

Analiza Matematyczna

Rafał Włodarczyk

INA 1 Sem. 2023

1 Wykład pierwszy

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

Definicja 1.0.1. Zasada indukcji matematycznej. Niech będzie dana własność liczb naturalnych, która czyni zadość warunkom:

1. Liczba 1 posiada tę własność.
2. Jeżeli liczba n posiada tę własność, to posiada ją również liczba $n + 1$.

Zasada indukcji matematycznej mówi, że przy tych założeniach każda liczba naturalna posiada tę własność.

Przykład 1.0.1. $1 + 2 + \dots + n = \frac{n(n+1)}{2}$.

1. $n = 1$ $L = 1$ $P = \frac{1(1+1)}{2}$
2. $\forall_{n \geq 1} 1 + 2 + \dots + n = \frac{n(n+1)}{2} \implies 1 + 2 + \dots + n + n + 1 = \frac{(n+1)(n+2)}{2}$.
Z założenia indukcyjnego mamy:
 $1 + 2 + \dots + n + (n + 1) = \frac{n(n+1)}{2} + n + 1 = (n + 1)\left(\frac{n}{2} + 1\right) = \frac{(n+1)(n+2)}{2}$
Na mocy zasady indukcji matematycznej teza zachodzi \square .

Przykład 1.0.2. Nierówność Bernoulli'ego. Niech $a \geq 1$, wówczas dla dowolnego n naturalnego zachodzi nierówność: $(1 + a)^n \geq 1 + na$

1. $n = 1$, $L = (1 + a)^1 = 1 + a$, $P = 1 + 1 \cdot a = 1 + a$, $L = P$, własność zachodzi
2. $\forall_{n > 1} (1 + a)^n \geq 1 + na \implies (1 + a)^{n+1} \geq 1 + (n + 1) \cdot a$
 $(1 + a)^{n+1} = (1 + a)^n \cdot (1 + a) \stackrel{\text{ind.}}{\geq} (1 + na)(1 + a)$
 $(1 + a)^{n+1} \geq 1 + a + na + na^2 = 1 + (n + 1)a + na^2 \geq 1 + (n + 1) \cdot a$
Na mocy zasady indukcji matematycznej nierówność jest prawdziwa.

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

Definicja 1.0.2. Liczby wymierne \mathbb{Q} to liczby postaci:

$$\frac{p}{q}, \text{ gdzie } p, q \in \mathbb{Z} \text{ oraz } q \neq 0$$

Zbiór liczb wymiernych jest liniowo uporządkowany, to znaczy każde dwie liczby wymierne można połączyć jednym ze znaków:

$$a < b, a > b, a = b.$$

Dodawanie \mathbb{Q}

$$\frac{p_1}{q_1} + \frac{p_2}{q_2} = \frac{p_1 q_2 + p_2 q_1}{q_1 q_2}$$

Mnożenie \mathbb{Q}

$$\frac{p_1}{q_1} \cdot \frac{p_2}{q_2} = \frac{p_1 p_2}{q_1 q_2}$$

Własności:

$$1. \text{ Przemienność } a + b = b + a$$

$$2. \text{ Łączność } a + (b + c) = (a + b) + c$$

$$3. \text{ Rozdzielność } (a + b)c = ac + bc$$

Uwaga. Jeżeli $(a < c \wedge c < b) \iff a < c < b$. Mówimy wtedy, że c leży między liczbami a i b .

Z twierdzenia Pitagorasa $1^2 + 1^2 = x^2 \implies x = \sqrt{2}$. D-d niewymierności $\sqrt{2}$ jako ćwiczenie.

Własność - zbiór \mathbb{Q} jest zbiorem gęstym.

Niech a, b będą dowolnymi liczbami wymiernymi, takimi że $a < b$. Wówczas istnieje liczba c leżąca między liczbami a i b .

$$\text{np.: } c = \frac{a+b}{2}$$

Liczby rzeczywiste \mathbb{R}

Definicja 1.0.3. Mówimy, że zbiór jest ograniczony jeżeli istnieją takie dwie liczby m, M , że:

$$\forall_{x \in X} m \leq x \leq M, X \in [m, M]$$

Uwaga analogicznie ograniczoność z dołu i góry osobno.

Definicja 1.0.4. Kres górny zbioru. Niech X będzie zbiorem ograniczonym z góry.

$$\forall_{x \in X} \exists_M x \leq M$$

Kresem górnym zbioru nazywamy najmniejszą liczbę ograniczającą zbiór X z góry.

$(-\infty, 1)$: kres 1

$(-\infty, 1) \cup (1, 2]$: kres 2

1.1 Aksjomat Zupełności

Każdy ograniczony z góry podzbiór liczb rzeczywistych ma kres górny.

Definicja 1.1.1. Kres dolny zbioru nazywamy największą liczbą ograniczającą zbiór X z dołu.

$$\forall_{x \in X} \exists_m m \leq x$$

$(-1, +\infty)$: kres -1

$(2, +\infty)$: kres 2

Kres górny zbioru i kres dolny zbioru to pojęcia dualne.

