

Technická univerzita v Košiciach
Fakulta elektrotechniky a informatiky



MATEMATIKA III v príkladoch FEI

Anna Grinčová – Jana Petrillová

Košice 2022

Technická univerzita v Košiciach
Fakulta elektrotechniky a informatiky



MATEMATIKA III v príkladoch FEI

Anna Grinčová – Jana Petrillová

Košice 2022

Recenzovali: RNDr. Miriam Andrejiová, PhD.
doc. RNDr. Viktor Pirč, CSc.

1. vydanie

Za odbornú stránku učebného textu zodpovedajú autori.
Rukopis neprešiel redakčnou ani jazykovou úpravou.

© Anna Grinčová, Jana Petrillová

ISBN

Obsah

Úvod	6
1 Nekonečné číselné rady	7
1.1 Pojem nekonečného číselného radu a jeho súčet	7
1.2 Harmonický a geometrický rad	12
1.3 Kritériá konvergenzie číselných radov	16
2 Funkcionálne a mocninové rady	29
2.1 Taylorov rad	36
2.2 Fourierov rad	38
3 Diferenciálne rovnice	45
3.1 Diferenciálne rovnice prvého rádu so separovateľnými premennými	45
3.2 Lineárne diferenciálne rovnice prvého rádu	49
3.3 Lineárne diferenciálne rovnice druhého rádu s konštantnými koeficientmi	53
4 Funkcia komplexnej premennej	65
4.1 Analytická funkcia a derivácia funkcie komplexnej premennej	65
4.2 Rezíduum funkcie	68
4.3 Integrál funkcie komplexnej premennej	70
5 Laplaceova transformácia	76
5.1 Laplaceova transformácia	76
5.2 Spätná Laplaceova transformácia	83
5.3 Riešenie diferenciálnych rovníc pomocou spätnej Laplaceovej transformácie	86
Použitá literatúra	89

Úvod

Táto učebná pomôcka je určená pre študentov druhého ročníka bakalárskej formy štúdia na Fakulte elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach (FEI TU), ale môže poslúžiť aj študentom iných fakúlt.

Učebnica je rozdelená do piatich kapitol, ktoré obsahujú základné teoretické poznatky potrebné k riešeniu príkladov, vzorové riešené aj neriešené úlohy k učivu, ktoré je preberané v predmete Matematika III.

Cieľom tejto učebnej pomôcky nebolo podať ucelený teoretický prehľad riešenej problematiky, preto je vhodné kombinovať používanie tejto učebnice s vysokoškolskou učebnicou Matematická analýza II autorov Jozef Džurina, Anna Grinčová a Viktor Pirč aj s voľne dostupnými e-learningovými materiálmi Katedry matematiky a teoretickej informatiky FEI TU v Košiciach.

Na záver ďakujeme RNDr. Miriam Andrejiovej, PhD. a doc. RNDr. Viktorovi Pirčovi CSc. za starostlivé prečítanie rukopisu a za cenné pripomienky, ktorými prispeli k zlepšeniu textu tejto učebnice. Zároveň sa chceme vopred ospravedlniť za možné jazykovo-štylistické chyby, pretože daný text neprešiel redakčnou ani jazykovou úpravou.

1 Nekonečné číselné rady

1.1 Pojem nekonečného číselného radu a jeho súčet

Definícia 1.1. Nech $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$ je postupnosť reálnych čísel. Potom výraz

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n = a_1 + a_2 + \cdots + a_n + \cdots$$

nazývame **nekonečný číselný rad**, kde číslo a_n nazývame n -tým členom nekonečného číselného radu.

Definícia 1.2. Postupnosť $\{s_n\}_{n=1}^{\infty}$ definovanú $s_1 = a_1$, $s_2 = a_1 + a_2$, $s_3 = a_1 + a_2 + a_3$, \dots , $s_n = a_1 + a_2 + \cdots + a_n$ nazývame **postupnosť čiastočných súčtov**.

Definícia 1.3. Ak existuje konečná limita $s = \lim_{n \rightarrow \infty} s_n$, tak číslo s nazývame **súčtom radu** $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ a hovoríme, že rad $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ je **konvergentný**. Označujeme $s = \sum_{n=1}^{\infty} a_n$.

Definícia 1.4. Ak neexistuje konečná limita $\lim_{n \rightarrow \infty} s_n$, tak je rad $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ **divergentný**.

Definícia 1.5. Ak je nekonečný číselný rad $\sum_{n=1}^{\infty} |a_n| = |a_1| + |a_2| + \cdots + |a_n| + \cdots$ konvergentný, tak hovoríme, že nekonečný číselný rad $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ je **absolútne konvergentný**.

Definícia 1.6. Ak je nekonečný číselný rad $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ konvergentný a rad $\sum_{n=1}^{\infty} |a_n|$ je divergentný, tak hovoríme, že nekonečný číselný rad $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ je **relatívne konvergentný**.

Veta 1.1. Ak je rad $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ absolútne konvergentný, tak je rad $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ konvergentný.

Veta 1.2. *Nutná podmienka konverencie nekonečného číselného radu*

Ak je rad $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ konvergentný, tak $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$.

Príklad 1.1. Nájďme súčet radu $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2 + 3n + 2}$.

Riešenie: n -tý člen radu $a_n = \frac{1}{n^2 + 3n + 2}$ je v tvare rýdzoracionálneho výrazu a preto je vhodné rozložiť ho na súčet elementárnych zlomkov. Daný rad je potom možné upraviť na tvar

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2 + 3n + 2} = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{n+1} - \frac{1}{n+2} \right).$$

Na základe Definície 1.2 vytvoríme n -tý čiastočný súčet $s_n = a_1 + a_2 + \dots + a_n$ a v ňom vyčíslime niekoľko prvých a niekoľko posledných členov.

$$\begin{aligned} s_n &= \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{3} \right) + \\ &+ \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{4} \right) + \\ &+ \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{5} \right) + \\ &\quad \vdots \\ &+ \left(\frac{1}{n-1} - \frac{1}{n} \right) + \\ &+ \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n+1} \right) + \\ &+ \left(\frac{1}{n+1} - \frac{1}{n+2} \right). \end{aligned}$$

Všimame si rovnaké menovatele a vidíme, že niektoré členy sa odčítajú (označené farebne). Druhý člen zátvorky sa odčíta s prvým členom nasledujúcej zátvorky. K tomu, aby sme členy odčítali, potrebujeme dve po sebe idúce zátvorky. Ďalšie škrtnuté členy sa odčítajú s členmi v nasledujúcich, resp. predchádzajúcich zátvorkách. Preto po úprave n -tého čiastočného súčtu (ostávajú iba tučné členy) dostaneme

$$s_n = \frac{1}{2} - \frac{1}{n+2}.$$

Na základe Definície 1.3 je súčet radu

$$s = \lim_{n \rightarrow \infty} s_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{n+2} \right) = \frac{1}{2}.$$

Príklad 1.2. Nájdime súčet radu $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{4}{4n^2 + 4n - 3}$.

Riešenie: n -tý člen radu $a_n = \frac{4}{4n^2 + 4n - 3}$ je v tvare rýdzoracionálneho výrazu a preto je vhodné rozložiť ho na súčet elementárnych zlomkov. Daný rad je potom možné upraviť na tvar

$$\sum_{n=2}^{\infty} \frac{4}{4n^2 + 4n - 3} = \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{1}{2n-1} - \frac{1}{2n+3} \right).$$

Na základe Definície 1.2 vytvoríme n -tý čiastočný súčet $s_n = a_1 + a_2 + \dots + a_n$ a v ňom vyčíslime niekoľko prvých a niekoľko posledných členov.

$$\begin{aligned} s_n &= \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{7} \right) + \\ &+ \left(\frac{1}{5} - \frac{1}{9} \right) + \\ &+ \left(\frac{1}{7} - \frac{1}{11} \right) + \\ &+ \left(\frac{1}{9} - \frac{1}{13} \right) + \\ &\quad \vdots \\ &+ \left(\frac{1}{2n-7} - \frac{1}{2n-3} \right) + \\ &+ \left(\frac{1}{2n-5} - \frac{1}{2n-1} \right) + \\ &+ \left(\frac{1}{2n-3} - \frac{1}{2n+1} \right) + \\ &+ \left(\frac{1}{2n-1} - \frac{1}{2n+3} \right). \end{aligned}$$

Všimame si rovnaké menovatele a vidíme, že niektoré členy sa odčítajú (označené farebne). Druhý člen prvej zátvorky sa odčíta s prvým členom tretej zátvorky atď. K tomu, aby sme členy odčítali, potrebujeme tri po sebe idúce zátvorky. Ďalšie škrtnuté členy sa odčítajú s členmi v nasledujúcich, resp. predchádzajúcich zátvorkách. Preto po úprave n -tého čiastočného súčtu (ostávajú iba tučné členy) dostaneme

$$s_n = \frac{1}{3} + \frac{1}{5} - \frac{1}{2n+1} - \frac{1}{2n+3}.$$

Na základe Definície 1.3 je súčet radu

$$s = \lim_{n \rightarrow \infty} s_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{5} - \frac{1}{2n+1} - \frac{1}{2n+3} \right) = \frac{8}{15}.$$

Príklad 1.3. Nájďme súčet radu $\sum_{n=3}^{\infty} \frac{-2}{n^3 - n}$.

