

Pro $x \in \mathbb{R}$ umíme odpovědět otázku, kdy $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n}$ konverguje, diverguje či osciluje.

Srovnání, protože $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{|x|^{n+1}}{n+1} < \sum_{n=1}^{\infty} \frac{|x|^n}{n}$ konverguje dle kritéria d'Alemberta

jestliže existuje pořadove $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{n+1} |x| < 1 \Leftrightarrow |x| < 1$, dohodně, dle **Kritéria AK \Rightarrow K**, je řada $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n}$ konverguje pro $x \in (-1, 1)$ (dozorce absolutně)

Dále víme, že $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x^n}{n}$ neklesne nebo není nulové pro $x \in \mathbb{R}$ taková, že $|x| > 1$. (Pro $x > 1$, postupně $\left\{ \frac{x^n}{n} \right\}_{n=1}^{\infty}$ diverguje, pro $x < -1$, $-\infty$ $\left\{ \frac{x^n}{n} \right\}_{n=1}^{\infty}$ osciluje)

Tedy, řada $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n}$ pro $x > 1$ diverguje a pro $x < -1$ nekonverguje (osciluje). Zbývají body $x = \pm 1$. Pro $x = 1$, řada $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n}$ diverguje (viz Příklad 11), zatímco řada $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n}$ konverguje (ale ne absolutně), viz Příklad 12.

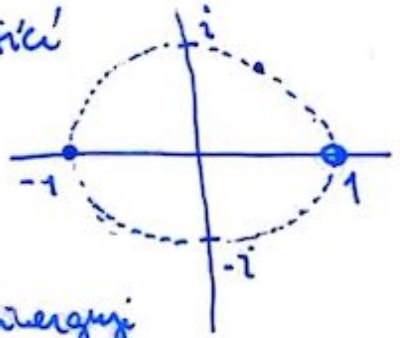
Motivací pro další výsledek bude otázka: Pro jaká $z \in \mathbb{C}$, řada $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{z^n}{n}$ konverguje, diverguje, osciluje?

Protože pro $z \in \mathbb{C}$: $z = |z|e^{i\varphi}$ $\varphi \in (0, 2\pi)$
 a $z^n = |z|^n e^{in\varphi} = |z|^n \cos n\varphi + i|z|^n \sin n\varphi$

tak stejnými metodami jako pro $x \in \mathbb{R}$, $|x| \neq 1$, zjistíme, že

- $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{z^n}{n}$ konverguje (dozorce absolutně) pro $|z| < 1$
- $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{z^n}{n}$ diverguje, nebo osciluje pro $|z| > 1$.

Zbývá vyšetřit $\{z \in \mathbb{C}; |z|=1\}$ tzn. z ležící na jednotkové kružnici neboli z tvaru $z = e^{i\varphi} = \cos\varphi + i\sin\varphi$.



Přitom víme, že na jednotkové kružnici je bod ($z=1$), kdy řada diverguje a bod ($z=-1$), kdy řada konverguje.

jednoduché
zvrstvení

Zajímá nás tedy co se děje v okolních bodech řuvnice.
Připomeňme si, že řovinná konvergence řady $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{in\varphi}}{n}$ je ekvivalentní řovinná konv. řad $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin n\varphi}{n}$ a $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos n\varphi}{n}$

Všimněme si, že tyto řady lze psát ve tvaru $\sum_{n=1}^{\infty} a_n b_n$, kde $a_n = \frac{1}{n}$ a $b_n = e^{in\varphi}$ či $\sin n\varphi$ nebo $\cos n\varphi$.

Řadami typu $\sum_{n=1}^{\infty} a_n b_n$ se nyní budeme zabývat. Začneme jedním technickým tvrzením, které lze interpretovat jako diskrétní verzi integrace per-parkes.