1.2 Wartość bezwzględna

$$|a| = \begin{cases} a, & a \geq 0 \\ -a, & a < 0 \end{cases}$$

Przykład 1.2.1. Własności:

- $|a| = |-a|$
- $|ab| = |a| \cdot |b|$
- $|a + b| \leq |a| + |b|$
- $|a - b| \leq |a| + |b|$
- $|a| - |b| \leq |a - b|$

Definicja 1.2.1. Współczynnik Newtona. Zakładamy że n, k są liczbami naturalnymi, takimi że $n \geq k$. Współczynnik Newtona określam wzorem:

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

Własności:

1. $\binom{n}{0} = \binom{n}{n} = 1$
 2. $\binom{n}{k} = \binom{n}{n-k}$
 3. $\binom{n+1}{k} = \binom{n}{k-1} + \binom{n}{k}$
 4. $\binom{n}{k+1} = \binom{n}{k} \cdot \frac{n-k}{k+1}$
- Symbol sumy \sum
 - Symbol iloczynu Π

Definicja 1.2.2. Nierówność Cauchy'ego - Schwarz. Niech a_1, a_2, \dots, a_n oraz b_1, b_2, \dots, b_n będą dowolnymi liczbami rzeczywistymi. Wówczas zachodzi nierówność:

$$(a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2)(b_1^2 + b_2^2 + \dots + b_n^2) \geq (a_1b_1 + a_2b_2 + \dots + a_nb_n)^2$$

lub równoważnie:

$$\sum_{i=1}^n a_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n b_i^2 \geq \left(\sum_{i=1}^n a_i b_i\right)^2$$

2 Wykład drugi

Definicja 2.0.1. Ciąg liczbowy to funkcja z \mathbb{N} w \mathbb{R} . Stosujemy zapis a_1, a_2, \dots, a_n . Przykłady:

- $a_n = c + (n-1)d$ - arytmetyczny
- $b_n = cq^{n-1}$ - geometryczny
- $c_n = n!$

- $d_{n+1} = 2^{d_n}$ - rekurencyjny

Definicja 2.0.2. Ciąg monotoniczny.

1. a_n jest rosnący $\iff \forall n \in \mathbb{N} a_n < a_{n+1}$
2. a_n jest malejący $\iff \forall n \in \mathbb{N} a_n > a_{n+1}$
3. a_n jest niemalejący $\iff \forall n \in \mathbb{N} a_n \leq a_{n+1}$
4. a_n jest nierosnący $\iff \forall n \in \mathbb{N} a_n \geq a_{n+1}$

Analogicznie definiujemy ciąg monotoniczny od pewnego miejsca:

1. a_n jest rosnący od n_0 $\iff \forall n > n_0 a_n < a_{n+1}$

Definicja 2.0.3. Liczbą graniczną ciągu a_n nazywamy liczbę g , taką że:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists n_0 \forall n > n_0 |a_n - g| < \varepsilon$$

Piszemy wtedy: $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = g$ lub $a_n \rightarrow g$.

$$|a_n - g| < \varepsilon \iff -\varepsilon < a_n - g < \varepsilon \iff g - \varepsilon < a_n < g + \varepsilon$$

3 Wykład trzeci

Twierdzenie 3.0.1. Twierdzenie (o ciągu monotonicznym i ograniczonym)

a) Ciąg rosnący i ograniczony z góry jest zbieżny.

$$\forall n > n_0 a_n \leq a_{n+1} \text{ i } \forall n \in \mathbb{N} a_n < M \implies \exists \lim_{n \rightarrow \infty} a_n$$

b) Ciąg malejący i ograniczony z dołu jest zbieżny.

$$\forall n > n_0 a_n \geq a_{n+1} \text{ i } \forall n \in \mathbb{N} a_n > m \implies \exists \lim_{n \rightarrow \infty} a_n$$

Idea dowodu:

$$A = \{a_{n_0+1}, a_{n_0+2}, \dots, a_n, \dots\} \in \mathbb{R}$$

A - ograniczony, istnieje kres górny zbioru A

Każdy ograniczony podzbiór liczb rzeczywistych ma kres

$$\text{czyli } \sup(A) \text{ (??) } \sup(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n$$

Przykład 3.0.1. Rozważmy następujący ciąg rekurencyjny: $a_1 = \sqrt{2}$ $a_{n+1} = \sqrt{2 + a_n}$

Idea dowodu indukcyjnego:

1. $a_n \leq 2$, indukcja po n
2. $a_n \leq a_{n+1}$, indukcja po n . $a_n \leq a_{n+1} \implies a_{n+1} \leq a_{n+2}$
3. $\sqrt{2 + a_n} \leq \sqrt{2 + a_{n+1}}$ kwadrat stronami rozwiązuje krok indukcyjny

$$\begin{aligned} \forall n \geq 1 a_n \leq 2 &\implies a_{n+1} \leq 2 \\ a_{n+1} = \sqrt{2 + a_n} &\leq_{z.ind} \sqrt{2 + 2} = 2 \end{aligned}$$

Na mocy twierdzenia o ciągu monotonicznym i ograniczonym istnieje:

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

$$a_{n+1} = \sqrt{2 + a_n}, \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = g = \lim_{n \rightarrow \infty} a_{n+1} = g$$

$$\begin{aligned} g &= \sqrt{2 + g} \\ g^2 - g - 2 &= 0 \\ \Delta &= 9 = 3^2 \end{aligned}$$

$$g_1 = \frac{1+3}{2} = 2 \text{ lub } g_2 = \frac{1-3}{2} = -1, \text{ które nie zachodzi, zatem } \lim a_n = g_1$$

Definicja 3.0.1. Podciąg ciągu

Niech a_n będzie dowolnym ciągiem. Niech n_1, n_2, \dots, n_k będzie pewnym rosnącym ciągiem liczb naturalnych. Wówczas ciąg $a_{n_k} = (a_{n_1}, a_{n_2}, a_{n_3}, \dots)$ Nazywamy podciągiem ciągu.

Przykład 3.0.2. Rozważmy następujące przykłady ($\mathbb{N} = \{1, 2, 3, 4, \dots\}$):

a) $a_n = (-1)^n, n \in \mathbb{N}$

$a_{2k} = (-1)^n = 1, k \in \mathbb{N}$

(a_2, a_4, a_6, \dots) - podciąg o wyrazach parzystych.

b) $a_{2k-1} = (-1)^{2k-1} = -1, n \in \mathbb{N}$

(a_1, a_3, a_5, \dots) - podciąg o wyrazach nieparzystych.