Riešenie: n -tý člen radu $a_n = \frac{-2}{n^3 - n}$ je v tvare rýdzoracionálneho výrazu a preto je vhodné rozložiť ho na súčet elementárnych zlomkov. Daný rad je potom možné upraviť na tvar

$$\sum_{n=3}^{\infty} \frac{-2}{n^3 - n} = \sum_{n=3}^{\infty} \left(-\frac{1}{n-1} + \frac{2}{n} - \frac{1}{n+1} \right).$$

Na základe Definície 1.2 vytvoríme n -tý čiastočný súčet $s_n = a_1 + a_2 + \dots + a_n$ a v ňom vyčíslime niekoľko prvých a niekoľko posledných členov.

$$\begin{aligned} s_n &= \left(-\frac{1}{2} + \frac{2}{3} - \frac{1}{4} \right) + \\ &+ \left(-\frac{1}{3} + \frac{2}{4} - \frac{1}{5} \right) + \\ &+ \left(-\frac{1}{4} + \frac{2}{5} - \frac{1}{6} \right) + \\ &+ \left(-\frac{1}{5} + \frac{2}{6} - \frac{1}{7} \right) + \\ &\quad \vdots \\ &+ \left(-\frac{1}{n-4} + \frac{2}{n-3} - \frac{1}{n-2} \right) + \\ &+ \left(-\frac{1}{n-3} + \frac{2}{n-2} - \frac{1}{n-1} \right) + \\ &+ \left(-\frac{1}{n-2} + \frac{2}{n-1} - \frac{1}{n} \right) + \\ &+ \left(-\frac{1}{n-1} + \frac{2}{n} - \frac{1}{n+1} \right). \end{aligned}$$

Všimame si rovnaké menovatele a vidíme, že niektoré členy sa odčítajú (označené farebne). Tretí člen prvej zátvorky sa odčíta s druhým členom druhej zátvorky a s prvým členom tretej zátvorky, atď. K tomu, aby sme členy odčítali, potrebujeme tri po sebe idúce zátvorky. Ďalšie škrtnuté členy sa odčítajú s členmi v nasledujúcich, resp. predchádzajúcich zátvorkách. Preto po úprave n -tého čiastočného súčtu (ostávajú iba tučné členy) dostaneme

$$s_n = -\frac{1}{2} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{n} + \frac{2}{n} - \frac{1}{n+1} = -\frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{n} - \frac{1}{n+1}.$$

Na základe Definície 1.3 je súčet radu

$$s = \lim_{n \rightarrow \infty} s_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(-\frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{n} - \frac{1}{n+1} \right) = -\frac{1}{6}.$$

Neriešené úlohy:

V nasledujúcich úlohách nájdite súčet radu:

1. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(n+1)(n+2)}$ $\frac{1}{2}$
2. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(5n-4)(5n+1)}$ $\frac{1}{5}$
3. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)(2n+1)}$ $\frac{1}{2}$
4. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2+5n+6}$ $\frac{1}{3}$
5. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2+7n+12}$ $\frac{1}{4}$
6. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2+9n+20}$ $\frac{1}{5}$
7. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2+4n+3}$ $\frac{5}{12}$
8. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2+6n+8}$ $\frac{7}{24}$
9. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2+8n+15}$ $\frac{9}{40}$
10. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2+10n+24}$ $\frac{11}{60}$
11. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{3}{n^2+3n}$ $\frac{11}{6}$
12. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{3}{n^2+5n+4}$ $\frac{13}{12}$
13. $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{2}{4n^2+8n+3}$ 1
14. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{3}{9n^2+3n-2}$ $\frac{1}{2}$
15. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{3}{9n^2-3n-2}$ 1
16. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{7}{49n^2-7n-12}$ $\frac{1}{3}$

17.	$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{7}{49n^2 - 21n - 10}$	$\frac{1}{2}$
18.	$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{7}{49n^2 + 21n - 10}$	$\frac{1}{5}$
19.	$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{3}{9n^2 + 12n - 5}$	$\frac{7}{20}$
20.	$\sum_{n=2}^{\infty} \frac{24}{9n^2 - 12n - 5}$	5
21.	$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{6}{9n^2 + 6n - 8}$	$\frac{5}{4}$
22.	$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{12}{36n^2 - 12n - 35}$	$-\frac{4}{5}$
23.	$\sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n^2 - 1}$	$\frac{3}{4}$
24.	$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{6}{4n^2 - 9}$	$\frac{1}{3}$
25.	$\sum_{n=5}^{\infty} \frac{-1}{(n-3)(n-4)}$	-1
26.	$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n-1}{n(n+1)(n+2)}$	$\frac{1}{4}$
27.	$\sum_{n=3}^{\infty} \frac{n+2}{n(n-1)(n-2)}$	$\frac{3}{2}$
28.	$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{(n^2 + 3n + 2)(n + 3)}$	$\frac{1}{6}$
29.	$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3 + 3n^2 + 2n}$	$\frac{1}{4}$
30.	$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n^3 + 3n^2 + 2n}$	$\frac{1}{2}$
31.	$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{3n-2}{n^3 + 3n^2 + 2n}$	1
32.	$\sum_{n=3}^{\infty} \frac{n+2}{n^3 - 3n^2 + 2n}$	$\frac{3}{2}$

1.2 Harmonický a geometrický rad

Zovšeobecnený harmonický rad má tvar $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^\alpha}$ pre $\alpha > 0$. Tento rad je divergentný pre $\alpha \leq 1$ a konvergentný pre $\alpha > 1$. Špeciálnym prípadom zovšeobecneného harmonického radu

pre $\alpha = 1$ je **harmonický rad** a má tvar $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n}$. Tento rad je divergentný.

Geometrický rad má tvar $\sum_{n=0}^{\infty} a_1 q^n = a_1 + a_1 q + a_1 q^2 + \dots + a_1 q^n + \dots$, kde $a_1 \neq 0$. Tento rad je konvergentný pre $|q| < 1$ a divergentný pre $|q| \geq 1$. **Súčet nekonečného geometrického radu** je $s = \frac{a_1}{1-q}$, kde $|q| < 1$.

Príklad 1.4. Nájďme súčet radu $\sum_{n=5}^{\infty} \frac{5}{4^{n-3}}$.

Riešenie: Pre daný rad určíme prvý člen a_1 a kvocient q . Prvý člen a_1 získame dosadením $n = 5$ do n -tého člena radu

$$a_1 = \frac{5}{4^{5-3}} = \frac{5}{16}.$$

Kvocient q určíme takto

$$q = \frac{a_{n+1}}{a_n} = \frac{\frac{5}{4^{n-2}}}{\frac{5}{4^{n-3}}} = \frac{4^{-2}}{4^{-3}} = \frac{4^{-3}}{4^{-2}} = \frac{1}{4}.$$

Pretože platí $|q| = \left|\frac{1}{4}\right| < 1$, súčet tohto geometrického radu je

$$s = \frac{a_1}{1-q} = \frac{\frac{5}{16}}{1-\frac{1}{4}} = \frac{5}{12}.$$

Príklad 1.5. Nájďme súčet radu $\sum_{n=2}^{\infty} (-1)^{n+1} \left(\frac{2}{3}\right)^n$.

Riešenie: Pre daný rad určíme prvý člen a_1 a kvocient q . Prvý člen a_1 získame dosadením $n = 2$ do n -tého člena radu

$$a_1 = (-1)^{2+1} \left(\frac{2}{3}\right)^2 = -\frac{4}{9}.$$

Kvocient q určíme takto

$$q = \frac{a_{n+1}}{a_n} = \frac{(-1)^{n+2} \left(\frac{2}{3}\right)^{n+1}}{(-1)^{n+1} \left(\frac{2}{3}\right)^n} = \frac{(-1)^n (-1)^2 \left(\frac{2}{3}\right)^n \left(\frac{2}{3}\right)^1}{(-1)^n (-1)^1 \left(\frac{2}{3}\right)^n} = -\frac{2}{3}.$$

Pretože platí $|q| = \left|-\frac{2}{3}\right| < 1$, súčet tohto geometrického radu je

$$s = \frac{a_1}{1-q} = \frac{-\frac{4}{9}}{1-\left(-\frac{2}{3}\right)} = -\frac{4}{15}.$$

Príklad 1.6. Nájďme súčet radu $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{4^n - 10^n}{16^n}$.

Riešenie: n -tý člen radu je vhodné rozdeliť na dve časti a takto vytvoriť dva nové jednoduchšie geometrické rady.

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{4^n - 10^n}{16^n} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4^n}{16^n} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{10^n}{16^n} = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{4}\right)^n - \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{5}{8}\right)^n$$

V každom novom rade určíme prvý člen a_1 a kvocient q .

Pre rad $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{4}\right)^n$ prvý člen a_1 získame dosadením $n = 1$ do n -tého člena radu

$$a_1 = \left(\frac{1}{4}\right)^1 = \frac{1}{4}.$$

Kvocient q určíme takto

$$q = \frac{a_{n+1}}{a_n} = \frac{\left(\frac{1}{4}\right)^{n+1}}{\left(\frac{1}{4}\right)^n} = \frac{\left(\frac{1}{4}\right)^n \left(\frac{1}{4}\right)^1}{\left(\frac{1}{4}\right)^n} = \frac{1}{4}.$$

Pretože platí $|q| = \left|\frac{1}{4}\right| < 1$, súčet tohto geometrického radu je

$$s_1 = \frac{a_1}{1 - q} = \frac{\frac{1}{4}}{1 - \frac{1}{4}} = \frac{1}{3}.$$

Pre rad $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{5}{8}\right)^n$ prvý člen a_1 získame dosadením $n = 1$ do n -tého člena radu

$$a_1 = \left(\frac{5}{8}\right)^1 = \frac{5}{8}.$$

Kvocient q určíme takto

$$q = \frac{a_{n+1}}{a_n} = \frac{\left(\frac{5}{8}\right)^{n+1}}{\left(\frac{5}{8}\right)^n} = \frac{\left(\frac{5}{8}\right)^n \left(\frac{5}{8}\right)^1}{\left(\frac{5}{8}\right)^n} = \frac{5}{8}.$$

Pretože platí $|q| = \left|\frac{5}{8}\right| < 1$, súčet tohto geometrického radu je

$$s_2 = \frac{a_1}{1 - q} = \frac{\frac{5}{8}}{1 - \left(\frac{5}{8}\right)} = \frac{5}{3}.$$

Súčet pôvodného radu $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{4^n - 10^n}{16^n}$ určíme ako rozdiel $s_1 - s_2 = \frac{1}{3} - \frac{5}{3} = -\frac{4}{3}$.

