(x_0)) + g(x_0)(f(x) - f(x_0)) = \\ &= f(x)(g'(x_0)(x - x_0) + o(x - x_0)) + g(x_0)(f'(x_0)(x - x_0) + o(x - x_0)) = \\ &= f(x)g'(x_0)(x - x_0) + f(x)o(x - x_0) + g(x_0)f'(x_0)(x - x_0) + g(x_0)o(x - x_0) = \\ &= (f'(x_0)g(x_0) + f(x_0)g'(x_0))(x - x_0) + (f(x) - f(x_0) + f(x_0))o(x - x_0) + o(x - x_0) = \\ &= (f'(x_0)g(x_0) + f(x_0)g'(x_0))(x - x_0) + (f'(x_0)(x - x_0) + o(x - x_0))o(x - x_0) + o(x - x_0) \quad \boxed{=} \end{aligned}$$

Використовуються формули о-маленьких, які є на практичному pdf-файлі

$$\begin{aligned} \boxed{=} & (f'(x_0)g(x_0) + f(x_0)g'(x_0))(x - x_0) + f'(x_0)o((x - x_0)^2) + o(x - x_0) = \\ &= (f'(x_0)g(x_0) + f(x_0)g'(x_0))(x - x_0) + o(x - x_0) \end{aligned}$$

Отже, $f \cdot g$ – диференційована в т. x_0 та має похідну в червоному.

4) доведу трошки інакше. Спочатку покажемо, що $\frac{1}{g}$ має похідну

$$\left(\frac{1}{g}\right)'(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{\frac{1}{g(x)} - \frac{1}{g(x_0)}}{x - x_0} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{g(x_0) - g(x)}{(x - x_0)g(x)g(x_0)} = -\frac{1}{(g(x_0))^2}$$

Отже, $\frac{1}{g}$ - диференційована в т. x_0 , а тому за 3), $\frac{f}{g} = f \cdot \frac{1}{g}$ - диференційована в т. x_0 . Похідна

$$\left(\frac{f}{g}\right)'(x_0) = f'(x_0)\frac{1}{g(x_0)} - f(x_0)\frac{1}{(g(x_0))^2} = \frac{f'(x_0)g(x_0) - f(x_0)g'(x_0)}{(g(x_0))^2}$$

Для всіх функцій диференційованість доведена. ■

Proposition 6.1.7 Похідна від композиції функцій

Задано функції f, g та $h = g \circ f$. Відомо, що f - диференційована в точці x_0 , а g - диференційована в точці $y_0 = f(x_0)$. Тоді функція h - диференційована в точці x_0 , а її похідна $h'(x) = g'(f(x_0)) \cdot f'(x_0)$.

Proof.

f - диференційована в точці x_0 , тобто $f(x) - f(x_0) = f'(x_0)(x - x_0) + o(x - x_0), x \rightarrow x_0$.

g - диференційована в точці y_0 , тобто $g(y) - g(y_0) = g'(y_0)(y - y_0) + o(y - y_0), y \rightarrow y_0$.

$$\begin{aligned} h(x) - h(x_0) &= g(f(x)) - g(f(x_0)) = g'(f(x_0))(f(x) - f(x_0)) + o(f(x) - f(x_0)) = \\ &= g'(f(x_0))(f'(x_0)(x - x_0) + o(x - x_0)) + o(f(x) - f(x_0)) \end{aligned}$$

Оскільки $x \rightarrow x_0$, то звідси $f(x) \rightarrow f(x_0)$. Зрозуміло, що $o(f(x) - f(x_0)) = o(x - x_0)$.

$$\equiv g'(f(x_0))f'(x_0)(x - x_0) + o(x - x_0), x \rightarrow x_0$$

Отже, $g \circ f = h$ - диференційована в т. x_0 та має похідну в червоному. ■

Proposition 6.1.8 Похідна від оберненої функції

Задано функції f, g - взаємно обернені. Відомо, що f - диференційована в точці x_0 та $f'(x_0) \neq 0$.

Тоді g - диференційована в точці $y_0 = f(x_0)$, а її похідна $g'(y_0) = \frac{1}{f'(x_0)}$.

Proof.

f - диференційована в точці x_0 , тобто $f(x) - f(x_0) = f'(x_0)(x - x_0) + o(x - x_0), x \rightarrow x_0$.

Також через взаємну оберненість маємо, що $x = g(y), x_0 = g(y_0)$, тоді рівняння матиме вигляд

$$f(g(y)) - f(g(y_0)) = f'(x_0)(g(y) - g(y_0)) + o(g(y) - g(y_0)), g(y) \rightarrow g(y_0)$$

$$y - y_0 = f'(x_0)(g(y) - g(y_0)) + o(y - y_0), y \rightarrow y_0.$$

$$g(y) - g(y_0) = \frac{1}{f'(x_0)}(y - y_0) + o(y - y_0), y \rightarrow y_0.$$

Отже, g - диференційована в точці y_0 та має похідну в червоному. ■

Definition 6.1.9 Функція f є диференційованою на множині A , якщо

$$\forall x \in A : f \text{ - диференційована в точці } x_0$$

Таблиця похідних елементарних функцій

$f(x)$	$f'(x)$
$const$	0
$x^\alpha, \alpha \neq 0$	$\alpha \cdot x^{\alpha-1}$
e^x	e^x
a^x	$a^x \cdot \ln a$
$\sin x$	$\cos x$
$\cos x$	$-\sin x$
$\operatorname{tg} x$	$\frac{1}{\cos^2 x}$
$\operatorname{ctg} x$	$-\frac{1}{\sin^2 x}$
$\ln x$	$\frac{1}{x}$
$\log_a x$	$\frac{1}{x \cdot \ln a}$
$\arcsin x$	$\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$
$\arccos x$	$-\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$
$\operatorname{arctg} x$	$\frac{1}{1+x^2}$
$\operatorname{arcctg} x$	$-\frac{1}{1+x^2}$
$\ln(x + \sqrt{1+x^2})$	$\frac{1}{\sqrt{1+x^2}}$

Почергово доведемо кожен похідну:

1) $f(x) = const$

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

2) $f(x) = x^\alpha$

$$f'(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{x^\alpha - x_0^\alpha}{x - x_0} \stackrel{x-x_0=t \rightarrow 0}{=} \lim_{t \rightarrow 0} \frac{(t+x_0)^\alpha - x_0^\alpha}{t} = x_0^{\alpha-1} \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\left(1 + \frac{t}{x_0}\right)^\alpha - 1}{\frac{t}{x_0}} = \alpha x_0^{\alpha-1}$$

3) $f(x) = e^x$

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

4) $h(x) = a^x$

Перепишемо інакше: $h(x) = e^{x \cdot \ln a}$

Побачимо, що $y = f(x) = x \cdot \ln a$, а в той час $g(y) = e^y \Rightarrow h(x) = g(f(x))$

Тоді за композицією, $h'(x_0) = g'(y_0)f'(x_0) = e^{y_0} \ln a = e^{x_0 \ln a} \ln a = a^{x_0} \ln a$

5) $f(x) = \sin x$

$$f'(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{\sin x - \sin x_0}{x - x_0} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{2 \sin \frac{x-x_0}{2} \cos \frac{x-x_0}{2}}{x - x_0} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{\sin \frac{x-x_0}{2}}{\frac{x-x_0}{2}} \cos \frac{x-x_0}{2} = \cos x_0$$

6) $h(x) = \cos x = \sin\left(\frac{\pi}{2} - x\right)$

$$f(x) = \frac{\pi}{2} - x, g(y) = \sin y \Rightarrow h(x) = g(f(x))$$

$$\text{Отже, } h'(x_0) = g'(y_0)f'(x_0) = \cos y_0(-1) = -\cos\left(\frac{\pi}{2} - x\right) = -\sin x$$

$$7) f(x) = \operatorname{tg} x$$

$$\text{Або } f(x) = \frac{\sin x}{\cos x}$$

$$\text{Тоді } f'(x) = \frac{(\sin x)' \cos x - \sin x (\cos x)'}{\cos^2 x} = \frac{\cos^2 x + \sin^2 x}{\cos^2 x} = \frac{1}{\cos^2 x}$$

$$8) f(x) = \operatorname{ctg} x$$

За аналогічними міркуваннями до 7.

$$9) g(y) = \ln y$$

Маємо функцію $f(x) = e^x$, тоді f, g - взаємно обернені

$$\text{Тоді оскільки } f'(x_0) = e^{x_0}, \text{ то } g'(y_0) = \frac{1}{f'(x_0)} = \frac{1}{e^{x_0}} = \frac{1}{e^{\ln y_0}} = \frac{1}{y_0}$$

$$10) f(x) = \log_a x$$

$$\text{Або } f(x) = \frac{\ln x}{\ln a} \Rightarrow f'(x_0) = \frac{1}{\ln a} \frac{1}{x_0}$$

$$11) g(y) = \arcsin y$$

Маємо функцію $f(x) = \sin x$, тоді f, g - взаємно обернені

$$\begin{aligned} \text{Тоді оскільки } f'(x_0) = \cos x_0, \text{ то } g'(y_0) &= \frac{1}{f'(x_0)} = \frac{1}{\cos x_0} = \frac{1}{\cos(\arcsin y_0)} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2(\arcsin y_0)}} = \frac{1}{\sqrt{1 - y_0^2}} \end{aligned}$$

Важливо, що тут функція $f: \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right] \rightarrow [-1, 1]$

$$12) f(x) = \arccos x$$

$$\text{Або } f(x) = \frac{\pi}{2} - \arcsin x \Rightarrow f'(x_0) = -\frac{1}{\sqrt{1 - x_0^2}}$$

$$13) g(y) = \operatorname{arctg} y$$

За аналогічними міркуваннями до 11., але тут вже $f: \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right) \rightarrow \mathbb{R}$, $f(x) = \operatorname{tg} x$

$$14) f(x) = \operatorname{arctg} x$$

За аналогічними міркуваннями до 12., але $\operatorname{arctg} x = \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} x$

$$15) f(x) = \ln(x + \sqrt{1 + x^2})$$

$$\begin{aligned} f'(x_0) &= \frac{1}{x_0 + \sqrt{1 + x_0^2}} \cdot (x + \sqrt{1 + x^2})'_{x=x_0} = \frac{1 + \frac{1}{2\sqrt{1+x_0^2}} \cdot (1+x^2)'_{x=x_0}}{x_0 + \sqrt{1+x_0^2}} = \frac{1 + \frac{x_0}{\sqrt{1+x_0^2}}}{x_0 + \sqrt{1+x_0^2}} = \\ &= \frac{\sqrt{1+x_0^2} + x_0}{x_0 + \sqrt{1+x_0^2}} \frac{1}{\sqrt{1+x_0^2}} = \frac{1}{\sqrt{1+x_0^2}} \end{aligned}$$