Lemma (Diskrétní verze integrace per-parkes) Pro $\{a_k\}_{k=1}^{\infty}, \{b_k\}_{k=1}^{\infty} \subset \mathbb{C}$

platí: $\sum_{k=1}^m a_k b_k = a_m B_m - \sum_{k=1}^{m-1} (a_{k+1} - a_k) B_k$ kde $B_k = \sum_{i=1}^k b_i$.

(Dě) Protože $b_1 = B_1$ a $b_k = B_k - B_{k-1}$ pro $k \geq 2$, píšeme

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^m a_k b_k &= \sum_{k=2}^m a_k (B_k - B_{k-1}) + a_1 B_1 \\ &= a_1 B_1 + a_2 B_2 - a_2 B_1 + a_3 B_3 - a_3 B_2 + \dots + a_m B_m - a_m B_{m-1} \\ &= \sum_{k=1}^{m-1} (a_k - a_{k+1}) B_k + a_m B_m = a_m B_m - \sum_{k=1}^{m-1} (a_{k+1} - a_k) B_k \quad \square \end{aligned}$$

Stejně, je sčítáme v Lemmatu od $k=1$, nehleďte v
druhou řádku roli; máme tedy také: } pro $m > n \in \mathbb{N}$ oť:

(6) $\sum_{k=n+1}^m a_k b_k = a_m B_m - \sum_{k=n+1}^{m-1} (a_{k+1} - a_k) B_k$ kde $B_k = \sum_{i=n+1}^k b_i$

Věta 6.11 (Abelovo a Dirichletovo kritérium)

Bud' $\{a_n\}_{n=1}^{\infty} \subset \mathbb{R}$ monotónní. Bud' $\{b_n\}_{n=1}^{\infty} \subset \mathbb{C}$. Dále uvažuj:

[DİR] $a_n \rightarrow 0$ pro $n \rightarrow \infty$ a $\{b_n\}_{n=1}^{\infty}$ má omezenou posloupnost částečných součtů,

[ABEL] $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$ je omezená a $\sum_{k=1}^{\infty} b_k$ konverguje.

[PAB] $\sum_{n=1}^{\infty} a_n b_n$ konverguje

Důk. Chceme ukázat, že $\sum_{n=1}^{\infty} a_n b_n$ splňuje B.-C. podmínku: K danému $\varepsilon > 0$ hledáme $n_0 \in \mathbb{N}$ tak, že $\forall m \geq n \geq n_0: \sum_{k=n}^m a_k b_k < \varepsilon$.

Definujme-li $B_k := \sum_{i=1}^k b_i$, tak z předchozí lemmy a (6) dostáváme:

$$(*) \quad \left| \sum_{k=n+1}^m a_k b_k \right| \leq |a_m| |B_m| + \max_{k \in \{n+1, \dots, m\}} |B_k| \sum_{k=n}^{m-1} |a_{k+1} - a_k|$$

Protože $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$ je monotónní, tak $|a_{k+1} - a_k| = \begin{cases} a_{k+1} - a_k & \text{je-li } \{a_k\} \text{ klesající} \\ a_k - a_{k+1} & \text{je-li } \{a_k\} \text{ rostoucí} \end{cases}$

Tedy $\{|a_{k+1} - a_k|\}_{k=1}^{\infty}$ je klesající a platí:

$$\sum_{k=n}^{m-1} |a_{k+1} - a_k| = |a_n - a_m|$$

Tedy odhad a z (*):

$$(**) \quad \left| \sum_{k=n+1}^m a_k b_k \right| \leq 3 \max_{k \in \{n+1, \dots, m\}} |a_k| \max_{k \in \{n+1, \dots, m\}} |B_k|$$

K vyjádření danému $\varepsilon > 0$, za předpokladu (DİR), $\exists M > 0$ tak, že $\forall k \geq 1 \quad |B_k| \leq M$, a také existuje n_0 tak, že $\forall m \geq n \geq n_0: \max_{k \in \{n+1, \dots, m\}} |a_k| < \frac{\varepsilon}{3M}$. Tedy z (**): $\left| \sum_{k=n+1}^m a_k b_k \right| < \varepsilon$