Neriešené úlohy:

V nasledujúcich úlohách nájdite súčet radu:

- | | | |
|-----|--|-----------------|
| 33. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{3^n}$ | $\frac{1}{2}$ |
| 34. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{5}{3^n}$ | $\frac{5}{2}$ |
| 35. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{3^n}$ | $-\frac{1}{4}$ |
| 36. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-2)^n}{3^n}$ | $-\frac{2}{5}$ |
| 37. | $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{10}{4^{n+2}}$ | $\frac{5}{6}$ |
| 38. | $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{2^n}{3^{n+1}}$ | 1 |
| 39. | $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{3^{n+1}}{4^{n-1}}$ | 27 |
| 40. | $\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \left(\frac{5}{7}\right)^n$ | $-\frac{5}{12}$ |
| 41. | $\sum_{n=2}^{\infty} (-1)^n \frac{2^{n+1}}{3^{n-1}}$ | $\frac{8}{5}$ |
| 42. | $\sum_{n=2}^{\infty} (-2)^{n-1} \left(\frac{1}{3}\right)^{n+1}$ | $-\frac{2}{45}$ |
| 43. | $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{2^n} - \frac{1}{2^{n+1}}\right)$ | $\frac{1}{2}$ |
| 44. | $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{3^n} - \frac{1}{3^{n+1}}\right)$ | $\frac{1}{3}$ |
| 45. | $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{2^n} - \frac{1}{3^{n+1}}\right)$ | $\frac{5}{6}$ |
| 46. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{4^n - 3^n}{12^n}$ | $\frac{1}{6}$ |
| 47. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{3^n - 2^n}{6^n}$ | $\frac{1}{2}$ |
| 48. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{5^n + 3^n}{15^n}$ | $\frac{3}{4}$ |
| 49. | $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{2^n + 3^n}{9^n}$ | $\frac{39}{14}$ |

1.3 Kritériá konvergence číselných radov

Veta 1.3. D'Alembertovo podielové kritérium

Nech $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ je nekonečný číselný rad a nech $\forall n \in \mathbb{N}$ platí, že $a_n \neq 0$.

(a) Ak $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| < 1$, tak je rad $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ absolútne konvergentný.

(b) Ak $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| > 1$, tak je rad $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ divergentný.

Príklad 1.7. Vyšetrite konvergenciu radu $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left(\frac{1}{2} \right)^n$.

Riešenie: n -tý člen radu je rovný $a_n = \frac{1}{n} \left(\frac{1}{2} \right)^n$ a $(n+1)$ člen radu je rovný $a_{n+1} = \frac{1}{n+1} \left(\frac{1}{2} \right)^{n+1}$. Na základe D'Alembertovho kritéria dostávame

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{n+1} \left(\frac{1}{2} \right)^{n+1}}{\frac{1}{n} \left(\frac{1}{2} \right)^n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2} \frac{n}{n+1} = \frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{n+1} = \frac{1}{2} < 1.$$

Z toho vyplýva, že daný číselný rad konverguje.

Príklad 1.8. Vyšetrite konvergenciu radu $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{3(n+2)!}{5^n}$.

Riešenie: n -tý člen radu je rovný $a_n = \frac{3(n+2)!}{5^n}$ a $(n+1)$ člen radu je rovný $a_{n+1} = \frac{3(n+3)!}{5^{n+1}}$. Na základe D'Alembertovho kritéria dostávame

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{3(n+3)(n+2)!}{5^{n+1}}}{\frac{3(n+2)!}{5^n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n+3}{5} = \infty > 1.$$

Z toho vyplýva, že daný číselný rad diverguje.

Príklad 1.9. Vyšetrite konvergenciu radu $\sum_{n=3}^{\infty} \frac{2n^n}{(n-1)!}$.

Riešenie: n -tý člen radu je rovný $a_n = \frac{2n^n}{(n-1)!}$ a $(n+1)$ člen radu je rovný $a_{n+1} = \frac{2(n+1)^{n+1}}{n!}$. Na základe D'Alembertovho kritéria dostávame

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{2(n+1)^{n+1}}{n!}}{\frac{2n^n}{(n-1)!}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n+1}{n} \left(\frac{n+1}{n} \right)^n = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n+1}{n} \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n} \right)^n = 1e > 1.$$

Z toho vyplýva, že daný číselný rad diverguje.

Poznámka: Vzťah $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n = e$ poznáme z predmetu Matematika I.

Neriešené úlohy:

V nasledujúcich úlohách vyšetrite pomocou D'Alembertovho kritéria konvergenciu radu:

- | | | |
|-----|---|---|
| 50. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n} \left(\frac{3}{8}\right)^n$ | $\lim_{n \rightarrow \infty} \left \frac{a_{n+1}}{a_n} \right = \frac{3}{8}$, konverguje |
| 51. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n+1} \left(\frac{2}{3}\right)^n$ | $\lim_{n \rightarrow \infty} \left \frac{a_{n+1}}{a_n} \right = \frac{2}{3}$, konverguje |
| 52. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{3n-1} \left(\frac{5}{7}\right)^n$ | $\lim_{n \rightarrow \infty} \left \frac{a_{n+1}}{a_n} \right = \frac{5}{7}$, konverguje |
| 53. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n+2} \left(\frac{6}{5}\right)^n$ | $\lim_{n \rightarrow \infty} \left \frac{a_{n+1}}{a_n} \right = \frac{6}{5}$, diverguje |
| 54. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(n+2)!} \left(\frac{3}{4}\right)^n$ | $\lim_{n \rightarrow \infty} \left \frac{a_{n+1}}{a_n} \right = 0$, konverguje |
| 55. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{3n-1} \left(\frac{7}{5}\right)^n$ | $\lim_{n \rightarrow \infty} \left \frac{a_{n+1}}{a_n} \right = \frac{7}{5}$, diverguje |
| 56. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{3}{4n+2} \left(\frac{3}{5}\right)^n$ | $\lim_{n \rightarrow \infty} \left \frac{a_{n+1}}{a_n} \right = \frac{3}{5}$, konverguje |
| 57. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n \cdot 3^n}$ | $\lim_{n \rightarrow \infty} \left \frac{a_{n+1}}{a_n} \right = \frac{1}{3}$, konverguje |
| 58. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{2^n}$ | $\lim_{n \rightarrow \infty} \left \frac{a_{n+1}}{a_n} \right = \frac{1}{2}$, konverguje |
| 59. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n+1}{n^2 \cdot 3^n}$ | $\lim_{n \rightarrow \infty} \left \frac{a_{n+1}}{a_n} \right = \frac{1}{3}$, konverguje |
| 60. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot 3^n}{n+4}$ | $\lim_{n \rightarrow \infty} \left \frac{a_{n+1}}{a_n} \right = 3$, diverguje |
| 61. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{3}{(2n-1) 2^n}$ | $\lim_{n \rightarrow \infty} \left \frac{a_{n+1}}{a_n} \right = \frac{1}{2}$, konverguje |
| 62. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n-1}{(n^2+1) 2^n}$ | $\lim_{n \rightarrow \infty} \left \frac{a_{n+1}}{a_n} \right = \frac{1}{2}$, konverguje |
| 63. | $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{(n+4) 2^n}{n^2-1}$ | $\lim_{n \rightarrow \infty} \left \frac{a_{n+1}}{a_n} \right = 2$, diverguje |
| 64. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!}$ | $\lim_{n \rightarrow \infty} \left \frac{a_{n+1}}{a_n} \right = 0$, konverguje |

65. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n+1}{2^n(n-1)!}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = 0$, konverguje
66. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot 10^n \cdot n!}{(n+1)!}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = 10$, diverguje
67. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{3^n(n-1)!}{5^n n!}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = \frac{3}{5}$, konverguje
68. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n!}{3^n(n+1)}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = \infty$, diverguje
69. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{6^n(n^2-1)}{n!}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = 0$, konverguje
70. $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{2^n(n+1)!}{n^2-2}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = \infty$, diverguje
71. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2}{(n+2)!}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = 0$, konverguje
72. $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2}{7}\right)^n \frac{(n-1)!}{n!}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = \frac{2}{7}$, konverguje
73. $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2}{7}\right)^n \frac{n}{(n+1)!}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = 0$, konverguje
74. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(n!)^2}{(2n)!}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = \frac{1}{4}$, konverguje
75. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n!}{(3n)!}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = 0$, konverguje
76. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{3^n}{(2n)!}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = 0$, konverguje
77. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n+2)!}{2^n(3n+5)}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = \infty$, diverguje
78. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n!}{n^n}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = \frac{1}{e}$, konverguje
79. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^n}{(n!)^2}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = 0$, konverguje
80. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2^n}{(n+1)!}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = 0$, konverguje
81. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2^n n!}{n^n}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = \frac{2}{e}$, konverguje
82. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{3^n n!}{n^n}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = \frac{3}{e}$, diverguje
83. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(3n+2)!}{10^n n^2}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = \infty$, diverguje

84. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot 10^n \cdot n!}{(2n)!}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = 0$, konverguje
85. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2}{2e^n}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = \frac{1}{e}$, konverguje
86. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^n}{n! 3^n}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = \frac{e}{3}$, konverguje
87. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{3^n (n+1)!}{\left(\frac{1}{2}\right)^n (n+2)!}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = 6$, diverguje
88. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n n}{(n+1)!}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = 0$, konverguje
89. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n n^2}{2e^n}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = \frac{1}{e}$, konverguje
90. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n+1}{2^n (n-1)!}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = 0$, konverguje
91. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(n-1)!}{10^{n+1}}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = \infty$, diverguje
92. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(n-2)!}{3 \cdot 10^{n+2}}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = \infty$, diverguje

Poznámka: Ak jednotlivé limity pri D'Alembertovom podielovom kritériu sú rovné 1, potom pomocou tohto kritéria nevieme rozhodnúť, či daný rad je konvergentný alebo divergentný. Musíme teda použiť iné kritérium.