Example 6.1.10 Обчислити похідну функції $f(x) = \sqrt[3]{\frac{1+x^2}{1-x^2}} + 2024$.

$$\begin{aligned} f'(x) &= \left(\sqrt[3]{\frac{1+x^2}{1-x^2}} + 2024 \right)' + \left(\left(\frac{1+x^2}{1-x^2} \right)^{\frac{1}{3}} \right)' + (2024)' = \frac{1}{3} \left(\frac{1+x^2}{1-x^2} \right)^{-\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{1+x^2}{1-x^2} \right)' + 0 = \\ &= \frac{1}{3} \left(\frac{1+x^2}{1-x^2} \right)^{-\frac{2}{3}} \frac{2x(1-x^2) + 2x(1+x^2)}{(1-x^2)^2} = \frac{1}{3} \left(\frac{1+x^2}{1-x^2} \right)^{-\frac{2}{3}} \frac{4x}{(1-x^2)^2} \end{aligned}$$

6.2 Похідні по один бік

Definition 6.2.1 Односторонню похідну функції $f(x)$ в точці x_0 називають:

$$\text{-якщо справа: } f'(x_0 + 0) \stackrel{\text{або}}{=} f'(x_0 + 0) = \lim_{x \rightarrow x_0 + 0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}.$$

$$\text{- якщо зліва: } f'(x_0 - 0) \stackrel{\text{або}}{=} f'(x_0 - 0) = \lim_{x \rightarrow x_0 - 0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}.$$

Theorem 6.2.2 Функція f - диференційована в точці $x_0 \iff$ вона містить похідну зліва та справа, а також $f'(x_0 + 0) = f'(x_0 - 0)$.

Proof.

f – диференційована в точці $x_0 \iff \exists f'(x_0)$, тобто \exists границя $\iff \exists$ та сама границя зліва та справа, які рівні \iff вона містить похідну зліва та справа та $f'(x_0^+) = f'(x_0^-)$. ■

Example 6.2.3 Знайти похідну функції $f(x) = |x|$.

Якщо $x > 0$, то $f(x) = x \implies f'(x) = 1$.

Якщо $x < 0$, то $f(x) = -x \implies f'(x) = -1$.

Перевіримо існування похідної в точці $x_0 = 0$.

$$f'(0+0) = \lim_{x \rightarrow 0+0} \frac{|x| - |0|}{x - 0} = 1 \quad f'(0-0) = \lim_{x \rightarrow 0-0} \frac{|x| - |0|}{x - 0} = -1$$

$$\implies f'(0+0) \neq f'(0-0), \text{ отже } \nexists f'(0).$$

До речі кажучи, похідну функції можна переписати інакше: $f'(x) = \frac{|x|}{x}$.

Також приклад того, що f в точці 0 неперервна, але не диференційована – контрприклад. Тобто зворотне твердження **Prp. 6.1.2** не працює.

Remark 6.2.4 У першому означенні розділу взагалі треба вимагати т. $x_0 \in A$ бути внутрішньою. Утім в рамках аналізу \mathbb{R} гранична точка теж припустима, оскільки ми маємо таке поняття як похідна справа та зліва, $f'(x_0+0)$, $f'(x_0-0)$. Чого не можна сказати буде в аналізі \mathbb{R}^n , який будемо проходити пізніше.

Якщо мені дадуть функцію $f : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$, де $f(x) = e^x$, то з похідними в внутрішніх точках все зрозуміло. А ось на кінцях, що не є вже внутрішніми, але граничними, $\exists f'(0) = f'(0+0)$, а також $\exists f'(1) = f'(1-0)$.

6.3 Дотична та нормаль до графіку функції

Definition 6.3.1 Пряма $y = k(x - x_0) + f(x_0)$ називається дотичною до графіку функції $f(x)$ в точці x_0 , якщо

$$f(x) - [k(x - x_0) + f(x_0)] = o(x - x_0), x \rightarrow x_0$$

Proposition 6.3.2 Функція f має дотичну в точці $x_0 \iff f$ – диференційована в точці x_0 .

При цьому $k = f'(x_0)$.

Proof.

$$f \text{ має дотичну в точці } x_0 \iff f(x) - [k(x - x_0) + f(x_0)] = o(x - x_0), x \rightarrow x_0 \iff$$

$$\iff f(x) - f(x_0) = k(x - x_0) + o(x - x_0), x \rightarrow x_0 \stackrel{\text{def.}}{\iff} f \text{ – диференційована в точці } x_0, k = f'(x_0).$$

■

Таким чином, рівняння дотичної задається формулою

$$y - f(x_0) = f'(x_0)(x - x_0)$$

Definition 6.3.3 Пряма, яка проходить через точку дотику $(x_0, f(x_0))$ та перпендикулярна до дотичної, називається нормаллю до графіку функції $f(x)$ в точці x_0 .

Знайдемо безпосередньо рівняння нормалі. Маємо рівняння дотичної: $f'(x_0)(x - x_0) - (y - f(x_0)) = 0$. Нормальний вектор дотичної задається координатами $\vec{n} = (f'(x_0); -1)$. Тоді для рівняння нормалі даний вектор буде напрямленим. Нам також відомо, що нормаль проходить через т. $(x_0, f(x_0))$, а отже,

$$\frac{x - x_0}{f'(x_0)} = \frac{y - f(x_0)}{-1} \Rightarrow f'(x_0)(y - f(x_0)) = -(x - x_0).$$

Таким чином, рівняння нормалі задається формулою

$$y - f(x_0) = -\frac{1}{f'(x_0)}(x - x_0)$$

Example 6.3.4 Знайти дотичну до графіку функції $f(x) = 2 \cos x + 5$ в точці $x_0 = \frac{\pi}{2}$.

$$y = f'(x_0)(x - x_0) + f(x_0)$$

$$f(x_0) = f\left(\frac{\pi}{2}\right) = 5$$

$$f'(x_0) = f'\left(\frac{\pi}{2}\right) = -2 \sin x|_{x=\frac{\pi}{2}} = -2$$

Отже, маємо:

$$y = -2\left(x - \frac{\pi}{2}\right) + 5 = -2x + (5 - \pi).$$

Ліричний відступ

Тут вже виникає необхідність поговорити про похідну функції, якщо вона раптом стане рівною нескінченності. І дійсно, ми можемо допускати такий випадок.

$$f'(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} = \pm\infty$$

Одразу зауважу, що просто ∞ границі бути не може.

Example 6.3.5 Нехай є функція $f(x) = \sqrt[3]{x^2}$. Знайдемо похідну цієї штуки в точці $x_0 = 0$.

$$f'(0) = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{x^2} - 0}{x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{\sqrt[3]{x}} = \infty$$

Проте для існування похідної необхідно і достатньо існування похідних з різних боків, а тут

$$f'(0^-) = \lim_{x \rightarrow 0^-} \frac{\sqrt[3]{x^2} - 0}{x} = -\infty$$

$$f'(0^+) = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\sqrt[3]{x^2} - 0}{x} = +\infty.$$

Зрозуміло, що жодним чином $f'(0 - 0) \neq f'(0 + 0)$, тож похідна існувати точно не може.

А тепер повернімось до геометричних застосувань. Вже відомо, що $f'(x_0) = \operatorname{tg} \alpha$ для дотичних. Якщо $f'(x_0) \rightarrow \pm\infty$, тобто $\operatorname{tg} \alpha \rightarrow \pm\infty$, то тоді кут $\alpha \rightarrow \pm\frac{\pi}{2}$. Тобто це означає, що ми матимемо справу з дотичною, яка є вертикальною прямою в т. x_0 , тобто $x = x_0$.

Example 6.3.6 Нехай є функція $f(x) = \sqrt[3]{x-1}$. Знайдемо похідну цієї штуки в точці $x_0 = 1$.

$$f'(1) = \lim_{x \rightarrow 1} \frac{\sqrt[3]{x-1} - 0}{x-1} = \lim_{x \rightarrow 1} \frac{1}{\sqrt[3]{(x-1)^2}} = +\infty$$

Похідна існує. Це можна навіть перевірити, пошукавши похідну зліва та справа.

Тоді дотичною графіка функції f в точці $x_0 = 1$ буде вертикальна пряма $x = 1$.

6.4 Диференціал функції

Definition 6.4.1 Задано функцію f – диференційована.

Диференціалом функції f в точці x_0 називають вираз

$$df(x_0, \Delta x) = f'(x_0)\Delta x.$$

Example 6.4.2 Розглянемо функцію $f(x) = x$. Вона має похідну $f'(x) = 1$, тому диференційована.

Тоді диференціал $df(x, \Delta x)$ запишеться так: $df(x, \Delta x) = \Delta x$

Зазвичай надалі опускають другий аргумент диференціалу та пишуть уже так: $dx = \Delta x$. А тому диференціал функції f можна записати іншим чином:

$$df(x_0) = f'(x_0) dx$$

Remark 6.4.3 Геометричний зміст диференціала функції $f(x)$ в т. x_0 – це приріст дотичної.

6.5 Інваріантність форми першого диференціалу

Задано функцію $f(x)$ – диференційована. Тоді диференціал $df(x) = f'(x) dx$.

Нехай задано функцію $x = x(t)$ – теж диференційована. Отримаємо складену функцію $f(x(t))$, від якої знайдемо диференціал.

$$df(x(t)) = (f(x(t)))' dt = f'(x(t))x'(t) dt = f'(x(t)) dx(t)$$

Отримали, що $df(x(t)) = f'(x(t)) dx(t)$.