Za předpokladu (ABEL), $\exists L > 0$ tak, že $\forall k \geq 1 \quad |a_k| < L$ a k danému $\varepsilon > 0$ najdeme A B.-C. podmínky pro konvergující řadu $\sum_{k=1}^{\infty} b_k$ tak, že pro $m \geq n \geq n_0: \left| \sum_{k=n}^m b_k \right| < \frac{\varepsilon}{3L}$. Tedy opět A (**): $\left| \sum_{k=n+1}^m a_k b_k \right| < \varepsilon$. ▣

Příklady 13 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{in\varphi}}{n}$ pro $\varphi \in (0, 2\pi)$ první konverguje,
 neboť dle Dirichletova kritéria posloupnost $\{a_n\}_{n=1}^{\infty} = \left\{ \frac{1}{n} \right\}_{n=1}^{\infty}$
 je klesající a splňuje $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} = 0$. Zbývá ověřit, že
 posloupnost číselných součtů posloupnosti $\{b_n\}_{n=1}^{\infty}$ a $b_n = e^{in\varphi}$
 je omezená. Avšak A. Gaussova věta pro součet geometrické
 řady máme

$$S_n := \sum_{k=1}^n e^{ik\varphi} = e^{i\varphi} \frac{1 - e^{i(n+1)\varphi}}{1 - e^{i\varphi}}$$

$$\text{Tedy } |S_n|_C \leq |e^{i\varphi}|_C \frac{|1 - e^{i(n+1)\varphi}|_C}{|1 - e^{i\varphi}|_C} \leq \frac{2}{|1 - e^{i\varphi}|_C} =: M \quad \forall n \in \mathbb{N}$$

$$\text{zde jsme využili: } |1 - \cos\varphi - i\sin\varphi|_C^2 = (1 - \cos\varphi)^2 + \sin^2\varphi \geq (1 - \cos\varphi)^2$$

Speciálně jsme takto ukázali, že $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos nx}{n}$ konverguje pro $x \in (0, 2\pi)$

a $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin nx}{n}$ konverguje pro $x \in (0, 2\pi)$. □

14) Řada $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{\sqrt{k}} \arctg k$ konverguje neboť:

• $\{a_k\}_{k=1}^{\infty} := \{\arctg k\}_{k=1}^{\infty}$ je omezená a monotónní

• pro $b_k := \frac{(-1)^k}{\sqrt{k}}$ řada $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{\sqrt{k}}$ konverguje dle Leibnizova kritéria. □

15) Řada $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin^2 k}{k}$ nekonverguje, neboť $\sin^2 \varphi = \frac{1 - \cos 2\varphi}{2}$
 a tedy $\left[\sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin^2 k}{k} = \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{1}{2k} - \frac{\cos 2k}{2k} \right) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos 2k}{2k} \right]$ (*)

protože řada $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos 2k}{2k}$ konverguje dle Dirichletova kritéria. Ověřte.

Kdyby $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin^2 k}{k}$ konvergovala, tak z (*) by plynilo, že $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k}$ konverguje;

což je spor a tedy řada $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin^2 k}{k}$ nekonverguje.

6.3 Mohutnost (cardinalita) čísel. Přerovnáni řád.

Bud $M \neq \emptyset$ množina prvků. Mohutnost množiny udává počet prvků množiny M . Ačkoliv jsme zvyklí porovnávat počty prvků v každodenním životě, i tento proces našeho myšlení vyžaduje jistou abstrakci a „stotožněni“. Cílem našich pohledů bude porovnat mohutnost nekonečných množin.

Definice Řekneme, že $\emptyset \neq M$ je konečná, pokud existuje $L \in \mathbb{N}$ a existuje $\varphi: N_L \xrightarrow{na} M$ podle, kde $N_L := \{m \in \mathbb{N}; m \leq L\}$.