Veta 1.4. Cauchyho odmocninové kritérium

Nech $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ je nekonečný číselný rad.

(a) Ak $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} < 1$, tak je rad $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ absolútne konvergentný.

(b) Ak $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} > 1$, tak je rad $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ divergentný.

Príklad 1.10. Vyšetrite konvergenciu radu $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2n}{5n+1} \right)^{3n+2}$.

Riešenie: n -tý člen radu je rovný $a_n = \left(\frac{2n}{5n+1} \right)^{3n+2} > 0$. Na základe Cauchyho odmocninového

kritéria dostávame

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{\left(\frac{2n}{5n+1}\right)^{3n+2}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{2n}{5n+1}\right)^{\frac{3n+2}{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{2n}{5n+1}\right)^{3+\frac{2}{n}} = \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{2n}{5n+1}\right)^3 \cdot \left(\frac{2n}{5n+1}\right)^{\frac{2}{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{2n}{5n+1}\right)^3 \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{2n}{5n+1}\right)^{\frac{2}{n}} = \\ &= \left(\frac{2}{5}\right)^3 \left(\frac{2}{5}\right)^0 = \frac{8}{125} < 1. \end{aligned}$$

Z toho vyplýva, že daný číselný rad konverguje.

Príklad 1.11. Vyšetrite konvergenciu radu $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{n+4}{n+1}\right)^{n^2}$.

Riešenie: n -tý člen radu je rovný $a_n = \left(\frac{n+4}{n+1}\right)^{n^2}$. Na základe Cauchyho odmocninového kritéria dostávame

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{\left(\frac{n+4}{n+1}\right)^{n^2}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{n+4}{n+1}\right)^{\frac{n^2}{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{n+4}{n+1}\right)^n = \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{n(1+\frac{4}{n})}{n(1+\frac{1}{n})}\right)^n = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(1+\frac{4}{n})^n}{(1+\frac{1}{n})^n} = \frac{e^4}{e^1} = e^3 > 1. \end{aligned}$$

Z toho vyplýva, že daný číselný rad diverguje.

Poznámka: Vzťah $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{k}{n}\right)^n = e^k$, $k \in \mathbb{R}$ poznáme z predmetu Matematika I.

Neriešené úlohy:

V nasledujúcich úlohách vyšetrite pomocou Cauchyho odmocninového kritéria konvergenciu radu:

- | | |
|--|--|
| 93. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^{2n-1}}$ | $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{ a_n } = \frac{1}{4}$, konverguje |
| 94. $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{2^{2n-1}} + \frac{1}{3^{2n}}\right)$ | $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{ a_n } = \frac{13}{36}$, konverguje |
| 95. $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{n+2}{2n-1}\right)^n$ | $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{ a_n } = \frac{1}{2}$, konverguje |
| 96. $\sum_{n=3}^{\infty} \left(\frac{4n+1}{2n-5}\right)^n$ | $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{ a_n } = 2$, diverguje |
| 97. $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{3n-2}{4n-2}\right)^n$ | $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{ a_n } = \frac{3}{4}$, konverguje |

98. $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{5n-3}{2n+1}\right)^n$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = \frac{5}{2}$, diverguje
99. $\sum_{n=1}^{\infty} \operatorname{arctg}^n \frac{1}{n}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = 0$, konverguje
100. $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2n}{3n+1}\right)^{2n-1}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = \frac{4}{9}$, konverguje
101. $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{8n+2}{2n-1}\right)^{\frac{n}{2}+3}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = 2$, diverguje
102. $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{n+5}{3n-2}\right)^{2n+1}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = \frac{1}{9}$, konverguje
103. $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2n+1}{3n+2}\right)^{2n-1}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = \frac{4}{9}$, konverguje
104. $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{4n+1}{3n-1}\right)^{n+3}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = \frac{4}{3}$, diverguje
105. $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{10n+3}{n-2}\right)^{3n+1}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = 10^3$, diverguje
106. $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{n^2}{3n^2+2}\right)^{2n+2}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = \frac{1}{9}$, konverguje
107. $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2n^2+1}{3n^2-2}\right)^{n+1}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = \frac{2}{3}$, konverguje
108. $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{5n^3+n}{2n^3-1}\right)^{\frac{n}{2}}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = \sqrt{\frac{5}{2}}$, diverguje
109. $\sum_{n=1}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{n^2}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = \frac{1}{e}$, konverguje
110. $\sum_{n=3}^{\infty} \left(\frac{n+5}{n-2}\right)^{n^2}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = e^7$, diverguje
111. $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{n-3}{n+1}\right)^{n^2}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = \frac{1}{e^4}$, konverguje
112. $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{n+3}{n-2}\right)^{2n^2}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = e^{10}$, diverguje
113. $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2n^2+1}{n^2+1}\right)^{n^2}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = \infty$, diverguje
114. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{3^n} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n^2}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = \frac{e}{3}$, konverguje
115. $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{6}{5}\right)^n \left(1 + \frac{2}{n}\right)^{n^2}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = \frac{6e^2}{5}$, diverguje
116. $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2}{7}\right)^n \left(\frac{n+1}{n}\right)^{n^2}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = \frac{2}{7} e$, konverguje

$$\begin{array}{ll}
117. \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(n-2)^{n^2}}{3^n n^{n^2}} & \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = \frac{1}{3e^2}, \text{ konverguje} \\
118. \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(n+1)^{n^2}}{3^n n^{n^2}} & \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = \frac{e}{3}, \text{ konverguje} \\
119. \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2^n (n+2)^{n^2}}{3^n (n+1)^{n^2}} & \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = \frac{2}{3}e, \text{ diverguje}
\end{array}$$

Poznámka: Ak jednotlivé limity pri Cauchyho odmocninovom kritériu sú rovné 1, potom pomocou tohto kritéria nevieme rozhodnúť, či daný rad je konvergentný alebo divergentný. Musíme teda použiť iné kritérium.

Veta 1.5. Cauchyho integrálne kritérium

Nech pre rad $\sum_{n=1}^{\infty} |a_n|$ existuje spojitá funkcia $f(x)$ nerastúca na $\langle K, \infty \rangle$ a nech $\forall n > K: f(n) = |a_n|$.

(a) Ak $\int_K^{\infty} f(x) dx < \infty$, tak je rad $\sum_{n=1}^{\infty} |a_n|$ absolútne konvergentný.

(b) Ak $\int_K^{\infty} f(x) dx = \infty$, tak rad je $\sum_{n=1}^{\infty} |a_n|$ divergentný.

Príklad 1.12. Vyšetrite konvergenciu radu $\sum_{n=4}^{\infty} \frac{1}{n^2 - 9}$.

Riešenie: Položme $f(x) = \frac{1}{x^2 - 9}$. Definičný obor tejto funkcie je $D(f) = \mathbb{R} - \{\pm 3\}$. Funkcia je teda spojitá na intervale $\langle 4, \infty \rangle$. Je zrejmé, že pre každé $n \geq 4$ je $f(n) = \frac{1}{n^2 - 9} = |a_n|$. Pretože $f'(x) = \frac{-2x}{(x^2 - 9)^2} < 0$, je funkcia $f(x)$ klesajúca na intervale $\langle 4, \infty \rangle$ a možno teda použiť Cauchyho integrálne kritérium. Platí

$$\begin{aligned}
\int_4^{\infty} \frac{1}{x^2 - 9} dx &= - \int_4^{\infty} \frac{1}{9 - x^2} dx = - \lim_{a \rightarrow \infty} \int_4^a \frac{1}{9 - x^2} dx = - \frac{1}{6} \lim_{a \rightarrow \infty} \left[\ln \left| \frac{3+x}{3-x} \right| \right]_4^a = \\
&= - \frac{1}{6} \lim_{a \rightarrow \infty} \left(\ln \left| \frac{3+a}{3-a} \right|^{-1} - \ln \left| \frac{3+4}{3-4} \right| \right) = - \frac{1}{6} (\ln |-1| - \ln |-7|) = - \frac{1}{6} (\ln 1 - \ln 7) = \frac{1}{6} \ln 7 \neq \infty.
\end{aligned}$$

Integrál je konvergentný. Z toho vyplýva, že daný číselný rad takisto konverguje.

Príklad 1.13. Vyšetrite konvergenciu radu $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{3}{n \ln n}$.

Riešenie: Položme $f(x) = \frac{3}{x \ln x}$. Definičný obor tejto funkcie je $D(f) = (0, \infty) - \{1\}$. Funkcia je teda spojitá na intervale $\langle 2, \infty \rangle$. Je zrejmé, že pre každé $n \geq 2$ je $f(n) = \frac{3}{n \ln n} = |a_n|$. Pretože $f'(x) = -\frac{3(1+\ln x)}{(x \ln x)^2} < 0$, je funkcia $f(x)$ klesajúca na intervale $\langle 2, \infty \rangle$ a možno teda použiť Cauchyho integrálne kritérium. Platí

$$\begin{aligned} \int_2^{\infty} \frac{3}{x \ln x} dx &= 3 \lim_{a \rightarrow \infty} \int_2^a \frac{1}{x \ln x} dx = 3 \lim_{a \rightarrow \infty} [\ln |\ln x|]_2^a = \\ &= 3 \lim_{a \rightarrow \infty} (\ln |\ln a| - \ln |\ln 2|) = 3 \lim_{a \rightarrow \infty} \ln \left| \frac{\ln a}{\ln 2} \right| = 3 \cdot \infty = \infty. \end{aligned}$$

Integrál je divergentný. Z toho vyplýva, že daný číselný rad takisto diverguje.