Коли x – залежна змінна, то формула диференціалу все рівно залишається такою самою. Це й є **інваріантність форми першого диференціалу**.

6.6 Приблизне обчислення значень для диференційованих функцій

Задано функцію f – диференційована в точці x_0 . Тоді за твердженням, функція має дотичну $y = f'(x_0)(x - x_0) + f(x_0)$, для якого:

$$f(x) - y = o(x - x_0), x \rightarrow x_0.$$

Права частина – якесь нескінченно мале число, яким можна знехтувати. Тому коли x ‘близьке’ до x_0 , тобто $|x - x_0| \ll 1$, то маємо: $f(x) - y \approx 0$, тому маємо таку формулу:

$$f(x) \approx f'(x_0)(x - x_0) + f(x_0)$$

Example 6.6.1 Знайти приблизно значення $\sqrt{65}$.

Перетворимо значення іншим чином:

$$\sqrt{65} = \sqrt{64 \cdot \frac{65}{64}} = 8\sqrt{\frac{65}{64}} = 8\sqrt{1 + \frac{1}{64}}.$$

А тепер розглянемо функцію $f(x) = 8\sqrt{x}$. Тут $x = \frac{65}{64}$, в той час $x_0 = 1$.

$$|x - x_0| = \left| \frac{65}{64} - 1 \right| = \frac{1}{64} \ll 1$$

Знайдемо значення функції та похідну в т. x_0 :

$$f(x_0) = f(1) = 8$$

$$f'(x_0) = f'(1) = 8 \cdot \frac{1}{2\sqrt{x}} \Big|_{x=1} = 4$$

Таким чином, отримаємо:

$$\sqrt{65} \approx 4 \left(\frac{65}{64} - 1 \right) + 8 = \frac{1}{16} + 8 = 8.0625.$$

6.7 Похідна та диференціал вищих порядків

Definition 6.7.1 Задано функцію f , для якої $\exists f'(x)$.

Похідною 2-го порядку від $f(x)$ називають

$$f''(x) = (f'(x))',$$

якщо така похідна існує.

Definition 6.7.2 Задано функцію f , для якої $\exists f^{(n)}(x)$.

Похідною $(n+1)$ -го порядку від $f(x)$ називають

$$f^{(n+1)}(x) = (f^{(n)}(x))',$$

якщо така похідна існує.

Example 6.7.3 Знайдемо похідну n -го порядку функції $f(x) = \cos x$.

$$g(x) = \cos x \Rightarrow g'(x) = -\sin x \Rightarrow g''(x) = -\cos x \Rightarrow g'''(x) = \sin x \Rightarrow g^{(4)}(x) = \cos x \Rightarrow \dots$$

Продовжувати можна довго, але можемо помітити, що:

$$\cos x = \cos x$$

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

$$-\cos x = \cos \left(x + \pi \right) = \cos \left(x + \frac{2\pi}{2} \right) = (\cos x)''$$

$$\sin x = \cos \left(x + \frac{3\pi}{2} \right) = (\cos x)'''$$

⋮

Спробуємо ствердити, що працює формула: $(\cos x)^{(n)} = \cos \left(x + \frac{n\pi}{2} \right)$. Покажемо, що для $(n+1)$ -го члену це теж виконується.

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

Остаточно отримаємо, що для функції $f(x) = \cos x$ існують похідні

$$\forall n \geq 1 : f^{(n)}(x) = \cos \left(x + \frac{n\pi}{2} \right).$$

А тепер уявімо собі іншу проблему. Задано функції f, g , для яких існують n похідних. Спробуємо знайти $(fg)^{(n)}$. Будемо робити по черзі:

$$(fg)' = f'g + fg'$$

$$(fg)'' = ((fg)')' = (f'g + fg')' = (f'g)' + (fg')' = (f''g + f'g') + (f'g' + fg'') = f''g + 2f'g' + fg''$$

$$(fg)''' = ((fg)'')' = (f''g + 2f'g' + fg'')' = f'''g + f''g' + 2f''g' + 2f'g'' + f'g'' + fg''' =$$

$$= f'''g + 3f''g' + 3f'g'' + fg'''$$

Це можна продовжувати до нескінченності, але можна зробити деякі зауваження, що форма виразу схожа дуже на формулу Бінома-Ньютона, якщо порядок похідної замінити уявно на степінь. Тоді якщо посилатись на МІ, то доведемо таку формулу:

Theorem 6.7.4 Формула Ляйбніца

$$(f(x)g(x))^{(n)} = \sum_{k=0}^n C_n^k f^{(k)}(x) g^{(n-k)}(x)$$

Example 6.7.5 Знайти похідну n -го порядку функції $y = x^2 \cos x$.

$$f(x) = x^2 \Rightarrow f'(x) = 2x \Rightarrow f''(x) = 2 \Rightarrow f'''(x) = 0 \Rightarrow \dots$$

Коротше, $\forall n \geq 3 : f^{(n)}(x) = 0$.

$$g(x) = \cos x \xrightarrow{\text{попередній приклад}} \forall n \geq 1 : g^{(n)}(x) = \cos \left(x + \frac{n\pi}{2} \right)$$

Скористаємось формулою Ляйбніца:

$$\begin{aligned} y^{(n)} &= (f(x)g(x))^{(n)} = \sum_{k=0}^n C_n^k f^{(k)}(x) g^{(n-k)}(x) = \\ &= C_n^0 f(x) g^{(n)}(x) + C_n^1 f'(x) g^{(n-1)}(x) + C_n^2 f''(x) g^{(n-2)}(x) + C_n^3 f'''(x) g^{(n-3)}(x) + \dots + C_n^n f^{(n)}(x) g(x) = \\ &= f(x) g^{(n)}(x) + n f'(x) g^{(n-1)}(x) + \frac{n(n-1)}{2} f''(x) g^{(n-2)}(x) + 0 = \\ &= x^2 \cos \left(x + \frac{n\pi}{2} \right) + 2nx \cos \left(x + \frac{(n-1)\pi}{2} \right) + n(n-1) \cos \left(x + \frac{(n-2)\pi}{2} \right). \end{aligned}$$

Тут зауважу, що

$$\cos \left(x + \frac{(n-1)\pi}{2} \right) = \cos \left(x + \frac{n\pi}{2} - \frac{\pi}{2} \right) = \sin \left(x + \frac{n\pi}{2} \right)$$

$$\cos \left(x + \frac{(n-2)\pi}{2} \right) = \cos \left(x + \frac{n\pi}{2} - \pi \right) = -\cos \left(x + \frac{n\pi}{2} \right)$$

$$= [x^2 - n(n-1)] \cos \left(x + \frac{n\pi}{2} \right) + 2nx \sin \left(x + \frac{n\pi}{2} \right).$$

Остаточно,

$$y^{(n)} = [x^2 - n(n-1)] \cos \left(x + \frac{n\pi}{2} \right) + 2nx \sin \left(x + \frac{n\pi}{2} \right).$$

Definition 6.7.6 Диференціалом n -го порядку функції $f(x)$ називають такий диференціал:

$$d^n f = d(d^{n-1} f)$$

Це можна переписати трошки інакше:

$$df = f' dx$$

$$d^2 f = d(df) = d(f' dx) = dx d(f') = dx f'' dx = f'' (dx)^2$$

Частіше позначають $(dx)^2 = dx^2$ ось так. Тоді

$$d^2 f = f'' dx^2$$

⋮

Продовжуючи за МІ, отримаємо:

$$d^n f = f^{(n)} dx^n$$

Example 6.7.7 Маємо функцію $f(x) = \cos x$, знайдемо диференціал n -го порядку.

Знаємо похідну $f^{(n)}(x) = \cos \left(x + \frac{n\pi}{2} \right)$, тому диференціал $d^n \cos x = \cos \left(x + \frac{n\pi}{2} \right) dx^n$.

6.8 Неінваріантність форми другого диференціалу

Задано функцію $f(x)$ – диференційована. Тоді другий диференціал $d^2 f(x) = f''(x) dx^2$.

Нехай задано функцію $x = x(t)$ – теж диференційована. Отримаємо складену функцію $f(x(t))$, від якої знайдемо другий диференціал.

$$d^2 f(x(t)) = (f(x(t)))'' dt^2 = [f'(x(t))x'(t)]' dt^2 = [f''(x(t))(x'(t))^2 + f'(x(t))x''(t)] dt^2 =$$

$$= f''(x(t))(x'(t))^2 dt^2 + f'(x(t))x''(t) dt^2 = f''(x(t))dx(t)^2 + f'(x(t))d^2 x(t)$$

Отримали, що $d^2 f(x(t)) \neq f''(x(t)) dx(t)^2$.

Маємо уже випадок **неінваріантності**. Єдине, що якщо x – якась лінійна функція, то тоді інваріантність залишається.

6.9 Похідна від параметрично заданої функції

Задано параметричну функцію $y : \begin{cases} y = y(t) \\ x = x(t) \end{cases}$.

Мета: знайти y'_x – похідну функції за x .

Ми знаємо, що $dy = y'_x dx \Rightarrow y'_x = \frac{dy}{dx}$. Знайдемо ці диференціали:

$$\begin{cases} dx = x'_t dt \\ dy = y'_t dt \end{cases} \Rightarrow y'_x = \frac{dy}{dx} = \frac{y'_t}{x'_t}. \text{ Таким чином:}$$

$$y'_x : \begin{cases} y'_x = \frac{y'_t(t)}{x'_t(t)} \\ x = x(t) \end{cases}$$

Example 6.9.1 Знайти похідну від функції: $y : \begin{cases} x = \ln t \\ y = t^3 \end{cases}$

$$x'_t = \frac{1}{t}, y'_t = 3t^2 \Rightarrow y'_x : \begin{cases} x = \ln t \\ y'_x = \frac{3t^2}{\frac{1}{t}} = 3t^3 \end{cases}$$

Сюди ми ще повернемось.