$S = \{1, -1\}$

c) $(1, \frac{1}{2}, 3, \frac{1}{4}, 5, \frac{1}{6}, \dots)$

$a_{2k-1} = 2k - 1$ - podciąg o wyr. nieparzystych.

$a_{2k} = \frac{1}{2k}$ - podciąg o wyr. parzystych.

$S = \{0, \infty\}$ d) $\sin(\frac{n\pi}{3})$ - $\text{plot}(\sin(\frac{n\pi}{3}), (n, 1, 17)) \leftarrow \text{wolframalpha}$

Definicja 3.0.2. Liczba s jest punktem skupienia ciągu $a_n \iff s$ jest granicą właściwą lub niewłaściwą pewnego podciągu. Oznaczenie S - zbiór punktów skupienia.

Jeśli $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \infty \implies a_n$ ma granicę niewłaściwą $+\infty$

- $\sup()$ - superior - kres górny

- $\inf()$ - inferior - kres dolny

Definicja 3.0.3. Granica górna ciągu a_n to kres górny granic podciągu a_n .

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sup(a_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n$$

Definicja 3.0.4. Granica dolna ciągu a_n to kres dolny granic podciągu a_n .

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \inf(a_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n$$

$\lim \inf(a_n) \leq \lim \sup(a_n)$, równość dla granicy ciągu.

Twierdzenie 3.0.2. Twierdzenie (Bolzano - Weierstrassa). Każdy ciąg ograniczony ma podciąg zbieżny. (English Wikipedia)

D-d. $\forall_{n \in \mathbb{N}} m \leq a_n \leq M$ Dzielimy przedział $[m_1, M_1]$ na dwa podprzedziały: $[m_1, \frac{m_1+M_1}{2}]$, $[\frac{m_1+M_1}{2}, M_1]$. Przynajmniej w jednym z przedziałów jest nieskończenie wiele wyrazów ciągu.

Oznaczmy tę połówkę przez $[m_2, M_2]$. Postępujemy tak dalej i mamy:

$$\forall_{k \in \mathbb{N}} m_1 \leq m_k \leq a_{n_k} \leq M_k \leq M_1$$

M_k malejący i ograniczony \implies zbieżny g_1

m_k rosnący i ograniczony \implies zbieżny g_2

$$g_1 = g_2 = g$$

$$M_k - m_k = \frac{M_1 - m_1}{2}$$

$$M_k \rightarrow g_1; m_k \rightarrow g_2, \text{ ponieważ } \frac{M_1 - m_1}{2^k} \rightarrow 0$$

Definicja 3.0.5. Ciąg a_n nazywamy ciągiem Cauchy'ego, wtedy i tylko wtedy, gdy:

$$\forall_{\varepsilon > 0} \exists_{n_0} \forall_{n, m > n_0} |a_n - a_m| < \varepsilon.$$

Twierdzenie 3.0.3. Ciąg liczb rzeczywistych jest zbieżny \iff jest ciągiem Cauchy'ego.

Przykład 3.0.3. $x_n = \frac{1}{0!} + \frac{1}{1!} + \frac{1}{2!} + \frac{1}{3!} + \frac{1}{4!} + \dots$

$$x_1 = 1, x_2 = 2, x_3 = 2 + 1/2.$$

1. x_n jest rosnący $x_{n+1} - x_n = \frac{1}{(n+1)!} > 0 \iff x_{n+1} > x_n$
2. x_n jest ograniczony (pamiętając, że $\forall_{n \geq 3} 2^n \leq n!$ czyli $\frac{1}{4!} < \frac{1}{2^4}, \frac{1}{5!} < \frac{1}{2^5}$)...
 Dla $n \geq 3$ $x_n = \frac{1}{0!} + \frac{1}{1!} + \frac{1}{2!} + \frac{1}{3!} + \frac{1}{4!} + \dots \leq$
 $2 + \frac{1}{2} + \frac{1}{6} + \frac{1}{2^4} + \frac{1}{2^5} + \dots + \frac{1}{2^n}$
 $\frac{1}{2^4} \cdot \frac{1}{1 - \frac{1}{2}} = \frac{1}{2^3}$
 Istnieje $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = e = 2.7182\dots$
 $sum(1/k!, (k, 0, 300)) \leftarrow \text{wolframalpha}$

Twierdzenie 3.0.4. Liczba eulera wyraża się wzorem:

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

Twierdzenie 3.0.5. Niech a_n będzie dowolnym ciągiem takim, że: $\lim_n \implies \infty a_n = \infty$.
 Wówczas:

$$\lim_n \implies \infty (1 + \frac{1}{a_n})^{a_n} = e, (1 - \frac{1}{a_n})^{a_n} = \frac{1}{e}$$

Przykład 3.0.4. $\lim((1 + \frac{1}{2^n})^{2^n})^{\frac{1}{2}} = e^{\frac{1}{2}} = \sqrt{e}$

Własność: $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = g_1 \wedge \lim_{n \rightarrow \infty} b_n = g_2 \implies \lim_{n \rightarrow \infty} (a_n^{b_n}) = g_1^{g_2}$

Przykład 3.0.5. $\lim(1 - \frac{1}{n})^{n/2} = \lim((1 - \frac{1}{n})^n)^{\frac{n}{2n}} = (\frac{1}{e})^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{\sqrt{e}}$

Wskazówka: $\lim((1 + \frac{1}{2^n})^{n+1}, n \rightarrow \infty)$

Definicja 3.0.6. Szereg o wyrazach nieujemnych. Dla dowolnego ciągu a_1, a_2, \dots, a_n o wyrazach nieujemnych, tworzymy ciąg sum częściowych:

$$S_1 = a_1, S_2 = a_1 + a_2, S_3 = a_1 + a_2 + a_3, \dots, S_N = a_1 + a_2 + \dots + a_N$$