Poznámka: Z Matematiky II vieme, že ak výsledok nevlastného integrálu je vlastné číslo, tak je integrál konvergentný a ak výsledok nevlastného integrálu je nevlastné číslo, tak je integrál divergentný.

Neriešené úlohy:

V nasledujúcich úlohách vyšetrite pomocou Cauchyho integrálneho kritéria konvergenciu radu:

- | | | |
|------|--|------------|
| 120. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{4n+3}$ | diverguje |
| 121. | $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{2}{3n-5}$ | diverguje |
| 122. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{3}{2n+1}$ | diverguje |
| 123. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{4n+7}$ | diverguje |
| 124. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n}{1+n^2}$ | diverguje |
| 125. | $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{n}{n^2+3}$ | diverguje |
| 126. | $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{3n}{n^2-1}$ | diverguje |
| 127. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n+n^2}$ | konverguje |
| 128. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n^2+3}$ | konverguje |
| 129. | $\sum_{n=3}^{\infty} \frac{2}{n^2-1}$ | konverguje |

130. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\sqrt{n^2+1}}$ diverguje
131. $\sum_{n=3}^{\infty} \frac{3}{\sqrt{n^2-2}}$ diverguje
132. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{\sqrt{n^2+1}}$ diverguje
133. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n^2+9}{n^4}$ konverguje
134. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^4-7n^2+2}{n^6}$ konverguje
135. $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{2n \ln n}$ diverguje
136. $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n \ln^2 n}$ konverguje
137. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\ln n}{n}$ diverguje
138. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\ln n}{n^2}$ konverguje
139. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\ln n}{\sqrt{n^3}}$ diverguje
140. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-\sqrt{n}}}{\sqrt{n}}$ konverguje

Definícia 1.7. Rad $a_1 - a_2 + a_3 - \dots + (-1)^{n+1}a_n + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1}a_n$, kde $a_n > 0$ pre $\forall n \in \mathbb{N}$, nazývame **radom so striedavými znamienkami (alternujúcim radom)**.

Veta 1.6. Leibnizovo kritérium

Nech $\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1}a_n$ je rad so striedavými znamienkami. Nech postupnosť $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$ je nerastúca.

Potom rad $\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1}a_n$ je konvergentný práve vtedy, ak $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$.

Príklad 1.14. Vyšetrite konvergenciu radu $\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{1}{\sqrt{2n}}$.

Riešenie: $\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{1}{\sqrt{2n}}$ je rad so striedavými znamienkami, kde $a_n = \frac{1}{\sqrt{2n}}$. Naviac platí

$$\forall n \in \mathbb{N}: n < n+1 \Rightarrow 2n < 2(n+1) \Rightarrow \sqrt{2n} < \sqrt{2(n+1)} \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{2n}} > \frac{1}{\sqrt{2(n+1)}} \Rightarrow a_n > a_{n+1}.$$

Postupnosť $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$ pre $a_n = \frac{1}{\sqrt{2n}}$ je klesajúca, z čoho vyplýva, že je aj nerastúca. Na základe toho je možné použiť Leibnizovo kritérium. Keďže $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{2n}} = 0$, podľa Leibnizovho kritéria je rad $\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{1}{\sqrt{2n}}$ konvergentný.

Príklad 1.15. Vyšetrite konvergenciu radu $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-1)^n n}{2n-3}$.

Riešenie: $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-1)^n n}{2n-3}$ je rad so striedavými znamienkami, kde $a_n = \frac{n}{2n-3}$. Člen a_n vieme upraviť na tvar $a_n = \frac{n}{2n-3} = \frac{n}{n(2-\frac{3}{n})} = \frac{1}{2-\frac{3}{n}}$. Navyiac platí

$$\begin{aligned} \forall n \in \mathbb{N}, n > 1: n < n+1 &\Rightarrow \frac{1}{n} > \frac{1}{n+1} \Rightarrow -\frac{3}{n} < -\frac{3}{n+1} \Rightarrow 2 - \frac{3}{n} < 2 - \frac{3}{n+1} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \frac{1}{2 - \frac{3}{n}} > \frac{1}{2 - \frac{3}{n+1}} \Rightarrow a_n > a_{n+1}. \end{aligned}$$

Postupnosť $\{a_n\}_{n=2}^{\infty}$ pre $a_n = \frac{n}{2n-3}$ je klesajúca, z čoho vyplýva, že je aj nerastúca. Na základe toho je možné použiť Leibnizovo kritérium. Keďže $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{2n-3} = \frac{1}{2} \neq 0$, podľa Leibnizovho kritéria je rad $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-1)^n n}{2n-3}$ divergentný.

Neriešené úlohy:

V nasledujúcich úlohách vyšetrite pomocou Leibnizovho kritéria konvergenciu radu:

- | | | |
|------|--|---|
| 141. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2\sqrt{n}}$ | $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$, konverguje |
| 142. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+3}}{\ln(2n+1)}$ | $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$, konverguje |
| 143. | $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n(n+2)}{n+1}$ | $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 1$, diverguje |
| 144. | $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n^2}$ | $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$, konverguje |
| 145. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1}$ | $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$, konverguje |
| 146. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n(n+1)}{n}$ | $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 1$, diverguje |
| 147. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+2}(2n)}{3n-1}$ | $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \frac{2}{3}$, diverguje |
| 148. | $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n \ln n}$ | $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$, konverguje |

$$149. \quad \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} n^3}{3^n} \quad \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0, \text{ konverguje}$$

$$150. \quad \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \sin \frac{\pi}{2^n} \quad \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0, \text{ konverguje}$$

Definícia 1.8. Majme rady $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$, $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$, pričom $b_n \geq 0$ pre všetky $n \in \mathbb{N}$. Rad $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ nazývame **majorantný rad k radu** $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ a rad $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ nazývame **minorantný rad k radu** $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$, ak pre každé $n \in \mathbb{N}$ $|a_n| \leq b_n$.

Veta 1.7. Majorantné porovnávacie kritérium

Majme rady $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ a $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$, kde $0 \leq a_n \leq b_n$ pre $n = 1, 2, \dots$

Ak majorantný rad $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ konverguje, tak konverguje aj rad $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$.

Ak minorantný rad $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ diverguje, tak diverguje aj rad $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$.

Veta 1.8. Limitné porovnávacie kritérium

Nech pre každé $n \in \mathbb{N}$ je $a_n \geq 0$ a $b_n > 0$.

(a) Ak existuje vlastná limita $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n}$ a rad $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ konverguje, tak konverguje aj rad $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$.

(b) Ak existuje vlastná limita $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n}$ rôzna od nuly alebo je táto limita nevlastná a rad $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ diverguje, tak diverguje aj rad $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$.

Poznámka: Použitie porovnávacieho kritéria vyžaduje skúsenosti na skonštruovanie majorantného resp. minorantného radu na základe hypotézy o konvergencii, resp. divergencii vyšetřovaného radu. Často sa používa na toto porovnávanie zovšeobecnený harmonický rad.

Príklad 1.16. Vyšetřime konvergenciu radu $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n+1}{n^2+4n}$.

Riešenie: n -tý člen radu je rovný $a_n = \frac{n+1}{n^2+4n}$. Skúsime porovnať daný rad s harmonickým radom $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n}$, o ktorom vieme, že je divergentný. Teda položíme $b_n = \frac{1}{n}$. Keďže platí

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{n+1}{n^2+4n}}{\frac{1}{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^2+n}{n^2+4n} = 1 \neq 0.$$

Podľa limitného porovnávacieho kritéria je aj rad $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n+1}{n^2+4n}$ divergentný.

Príklad 1.17. Vyšetrite konvergenciu radu $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2 + 4n}{2n^5 - 3n + 2}$.

Riešenie: n -tý člen radu je rovný $a_n = \frac{n^2+4n}{2n^5-3n+2}$. Skúsime porovnať daný rad s radom $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3}$, o ktorom vieme, že je konvergentný. Teda položíme $b_n = \frac{1}{n^3}$. Keďže platí

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{n^2+4n}{2n^5-3n+2}}{\frac{1}{n^3}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^3(n^2+4n)}{2n^5-3n+2} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^5+4n^4}{2n^5-3n+2} = \frac{1}{2}.$$

Táto limita je vlastná a podľa limitného porovnávacieho kritéria je rad $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2+4n}{2n^5-3n+2}$ konvergentný.

Neriešené úlohy:

V nasledujúcich úlohách vyšetrite pomocou porovnávacieho kritéria konvergenciu radu:

- | | | |
|------|--|------------|
| 151. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{4n+3}$ | diverguje |
| 152. | $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{2}{3n-5}$ | diverguje |
| 153. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{3}{2n+1}$ | diverguje |
| 154. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{4n+7}$ | diverguje |
| 155. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n}{1+n^2}$ | diverguje |
| 156. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{n^2+3}$ | diverguje |
| 157. | $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{3n}{n^2-1}$ | diverguje |
| 158. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n^2+3}$ | konverguje |
| 159. | $\sum_{n=3}^{\infty} \frac{3}{n^2-4}$ | konverguje |
| 160. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n^2+9}{n^4}$ | konverguje |
| 161. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^4-7n^2+2}{n^6}$ | konverguje |
| 162. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{3}{n^{3,6}}$ | konverguje |

163. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{5}{\sqrt{n^3}}$ konverguje
164. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\sqrt{n}}$ diverguje
165. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt[7]{n^3}}$ diverguje
166. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{3} \left(\frac{5}{7}\right)^n$ konverguje
167. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{3}{2} \left(\frac{7}{5}\right)^n$ diverguje
168. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{3}{2} \left(\frac{1}{3}\right)^n$ konverguje
169. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{6} \frac{2^{n+1}}{4^n}$ konverguje
170. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{5} \frac{3^n}{2^{n-1}}$ diverguje

2 Funkcionálne a mocninové rady

Definícia 2.1. Nech $\{f_n(x)\}_{n=1}^{\infty}$ je postupnosť funkcií definovaných na intervale $\langle a, b \rangle$, potom výraz $\sum_{n=1}^{\infty} f_n(x)$ nazývame **nekonečný funkcionálny rad**.