Знайдемо другу похідну:

$$y''_{x^2}(t) = (y'_x(t))'_x = \frac{(y'_x(t))'_t}{x'_t(t)} = \frac{y''_{t^2}(t)x'_t(t) - x''_{t^2}(t)y'_t(t)}{(x'_t(t))^3}.$$

Складно виглядає, тому краще повернемось до прикладу.

$$\text{Маємо } y : \begin{cases} x = \ln t \\ y = t^3 \end{cases}, \quad x'_t = \frac{1}{t}, y'_t = 3t^2 \Rightarrow y'_x = 3t^3$$

$$\text{Тоді отримаємо, що } y''_{x^2} = \frac{(y'_x)'_t}{x'_t} = \frac{9t^2}{t^3} = \frac{9}{t} \Rightarrow y''_{x^2} : \begin{cases} x = \ln t \\ y''_{x^2} = \frac{9}{t} \end{cases}$$

6.10 Основні теореми

Theorem 6.10.1 Лема Ферма

Задано функцію $f : (a, b) \rightarrow \mathbb{R}$ – диференційована в точці $x_0 \in (a, b)$. Більш того, в точці x_0 функція f приймає найбільше (або найменше) значення. Тоді $f'(x_0) = 0$.

Proof.

Розглянемо випадок, коли в точці x_0 досягається max. Для min аналогічно.

Тобто маємо $\forall x \in (a, b) : f(x_0) \geq f(x)$. Оскільки $\exists f'(x_0)$, то тоді $\exists f'(x_0^+), \exists f'(x_0^-)$.

$$f'(x_0^+) \stackrel{\text{def.}}{=} \lim_{x \rightarrow x_0^+} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} \left(\begin{smallmatrix} \leq 0 \\ > 0 \end{smallmatrix} \right) \leq 0.$$

$$f'(x_0^-) \stackrel{\text{def.}}{=} \lim_{x \rightarrow x_0^-} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} \left(\begin{smallmatrix} \leq 0 \\ < 0 \end{smallmatrix} \right) \geq 0.$$

$$\text{Таким чином, } 0 \leq f'(x_0^-) = f'(x_0^+) \leq 0 \Rightarrow f'(x_0^-) = f'(x_0^+) = 0 \Rightarrow f'(x_0) = 0.$$

■

Remark 6.10.2 Головне питання, чому не відрізок або напівінтервал.

Розглянемо функцію $f(x) = e^x$ на $[0, 2]$. На кінцях f приймає відповідно найбільше та найменше значення, проте $f'(0) = 1, f'(2) = e^2$, ненульові похідні.

Theorem 6.10.3 Теорема Ролля

Задано функцію $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$, причому $f \in C([a, b])$ та диференційована на (a, b) . Більш того, $f(a) = f(b)$. Тоді $\exists \xi \in (a, b) : f'(\xi) = 0$.

Proof.

Оскільки $f \in C([a, b])$, то за теоремою Ваєрштраса,

$$\exists x_1 \in [a, b] : f(x_1) = \min_{x \in [a, b]} f(x).$$

$$\exists x_2 \in [a, b] : f(x_2) = \max_{x \in [a, b]} f(x).$$

Розглянемо два випадки:

I. $f(x) = \text{const} \implies f'(x) = 0, \forall x \in (a, b), \xi = x$.

II. $f(x) \neq \text{const} \implies$ або є x_1 , або є x_2 , або навіть обидва. Якщо беремо x_2 , то функція f приймає найбільше значення, тому за лемою Ролля, $f'(x_2) = 0 \implies \xi = x_2$. Для x_1 – аналогічно. ■

Remark 6.10.4 Диференційованість в точці $x_0 = a, x_0 = b$ не обов'язкова.

Маємо функцію $f(x) = \sqrt{1 - x^2}$. Що в нас є: $f(-1) = f(1), f \in C([-1, 1])$, диференційована всюди, але не в точці $x_0 = \pm 1$. При цьому $\exists \xi = 0 : f'(\xi) = 0$.

Theorem 6.10.5 Теорема Лагранжа

Задано функцію $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}, f \in C([a, b])$ та диференційована на (a, b) . Тоді $\exists c \in (a, b) :$

$$f'(c) = \frac{f(b) - f(a)}{b - a}.$$

Proof.

Розглянемо функцію $h(x) = (f(x) - f(a)) - \frac{f(b) - f(a)}{b - a}(x - a)$. За сумою та добутками, маємо, що $h \in C([a, b])$ і теж диференційована на (a, b) .

$$h'(x) = f'(x) - \frac{f(b) - f(a)}{b - a}.$$

Зауважимо, що $h(a) = 0$ та $h(b) = 0 \implies h(a) = h(b)$. Тому за теоремою Ролля,

$$\exists \xi = c \in (a, b) : f'(c) = 0 \implies f'(c) = \frac{f(b) - f(a)}{b - a}.$$

■

Corollary 6.10.6 Наслідки з теореми Лагранжа

Справедливі наступні твердження:

- 1) Якщо $\forall x \in (a, b) : f'(x) = 0$, то $f(x) = \text{const}$;
- 2) Якщо $\forall x \in (a, b) : f'(x) = k$, то $f(x) = kx + q$;
- 3) Нехай g – така ж за властивостями як і f . Якщо $\forall x \in (a, b) : f'(x) = g'(x)$, то $f(x) = g(x) + C$;
- 4) Якщо додатково f' – обмежена, то f задовольняє умові Лібшиця (буде згодом).

Перед цим все ж таки наведу означення.

Definition 6.10.7 Задано функцію $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$.

Функція f задовольняє умові Лібшиця, якщо

$$\exists L > 0 : \forall x_1, x_2 \in [a, b] : |f(x_1) - f(x_2)| \leq L|x_1 - x_2|$$

Щоб зрозуміти сенс, я зміню трошки означення.

Зафіксуємо точки x_1 , а $x_2 = x$ Перепишу останню нерівність в іншому вигляді:

$$|f(x_1) - f(x)| \leq L|x_1 - x| \implies -L|x_1 - x| + f(x_1) \leq f(x) \leq L|x_1 - x| + f(x_1)$$

Це означає, що в кожній точці $x_1 \in [a, b]$ графік функції $f(x)$ буде лежати в блакитній області. Ліва та права частини – це прямі.

Proof.

Тепер можемо довести всі наслідки.

- 1) $\exists c : f(b) - f(a) = f'(c)(b - a) \implies f(b) = f(a)$. Але взагалі-то кажучи $\exists c \in (x_1, x_2) \subset (a, b) : f(x_1) = f(x_2)$. Коротше, $f(x) = \text{const}$.

2) Розглянемо функцію $g(x) = f(x) - kx$, теж неперервна і диференційована на (a, b) . Тоді $g'(x) = f'(x) - k \implies g'(x) = 0 \xrightarrow{1)} g(x) = q$. Отже, $f(x) = kx + q$.

3) Розглянемо функцію $h(x) = f(x) - g(x)$, теж неперервна і диференційована на (a, b) . Тоді $h'(x) = f'(x) - g'(x) = 0 \xrightarrow{1)} h(x) = C \implies f(x) = g(x) + C$.

4) $\exists c \in (x_1, x_2) \subset (a, b) : f(x_2) - f(x_1) = f'(c)(x_2 - x_1) \implies |f(x_2) - f(x_1)| = |f'(c)||x_2 - x_1| \leq M|x_2 - x_1|$. Тоді встановлюючи $L = M$, маємо умову Ліпшиця.

Усі наслідки доведені. ■

Example 6.10.8 Зокрема функція $f(x) = \sqrt{x^2 + 5}$ задовольняє умові Ліпшиця на \mathbb{R} , оскільки $f'(x) = \frac{x}{\sqrt{x^2 + 5}}$ — обмежена. Дійсно, $f'(x) \rightarrow \pm 1, x \rightarrow \pm\infty$, а також f' зростає.

Theorem 6.10.9 Теорема Коші

Задані функції $f, g: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}, f, g \in C([a, b])$ та диференційовані на (a, b) . При цьому $g'(x) \neq 0$.

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

Доводиться аналогічно як теорема Лагранжа.

Вказівка: розглянути функцію $h(x) = (f(x) - f(a)) - \frac{f(b) - f(a)}{g(b) - g(a)}(g(x) - g(a))$.

Remark 6.10.10 Із теореми Коші випливає як раз теорема Лагранжа, якщо $g(x) = x$.

Example 6.10.11 Довести нерівність: $|\arctg a - \arctg b| \leq |a - b|$.

Оскільки $\arctg x$ — неперервна на $[a, b]$ та диференційована на (a, b) , то за теоремою Лагранжа,

$\exists c \in (a, b) : (\arctg x)'_{x=c} = \frac{\arctg b - \arctg a}{b - a}$. Тобто $\frac{1}{1 + c^2} = \frac{\arctg b - \arctg a}{b - a}$.

Тоді $|\arctg a - \arctg b| = \left| \frac{1}{1 + c^2} \right| |a - b| \leq |a - b|$.

6.11 Дослідження функції

6.11.1 На монотонність

Означення монотонної функції можна побачити в розділі про границі функції. Тому перейдемо безпосередньо до теорем.

Theorem 6.11.1 Задано функцію $f: (a, b) \rightarrow \mathbb{R}$ та f диференційована на (a, b) .

Функція f нестрого монотонно $\begin{cases} \text{зростає} \\ \text{спадає} \end{cases} \iff \forall x \in (a, b) : \begin{cases} f'(x) \geq 0 \\ f'(x) \leq 0 \end{cases}$.

Proof.

Розглянемо випадок зростаючої функції. Для спадної аналогічно.

\Rightarrow Дано: f — нестрого зростає, тобто $x_2 > x_1 \implies f(x_2) \geq f(x_1)$. Оскільки диференційована $\forall x_0 \in (a, b)$, то $\exists f'(x_0)$, а тому

$$\exists f'(x_0^+) = \lim_{x \rightarrow x_0^+} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} \left(\begin{matrix} \geq 0 \\ \geq 0 \end{matrix} \right) \geq 0.$$

$$\exists f'(x_0^-) = \lim_{x \rightarrow x_0^-} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} \left(\begin{matrix} \leq 0 \\ \leq 0 \end{matrix} \right) \geq 0.$$

Також $f'(x_0^+) = f'(x_0^-)$, а отже, $\forall x_0 \in (a, b) : f'(x_0) \geq 0$.