Przykładowo dla e $S_0 = \frac{1}{0!}, S_1 = \frac{1}{0!} + \frac{1}{1!} \dots$
 Jeżeli ciąg S_n jest zbieżny to piszemy, że:

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} S_N$$

(granica to suma szeregu)

$$S_1 \leq S_2 \leq S_3 \leq S_N < M$$

Przykład 3.0.6. $apart(1/(n \cdot (n+1)), n) \leftarrow \text{wolframalpha}$

$$\begin{aligned} \frac{1}{1 \cdot 2} + \frac{1}{2 \cdot 3} + \dots + \frac{1}{n(n+1)} &= S_N \\ S_1 &= \frac{1}{2}, S_2 = \frac{1}{1 \cdot 2} + \frac{1}{2 \cdot 3}, \text{ zatem:} \\ \frac{1}{1 \cdot 2} + \frac{1}{2 \cdot 3} + \dots + \frac{1}{n(n+1)} &= \\ = \frac{1}{1} - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} - \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n} - \frac{1}{n+1} &= \\ = 1 - \frac{1}{n+1}, \text{ finalnie:} \\ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n(n+1)} &= \lim_{n \rightarrow \infty} S_N = \lim_{n \rightarrow \infty} (1 - \frac{1}{n+1}) = 1 \end{aligned}$$

Przykład 3.0.7. $a + aq + \dots + aq^n = a \cdot \frac{1-q^{n+1}}{1-q}$, dla $|q| < 1$:

$$\sum_{n=0}^{\infty} aq^n = \lim_{n \rightarrow \infty} a \cdot \frac{1-q^{n+1}}{1-q} = \frac{a}{1-q}$$

Przykład 3.0.8. $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} = e$

Przykład 3.0.9. Szereg harmoniczny. $H_N = \sum_{n=1}^N \frac{1}{n}$, $\lim_{N \rightarrow \infty} H_N = \infty$, wolny wzrost do ∞
 $H_{2^{n+1}} = \frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2+1} + \frac{1}{2+2} + \frac{1}{2^2+1} + \frac{1}{2^2+2} + \frac{1}{2^2+3} + \frac{1}{2^3} + \frac{1}{2^3+1} + \frac{1}{2^3+2} + \frac{1}{2^3+3} + \dots + \frac{1}{2^3+2^3} + \frac{1}{2^n+1} + \frac{1}{2^n+2} + \dots + \frac{1}{2^n+2^n}$

$$\begin{aligned} \frac{1}{1} + \frac{1}{2} &= \frac{3}{2} \\ \frac{1}{2+1} + \frac{1}{2+2} &\geq 2 \cdot \frac{1}{2+2} = \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2^2+1} + \frac{1}{2^2+2} + \dots &\geq 4 \cdot \frac{1}{2^2+2^2} = \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2^3+1} + \frac{1}{2^3+2} + \dots &\geq 8 \cdot \frac{1}{2^3+2^3} = \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2^n+1} + \frac{1}{2^n+2} + \dots &\geq 2^n \cdot \frac{1}{2^n+2^n} = \frac{1}{2} \\ H_{2^{n+1}} &\geq \frac{3}{2} + \frac{1}{2} \cdot n = 1 + \frac{1}{2}(n+1) \\ H_{2^{n+1}} &\geq 1 + \frac{n+1}{2} \\ H_{2^n} &\geq 1 + \frac{n}{2} \end{aligned}$$

Założmy, że $2^N = k \implies N = \log_2(k)$

$$H_k \geq 1 + \frac{\log_2(k)}{2} \rightarrow \infty$$

Na mocy twierdzenia o dwóch ciągach $H_k \rightarrow \infty$

Następny wykład - kryteria zbieżności szeregów: kryterium kondensacyjne.

Definicja 3.0.7. Warunek konieczny zbieżności szeregów. Jeżeli $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ jest zbieżny, to $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$. (dla $\sum_{n=1}^{\infty} a_n < \infty$).

Szereg $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{n+1}$ jest rozbieżny, bo nie jest spełniony warunek konieczny
 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{n+1} = 1$

Warunek konieczny nie jest wystarczający.

4 Wykład czwarty

4.1 Kryteria zbieżności szeregów

Twierdzenie 4.1.1. Szereg o wyrazach dodatnich jest zbieżny \iff jest ograniczony.

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n, a_n > 0, \text{ czy } S_n = \sum_{n=1}^{\infty} a_n$$

$S_{N+1} - S_N = a_{N+1} > 0$, S_N - rosnący. Jeżeli S_N jest ograniczony to jest zbieżny.

Wniosek:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2}, \text{ dla } n \geq 2:$$

$$S_N = \sum_{n=1}^N \frac{1}{n^2} = 1 + \sum_{n=2}^N \frac{1}{n^2} \leq 1 + \sum_{n=2}^N \frac{1}{n(n-1)} = 1 + \sum_{n=2}^N \left(\frac{1}{n-1} - \frac{1}{n} \right) = 2 - \frac{1}{N} \leq 2$$

Twierdzenie 4.1.2. Kryterium porównawcze. $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$, $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ oraz $a_n, b_n > 0$:

Jeżeli $\exists_{n_0} \forall_{n > n_0} a_n \leq b_n$ i $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ jest zbieżny, to $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ jest zbieżny.

Twierdzenie 4.1.3. Jeżeli $\sum_{n > n_0}^{\infty} \leq \sum_{n > n_0}^{\infty}$ i $\sum_{n > n_0}^{\infty} a_n = \infty$ (a_n rozbieżny), to wówczas $\sum_{n > n_0}^{\infty} b_n = \infty$ (b_n rozbieżny).