Množina M je

- nekonečná, není-li konečná
- spčetně (nekonečná), jestliže existuje $\varphi: \mathbb{N} \xrightarrow{na} M$ podle.
- (spčetná) je-li konečná nebo spčetně nekonečná
- nespčetná, není-li spčetná.

Georg Cantor

D. Hilbert (1900): „Ničto máš nevyžene z ráje, který pro nás připravil Cantor.“

Příklad Uvažujme $N_{sudí} = \{2k; k \in \mathbb{N}\}$. Paž z množinového pohledu $N_{sudí} \not\cong \mathbb{N}$. Z pohledu cardinality, tj. kolik prvků tyto množiny mají, jsou však $N_{sudí}$ a \mathbb{N} stejně velké neboť $\varphi: \mathbb{N} \mapsto N_{sudí}$ definované $\varphi(k) = 2k$ je podle a na.

Věta 6.12 Peati:

- Jsou-li S a T spčetné, paž $S \cup T$ a $S \times T$ jsou spčetné.
- \mathbb{Z}, \mathbb{Q} jsou spčetné.
- $\mathbb{R}, \mathbb{C}, \mathbb{R}^n, \mathbb{C}^n$ jsou nespčetné.

Dě **A2(i)** Necht $S = \{s_k\}_{k=1}^{\infty}$ a $T = \{t_k\}_{k=1}^{\infty}$. Definujme-li

φ následicem

$$\varphi(2n) = s_n \quad (n \in \mathbb{N})$$

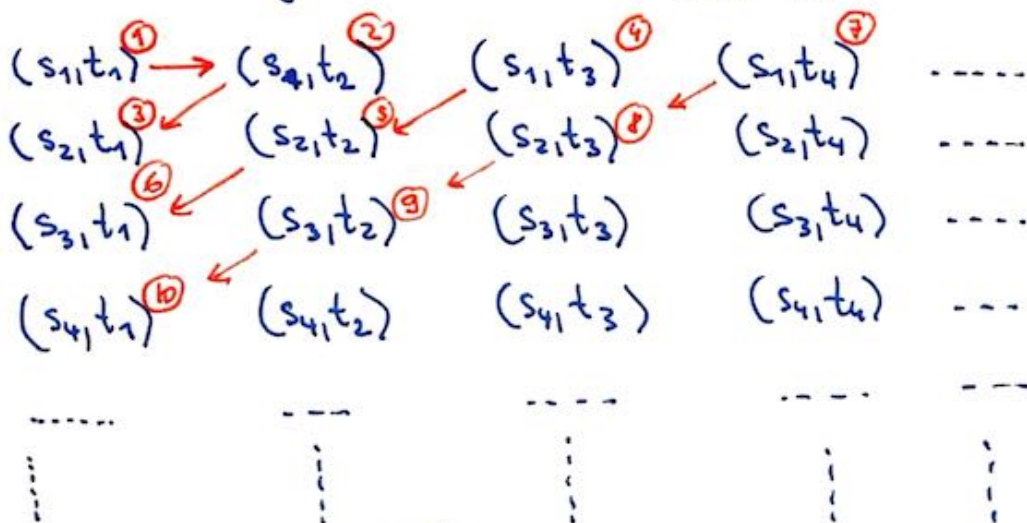
$$\varphi(2n-1) = t_n$$

paž $\varphi: \mathbb{N} \xrightarrow{na} S \cup T$ podle

Tedy $S \cup T$ je spčetně nekonečná.

V případě $S \times T := \{ (s_j, t_k); j=1,2,\dots; k=1,2,\dots \}$ si pomůžeme

obrázkem. Každý prvek (s_j, t_k) ve zobrazení:



Zobrazení φ přiřadí $m \in \mathbb{N}$ prvek (s_j, t_k) , který má u sebe (červený) kroužek (m) . Toto zobrazení je podle a na.

Ad (ii) • \mathbb{Z} mají stejnou mohutnost jako \mathbb{N} neboť zobrazení

$\varphi: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{Z}$ definované:

$$\begin{cases} \varphi(1) = 0 \\ \varphi(2k) = k \\ \varphi(2k+1) = -k \end{cases} \quad k \in \mathbb{N}$$

je podle a na.