\Leftarrow Дано: $\forall x \in (a, b) : f'(x) \geq 0$. Зафіксуємо такі x_1, x_2 , щоб $x_2 > x_1$. Розглянемо функцію тепер на відрізка $[x_1, x_2] \subset (a, b)$. В кожній точці цього відрізка є похідна, тож $f \in C([x_1, x_2])$. Також можна розглядати диференційованість на (x_1, x_2) . Тоді за Лагранжом,

$\exists c \in (x_1, x_2) : f(x_2) - f(x_1) = f'(c)(x_2 - x_1) \geq 0$.

Остаточно, $f(x_2) \geq f(x_1)$, тобто монотонно нестрого зростає. ■

Theorem 6.11.2 Задано функцію $f: (a, b) \rightarrow \mathbb{R}$ та f диференційована на (a, b) .

Функція f строго монотонно $\begin{cases} \text{зростає} \\ \text{спадає} \end{cases} \iff \forall x \in (a, b) : \begin{cases} f'(x) > 0 \\ f'(x) < 0 \end{cases}$.

Доведення є аналогічним.

Remark 6.11.3 А тепер питання, куди зникла імплікація \implies в цій теоремі.

Нехай задано функцію $f: (-1, 1) \rightarrow \mathbb{R}$, де $f(x) = x^3$. Вона строго монотонно зростає. Маємо похідну $f'(x) = 3x^2$. Вона не для всіх точках строго додатна: для $x = 0$ маємо, що $f'(x) = 0$.

6.11.2 На локальні екстремуми

Definition 6.11.4 Задано функцію $f: A \rightarrow \mathbb{R}$ та $x_0 \in A$.

Точку x_0 називають точкою **локального**

максимуму, якщо $\exists \delta > 0 : \forall x \in (x_0 - \delta, x_0 + \delta) \cap A : f(x_0) \geq f(x)$;

мінімуму, якщо $\exists \delta > 0 : \forall x \in (x_0 - \delta, x_0 + \delta) \cap A : f(x_0) \leq f(x)$.

Локальний максимум або мінімум ще називають **точками локального екстремуму**. Якщо нерівність строга, то екстремуми називають **строгими** та не розглядаємо в околі точці x_0 .

Definition 6.11.5 Задано функцію $f: A \rightarrow \mathbb{R}$ та $x_0 \in A$.

Точку x_0 називають **критичною**, якщо

$$f'(x_0) = 0 \text{ або } \nexists f'(x_0)$$

Theorem 6.11.6 **Необхідна умова екстремума**

Задано функцію $f: (a, b) \rightarrow \mathbb{R}$ та $x_0 \in (a, b)$ – локальний екстремум. Тоді x_0 – критична точка.

Proof.

Розглянемо випадок точки максимуму. Для мінімуму аналогічно.

x_0 – локальна точка максимуму, тобто в околі точки x_0 функція f приймає найбільшого значення. Тоді за лемою Ферма, при існуванні похідної в точці x_0 , $f'(x_0) = 0$. Або $\nexists f'(x_0)$. ■

Remark 6.11.7 Пояснювальний приклад, чому нас точки з неіснуючою похідною цікавить.

Маємо $f(x) = |x|$. У точці $x_0 = 0$ похідної нема, проте вона є точкою локального мінімуму.

Remark 6.11.8 Інший приклад, чому ця умова не є достатньою.

Маємо $f(x) = x^3$, її похідна $f'(x) = 3x^2 \xrightarrow{f'(x)=0} x_0 = 0$, але вона не є екстремумом, оскільки минулого разу дізнались, що така функція зростає всюди.

Theorem 6.11.9 **Достатня умова для екстремума**

Задано функцію $f: (a, b) \rightarrow \mathbb{R}$ та $x_0 \in (a, b)$ – критична точка. Відомо, що $\exists \delta > 0 : \forall x \in$

$\begin{cases} (x_0 - \delta, x_0) : f'(x) \leq 0 \\ (x_0, x_0 + \delta) : f'(x) \geq 0 \end{cases}$ (або нерівності навпаки). Тут я беру $\delta > 0$, щоб інтервал цілком по-

трапляв в інтервал (a, b) . Тоді x_0 – точка локального мінімуму (максимуму).

При строгої нерівності екстремум буде строгим.

Proof.

Розглянемо випадок, коли $\forall x \in \begin{cases} (x_0 - \delta, x_0) : f'(x) \leq 0 \\ (x_0, x_0 + \delta) : f'(x) \geq 0 \end{cases}$. (для нерівностей навпаки все аналогі-

чно). Тоді звідси f – спадає на $(x_0 - \delta, x_0)$ і зростає на $(x_0, x_0 + \delta)$. Або математично, $\forall x \in (x_0 - \delta, x_0) : f(x_0) \leq f(x)$ та $\forall x \in (x_0, x_0 + \delta) : f(x_0) \leq f(x)$.

За означенням, це й є точка локального мінімуму. ■

Remark 6.11.10 Робимо такий висновок: щоб знайти локальний екстремум, треба спочатку знайти всі критичні точки, а потім дослідити, які значення похідним вона приймає навколо.

Example 6.11.11 Задано функцію $f(x) = x^3 - 3x^2 - 9x + 2$. Знайдемо всі локальні екстремуми.

Спочатку шукаємо критичні точки:

$$f'(x) = 3x^2 - 6x - 9$$

$$f'(x) = 0 \Rightarrow x^2 - 2x - 3 = 0 \Rightarrow x = -1, x = 2$$

Перевіримо екстремуми на інтервалі.

Стрілки вказують на зростання або на спадання функції на даному інтервалі. Тоді можемо зробити висновок, що $x = -1$ – локальний максимум, а $x = 2$ – локальний мінімум.

6.11.3 На опуклість

Розглянемо графік функції $f(x)$ на множині A . Оберемо точки $x_1, x_2 \in A$ так, що $x_1 > x_2$.

Це приклад так називаємої **опуклої функції вниз**, коли на множині A справедлива нерівність:

$$\forall x \in A : f(x) \leq l(x)$$

Прийняте трошки інше означення, а це просто пояснення, звідки все це береться.

Знайдемо рівняння прямої, що проходить через точки $(x_1, f(x_1)), (x_2, f(x_2))$.

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{l(x) - f(x_1)}{f(x_2) - f(x_1)} \implies l(x) = f(x_1) + \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1}(x - x_1).$$

Її підставити можна в нерівність, проте таке означення все рівно не є зручним. Зафіксуємо $\lambda \in [0, 1]$ та розглянемо точку $x = \lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2$. Для довільних λ точка $x \in [x_1, x_2]$. А якщо це рівняння розв'язати відносно λ , ми отримаємо, що:

$$\lambda = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} \quad 1 - \lambda = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}.$$

Отримане $\lambda \in (0, 1)$. Тоді

$$x = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}x_1 + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}x_2, \text{ це все } \forall x_1 < x < x_2.$$

Але поки що обмежимося першим виглядом. Підставимо цю точку в рівняння прямої.

$$\begin{aligned} l(x) &= l(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) = f(x_1) + \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1}(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2 - x_1) = \\ &= f(x_1) + (f(x_2) - f(x_1))(1 - \lambda) = \lambda f(x_1) + (1 - \lambda)f(x_2). \end{aligned}$$

Таким чином, якщо повернутись до нерівності, то отримаємо наступне:

$$\forall \lambda \in [0, 1] : f(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \leq \lambda f(x_1) + (1 - \lambda)f(x_2)$$

А ось таке означення можна використовувати подальше для інших досліджень.

Аналогічні міркування будуть для **опуклої функції вгору**, але тут нерівність навпаки.

Definition 6.11.12 Задано функцію $f : A \rightarrow \mathbb{R}$.

Цю функцію називають **опуклою вгору**, якщо

вниз

$$\forall x_1, x_2 \in A : \forall \lambda \in [0, 1] : f(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \geq \lambda f(x_1) + (1 - \lambda)f(x_2)$$

Remark 6.11.13 Якщо $\lambda \in (0, 1)$, то тоді нерівність строга.

Lemma 6.11.14 Лема про 3 хорди

Функція $f : A \rightarrow \mathbb{R}$ опукла вниз \iff справедлива нерівність:

$$\frac{f(x) - f(x_1)}{x - x_1} \leq \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \leq \frac{f(x_2) - f(x)}{x_2 - x}, \text{ де } x \in (x_1, x_2) \subset A.$$

Нерівність каже: кутовий коефіцієнт $PP_1 \leq$ кутовий коефіцієнт $P_2P_1 \leq$ кутовий коефіцієнт P_2P .

Remark 6.11.15 Для опуклої вгору нерівність навпаки. Для строгої опуклості нерівність строга.

Proof.

Зафіксуємо точки $x_1, x_2 \in A$ та точку $x \in (x_1, x_2)$.

$$f - \text{опукла вниз} \iff f(x) \leq \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}f(x_1) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}f(x_2) \iff$$

$$\iff (x_2 - x_1)f(x) \leq (x_2 - x)f(x_1) + (x - x_1)f(x_2)$$

$$\iff (f(x) - f(x_1))(x_2 - x_1) \leq (f(x_2) - f(x))(x - x_1) \iff \frac{f(x) - f(x_1)}{x - x_1} \leq \frac{f(x_2) - f(x)}{x_2 - x}$$

Середня нерівність мене поки що не цікавить, це я так, щоб було. ■

Lemma 6.11.16 Задано функцію $f : A \rightarrow \mathbb{R}$ – диференційована на A .

f - опукла вниз $\iff f'$ не спадає на A .