Poznámka: Pre vyšetrenie konvergencie funkcionálnych radov môžeme použiť D'Alembertovo podielové alebo Cauchyho odmocninové kritérium v upravenom tvare.

Teda ak $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{f_{n+1}(x)}{f_n(x)} \right| < 1$, resp. $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|f_n(x)|} < 1$, tak funkcionálny rad konverguje v x .

Definícia 2.2. Ak $f_n(x) = a_n(x - a)^n$, rad $\sum_{n=0}^{\infty} a_n(x - a)^n$ nazývame **mocninový rad so stredom v bode a** .

Pre každý mocninový rad $\sum_{n=0}^{\infty} a_n(x - a)^n$ nastáva jeden z prípadov:

- rad konverguje len v bode $x = a \Rightarrow \rho = 0$,
- rad konverguje pre $\forall x \in R \Rightarrow \rho = \infty$,
- $\exists \rho > 0$, že na intervale $(a - \rho, a + \rho)$ daný rad konverguje a na množine $R \setminus \langle a - \rho, a + \rho \rangle$ daný rad diverguje.

Číslo ρ sa nazýva **polomer konvergencie** a interval $(a - \rho, a + \rho)$ označuje **interval konvergencie (IK)**.

Ak existuje $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = \lambda$, resp. $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = \lambda$, tak pre polomer konvergencie mocninového radu $\sum_{n=0}^{\infty} a_n(x - a)^n$ platí

- $\rho = \frac{1}{\lambda}$ pre $0 < \lambda < \infty$,
- $\rho = \infty$ pre $\lambda = 0$,
- $\rho = 0$ pre $\lambda = \infty$.

Poznámka: Interval konvergencie $(a - \rho, a + \rho)$ je otvorený. Ak vyšetříme konvergenciu aj v krajných bodoch, môže tento interval ostať otvorený, môže sa zmeniť na polouzavretý, resp. uzavretý. V takom prípade novovzniknutý interval budeme označovať ako **obor konvergencie (OK)**.

Príklad 2.1. Nájďme polomer konvergencie mocninového radu $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(x+2)^n}{3^n(n+1)(n+2)}$.

Riešenie:

Na určenie polomeru konvergencie mocninového radu použijeme D'Alembertovo kritérium.

Vidíme, že $a_n = \frac{1}{3^n(n+1)(n+2)}$ a $a_{n+1} = \frac{1}{3^{n+1}(n+2)(n+3)}$. Potom

$$\lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{3^{n+1}(n+2)(n+3)}}{\frac{1}{3^n(n+1)(n+2)}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n+1}{3(n+3)} = \frac{1}{3}.$$

Podľa Definície 2.2 je polomer konvergencie $\rho = \frac{1}{\lambda} = 3$.

Príklad 2.2. Nájďme polomer konvergencie mocninového radu $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n 4^n}{n}$.

Riešenie: Na určenie polomeru konvergencie mocninového radu použijeme Cauchyho odmocninové kritérium a využijeme vzťah $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{n} = 1$. Platí

$$\lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{\left| \frac{4^n}{n} \right|} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{4}{\sqrt[n]{n}} = 4 \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt[n]{n}} = 4.$$

Podľa Definície 2.2 je polomer konvergencie $\rho = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{4}$.

Neriešené úlohy:

V nasledujúcich úlohách určte polomer konvergencie mocninového radu:

- | | | |
|------|--|---------------|
| 171. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} x^n$ | 1 |
| 172. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)} (x-1)^n$ | 1 |
| 173. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n!}$ | ∞ |
| 174. | $\sum_{n=1}^{\infty} n! x^n$ | 0 |
| 175. | $\sum_{n=1}^{\infty} n 5^n x^n$ | $\frac{1}{5}$ |
| 176. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2^n}{n} x^n$ | $\frac{1}{2}$ |
| 177. | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{5^n}{n} x^n$ | $\frac{1}{5}$ |

178.	$\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2}{3}\right)^n \frac{x^n}{n}$	$\frac{3}{2}$
179.	$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2^n n}{(n+1)3^n} x^n$	$\frac{3}{2}$
180.	$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(n+1)(n+2)3^n} (x+1)^n$	3
181.	$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^k}{n!} x^n$	∞
182.	$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n! x^n}{(2n-1)!}$	∞
183.	$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{10^n}{\sqrt{n}} x^n$	$\frac{1}{10}$
184.	$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{100^n}{\sqrt{n+1}} x^n$	$\frac{1}{100}$
185.	$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{3^n}{\sqrt{2^n}} x^n$	$\frac{\sqrt{2}}{3}$
186.	$\sum_{n=1}^{\infty} n^n (x+3)^n$	0
187.	$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(n-1)!}{n^n} x^n$	e
188.	$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^n}{n!} x^n$	$\frac{1}{e}$
189.	$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n!}{n^n} (x-2)^n$	e
190.	$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(3n)!}{(2n)! n^n} x^n$	$\frac{4e}{27}$
191.	$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(n!)^2 x^n}{(2n)!}$	4

Príklad 2.3. Nájďme obor konvergence mocninového radu $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(x+2)^n}{3^n(n+1)(n+2)}$.

Riešenie: Riešenie tejto úlohy urobíme dvoma spôsobmi.

Riešenie spôsobom A: Použijeme D'Alembertovo kritérium pre konvergenciu funkcionálnych radov. Vidíme, že $f_n(x) = \frac{(x+2)^n}{3^n(n+1)(n+2)}$ a $f_{n+1}(x) = \frac{(x+2)^{n+1}}{3^{n+1}(n+2)(n+3)}$. Potom

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{f_{n+1}(x)}{f_n(x)} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{\frac{(x+2)^{n+1}}{3^{n+1}(n+2)(n+3)}}{\frac{(x+2)^n}{3^n(n+1)(n+2)}} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{(n+1)}{3(n+3)} (x+2) \right| = \frac{1}{3} |x+2|.$$

Podľa D'Alembertovho kritéria je rad konvergentný vtedy, ak platí $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{f_{n+1}(x)}{f_n(x)} \right| < 1$. Pre daný rad teda musí platiť podmienka $\frac{1}{3}|x+2| < 1$, z čoho dostávame

$$\frac{1}{3}|x+2| < 1 \Leftrightarrow -1 < \frac{1}{3}(x+2) < 1 \Leftrightarrow -3 < x+2 < 3 \Leftrightarrow -5 < x < 1.$$

Pre všetky $x \in (-5, 1)$ rad $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(x+2)^n}{3^n(n+1)(n+2)}$ konverguje.

Z toho vyplýva, že interval konvergenzie je $IK = (-5, 1)$. Ešte musíme vyšetriť konvergenziu radu v krajných bodoch intervalu konvergenzie. K tomu použijeme kritériá konvergenzie číselných radov.

1. Pre $x = -5$ dostaneme číselný rad

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-5+2)^n}{3^n(n+1)(n+2)} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-3)^n}{3^n(n+1)(n+2)} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(n+1)(n+2)}.$$

Dostávame rad so striedavými znamienkami, kde $a_n = \frac{1}{(n+1)(n+2)}$ a podľa Leibnizovho kritéria zistíme, či daný rad konverguje. O postupnosti $\left\{ \frac{1}{(n+1)(n+2)} \right\}_{n=1}^{\infty}$ vieme, že je nerastúca a pretože $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{(n+1)(n+2)} = 0$, rad $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(n+1)(n+2)}$ je konvergentný.

2. Pre $x = 1$ dostaneme číselný rad

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{3^n}{3^n(n+1)(n+2)} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(n+1)(n+2)}.$$

Daný číselný rad má súčet $s = \frac{1}{2}$ (pozri Príklad 1.1) a teda je konvergentný.

Obor konvergenzie radu $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(x+2)^n}{3^n(n+1)(n+2)}$ je interval $\langle -5, 1 \rangle$.

Riešenie spôsobom B: Vyšetrovaný rad je mocninový. Vidíme, že stred radu je $a = -2$.

Na určenie polomeru konvergenzie mocninového radu použijeme D'Alembertovo kritérium.

Vidíme, že $a_n = \frac{1}{3^n(n+1)(n+2)}$ a $a_{n+1} = \frac{1}{3^{n+1}(n+2)(n+3)}$. Potom

$$\lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{3^{n+1}(n+2)(n+3)}}{\frac{1}{3^n(n+1)(n+2)}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n+1}{3(n+3)} = \frac{1}{3}.$$

Polomer konvergenzie je $\rho = \frac{1}{\lambda} = 3$.

Interval konvergenzie je $(a - \rho, a + \rho) = (-2 - 3, -2 + 3) = (-5, 1)$. Konvergenziu radu v krajných bodoch intervalu konvergenzie určíme rovnako ako v Riešení spôsobom A.

Obor konvergenzie radu $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(x+2)^n}{3^n(n+1)(n+2)}$ je interval $\langle -5, 1 \rangle$.

Príklad 2.4. Nájdime obor konvergence mocninového radu $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n 4^n}{n}$.

Riešenie: Daný mocninový rad má stred v bode $a = 0$ a $a_n = \frac{4^n}{n}$. Cauchyho odmocninové kritérium použijeme na určenie polomeru konvergence mocninového radu a využijeme vzťah $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{n} = 1$. Platí

$$\lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{\left| \frac{4^n}{n} \right|} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{4}{\sqrt[n]{n}} = 4 \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt[n]{n}} = 4.$$

Polomer konvergence $\rho = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{4}$.

Interval konvergence je $(a - \rho, a + \rho) = (0 - \frac{1}{4}, 0 + \frac{1}{4}) = (-\frac{1}{4}, \frac{1}{4})$.