• \mathbb{Q} chápeme jako množinu $\left\{ \frac{p}{q}; p \in \mathbb{Z} \text{ a } q \in \mathbb{N} \right\}$

(s tím, že $\frac{2}{2}, \frac{1}{1}, \dots$ chápeme jako odlišné prvky)

pat \mathbb{Q} ke třetím $\mathbb{Z} \times \mathbb{N}$, což je dle předchozího spočetná množina.

chceme ukázat, že \mathbb{R} je nespočetná.

Ad (iii) Uvažujme nejdříve uzavřený interval $S := \langle 0, 1 \rangle$. S je buď spočetná (tzn. spočetně nekonečná) nebo nespočetná. Předpokládejme, že S je spočetná. Každý prvek $x \in S$ lze reprezentovat ve tvaru desítkového rozvoje $0.d_1d_2d_3\dots d_n\dots$, kde $d_k \in \{0, 1, \dots, 9\}$.

(vyloučíme čísla typu $0.d_1\dots d_{k-1}9$ (abychom se vyhnuli nejednoznačnosti)) s výjimkou $1 = 0.\bar{9}$)

Z předchozího, že S je spočetná plyne, že prvky S lze uspořádat do posloupnosti: $\varphi(k) = x_k = 0.d_{k1}d_{k2}\dots d_{kn}\dots$

Máme tedy:

$$(T) \begin{array}{l} x_1 = 0. d_{11} d_{12} d_{13} \dots d_{1k} \dots \\ x_2 = 0. d_{21} d_{22} d_{23} \dots d_{2k} \dots \\ \vdots \\ x_k = 0. d_{k1} d_{k2} d_{k3} \dots d_{kk} \dots \end{array}$$

Dle předpokladu (S spočetná) by každé číslo $A \in S$ mělo být v seznamu (T). Zaujmeme se, tak jako Cantor, na prvky na diagonále^{*)}, tj. d_{kk} , a vytvoříme číslo y tvaru

$$(*) \quad y = 0. c_1 c_2 \dots c_k \dots,$$

kteří patří do S , ale nebude prvkem tabulky (T). Tato tabulka však měla obsahovat všechny prvky S , kdyby S byla spočetná. Máme tedy spor a S musí být nespočetná. Nyní tedy ke konstrukci y tvaru (*) nepřidáme do (T). Zvolme si 2 čísla $z \in \{1, 2, \dots, 8\}$, například 1 a 6. Definujeme y tvaru (*) takto:

$$\begin{array}{l} \text{Je-li } d_{kk} = 1, \text{ pak položíme } c_k = 6 \\ \text{Je-li } d_{kk} = 6, \text{ pak položíme } c_k = 1. \end{array}$$

Takto vytvořené y patří do S , ale neshoduje se s žádným prvkem z (T).

Tedy $(0, 1)$ je nespočetná, a také $(0, 1)$ je nespočetná.

[Přetvoříme $\text{cotg} \pi x : (0, 1) \xrightarrow{\text{na}} \mathbb{R}$ podle a $(0, 1)$ je nespočetná, takže je \mathbb{R} také nespočetná.]

[Dle (i) je $\mathbb{R} \times \mathbb{R}$ a také $\mathbb{R}^k = \underbrace{\mathbb{R} \times \dots \times \mathbb{R}}_{k\text{-krát}}$ nespočetná (se stejnou mohutností jako \mathbb{R}).

[Přetvoříme \mathbb{C} je izomorfní s $\mathbb{R} \times \mathbb{R}$ má i \mathbb{C} a také $\mathbb{C}^k = \mathbb{C} \times \dots \times \mathbb{C}$ stejnou mohutností jako \mathbb{R} .]