вгору

не зростає

Proof.

$$\Rightarrow \text{Дано: } f - \text{опукла вниз. Розглянемо точки } x_1, x_2 \in A, \text{ тоді } \frac{f(x) - f(x_1)}{x - x_1} \leq \frac{f(x_2) - f(x)}{x_2 - x}.$$

Ба більше, оскільки f – диференційована, то $\exists f'(x_1), \exists f'(x_2)$. Тоді отримаємо ось що, використовуючи границі в нерівностях:

$$f'(x_1) = \lim_{x \rightarrow x_1+0} \frac{f(x) - f(x_1)}{x - x_1} \leq \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1}. \text{ Отже, } \forall x_1, x_2 \in A : x_2 > x_1 \implies f'(x_2) \geq f'(x_1).$$

$$\frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \leq \lim_{x \rightarrow x_2-0} \frac{f(x_2) - f(x)}{x_2 - x} = f'(x_2)$$

☐ Дано: f' – неспадна на A , тобто $\forall x_1, x_2 \in A : x_1 < x_2 \implies f'(x_1) \leq f'(x_2)$. Оскільки f – диференційована на A , то за теоремою Лагранжа,

$$f'(x_1) = \frac{f(c) - f(c_1)}{c - c_1} \implies \frac{f(c) - f(c_1)}{c - c_1} \leq \frac{f(c_2) - f(c)}{c_2 - c}.$$

$$f'(x_2) = \frac{f(c_2) - f(c)}{c_2 - c}$$

Тоді маємо, що f – випукла вниз. ■

Remark 6.11.17 Майже аналогічно доводиться для строгої опуклості.

Єдине, що в першій частині доведення треба застосувати теорему Лагранжа для точок $z_1 \in (x_1, x)$ та $z_2 \in (x, x_2)$.

Theorem 6.11.18 Задано функцію $f: (a, b) \rightarrow \mathbb{R}$ та f диференційована двічі на (a, b) .

$$\text{Функція } f \text{ нестрого опукла } \begin{cases} \text{вниз} \\ \text{вгору} \end{cases} \iff \forall x \in (a, b) : \begin{cases} f''(x) \geq 0 \\ f''(x) \leq 0 \end{cases}.$$

Proof.

$$f \text{ – опукла вниз на } (a, b) \iff f' \text{ – не спадає на } (a, b) \iff \forall x \in (a, b) : f''(x) \geq 0.$$

Аналогічно для опуклої вгору. ■

Theorem 6.11.19 Задано функцію $f: (a, b) \rightarrow \mathbb{R}$ та f диференційована двічі на (a, b) .

$$\text{Функція } f \text{ строго опукла } \begin{cases} \text{вниз} \\ \text{вгору} \end{cases} \iff \forall x \in (a, b) : \begin{cases} f''(x) > 0 \\ f''(x) < 0 \end{cases}.$$

Доведення аналогічне.

Example 6.11.20 Функція $f(x) = x^2$ буде опуклою вниз, оскільки $f''(x) = 2 > 0$.

Definition 6.11.21 Задано функцію $f: A \rightarrow \mathbb{R}$ – диференційована в точці x_0 – внутрішня точка. Точку $(x_0, f(x_0))$ називають **точкою перегину**, якщо

$$\exists \delta > 0 : \text{інтервали } (x_0 - \delta, x_0), (x_0, x_0 + \delta) \text{ мають різну опуклість}$$

Example 6.11.22 Маємо $f(x) = \frac{(x-1)^3}{4} + 2$.

$f''(x) = \frac{3}{2}(x-1) = 0$. Тут буде точка $x_0 = 1$ – точка перегину. Дійсно, якщо $x > 1$, то $f''(x) > 0$; також якщо $x < 1$, то $f''(x) < 0$. Отже, на $(-\infty, 1)$ – випукла догори, а на $(1, +\infty)$ – випукла донизу.

Example 6.11.23 Маємо $f(x) = \sqrt[3]{x}$.

$f''(x) = \frac{1}{3} \left(-\frac{2}{3} \right) x^{-\frac{5}{3}}$. Тут буде точка $x_0 = 0$ – точка перегину. Водночас

$$\exists y'(0^+) = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\sqrt[3]{x} - 0}{x - 0} = +\infty \quad \exists y'(0^-) = \lim_{x \rightarrow 0^-} \frac{\sqrt[3]{x} - 0}{x - 0} = +\infty.$$

Example 6.11.24 Маємо $f(x) = \sqrt{|x|}$.

Тут точка $x_0 = 0$ не може бути точкою перегину, оскільки $\nexists f'(0)$.

Theorem 6.11.25 Необхідна умова для перегину

Задано функцію $f: A \rightarrow \mathbb{R}$ та точка $x_0 \in A$ – точка перегину. Тоді $f''(x_0) = 0$.

Тут все зрозуміло.

Theorem 6.11.26 Достатня умова для перегину

Задано функцію $f: A \rightarrow \mathbb{R}$, $f \in C(A)$ та диференційована в околі точці x_0 та має другу похідну. Якщо по обидва боки від точки x_0 маємо протилежні знаки, то тоді x_0 – точка перегину.

Тут теж все зрозуміло.

Theorem 6.11.27 Нерівність Єнсена

Задано функцію $f: (a, b) \rightarrow \mathbb{R}$ - опукла ^{вгору} вниз. Тоді $\forall \alpha_1, \dots, \alpha_n \in (0, 1) : \alpha_1 + \dots + \alpha_n = 1 :$
 $f(\alpha_1 x_1 + \dots + \alpha_n x_n) \leq \alpha_1 f(x_1) + \dots + \alpha_n f(x_n).$

Proof.

Доведення проведемо за МІ по числу n .

База індукції: $n = 2$. Тоді $\forall \alpha_1, \alpha_2 : \alpha_1 + \alpha_2 = 1 \Rightarrow \alpha_2 = 1 - \alpha_1 :$

$f(\alpha_1 x_2 + \alpha_2 x_2) = f(\alpha_1 x_2 + (1 - \alpha_1)x_2) < \alpha_1 f(x_1) + (1 - \alpha_1)f(x_2)$, бо наша функція опукла вниз.

Припущення індукції: для $n - 1$ нерівність виконана.

Крок індукції: доведемо, що для n де виконано. Маємо:

$\forall \alpha_1, \dots, \alpha_n \in (0, 1) : \forall x \in (a, b) :$

$$f(\alpha_1 x_1 + \dots + \alpha_n x_n) = f\left(\alpha_n x_n + (1 - \alpha_n) \left(\frac{\alpha_1}{1 - \alpha_n} x_1 + \dots + \frac{\alpha_{n-1}}{1 - \alpha_{n-1}} x_{n-1}\right)\right) \leq$$

Зауважу, що $\frac{\alpha_1}{1 - \alpha_n} + \dots + \frac{\alpha_{n-1}}{1 - \alpha_{n-1}} = 1$ та всі доданки > 0 .

$$\leq \alpha_n f(x_n) + (1 - \alpha_n) \left(\frac{\alpha_1}{1 - \alpha_n} x_1 + \dots + \frac{\alpha_{n-1}}{1 - \alpha_{n-1}} x_{n-1}\right) = \alpha_1 f(x_1) + \dots + \alpha_n f(x_n).$$

МІ доведено. ■

Example 6.11.28 Розглянемо функцію $f(x) = \ln x$.

Вона є опуклою вгору, тому що $f''(x) = -\frac{1}{x^2} < 0$. Тоді за нерівністю Єнсена, отримаємо:

$\ln(\alpha_1 x_1 + \dots + \alpha_n x_n) > \alpha_1 \ln x_1 + \dots + \alpha_n \ln x_n$, де $\alpha_1 + \dots + \alpha_n = 1$.

Можемо встановити $\alpha_1 = \dots = \alpha_n = \frac{1}{n}$, сума буде також рівна одинички. Прийдемо до такої нерівності: $\ln \frac{x_1 + \dots + x_n}{n} \geq \frac{1}{n} (\ln x_1 + \dots + \ln x_n)$.

6.11.4 На асимптоти

Definition 6.11.29 Пряма $y = kx + b$ називається **похилою асимптотою** функції f , якщо

$$\lim_{x \rightarrow \pm\infty} (f(x) - (kx + b)) = 0.$$

Theorem 6.11.30 $y = kx + b$ - похила асимптота $\iff k = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{f(x)}{x}$ та $b = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} (f(x) - kx)$.

Proof.

\Rightarrow Дано: $y = kx + b$ - похила асимптота, тобто $\lim_{x \rightarrow \pm\infty} (f(x) - (kx + b)) = 0$.

Тоді $\lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{f(x) - (kx + b)}{x} = 0$. Це трошки перепишемо:

$$\lim_{x \rightarrow \pm\infty} \left(\frac{f(x)}{x} - k - \frac{b}{x}\right) = 0 \implies \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \left(\frac{f(x)}{x} - k\right) = 0 \implies k = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{f(x)}{x}.$$

Водночас оскільки $\lim_{x \rightarrow \pm\infty} (f(x) - kx - b) = 0$, то звідси $b = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} (f(x) - kx)$.

\Leftarrow Дано: $k = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{f(x)}{x}, b = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} (f(x) - kx)$.

Тоді автоматично $\lim_{x \rightarrow \pm\infty} (f(x) - (kx + b)) = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} (f(x) - kx) - \lim_{x \rightarrow \pm\infty} b = 0 \implies y = kx + b$ - асимптота для f . ■

Example 6.11.31 Маємо функцію $f(x) = \frac{\sin 10x}{x} + x$. З'ясуємо, чи має вона асимптоту.

Знайдемо спочатку перший коефіцієнт:

$$k = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{x} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \left(\frac{\sin 10x}{x} + 1\right) = 0 + 1 = 1.$$

Знаходимо другий коефіцієнт:

$$b = \lim_{x \rightarrow +\infty} (f(x) - kx) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \left(\frac{\sin 10x}{x} + x - x\right) = 0.$$

Для $-\infty$ все аналогічно.

Таким чином, $y = x$ - похила асимптота.

Remark 6.11.32 У випадку $k = 0$ пряму називають **горизонтальною асимптотою**.

Definition 6.11.33 Пряма $x = x_0$ називається **вертикальною асимптотою** функції $f(x)$, якщо виконується одна з чотирьох умов:

$$\lim_{x \rightarrow x_0+0} f(x) = \pm\infty \text{ або } \lim_{x \rightarrow x_0-0} f(x) = \pm\infty$$

Example 6.11.34 Задано функцію $f(x) = e^{\frac{1}{x-1}}$. Розглянемо т. $x_0 = 1$.

$$\lim_{x \rightarrow 1+0} e^{-\frac{1}{x-1}} = +\infty.$$

Таким чином, $x_0 = 1$ – вертикальна асимптота.