Wniosek: $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^p} = \infty$ dla $p \leq 1$, bo $\frac{1}{n^p} \geq \frac{1}{n}$, $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} = \infty$

Twierdzenie 4.1.4. Twierdzenie o zagęszczaniu. Zakładamy, że $a_n \geq 0$ i $a_{n+1} \leq a_n$.

Wówczas $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ jest zbieżny $\iff \sum_{n=1}^{\infty} 2^n a_{2^n}$ jest zbieżny.

Przykład 4.1.1. Rozważmy poniższy przykład ciągu:

$$a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6 + a_7 + a_8 \implies tw.zag$$

$$2 \cdot a_2 + 4 \cdot a_4 + 8 \cdot a_8$$

Przykład 4.1.2. Zastosowanie Tw. o zagęszczaniu.

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^p}, p \in \mathbb{R} \text{ zbieżny} \iff \sum_{n=1}^{\infty} 2^n \left(\frac{1}{2^n}\right)^p \text{ jest zbieżny.}$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} 2^n \left(\frac{1}{2^n}\right)^p = \sum_{n=1}^{\infty} 2^n \frac{1}{2^{np}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^{np-n}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^{n(p-1)}}$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^{n(p-1)}} \text{ jest zbieżny dla } p > 1$$

Wniosek 1: $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^p}$ jest zbieżny dla $p > 1$ i rozbieżny dla $p \leq 1$

Definicja 4.1.1. Kryterium d'Alemberta: $\sum_{n=1}^{\infty} a_n, a_n \geq 0$:

- Jeżeli $\exists_{n_0} \forall_{n > n_0} \frac{a_{n+1}}{a_n} \leq q < 1$, to $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ jest zbieżny.
- Jeżeli $\exists_{n_0} \forall_{n > n_0} \frac{a_{n+1}}{a_n} \geq 1$, to $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ jest rozbieżny.
- Jeżeli $\exists_{n_0} \forall_{n > n_0} \frac{a_{n+1}}{a_n} = 1$, to kryterium d'Alemberta nie rozstrzyga zbieżności.

Idea d-d:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sup \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = q, q < 1$$

$$\left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| < q$$

$$a_{n+1} < a_n q$$

$$a_n < a_0 q^{n-1}$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n < \sum_{n=1}^{\infty} a_0 q^{n-1} - \text{zbieżne}$$

Przykład 4.1.3. Przykład: $\sum_{n=1}^{\infty} a_n = \frac{n!}{n^n}$:

$$\frac{a_{n+1}}{a_n} = \frac{\frac{(n+1)!}{(n+1)^{n+1}}}{\frac{n!}{n^n}} = \frac{n^n}{(n+1)^n} = \frac{1}{\left(\frac{n+1}{n}\right)^n} = \frac{1}{\left(1+\frac{1}{n}\right)^n}$$

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

Z kryterium d'Alemberta szereg jest zbieżny.

Przykład 4.1.4. Przykład: $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n!}{2^n}$ jest rozbieżny. ($\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n!}{2^n} = \infty$)

Przykład 4.1.5. Przykład: $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} = \infty$

$$\frac{a_{n+1}}{a_n} = \frac{\frac{1}{n+1}}{\frac{1}{n}} = \frac{n}{n+1} \rightarrow 1 \text{ Kryterium d'Alamberta nic nie powie.}$$

Przykład 4.1.6. Przykład: $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n(n+1)}$

$$\sum_{n=1}^N \frac{1}{n(n+1)} = \sum_{n=1}^N \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n+1} \right) = 1 - \frac{1}{N+1} \rightarrow 1$$

$$\frac{a_{n+1}}{a_n} = \dots = \frac{n^2+n}{n^2+3n+2} = 1 \text{ Kryterium d'Alamberta nic nie powie.}$$

Simplify (wolframalpha):

$$\frac{(n+1)!}{(n+1)^{n+1}} \cdot \frac{n^n}{n!} = \frac{n^n}{(n+1)^n}$$

discreteplot($n^2, (n, 1, 20)$) (wolframalpha)

discreteplot($n^2, n, 1, 20$) (mathematica)

Definicja 4.1.2. Kryterium Cauchy'ego. $\sum_{n=1}^{\infty} a_n \geq 0$

1. Jeżeli $\exists_{n_0} \forall_{n > n_0} \sqrt[n]{a_n} \leq q < 1$, to $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ jest zbieżny.
2. Jeżeli $\exists_{n_0} \forall_{n > n_0} \sqrt[n]{a_n} \geq 1$, to $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ jest rozbieżny.
3. Jeżeli $\exists_{n_0} \forall_{n > n_0} \sqrt[n]{a_n} = 1$, to kryterium Cauchy'ego nie rozstrzyga zbieżności.

Idea:

$\sqrt[n]{|a_n|} < q$, $0 < q < 1$ czyli $|a_n| < q^n$ więc $a_n < q^n$ zatem $\sum_{n=1}^{\infty} q^n$ zbieżny.

Przykład 4.1.7. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2}{2^n}$, $a_n = \frac{n^2}{2^n}$
z kryterium Cauchy'ego: $\sqrt[n]{a_n} = \frac{\sqrt[n]{n^2}}{2} = \frac{1}{2} < 1$ - zbieżny

Przykład 4.1.8. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{7^n}{2^n + 5^n}$, $a_n = \frac{7^n}{2^n + 5^n}$
z kryterium Cauchy'ego: $\sqrt[n]{a_n} = \frac{7}{\sqrt[n]{2^n + 5^n}} = \frac{7}{5} > 1$ - rozbieżny

Przykład 4.1.9. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{5^n}{5^n + 3^n}$
kryterium Cauchy'ego nie działa: $\sqrt[n]{a_n} = \frac{5}{\sqrt[n]{5^n + 3^n}} \Rightarrow 1$
 $a_n = \frac{5^n}{5^n + 3^n}$, sprawdźmy warunek konieczny zbieżności:
 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{5^n}{5^n + 3^n} = 1 \neq 0$
Ciąg jest rozbieżny.