*) Metody tohoto typu se často nazývají Cantorova diagonalizace

• M, \emptyset jsou stejné mohutné (mají stejnou kardinalitu) $= \exists \varphi: M \xrightarrow{\text{bij}} \emptyset$ podle.

• Mohutnost (kardinalita) množiny M se označuje často $|M|$, tedy stejným symbolem jako absolutní hodnota nebo míra množiny (budeme mít pořadí). **POZOR!**

• Mohutnost \mathbb{N} se označuje \aleph_0 (= hebrejské abecedy... aleph nula)
tedy $|\mathbb{N}| = \aleph_0$.

• Je-li X množina, pak $\mathcal{P}(X) := \{A; A \subset X\}$ je tzv. potenční množina
(angl. power set) ... systém všech podmnožin

► Je-li X konečná, pak je $|\mathcal{P}(X)| > |X|$

► $|\mathcal{P}(\mathbb{N})| = |\mathbb{R}| =: \aleph_1 > \aleph_0$

↑
aleph jedna

Množina všech podmnožin přirozených čísel je stejně mohutná jako množina reálných čísel

$$|\mathcal{P}(\mathbb{R})| > \aleph_1 = |\mathbb{R}|$$

► Otevřeným problémem axiomatiké které množin je tzv. "hypotéza kontinua": neexistuje řádové (kardinalní) číslo c , které leží mezi \aleph_0 a \aleph_1 .

Cantor:

• Počet bodů na úsečce je stejně jako počet bodů ve čtverci.

Prerovnáni řád

Definice Necht $\{a_k\}_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathbb{R}$ (nebo \mathbb{C}) a $\varphi: \mathbb{N} \xrightarrow{\text{bij}} \mathbb{N}$ podle.

Pak řadu $\sum_{k=1}^{\infty} b_k := \sum_{k=1}^{\infty} a_{\varphi(k)}$ nazýváme prerovnaním řady $\sum_{k=1}^{\infty} a_k$

Věta 6.13 Jestliže $\sum_{k=1}^{\infty} a_k$ je absolutně konvergentní a

je-li $\sum_{k=1}^{\infty} a_{\varphi(k)}$ její prerovnáni. Pak $\sum_{k=1}^{\infty} a_{\varphi(k)}$ konverguje absolutně

$$\sum_{k=1}^{\infty} a_{\varphi(k)} = \sum_{k=1}^{\infty} a_k.$$

Dě **Ad konvergence** Pro dané libovolné $\varepsilon > 0$ existuje $m_0 \in \mathbb{N}$:
 $\sum_{n=m_0}^{\infty} |a_n| < \varepsilon$. Definujeme $m_0 := \max \{ \varphi^{-1}(1), \dots, \varphi^{-1}(m_0-1) \}$.

Paž pro $m \geq m_0$ platí $\varphi(m) \geq m_0$ a tedy
 $\sum_{n=m_0+1}^{\infty} |a_{\varphi(m)}| \leq \sum_{n=m_0}^{\infty} |a_n| < \varepsilon$ a tedy $\sum_{k=1}^{\infty} |a_{\varphi(k)}|$ konverguje.

Ad součet Označme $s := \lim_{n \rightarrow \infty} s_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n a_k = \sum_{k=1}^{\infty} a_k$
 a $t := \lim_{m \rightarrow \infty} t_m = \lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^m a_{\varphi(k)} = \sum_{k=1}^{\infty} a_{\varphi(k)}$

Pro $\varepsilon > 0$ najdeme $m_0 \in \mathbb{N}$: $\sum_{k=m_0}^{\infty} |a_k| < \varepsilon$ a $\sum_{k=m_0}^{\infty} |a_{\varphi(k)}| < \varepsilon$.