6.12 Правила Лопітала

Theorem 6.12.1 I правило Лопітала

Задані функції f, g – диференційовані на (a, b) та $\forall x \in (a, b) : g'(x) \neq 0$. Також відомо, що:

$$1) \exists \lim_{x \rightarrow b^-} f(x) = 0, \exists \lim_{x \rightarrow b^-} g(x) = 0;$$

$$2) \exists \lim_{x \rightarrow b^-} \frac{f'(x)}{g'(x)} = L.$$

$$\text{Тоді } \exists \lim_{x \rightarrow b^-} \frac{f(x)}{g(x)} = L.$$

Тут можна замість $x \rightarrow b^-$ записати $x \rightarrow a^+$, доведення аналогічне.

Proof.

$$\lim_{x \rightarrow b^-} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{x \rightarrow b^-} \frac{f(x) - f(b)}{g(x) - g(b)} \equiv$$

Функцію f довізнаємо, щоб $f \in C([x, b])$, бо існує ліміт. Тоді за теоремою Коші, $\exists c \in (x, b) :$

$$\frac{f(x) - f(b)}{g(x) - g(b)} = \frac{f'(c)}{g'(c)}. \text{ Тут } x < c < b. \text{ Коли } x \rightarrow b^-, b \rightarrow b^-. \text{ Отже, } c \rightarrow b^-.$$

$$\equiv \lim_{c \rightarrow b^-} \frac{f'(c)}{g'(c)} = L.$$

Випадок, коли $L = \infty$, маємо, що $\frac{g'(x)}{f'(x)} \rightarrow 0$, а тому $\frac{g(x)}{f(x)} \rightarrow 0 \implies \frac{f(x)}{g(x)} \rightarrow \infty$. ■

Example 6.12.2 Обчислити границю $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{x - \sin x}{x^3}$.

Маємо $f(x) = x - \sin x$, $g(x) = x^3$ – обидва неперервні та диференційовані. Також $f(x) \rightarrow 0, g(x) \rightarrow 0$, якщо $x \rightarrow 0$. Тепер з'ясуємо, куди прямує $\frac{f'(x)}{g'(x)}$.

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - \cos x}{3x^2} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{2 \sin^2 \frac{x}{2}}{3x^2} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{2x^2}{3x^2 \cdot 4} = \frac{1}{6}.$$

Всі пункти I правила Лопітала виконуються. Отже, $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{x - \sin x}{x^3} = \frac{1}{6}$.

Theorem 6.12.3 II правило Лопітала

Задані функції f, g – диференційовані на (a, b) та $\forall x \in (a, b) : g'(x) \neq 0$. Також відомо, що:

$$1) \exists \lim_{x \rightarrow b^-} g(x) = +\infty;$$

$$2) \exists \lim_{x \rightarrow b^-} \frac{f'(x)}{g'(x)} = L.$$

$$\text{Тоді } \exists \lim_{x \rightarrow b^-} \frac{f(x)}{g(x)} = L.$$

Тут можна замість $x \rightarrow b^-$ записати $x \rightarrow a^+$, доведення аналогічне.

Proof.

Одразу нехай $\varepsilon > 0$, далі знадобиться

$$\text{Маємо } \lim_{x \rightarrow b^-} \frac{f'(x)}{g'(x)} = L \implies \exists \delta_1 : \forall x : b - \delta_1 < x < b \implies \left| \frac{f'(x)}{g'(x)} - L \right| < \varepsilon.$$

$$\text{Також } \lim_{x \rightarrow b^-} g(x) = +\infty \implies \exists \delta_2 : \forall x : b - \delta_2 < x < b \implies g(x) > 0.$$

Позначимо точки $b - \delta_1 = c_1, b - \delta_2 = c_2$. Розглянемо точку $x > \max\{c_1, c_2\}$, тоді за теоремою Коші,
 $\exists \theta \in (c_1, x) : \frac{f(x) - f(c_1)}{g(x) - g(c_1)} = \frac{f'(\theta)}{g'(\theta)}$. Звідси для точки $\theta \in (c_1, b) : \left| \frac{f(x) - f(c_1)}{g(x) - g(c_1)} - L \right| < \varepsilon$.

Дріб поділимо на $g(x)$. Ми це можемо, оскільки $g(x) > 0$ для $x > \max\{c_1, c_2\}$

$$\frac{f(x) - f(c_1)}{g(x) - g(c_1)} = \frac{\frac{f(x)}{g(x)} - \frac{f(c_1)}{g(c_1)}}{1 - \frac{g(c_1)}{g(x)}} \implies \frac{f(x)}{g(x)} - \frac{f(x) - f(c_1)}{g(x) - g(c_1)} = \frac{f(c_1)}{g(x)} - \frac{f(x) - f(c_1)}{g(x) - g(c_1)} \frac{g(c_1)}{g(x)}.$$

З'ясуємо, куди прямує права частина, якщо $x \rightarrow b^-$. Ми знаємо, що $g(x) \rightarrow +\infty$, ну а $f(c_1), g(c_1)$ – визначені, тоді $\frac{f(c_1)}{g(x)} \rightarrow 0, \frac{g(c_1)}{g(x)} \rightarrow 0$. Дріб $\frac{f(x) - f(c_1)}{g(x) - g(c_1)}$ обмежена за використаною теоремою Коші, тому все чудово.

Отже, $\frac{f(x)}{g(x)} - \frac{f(x) - f(c_1)}{g(x) - g(c_1)} \rightarrow 0$, тож $\left| \frac{f(x)}{g(x)} - \frac{f(x) - f(c_1)}{g(x) - g(c_1)} \right| < \varepsilon$.

За нерівністю трикутника, маємо, що $\left| \frac{f(x)}{g(x)} - L \right| < 2\varepsilon$.

Остаточно, $\exists \lim_{x \rightarrow b^-} \frac{f(x)}{g(x)} = L$.

Випадок, коли $L = +\infty$ ($-\infty$ аналогічно). Ми задаємо $E > 0$, тоді $\exists \delta_1 : \forall x \in (b - \delta_1, b) \Rightarrow \frac{f'(x)}{g'(x)} > E$.

Також $\exists \delta_2 : \forall x \in (b - \delta_2, b) \Rightarrow g(x) > 0$.

Знову позначу $c_1 = b - \delta_1, c_2 = b - \delta_2$. За аналогічними міркуваннями, $\implies \frac{f(x) - f(c_1)}{g(x) - g(c_1)} > E$. де $x > \max\{c_1, c_2\}$.

Оскільки $g(x) \rightarrow \infty$, то $\frac{1}{g(x)} \rightarrow 0$, тобто $-1 < \frac{1}{g(x)} < 1$ для деякого δ' , маємо $c_3 = b - \delta'$. Тому якщо

$$x > \max\{c_1, c_2, c_3\}, \text{ то } \frac{f(x)}{g(x)} = \frac{f(x) - f(c_1)}{g(x) - g(c_1)} + \frac{f(c_1)}{g(x)} - \frac{f(x) - f(c_1)}{g(x) - g(c_1)} \frac{g(c_1)}{g(x)} > E - f(c_1) + E g(c_1) \implies \frac{f(x)}{g(x)} \rightarrow +\infty. \quad \blacksquare$$

Example 6.12.4 Обчислити границю $\lim_{x \rightarrow 0^+} x^x$.

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} x^x = \lim_{x \rightarrow 0^+} e^{x \ln x} = e^{\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\ln x}{\frac{1}{x}}} \quad \boxed{=}$$

Перевіримо цю границю за Лопіталем:

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{(\ln x)'}{\left(\frac{1}{x}\right)'} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\frac{1}{x}}{-\frac{1}{x^2}} = 0.$$

Отже, можемо продовжувати наш ланцюг обчислення:

$$\boxed{=} e^0 = 1$$

Remark 6.12.5 Якщо виникає $x \rightarrow \pm\infty$, то можна застосувати правило Лопіталя, використавши заміну $t = \frac{1}{x}$, де $t \rightarrow 0^\pm$.

Remark 6.12.6 Границю $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x}$ в жодному (!) випадку не можна рахувати за Лопіталем, хоча й результат буде таким самим. Все це тому, що $(\sin x)'$ ми отримали завдяки цієї границі, ми посиляємось на те, що ми знаємо цю границю уже (!). Коротше, замнений круг відносно логічної послідовності виклада.

6.13 Формула Тейлора

Задача цього підрозділу полягає в тому, що ми хочемо навчитись апроксимувати функцію в вигляді многочлена навколо певній точці. Маємо функцію $f(x)$ та точці x_0 .

Перше наближення до многочлену – це буде $y = f(x_0)$. Досить грубе наближення.

Друге наближення до многочлену – це буде $y = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0)$, якщо функція диференційована. А це вже – дотична, яка дає вже нормальне наближення.

Третє наближення до многочлену – це буде $y = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + \frac{f''(x_0)}{2}(x - x_0)^2$, якщо функція двічі диференційована. Ділю я навпіл, тому що я вимагаю, щоб $y'' = f''(x_0)$. Це вже краще наближення, використовуючи знання випуклості функції.
То що, то що, то що...

Definition 6.13.1 Задано функцію f – диференційована n разів в точці x_0 .

Многочленом Тейлора функції f в точці x_0 називається такий многочлен порядку n :

$$P_n(x, x_0) = f(x_0) + \frac{f'(x_0)}{1!}(x - x_0) + \frac{f''(x_0)}{2!}(x - x_0)^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!}(x - x_0)^n.$$

Оскільки ми на кожному наближенні вимагали рівність похідних в точці x_0 , то для многочлена Тейлора має бути теж саме.

Lemma 6.13.2 $f^{(k)}(x_0) = (P_n(x, x_0))^{(k)}(x_0)$.

Зрозуміло.

Я буду собі наближувати щоразу – і тоді в мене виникне певна похибка. Для цієї похибки є теорема, яку наведу після розмови, бо сприйняти буде важко.

Розглянемо функцію f – n разів диференційована в точці x_0 та многочлен Тейлора $P_n(x, x_0)$.