Ešte musíme vyšetriť konvergenciu radu v krajných hodnotách a k tomu použijeme kritériá konvergence číselných radov.

1. Pre $x = -\frac{1}{4}$ dostaneme číselný rad

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n}.$$

Dostávame rad so striedavými znamienkami, kde $a_n = \frac{1}{n}$ a podľa Leibnizovho kritéria zistíme, či daný rad konverguje. O postupnosti $\{\frac{1}{n}\}_{n=1}^{\infty}$ vieme, že je nerastúca a keďže $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} = 0$, rad $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n}$ je konvergentný.

2. Pre $x = \frac{1}{4}$ dostaneme číselný rad

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

Tento rad je harmonický rad, preto je divergentný.

Obor konvergence radu $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n 4^n}{n}$ je interval $\left\langle -\frac{1}{4}, \frac{1}{4} \right\rangle$.

Neriešené úlohy:

V nasledujúcich úlohách nájdite obor konvergence funkcionálneho radu:

$$192. \quad \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{(n-1)!} \quad (-\infty, \infty)$$

$$193. \quad \sum_{n=1}^{\infty} n! (x+2)^n \quad \{-2\}$$

$$194. \quad \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n 3^n} \quad \langle -3, 3 \rangle$$

195. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n x^{2n}}{9^n}$ $(-3, 3)$
196. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n x^{2n}}{4^n}$ $(-2, 2)$
197. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^{2n}}{n}$ $(-1, 1)$
198. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n \sqrt{n}}$ $\langle -1, 1 \rangle$
199. $\sum_{n=1}^{\infty} n 2^n (x-1)^n$ $\left(\frac{1}{2}, \frac{3}{2}\right)$
200. $\sum_{n=1}^{\infty} (3-x^2)^n$ $(-2, -\sqrt{2}) \cup (\sqrt{2}, 2)$
201. $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{x(x+n)}{n}\right)^n$ $(-1, 1)$
202. $\sum_{n=1}^{\infty} n e^{-nx}$ $(0, \infty)$
203. $\sum_{n=1}^{\infty} nx e^{-nx}$ $\langle 0, \infty \rangle$
204. $\sum_{n=1}^{\infty} \ln^n x$ $\left(\frac{1}{e}, e\right)$

V nasledujúcich úlohách nájdite obor konvergence mocninového radu:

205. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} x^n$ $\langle -1, 1 \rangle$
206. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)} (x-1)^n$ $\langle 0, 2 \rangle$
207. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n!}$ $(-\infty, \infty)$
208. $\sum_{n=1}^{\infty} n! x^n$ $\{0\}$
209. $\sum_{n=1}^{\infty} n 5^n x^n$ $\left(-\frac{1}{5}, \frac{1}{5}\right)$
210. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2^n}{n} x^n$ $\left\langle -\frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right\rangle$
211. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{5^n}{n} x^n$ $\left\langle -\frac{1}{5}, \frac{1}{5} \right\rangle$
212. $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2}{3}\right)^n \frac{x^n}{n}$ $\left\langle -\frac{3}{2}, \frac{3}{2} \right\rangle$

213. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2^n n}{(n+1) 3^n} x^n$ $\left(-\frac{3}{2}, \frac{3}{2}\right)$
214. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(n+1)(n+2) 3^n} (x+1)^n$ $\langle -4, 2 \rangle$
215. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^k}{n!} x^n$ $(-\infty, \infty)$
216. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n! x^n}{(2n-1)!}$ $(-\infty, \infty)$
217. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{10^n}{\sqrt{n}} x^n$ $\left\langle -\frac{1}{10}, \frac{1}{10} \right\rangle$
218. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{100^n}{\sqrt{n+1}} x^n$ $\left\langle -\frac{1}{100}, \frac{1}{100} \right\rangle$
219. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{3^n}{\sqrt{2^n}} x^n$ $\left(-\frac{\sqrt{2}}{3}, \frac{\sqrt{2}}{3}\right)$
220. $\sum_{n=1}^{\infty} n^n (x+3)^n$ $\{-3\}$

Veta 2.1 (Veta o derivovaní a integrovaní mocninového radu). *Nech $\rho > 0$ je polomer konvergencie mocninového radu $\sum_{n=1}^{\infty} a_n(x-a)^n$ a nech funkcia $s(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n(x-a)^n$, $x \in (a-\rho, a+\rho)$. Potom pre každé $x \in (a-\rho, a+\rho)$ platí*

- $s'(x) = \sum_{n=1}^{\infty} n a_n(x-a)^{n-1}$,
- $\int_a^x s(t) dt = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{a_n}{n+1} (x-a)^{n+1}$.

Príklad 2.5. *Derivovaním alebo integrovaním vhodného radu nájdime súčet radu $\sum_{n=1}^{\infty} n x^{n-1}$ na vhodnom intervale.*

Riešenie: Keďže platí $(x^n)' = n x^{n-1}$, môžeme napísať

$$\sum_{n=1}^{\infty} n x^{n-1} = \left(\sum_{n=1}^{\infty} x^n \right)'$$

Rad $\sum_{n=1}^{\infty} x^n$ je geometrický rad, kde $a_1 = x$, $q = x$, a teda tento rad je konvergentný pre $|x| < 1$. Potom súčet tohto geometrického radu je $s = \frac{a_1}{1-q} = \frac{x}{1-x}$. Teda súčet radu $\sum_{n=1}^{\infty} n x^{n-1}$ je rovný

$$s = \left(\frac{x}{1-x} \right)' = \frac{1}{(1-x)^2} \quad \text{pre } x \in (-1, 1).$$

Neriešené úlohy:

V nasledujúcich úlohách derivovaním alebo integrovaním vhodného radu nájdite súčet daného radu na vhodnom intervale:

$$\begin{array}{ll}
 221. \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)x^n & \frac{1}{(1-x)^2} \\
 222. \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)x^n & \frac{2}{(1-x)^3} \\
 223. \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{5^n} x^{n-1} & \frac{5}{(5-x)^2} \\
 224. \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1)x^{2n} & \frac{1+x^2}{(1-x^2)^2} \\
 225. \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n} (x-3)^{2n} & \ln|x-3| + \frac{1}{2} \ln|1-(x-3)^2|
 \end{array}$$

2.1 Taylorov rad

Definícia 2.3. *Nech funkcia $f(x)$ má v bode a derivácie všetkých rádov. Mocninový rad*

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(a)}{n!} (x-a)^n = f(a) + \frac{f'(a)}{1!} (x-a) + \frac{f''(a)}{2!} (x-a)^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(a)}{n!} (x-a)^n + \dots$$

nazývame **Taylorov rad funkcie so stredom v bode a** .

Uvedieme rozvoj niektorých funkcií do Taylorovho radu so stredom v bode $a = 0$:

$$e^x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} \quad \text{pre } x \in R,$$

$$\ln(1+x) = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{x^n}{n} \quad \text{pre } x \in (-1, 1),$$

$$\sin x = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!} \quad \text{pre } x \in R,$$

$$\cos x = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{2n}}{(2n)!} \quad \text{pre } x \in R.$$

Príklad 2.6. Rozviňme funkciu $f(x) = x \ln(1 + x^2)$ do Taylorovho radu.

Riešenie: Ak namiesto x dosadíme x^2 do vzťahu $\ln(1 + x) = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{x^n}{n}$, dostaneme

$$\ln(1 + x^2) = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{x^{2n}}{n}.$$

Potom vynásobíme obe strany x a úpravou dostaneme

$$x \ln(1 + x^2) = x \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{x^{2n}}{n} = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{x^{2n+1}}{n} \quad \text{pre } x \in (-1, 1).$$

Príklad 2.7. Nájdime prvé tri členy rozvoja funkcie $f(x) = x e^x$ do Taylorovho radu v bode $a = 0$.

Riešenie: Z definície Taylorovho radu vyplýva

$$f(x) \approx f(0) + \frac{f'(0)}{1!} (x - 0) + \frac{f''(0)}{2!} (x - 0)^2 + \frac{f'''(0)}{3!} (x - 0)^3.$$

Keďže platí

$$f(x) = x e^x \Rightarrow f(0) = 0,$$

$$f'(x) = e^x + x e^x \Rightarrow f'(0) = 1,$$

$$f''(x) = e^x + e^x + x e^x = 2e^x + x e^x \Rightarrow f''(0) = 2,$$

$$f'''(x) = 2e^x + e^x + x e^x = 3e^x + x e^x \Rightarrow f'''(0) = 3,$$

rozvoj funkcie $f(x) = x e^x$ do Taylorovho radu v bode $a = 0$ je

$$x e^x \approx 0 + \frac{1}{1!} x + \frac{2}{2!} x^2 + \frac{3}{3!} x^3.$$

Neriešené úlohy:

V nasledujúcich úlohách pomocou základných mocninových radov určte Taylorov rad danej funkcie so stredom v bode $a = 0$:

226. $f(x) = e^{\frac{x^2}{2}}$

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{2n}}{2^n n!}$$

227. $f(x) = e^{2x}$

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{2^n}{n!} x^n$$

228.	$f(x) = e^{-2x}$	$\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{2^n}{n!} x^n$
229.	$f(x) = x e^x$	$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{n+1}}{n!}$
230.	$f(x) = 3x e^{2x}$	$\sum_{n=0}^{\infty} 3 \frac{2^n}{n!} x^{n+1}$
231.	$f(x) = x^2 e^{-2x}$	$\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{2^n}{n!} x^{n+2}$
232.	$f(x) = 2x e^{\frac{x^2}{2}}$	$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{2n+1}}{2^{n-1} n!}$
233.	$f(x) = x^2 e^{-x^2}$	$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n!} x^{2n+2}$
234.	$f(x) = x^3 e^x$	$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{n+3}}{n!}$
235.	$f(x) = x^3 e^{-x}$	$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n!} x^{n+3}$
236.	$f(x) = x \ln(1+x)$	$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} x^{n+1}$
237.	$f(x) = x^2 \ln(1+x)$	$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} x^{n+2}$
238.	$f(x) = \ln(1+x^3)$	$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} x^{3n}$
239.	$f(x) = x \ln(1+x^3)$	$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} x^{3n+1}$
240.	$f(x) = x \sin x$	$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)!} x^{2n+2}$
240.	$f(x) = x^2 \cos x$	$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n)!} x^{2n+2}$
241.	$f(x) = \sin x^2$	$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)!} x^{4n+2}$

2.2 Fourierov rad

Definícia 2.4. Nech $f(x)$, $x \in \langle -l, l \rangle$ je po častiach spojitá, periodická funkcia s periódou $T = 2l$. Trigonometrický rad

$$\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos \frac{\pi n x}{l} + b_n \sin \frac{\pi n x}{l},$$

kde

$$a_0 = \frac{1}{l} \int_{-l}^l f(x) dx,$$

$$a_n = \frac{1}{l} \int_{-l}^l f(x) \cos \frac{\pi n x}{l} dx,$$

$$b_n = \frac{1}{l} \int_{-l}^l f(x) \sin \frac{\pi n x}{l} dx,$$

$n = 1, 2, \dots$, nazývame **Fourierov rad funkcie** $f(x)$ a píšeme

$$f(x) \approx \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{\pi n x}{l} + b_n \sin \frac{\pi n x}{l} \right).$$

Koeficienty a_0 , a_n a b_n nazývame **Fourierove koeficienty**.