Nyní najdeme $m_0 \in \mathbb{N}$ tak, aby $\boxed{m_0 \geq m_0}$, $\boxed{\{1, \dots, m_0-1\} \subset \{\varphi(1), \dots, \varphi(m_0)\}}$
 $\boxed{\{\varphi(1), \dots, \varphi(m_0-1)\} \subset \{1, \dots, m_0\}}$

Paž pro $m \geq m_0$:
 $|s_m - t_m| = \left| \sum_{k=1}^m a_k - \sum_{k=1}^m a_{\varphi(k)} \right| \leq \sum_{k=m_0}^{\infty} |a_k| + \sum_{k=m_0}^{\infty} |a_{\varphi(k)}| < 2\varepsilon$ \square

Jiný dě **Krok 1** Doplňme nejdrive tvrzení pro $a_n \geq 0$. Paž
 $\{a_{\varphi(1)}, \dots, a_{\varphi(m)}\} \subset \{a_1, \dots, a_m\}$ pro $M \in \mathbb{N}$ dobře zvolené veliči.

Tedy $0 \leq \sum_{k=1}^m a_{\varphi(k)} \leq \sum_{k=1}^M a_k \leq \sum_{k=1}^{\infty} a_k = \sup_{N \in \mathbb{N}} s_N =: s < +\infty$

Tak $t := \lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^m a_{\varphi(k)} \leq s < +\infty$ a řada $\sum_{k=1}^{\infty} a_{\varphi(k)}$ konverguje.

Nyní vyjdeme a doplníme a že skutečně, i
 $\{a_1, \dots, a_m\} \subset \{a_{\varphi(1)}, \dots, a_{\varphi(L)}\}$ pro L dobře zvolené veliči.

Tedy $0 \leq \sum_{k=1}^m a_k \leq \sum_{k=1}^L a_{\varphi(k)} \leq \sum_{k=1}^{\infty} a_{\varphi(k)} = t \Rightarrow \boxed{s \leq t}$

$\boxed{s=t}$ **Krok 2** Jsou-li $a_n \in \mathbb{R}$, paž $a_n = a_n^+ - a_n^-$ a $|a_n| = a_n^+ + a_n^-$,

kde $x^+ = \max\{x, 0\}$ a $x^- = \max\{-x, 0\}$. Protož $\sum_{n=1}^{\infty} |a_n|$ konverguje,
 taž konverguje $\sum_{n=1}^{\infty} a_n^+$ a $\sum_{n=1}^{\infty} a_n^-$. Dle **Kroku 1** i taž

konverguje taž $\sum_{n=1}^{\infty} a_{\varphi(n)}^+$ a $\sum_{n=1}^{\infty} a_{\varphi(n)}^-$ a navíc $\sum_{n=1}^{\infty} a_{\varphi(n)}^+ = \sum_{n=1}^{\infty} a_n^+$
 Tak $\sum_{n=1}^{\infty} a_{\varphi(n)} = \sum_{n=1}^{\infty} a_{\varphi(n)}^+ - \sum_{n=1}^{\infty} a_{\varphi(n)}^- = \sum_{n=1}^{\infty} a_n^+ - \sum_{n=1}^{\infty} a_n^- = \sum_{n=1}^{\infty} a_n$. \square

Príklad, ktorý ukazuje, že pre neabsolútne konvergentní řády věta 6.13 neplatí

Řada $\{a_n\}_{n=1}^{\infty} = (1, -1, \frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, -\frac{1}{3}, \dots)$ definována předpisem

$$a_{2k-1} = \frac{1}{k} \quad \text{a} \quad a_{2k} = -\frac{1}{k}. \quad \text{Pak } S_{2k} = 0 \quad \text{a} \quad S_{2k-1} = \frac{1}{k}.$$

Tedy $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ konverguje a $\sum_{n=1}^{\infty} a_n = 0$.