Definicja 4.1.3. Zbieżność bezwzględna. Rozważmy szereg $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ o wyrazach dowolnych. Mówimy, że szereg $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ jest zbieżny bezwzględnie jeśli: $\sum_{n=1}^{\infty} |a_n|$ jest zbieżny.

Przykład 4.1.10. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n n^2}{2^n}$ jest zbieżny bezwzględnie.
 $\sum_{n=1}^{\infty} \left| \frac{(-1)^n n^2}{2^n} \right| = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2}{2^n} < \infty$
 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2}{2^n}$ jest zbieżny (kryterium d'Alemberta)

FAKT. Badanie zbieżności bezwzględnej szeregu sprowadza się do badania zbieżności szeregu o wyrazach nieujemnych.

Twierdzenie 4.1.5. Zbieżność bezwzględna implikuje zwykłą zbieżność.

$$\sum_{n=1}^{\infty} |a_n| \text{ jest zbieżny } \Rightarrow \sum_{n=1}^{\infty} a_n \text{ zbieżny.}$$

Uwaga: twierdzenie w drugą stronę nie działa.

Przykład 4.1.11. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n}$ nie jest zbieżny bezwzględnie, bo:
 $\sum_{n=1}^{\infty} \left| \frac{(-1)^n}{n} \right| = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} = \infty$

Twierdzenie 4.1.6. Kryterium Abela (Dirichleta). Niech zachodzą następujące warunki:

1. $a_n \geq 0$
2. $a_1 \geq a_2 \geq \dots \geq a_n \geq \dots$
3. $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$

Wówczas:

$\sum_{n=1}^{\infty} a_n (-1)^n$ jest zbieżny

Przykład 4.1.12. Pokażmy, że szereg $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n}$ jest zbieżny. Z kryterium Abela:
 $a_n = \frac{1}{n} \geq 0 \wedge a_1 \geq a_2 \geq \dots \geq a_n \geq \dots \wedge \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$ Szereg jest zatem zbieżny.

Przykład 4.1.13. $\sum_{n=1}^{\infty} a_n (-1)^{n+1} = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)(-1)^n a_n = -1 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n a_n$
 Dalej z kryterium Abela...

Ciągi to funkcje $\mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$

4.2 Funkcje

Analizujemy funkcje $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$

Definicja 4.2.1. Dziedzina funkcji (domain): $dom(f)$ - zbiór wszystkich x dla których funkcja jest określona.

Definicja 4.2.2. Zbiór wartości (range): $rng(f) = \{f(x) : x \in dom(f)\}$

Definicja 4.2.3. Wykres funkcji (graph): $G(f) = \{(x, f(x)) : x \in dom(f)\}$

Definicja 4.2.4. Funkcja różnowartościowa (one-to-one function):

$$\forall_{x,y \in A} x \neq y \implies f(x) \neq f(y)$$

Uwaga. Jeśli $f : A \rightarrow B$ jest różnowartościowa, to istnieje dokładnie jedna funkcja $f^{-1} : rng(f) \rightarrow A$, taka że: $\forall_{x \in A} f^{-1}(f(x)) = x$ oraz $\forall_{y \in rng(f)} f(f^{-1}(y)) = y$.

Definicja 4.2.5. Funkcje monotoniczne $f : A \rightarrow B$:

1. $\forall x, y \in A (x < y \implies f(x) < f(y))$ - rosnąca
2. $\forall x, y \in A (x < y \implies f(x) > f(y))$ - malejąca
3. $\forall x, y \in A (x < y \implies f(x) \leq f(y))$ - niemalejąca (słabo rosnąca)
4. $\forall x, y \in A (x < y \implies f(x) \geq f(y))$ - nierosnąca (słabo malejąca)

Definicja 4.2.6. Złożenie funkcji $f : A \rightarrow B, g : B \rightarrow C$ wówczas:

$$\begin{aligned} g \circ f &: A \rightarrow C \\ (g \circ f)(x) &= g(f(x)) \end{aligned}$$

Przykład 4.2.1. Rozważmy następujące funkcje i ich złożenia:

$$f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, g : \mathbb{R} \rightarrow [-1, 1]$$

$$f(x) = x^3 + 1, g(y) = \sin(y)$$

$$g \circ f(x) = g(f(x)) = \sin(f(x)) = \sin(x^3 + 1)$$

Przykład drugi:

$$g : \mathbb{R} \rightarrow [-1, 1], f : [-1, 1] \rightarrow \mathbb{R}$$

$$f \circ g(x) = f(g(x)) = f(\sin(x)) = \sin^3(x) + 1$$

5 Wykład piąty

Funkcje elementarne.

1. $f(x) = ax + b$ - funkcja liniowa
2. $f(x) = ax^2 + bx + c$ - funkcja kwadratowa
3. $W(x)$ - wielomian (wymierna)
4. $f(x) = a^x$, $a > 0$ - funkcja wykładnicza
 $a^b \cdot a^c = a^{b+c}$; $(a^b)^c = a^{b \cdot c}$
5. $f(x) = \log_a(x)$, $a > 0$ - funkcja logarytmiczna, odwrotna do $f(x) = a^x$
 $\log_a(x \cdot y) = \log_a(x) + \log_a(y)$;
 $\log_a(x^y) = y \log_a(x)$
Wzór na zamianę podstawy logarytmu:
 $\log_a(x) = \frac{\log_b(x)}{\log_b(a)}$
6. e - Liczba Eulera - $e \approx 2.7172$
 $\log_e(x) = \ln(x)$
 $\log_a(x) = \ln(x) \cdot \log_a(e)$