Розглянемо функцію $g(t) = f(x) - P_n(x, t)$, або більш розгорнуто

$$g(t) = f(x) - \left(f(t) + \frac{f'(t)}{1!}(x - t) + \frac{f''(t)}{2!}(x - t)^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(t)}{n!}(x - t)^n \right).$$

$$g(x) = 0$$

$$g(x_0) \stackrel{\text{позн.}}{=} r_n(x, x_0) = f(x) - P(x, x_0), \text{ позначимо це як залишковий член – та сама похибка.}$$

Тут вимагаємо, щоб функція f була n разів диференційована на відрізку $[x_0, x]$, коли в нас $x_0 < x$.
(*)

Також вимагатимемо, щоб функція f мала похідну $n + 1$ порядку на інтервалі (x_0, x) . (**)

Маючи (*), (**), ми можемо знайти похідну функції g , тоді:

$$g'(t) = - \left(f'(t) - \frac{f'(t)}{1!} + \frac{f''(t)}{1!}(x - t) - \frac{2f''(t)}{2!}(x - t) + \frac{f'''(t)}{2!}(x - t)^2 + \dots - \frac{nf^{(n)}(t)}{n!}(x - t)^{n-1} + \frac{f^{(n+1)}(t)}{n!}(x - t)^n \right)$$

$$g'(t) = - \frac{f^{(n+1)}(t)}{n!}(x - t)^n.$$

Згідно з (*), (**) ми можемо сказати, що $g \in C([x_0, x])$ та диференційована в (x_0, x) . Додамо ще функцію $\varphi \neq 0$ з такими самими умовами. Тоді за теоремою Коші,

$$\exists c \in (x_0, x) : \frac{g(x) - g(x_0)}{\varphi(x) - \varphi(x_0)} = \frac{g'(c)}{\varphi'(c)} \implies r(x, x_0) = \frac{\varphi(x) - \varphi(x_0)}{\varphi'(c)} \frac{f^{(n+1)}(c)}{n!}(x - c)^n.$$

Отримали загальну формулу залишкового члена, але мене буде цікавити інший формат.

Тому нехай задано функцію $\varphi(t) = (x - t)^{n+1}$, яка потрапляє під всіма умовами.

Тоді маємо, що

$$r_n(x, x_0) = \frac{\varphi(x) - \varphi(x_0)}{\varphi'(c)} \frac{f^{(n+1)}(c)}{n!}(x - c)^n = \frac{-(x - x_0)^{n+1}}{-(n + 1)(x - c)^n} \frac{f^{(n+1)}(c)}{n!}(x - c)^n = \frac{f^{(n+1)}(c)}{(n + 1)!}(x - x_0)^{n+1}.$$

Таким чином, ми можемо сформулювати теорему:

Theorem 6.13.3 Теорема Тейлора (у формі Лагранжа)

Задано функцію f – диференційована n разів на $[x_0, x]$ при $x_0 < x$ та має похідну $n + 1$ порядку на (x_0, x) . Тоді $\exists c \in (x_0, x)$, така, що функція f представляється у вигляді

$$f(x) = f(x_0) + \frac{f'(x_0)}{1!}(x - x_0) + \dots + \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!}(x - x_0)^n + \frac{f^{(n+1)}(c)}{(n + 1)!}(x - x_0)^{n+1}.$$

Інше представлення формули Тейлора буде таким:

Ми знову розглянемо функцію $g(x) = f(x) - P_n(x, x_0)$, але цього разу ми спробуємо довести, що $f(x) - P_n(x, x_0) = o((x - x_0)^n), x \rightarrow x_0$.

Зрозуміло, що $g(x_0) = g'(x_0) = \dots = g^{(n)}(x_0) = 0$. Тепер обчислимо таку границю:

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{g(x)}{(x - x_0)^n} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{g'(x)}{n(x - x_0)^{n-1}} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{g''(x)}{n(n-1)(x - x_0)^{n-2}} = \dots = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{g^{(n)}(x)}{n!} = 0.$$

Тут ми використовували n разів І правило Лопітала. Таким чином, ми сформулювали теорему:

Theorem 6.13.4 Теорема Тейлора (у формі Пеано)

Задано функцію f – диференційована n разів в точці x_0 . Тоді

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

Remark 6.13.5 Існують такі функції, де в певній точці апроксимація не спрацює. Такі функції називають **неаналітичними**.

Зокрема $f(x) = \begin{cases} e^{-\frac{1}{x^2}}, & x \neq 0 \\ 0, & x = 0 \end{cases}$. У точці $x_0 = 0$ вийде многочлен Тейлора $P_n(x, 0) \equiv 0$.

Основні розклади в Тейлора

Всі вони розглядатимуться в точці $x_0 = 0$, всюди $x \rightarrow x_0$.

I. $e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \dots + \frac{x^n}{n!} + o(x^n)$;

II. $\sin x = \frac{x}{1!} - \frac{x^3}{3!} + \dots + \frac{(-1)^n}{(2n+1)!} x^{2n+1} + o(x^{2n+2})$;

III. $\cos x = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} + \dots + \frac{(-1)^n}{(2n)!} x^{2n} + o(x^{2n+1})$;

IV. $(1+x)^\alpha = 1 + \frac{\alpha x}{1!} + \frac{\alpha(\alpha-1)x^2}{2!} + \dots + \frac{\alpha(\alpha-1)\dots(\alpha-(n-1))x^n}{n!} + o(x^n)$;

V. $\ln(1+x) = x - \frac{x^2}{2} + \dots + (-1)^{n-1} \frac{x^n}{n} + o(x^n)$.

А тепер полягає питання, який розклад використовувати: за Лагранжем чи Пеано. Відповідь на ці питання дадуть приклади нижче.

Example 6.13.6 Обчислити границю функції $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{e^x - 1 - \sin x - \frac{x^2}{2}}{x(1 - \cos x)}$

Маємо, що:

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{e^x - 1 - \sin x - \frac{x^2}{2}}{x(1 - \cos x)} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{e^x - 1 - \sin x - \frac{x^2}{2}}{2x \sin^2 \frac{x}{2}} = 2 \lim_{x \rightarrow 0} \frac{e^x - 1 - \sin x - \frac{x^2}{2}}{x^3} \quad \boxed{=}$$

Розкладемо e^x та $\sin x$ до степеня знаменника:

$$\begin{aligned} \boxed{=} 2 \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 + x + \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{6} + o(x^3) - 1 - x + \frac{x^3}{6} + o(x^4) - \frac{x^2}{2}}{x^3} &= 2 \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\frac{x^3}{6} + o(x^3) + \frac{x^3}{6} + o(x^4)}{x^3} = \\ &= 2 \lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{1}{3} + \frac{o(x^3)}{x^3} + \frac{o(x^4)}{x^3} \right) = 2 \lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{1}{3} + \frac{x^4}{x^3} + \frac{x^5}{x^3} \right) = \frac{2}{3}. \end{aligned}$$

Тобто коли обчислюються ліміти, то тоді краще через Пеано розписувати.

Example 6.13.7 Обчислити $\sin 1^\circ$ із точністю до 10^{-6} .

Для дурних як я: 'із точністю до 10^{-6} ', означає, що реальна відповідь відрізняється від приблизної відповіді не більше ніж на 10^{-6} .

Маємо $f(x) = \sin x$. Розклад цієї формули має такий вигляд:

$$\sin x = \frac{x}{1!} - \frac{x^3}{3!} + \dots + \frac{(-1)^n}{(2n-1)!} x^{2n-1} + \frac{f^{(2n+1)}(c)}{(2n+1)!} x^{2n+1}.$$

У нашому випадку $1^\circ = \frac{\pi}{180}$, тоді $c \in \left(0, \frac{\pi}{180}\right)$. Щоб порахувати з точністю до 10^{-6} , треба, щоб залишковий член був менше за цю похибку, тобто

$$\begin{aligned} \left| \frac{f^{(2n+1)}(c)}{(2n+1)!} x^{2n+1} \right| &< 10^{-6} \\ \left| \frac{\cos c}{(2n+1)!} x^{2n+1} \right| &= \frac{|\cos c| x^{2n+1}}{(2n+1)!} \leq \frac{|x|^{2n+1}}{(2n+1)!} \leq \frac{\pi^{2n+1}}{(2n+1)! 180^{2n+1}} < \frac{1}{(2n+1)! 45^{2n+1}} < \frac{1}{1000000}. \end{aligned}$$

Методом перебору можна отримати, що $n = 2$. Тоді

$$\sin \frac{\pi}{180} \approx \frac{\pi}{180} - \frac{\pi^3}{180^3 3!} = a.$$

Дійсно, якщо порахувати $|\sin 1^\circ - a|$, то різниця не є більше 10^{-6} .

Тобто коли треба приблизне обчислення, то тоді краще через Лагранжа розписувати.

Перше зауваження: насправді, для $n = 1$ різниця вже не перебільшує нашу похибку. Проте це дуже складно перевірити в нерівностях.

Друге зауваження: якщо оцінювати нерівності дуже грубо, то тоді n було б великим числом, що не є гарно. Нас не цікавить дуже точне значення.

Додаткові матеріали на згодом

1. Загальне означення границі числової послідовності (не стандартне звичне)
2. Ірраціональність числа e
3. Теорема: будь-яка послідовність має монотонну підпослідовність
4. Загальне означення границі функції
5. Порядок однієї функції відносно іншої
6. Функція Діріхле, Рімана та їхня поведінка на неперервність
7. Теорема про монотонну функцію, яка має розриви (кількість якої не більше, ніж зліченна)
8. Теорема про обернену функцію, якщо функція задана не на відрізку
9. Формула Фаа-ді-Бруно
10. Теорема Дарбу
11. Друга достатню умову випуклості функції
12. Теорема: f - опукла \iff дотична в т. x_0 лежить нижче графіка
13. Узагальнене означення асимптоти
14. Випукла функція на (a, b) є неперервною

Література та джерела

1. Викладачі ІІСА: Подколзін Г.Б., Богданський Ю.В.
2. Про дійсні числа та дедекіндовий переріз
3. Трушин Б.В.
4. Лекторий ФПМИ: Лукашов А.Л.
5. Дороговцев А.Я. "Математический анализ"
6. Бойцев А.А.