Uvažujme přerovnaní

$$\{a_{\varphi(k)}\}_{k=1}^{\infty} = (1, \frac{1}{2}, -1, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, -\frac{1}{2}, \frac{1}{5}, \frac{1}{6}, -\frac{1}{3}, \dots)$$

definované takto:

$$a_{\varphi(3k-2)} = \frac{1}{2k-1}, \quad a_{\varphi(3k-1)} = \frac{1}{2k}, \quad a_{\varphi(3k)} = -\frac{1}{k}.$$

Pak

$$\begin{aligned} \underline{S_{3k}} &= \sum_{\ell=1}^{3k} a_{\varphi(\ell)} = \sum_{\ell=1}^k \{a_{\varphi(3\ell-2)} + a_{\varphi(3\ell-1)} + a_{\varphi(3\ell)}\} \\ &= \sum_{\ell=1}^k \left(\frac{1}{2\ell-1} + \frac{1}{2\ell} - \frac{1}{\ell} \right) = \sum_{\ell=1}^k \frac{2\ell + (2\ell-1) - 2(2\ell-1)}{2\ell(2\ell-1)} \\ &= \sum_{\ell=1}^k \frac{1}{(2\ell-1)2\ell} = \sum_{\ell=1}^k \left(\frac{1}{2\ell-1} - \frac{1}{2\ell} \right) = 1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{3} - \frac{1}{4} + \frac{1}{5} - \frac{1}{6} + \dots \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{1}{n} = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \frac{x^5}{5} + \dots \Big|_{x=1} = \ln(x+1) \Big|_{x=1} \\ &= \underline{\ln 2} \end{aligned}$$

Protože $S_{3k+1} - S_{3k} \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$ a $S_{3k+2} - S_{3k} \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$,

tak $\lim_{k \rightarrow \infty} S_k$ existuje a rovná se $\ln 2$.

Vidíme, že přerovnaním konvergentních řad mohou dostat jiné výsledky. Následující Riemannova věta, že lze vhodným přerovnaním dostat jakýkoliv výsledek, i $+\infty$.
JAKÝTOVŽDIL opoti absolútne konvergentní řádkm!

* neabsolútne

Věta 6.14 (Riemannova věta o přerovnění neabsolutně konvergentních řad) Nechť $\sum_{k=1}^{\infty} a_k$ konverguje neabsolutně. Pak pro každé $s^* \in \mathbb{R}^*$ existuje přerovnění $\rightarrow \sum_{k=1}^{\infty} a_{\varphi(k)} = s^*$.

(Dt) Připomeňme si ujednotěné značení: $x \in \mathbb{R} \Rightarrow x^+ = \max\{x, 0\} \geq 0$
 $x^- = \max\{-x, 0\} \geq 0$

a tedy $x = x^+ - x^-$ a $|x| = x^+ + x^-$.

► Tedy $\sum_{k=1}^{\infty} a_k = \sum_{k=1}^{\infty} a_k^+ - \sum_{k=1}^{\infty} a_k^-$

Tvrdíme, že nutně z neabsolutní konvergence $\sum_{k=1}^{\infty} a_k$ plyne:

(+) $\sum_{k=1}^{\infty} a_k^+ = \infty$ a $\sum_{k=1}^{\infty} a_k^- = \infty$

Kdyby totiž $\sum_{k=1}^{\infty} a_k^+$ a $\sum_{k=1}^{\infty} a_k^-$ konvergovaly, tak $\sum_{k=1}^{\infty} |a_k|$ konverguje, ale to neplatí.

Kdyby jedna z řad divergovala a druhá konvergovala, pak $\sum_{k=1}^{\infty} a_k$ nekonverguje. Platí tedy (+).

► Pro dané $s^* \in \mathbb{R}$, bereme vhodné členy tak dlouho až jejich součet je větší než s^* , pak přidáváme záporné prvky až se dostaneme pod s^* , pak vhodné, pak záporné, ...

Otázka: Jak budeme postupovat je-li $s^* = +\infty$ či $s^* = -\infty$? ▣

POZOR! S neabsolutně konvergentními řadami je třeba pracovat obzvláště opatrně, jak ukazuje příklady připravené na stránkách kurzu Vitem Průšon. Nevhodné manipulace (které zdánlivě působí věrohodně) mohou vést k identitám typu $\ln 2 = 2 \ln 2$ či $\ln 2 = 0$.