5.1 Trygonometria

$$\begin{aligned}e^{it} &= \cos t + i \sin t \\ \cos t &= \operatorname{Re}(e^{it}) \\ \sin t &= \operatorname{Im}(e^{it})\end{aligned}$$

Szeregi liczby Eulera:

- $\sum_{k=0}^{\infty} \frac{(i-t)^k}{k!} = e^{it}$
- $e^x = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{x^k}{k!}$
- $\sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} [\text{sum}(1k!, (k, 0, 1000))]$

Zobaczmy wzór:

$$\begin{aligned}\cos(x+y) &= \cos(x)\cos(y) - \sin(x)\sin(y) \\ e^{ix} \cdot e^{iy} &= e^{ix+iy} = e^{i(x+y)} \stackrel{\text{def}}{=} \cos(x+y) + i \sin(x+y) \\ (\cos x + i \sin x)(\cos y + i \sin y) &= (\cos x)(\cos y) + (\cos x)(\sin y)i + (\sin x)(\cos y) + i^2 \sin x \sin y \\ ((\cos x) + (\cos y) - (\sin x)(\sin y)) &+ i((\cos x)(\sin y) + (\sin x)(\cos y)) \\ \operatorname{Re} = \operatorname{Re}, \operatorname{Im} = \operatorname{Im}, &\text{ a zatem d-d.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Funkcje } \operatorname{tg}(x), \operatorname{ctg}(x), \operatorname{tg}(x) &= \frac{\sin(x)}{\cos(x)}, \operatorname{ctg}(x) = \frac{\cos(x)}{\sin(x)} \\ \operatorname{plot}(\tan(x), (x, -20, 20))\end{aligned}$$

5.2 Funkcje odwrotne do trygonometrycznych

$\sin(x)$ w $x \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ jest bijekcją, dzięki czemu można zdefiniować funkcję odwrotną.

- $\arcsin(x) : [-1, 1] \rightarrow [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$
- $\arccos(x) : [-1, 1] \rightarrow [0, \pi]$
- $\arctg(x) : \mathbb{R} \rightarrow (-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$
- $\text{arcctg}(x) : \mathbb{R} \rightarrow (0, \pi)$

5.3 Funkcje hiperboliczne

$$\sinh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{2}, \cosh(x) = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$$

Jedynka hiperboliczna:

$$\cosh^2(x) - \sinh^2(x) = 1$$

$$\begin{aligned} \text{D-d: } \cosh^2 x - \sinh^2 x &= \left(\frac{e^x + e^{-x}}{2}\right)^2 - \left(\frac{e^x - e^{-x}}{2}\right)^2 = \\ &= \frac{e^x \cdot e^x + e^{-x} \cdot e^{-x} + 2e^x \cdot e^{-x}}{4} - \frac{e^x \cdot e^x + e^{-x} \cdot e^{-x} - 2e^x \cdot e^{-x}}{4} = \\ &= \frac{4e^x \cdot e^{-x}}{4} = 1 \end{aligned}$$

Definicja $tgh, ctgh$:

- $tgh(x) = \frac{\sinh(x)}{\cosh(x)}$
- $ctgh(x) = \frac{\cosh(x)}{\sinh(x)}$

5.4 Funkcje sigmoidalne

1. funkcja logistyczna $\sigma(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}, \sigma(x) : \mathbb{R} \rightarrow [0, 1]$
Uogólniona:

$$f(x) = \frac{1}{(1+e^x)^\alpha}, \alpha > 0$$

2. tangens hiperboliczny $f(x) = tgh(x)$
3. arcus tangens hiperboliczny $f(x) = \arctg(x)$
4. error function - funkcja błędu

$$\sigma(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot tgh\left(\frac{x}{2}\right)$$

5.5 Funkcje okresowe

Definicja A - dziedzina f : \exists_T takie, że $\forall_{x \in A} f(x+T) = f(x)$

5.6 Funkcje egzotyczne

1. $\lceil x \rceil = \max\{k \in \mathbb{Z}, k \leq x\}$ - cz. całkowita x . Najw. całkowita nieprzekraczająca x .
2. $\lfloor x \rfloor = \max\{k \in \mathbb{Z}, k \leq x\}$ - podłoga liczby x (to samo co część całkowita)
3. $\lceil x \rceil = \min\{k \in \mathbb{Z}, k \leq x\}$ - sufit liczby x

$$4. \operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}$$

$$\lceil 5.5 \rceil = 5, \lfloor 4.7 \rfloor = 4, \lceil -3.4 \rceil = -4$$

5.7 (Heine) Granica funkcji

Zakładamy, że istnieje $\Delta > 0$ taka, że f jest określona na $(a - \Delta, a) \cup (a, a + \Delta)$ (sąsiedztwie punktu a).

$$\lim_{x \rightarrow a} f(x) = g \iff \forall x_n \implies a, x_n \neq a \lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = g$$

Przykład 5.7.1. Policzmy granicę następującej funkcji:

$$\lim_{x \rightarrow 0} x^2 = 0$$

$$\text{Weźmy } x_n \rightarrow 0; x_n \neq 0: \lim_{n \rightarrow \infty} x_n^2 = \lim_{n \rightarrow \infty} x_n \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = 0 \cdot 0 = 0$$

Przykład 5.7.2. Policzmy granicę następującej funkcji:

$$\lim_{x \rightarrow 1} \frac{x^2 - 1}{x - 1} = \left[\frac{0}{0} \right] = \lim_{x \rightarrow 1} \frac{(x-1)(x+1)}{x-1} = \lim_{x \rightarrow 1} \frac{x+1}{1} = 2$$

Przykład 5.7.3. $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin(x)}{x} = 1$ - dowód z tw. o trzech funkcjach.

