# 6. cvičení - Mocninné řady – poloměr konvergence

https://www2.karlin.mff.cuni.cz/~kuncova/vyuka.php, kuncova@karlin.mff.cuni.cz

## Teorie

**Definice 1.** *Mocninnou řadou o středu* $x_0 \in \mathbb{R}$ rozumíme řadu $\sum_{n=0}^{\infty} a_n(x-x_0)^n$, kde $x \in \mathbb{R}$ a $a_n \in \mathbb{R}$ pro $n \in \mathbb{N}_0$.

**Věta 2** (Poloměr konvergence)**.** Nechť $\sum_{n=0}^{\infty} a_n(x-x_0)^n$ je mocninná řada. Pak existuje právě jeden nezáporný prvek $R \in \mathbb{R}^*$ takový, že

- pro každé $x \in \mathbb{R}$, $|x-x_0| < R$, uvedená řada konverguje absolutně,
- pro každé $x \in \mathbb{R}$, $|x-x_0| > R$, uvedená řada diverguje.

Prvek $R$ splňuje

$$R = \frac{1}{\limsup_{n\to\infty} \sqrt[n]{|a_n|}},$$

kde výrazem $1/0$ zde rozumíme $+\infty$ a výrazem $1/\infty$ zde rozumíme $0$. Prvek $R$ nazýváme *poloměrem konvergence* uvedené řady.

**Věta 3.** Nechť $\{a_n\}$ je posloupnost s **kladnými** členy, splňující podmínku

$$\lim_{n\to\infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} = A.$$

Pak také

$$\lim_{n\to\infty} \sqrt[n]{a_n} = A.$$

**Věta 4.** Nechť $\{a_n\}$ je reálná posloupnost, jejíž všechny členy jsou **kladné**. Nechť dále platí, že

$$\lim_{n\to+\infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} < 1.$$

Potom platí, že

$$\lim_{n\to+\infty} a_n = 0.$$

## Fakta

Nechť $a > 0$, pak:

1. $\lim_{n\to+\infty} \sqrt[n]{a} = 1$
2. $\lim_{n\to+\infty} \sqrt[n]{n} = 1$
3. $\lim_{n\to+\infty} \sqrt[n]{n^a} = 1$
4. $\lim_{n\to+\infty} \sqrt[n]{n!} = +\infty$
5. $\lim_{n\to+\infty} \left(1+\frac{1}{n}\right)^n = e$

## Hint

$$a^b = e^{b \ln a}$$

$$n!! = n(n-2)(n-4)\cdots$$

$$\frac{(2n)!!}{(2n+1)!!} > \frac{1}{2n+1}, \qquad \frac{(2n)!!}{(2n+1)!!} < \frac{1}{\sqrt{2n+2}}.$$

## Příklady

1. Určete poloměr konvergence mocninných řad a konvergenci i absolutní konvergenci na hranici.

(a) $\displaystyle\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^7}{n+20} x^n$

(b) $\displaystyle\sum_{n=1}^{\infty} \alpha^{n^2} \cdot x^n$, kde $(0 < \alpha < 1)$

(c) $\displaystyle\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n^p}$, kde $p \in \mathbb{R}$.

(d) $\displaystyle\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n!}{a^{n^2}} \cdot x^n$, kde $(a > 1)$

(e) $\displaystyle\sum_{n=1}^{\infty} \frac{3^n + (-2)^n}{n} (x+1)^n$

(f)✱ $\displaystyle\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^n} x^{n^2}$

(g)❀ $\displaystyle\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n)!!}{(2n+1)!!} x^n$

(h)❋ $\displaystyle\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(3+(-1)^n)^n}{n} x^n$

(i) $\displaystyle\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{a^n + b^n}$, kde $a > 0$, $b > 0$.

(j) $\displaystyle\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(n!)^2}{(2n)!} x^n$

(k)✿ $\displaystyle\sum_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n^2} \cdot x^n$

(l)♡ $\displaystyle\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{a^{\sqrt{n}}}$, kde $a > 0$.

(m) $\displaystyle\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{a^n}{n} + \frac{b^n}{n^2}\right) \cdot x^n$, kde $a > 0$, $b > 0$.

### Bonus

2. Víme, že řada $\sum a_n (x+7)^n$ konverguje pro $x = 0$ a diverguje pro $x = -17$. Co můžeme říct o poloměru konvergence?
3. Víme, že řada $\sum a_n x^n$ konverguje pro $x = -4$ a diverguje pro $x = 7$. Určete, zda jsou následující výroky pravdivé, nepravdivé nebo pravdivost nelze určit:
   (a) Řada konverguje pro $x = 10$.
   (b) Řada konverguje pro $x = 3$.
   (c) Řada diverguje pro $x = 1$.
   (d) Řada diverguje pro $x = 6$.
4. Najděte mocninnou řadu, která:
   (a) diverguje pro $x = 0$;
   (b) konverguje pro $x = 5$, ale nikde jinde;
   (c) má střed konvergence v 0, poloměr konvergence roven 2 a konverguje pro 2, ale diverguje pro $-2$.
5. Nechť mocninná řada $\sum a_n x^n$ má poloměr konvergence roven $R_1$ a mocninná řada $\sum b_n x^n$ má poloměr konvergence roven $R_2$. Co můžeme říct o poloměru konvergence mocninné řady $\sum_{n=1}^{\infty} (a_n + b_n) x^n$?

(1f) Jak vypadá $n$-tý člen?
(1g) pro hranici: $\frac{(2n)!!}{(2n+1)!!} > \frac{1}{2n+1}$, $\frac{(2n)!!}{(2n+1)!!} < \frac{1}{\sqrt{2n+2}}$
(1h) Na hranici zkoumejte liché a sudé členy. Pro NAK: jak vypadají částečné součty?
(1k) Na hranici otestuje NP (Taylorem nebo L'Hospitalem).
(1l) Na hranici LSK s $\frac{1}{n^2}$ a NP.