5.8 (Cauchy) Granica funkcji

$$\lim_{x \rightarrow a} f(x) = g \iff \forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 \forall x \in A \ 0 < |x - a| < \delta \implies |f(x) - g| < \varepsilon$$

Symbolu $\lim_{x \rightarrow a} f(x)$ - używamy również na oznaczenie granicy niewłaściwej.

Przykłady:

- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{0}{x^2} = \left[\frac{1}{0^+} \right] = \infty$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x}$ nie istnieje $x'_n = \frac{1}{n} \rightarrow 0, x''_n = \frac{-1}{n} \rightarrow 0$, ale $f(x'_n) \rightarrow \infty, f(x''_n) \rightarrow -\infty$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \sin\left(\frac{1}{x}\right)$ nie istnieje $x'_n = \frac{1}{2\pi n} \rightarrow 0, x''_n = \frac{1}{2\pi n + \frac{\pi}{2}} \rightarrow 0$, ale $f(x'_n) = 0, f(x''_n) = 1$

5.9 Granice Jednostronne

Granica prawostronna:

$$\lim_{x \rightarrow a^+} f(x) = g \iff \forall x_n \rightarrow a, x_n \neq a, x_n > a \lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = g$$

Granica lewostronna:

$$\lim_{x \rightarrow a^-} f(x) = g \iff \forall x_n \rightarrow a, x_n \neq a, x_n < a \lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = g$$

$\lim_{x \rightarrow 1^+} |x^2 - x|$ - *limit(abs(x^2 - x), x → 1, assumptions → rightarrow x > 1)* ← wolfram
Limit[Abs[x^2 - x], x → 1, assumptions → x > 1] ← mathematica

5.10 Granica w nieskończoności

$$\begin{aligned} x_n \rightarrow \infty \lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) \\ \lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = g \iff \forall_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = g \end{aligned}$$

Przykład 5.10.1. Zobaczmy granice w nieskończoności:

- $\lim_{x \rightarrow \infty} e^x = e^\infty = \infty$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} a^x = \infty$, o ile $a > 1$
- $\lim_{x \rightarrow \infty} \ln(x) = \infty$

Przykład 5.10.2. $\lim_{x \rightarrow -\infty} e^x = \begin{cases} x = -t \\ t \rightarrow \infty \end{cases} = \lim_{t \rightarrow \infty} e^{-t} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{e^t} = 0$

5.11 Twierdzenie o arytmetyce granic

1. $\lim_{x \rightarrow a} (f(x) + g(x)) = \lim_{x \rightarrow a} f(x) + \lim_{x \rightarrow a} g(x)$
2. $\lim_{x \rightarrow a} (f(x) \cdot g(x)) = \lim_{x \rightarrow a} f(x) \cdot \lim_{x \rightarrow a} g(x)$

5.12 Twierdzenie o trzech funkcjach

Zakładamy, że $f(x) \leq g(x) \leq h(x)$ oraz $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = \lim_{x \rightarrow a} h(x) = g$, wtedy:

$$\lim_{x \rightarrow a} g(x) = g$$

Przykład 5.12.1. $\lim (x \cdot \sin(\frac{1}{x})) = 0$
 $0 \leq |x \sin(\frac{1}{x})| \leq |x| \cdot 1$

Twierdzenie 5.12.1. Definicja z granic ciągów $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0 \iff \lim_{n \rightarrow \infty} |a_n| = 0$, przenosi się na granice funkcji:

$$\lim_{x \rightarrow a} f(x) = 0 \iff \lim_{x \rightarrow a} |f(x)| = 0$$

5.13 Notacja duże O, notacja asymptotyczna

Mamy dwa ciągi $a(n)$, $b(n)$. Mówimy że:

$$a(n) = O(b(n)) \iff \exists_C \exists_{n_0} \forall_{n > n_0} |a(n)| \leq C |b(n)|$$

Przykład 5.13.1. Przykłady notacji big O:

- $a(n) = n^2 - \frac{1}{2}n = O(n^2)$
- $b(n) = (\frac{1}{2})n^2 + n = O(n^2)$
 $\forall_{n \geq 1} \frac{1}{2}n^2 + n \leq \frac{1}{2}n^2 + n^2 = \frac{3}{2}n^2, C = \frac{3}{2}$
- $c(n) = a_2 \cdot n^2 + a_1 \cdot n + a_0, a_0, a_1, a_2 \in \mathbb{R}, a_2 \neq 0$
 $c(n) = O(n^2), c = |a_2| + |a_1| + |a_0|$

Twierdzenie 5.13.1. $f(n) = O(g(n)) \iff \limsup_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{f(n)}{g(n)} \right| < \infty$

Zastosowania:

$n^3 - n^2 + 1 = O(n^3)$, ponieważ:

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{n^3 - n^2 + 1}{n^3} \right| = 1 < \infty$$

Przykład 5.13.2. Przykład ambitny:

Ustalmy k - stała: $\binom{n}{k} = O(n^k)$ - dowód jako zadanie z (*).

Kolejno:

$n^2 + n = O(n^2)$, $n^2 + n = O(n^3)$ - na interesuje najmniejsze O

Definicja 5.13.1. Mówimy, że:

$$f(n) = \Theta(g(n)) \iff f(n) = O(g(n)) \wedge g(n) = O(f(n))$$

Przykład 5.13.3. $\frac{1}{2}n^2 + n = \Theta(n^2)$

Twierdzenie 5.13.2. $\left(\lim \left| \frac{f(n)}{g(n)} \right| = g \wedge 0 < g < \infty \right) \implies f(n) = \Theta(g(n))$

Oraz kolejno (bardzo zaawansowane):

$$\binom{n}{k} = \Theta(n^k)$$

$$\binom{n}{k} = \frac{1}{k!}n^k + \Theta(n^{k-1})$$