Definícia 2.5. Nech $f(x)$, $x \in \langle -l, l \rangle$ je po častiach spojitá, párna, periodická funkcia s periódou $T = 2l$. Trigonometrický rad

$$\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos \frac{\pi n x}{l},$$

kde

$$a_n = \frac{2}{l} \int_0^l f(x) \cos \frac{\pi n x}{l} dx,$$

$n = 0, 1, \dots$, nazývame **kosínusový Fourierov rad funkcie** $f(x)$.

Definícia 2.6. Nech $f(x)$, $x \in \langle -l, l \rangle$ je po častiach spojitá, nepárna, periodická funkcia s periódou $T = 2l$. Trigonometrický rad

$$\sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin \frac{\pi n x}{l},$$

kde

$$b_n = \frac{2}{l} \int_0^l f(x) \sin \frac{\pi n x}{l} dx,$$

$n = 1, 2, \dots$, nazývame **sínusový Fourierov rad funkcie** $f(x)$.

V praxi sa stretávame s dejmi, ktoré sa pravidelne opakujú. Sú to tzv. periodické deje, ktoré možno popísať periodickými funkciami. Ak $f(x)$ je periodická funkcia s periódou T , tak $\forall a \in D(f)$ platí

$$\int_a^{a+T} f(x) dx = \int_0^T f(x) dx.$$

Fourierove rady sú funkcionálne rady, ktorými popisujeme periodicky sa opakujúce deje. Ak chceme pomocou kosínusového resp. sínusového Fourierovho radu vyjadriť po častiach spojitú funkciu $f(x)$, ktorá nie je ani párna ani nepárna, musíme ju najprv párne resp. nepárne predĺžiť:

- **Párne predĺženie** funkcie $f(x)$ z intervalu $\langle 0, l \rangle$ na interval $\langle -l, l \rangle$ sa nazýva funkcia

$$f_p(x) = \begin{cases} f(x) & \text{pre } x \in \langle 0, l \rangle, \\ f(-x) & \text{pre } x \in \langle -l, 0 \rangle. \end{cases}$$

- **Nepárne predĺženie** funkcie $f(x)$ z intervalu $\langle 0, l \rangle$ na interval $\langle -l, l \rangle$ sa nazýva funkcia

$$f_n(x) = \begin{cases} f(x) & \text{pre } x \in (0, l), \\ 0 & \text{pre } x = 0, \\ -f(-x) & \text{pre } x \in \langle -l, 0 \rangle. \end{cases}$$

Poznámka: Pri výpočte koeficientov Fourierovho radu často používame tieto integračné vzorce $\int \cos(kx) dx = \frac{\sin(kx)}{k}$, resp. $\int \sin(kx) dx = -\frac{\cos(kx)}{k}$, $k \in R$.

Príklad 2.8. Nájďme Fourierov rad funkcie $f(x) = x + 1$ na intervale $x \in \langle -1, 1 \rangle$.

Riešenie: Zo zadania vyplýva, že perióda je $T = 2 \Rightarrow l = 1$. Funkcia $f(x) = x + 1$ nie je na intervale $x \in \langle -1, 1 \rangle$ ani párna ani nepárna a pre $n = 1, 2, \dots$ platí

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{l} \int_{-l}^l f(x) dx = \int_{-1}^1 (x+1) dx = \left[\frac{x^2}{2} + x \right]_{-1}^1 = \frac{1}{2} + 1 - \frac{1}{2} + 1 = 2 \\ a_n &= \frac{1}{l} \int_{-l}^l f(x) \cos \frac{\pi n x}{l} dx = \int_{-1}^1 (x+1) \cos(\pi n x) dx = \left| \begin{array}{ll} u = x+1 & u' = 1 \\ v' = \cos(\pi n x) & v = \frac{\sin(\pi n x)}{\pi n} \end{array} \right| = \\ &= \left[(x+1) \frac{\sin(\pi n x)}{\pi n} \right]_{-1}^1 - \int_{-1}^1 \frac{\sin(\pi n x)}{\pi n} dx = - \left[-\frac{\cos(\pi n x)}{\pi^2 n^2} \right]_{-1}^1 = \frac{\cos(\pi n)}{\pi^2 n^2} - \frac{\cos(-\pi n)}{\pi^2 n^2} = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
b_n &= \frac{1}{l} \int_{-l}^l f(x) \sin \frac{\pi n x}{l} dx = \int_{-1}^1 (x+1) \sin(\pi n x) dx = \left| \begin{array}{ll} u = x+1 & u' = 1 \\ v' = \sin(\pi n x) & v = -\frac{\cos(\pi n x)}{\pi n} \end{array} \right| = \\
&= \left[-(x+1) \frac{\cos(\pi n x)}{\pi n} \right]_{-1}^1 + \int_{-1}^1 \frac{\cos(\pi n x)}{\pi n} dx = -\frac{2(-1)^n}{\pi n} + \left[\frac{\sin(\pi n x)}{\pi^2 n^2} \right]_{-1}^1 \\
&= -\frac{2(-1)^n}{\pi n} = \frac{2(-1)^{n+1}}{\pi n}
\end{aligned}$$

Dosadením do predpisu Fourierovho radu dostávame

$$f(x) \approx \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{\pi n x}{l} + b_n \sin \frac{\pi n x}{l} \right) = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{2(-1)^{n+1}}{\pi n} \right] \sin(\pi n x).$$

Neriešené úlohy:

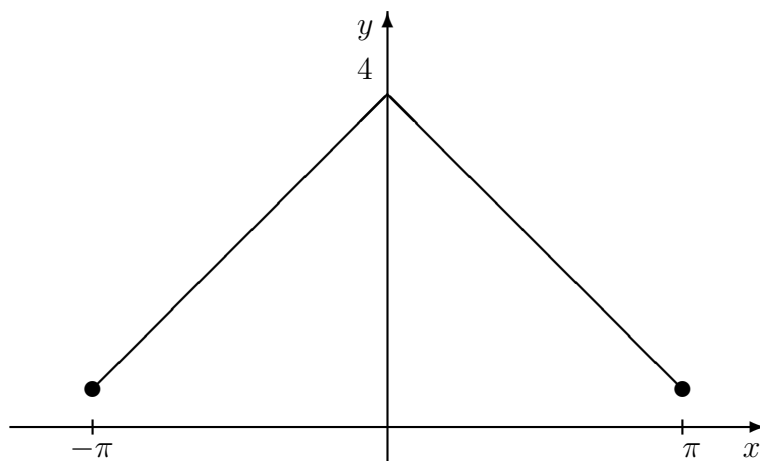
V nasledujúcich úlohách nájdite Fourierov rad funkcie na danom intervale:

- | | | |
|------|--|--|
| 242. | $f(x) = x, x \in \langle -1, 1 \rangle$ | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{n+1}}{n\pi} \sin(n\pi x)$ |
| 243. | $f(x) = x, x \in \langle 0, 2\pi \rangle$ | $\pi - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(nx)}{n}$ |
| 244. | $f(x) = 2x, x \in \langle -\pi, \pi \rangle$ | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{n} (-1)^{n+1} \sin(nx)$ |
| 245. | $f(x) = \frac{x}{2}, x \in \langle -\pi, \pi \rangle$ | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} \sin(nx)$ |
| 246. | $f(x) = \frac{x}{2}, x \in \langle 0, \pi \rangle$ | $\frac{\pi}{4} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n} \sin(2nx)$ |
| 247. | $f(x) = \begin{cases} 0, & \text{pre } x \in \langle -\pi, 0 \rangle \\ 1, & \text{pre } x \in \langle 0, \pi \rangle \end{cases}$ | $\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\pi n} [1 - (-1)^n] \sin(nx)$ |
| 248. | $f(x) = \begin{cases} \pi - x, & \text{pre } x \in \langle -\pi, 0 \rangle \\ 0, & \text{pre } x \in \langle 0, \pi \rangle \end{cases}$ | $\frac{3\pi}{4} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{(-1)^n - 1}{\pi n^2} \cos(nx) + \frac{2(-1)^n - 1}{n} \sin(nx) \right]$ |
| 249. | $f(x) = x , x \in \langle -\pi, \pi \rangle$ | $\frac{\pi}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\pi n^2} [(-1)^n - 1] \cos(nx)$ |
| 250. | $f(x) = x^2, x \in \langle -\pi, \pi \rangle$ | $\frac{\pi^2}{3} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{n^2} (-1)^n \cos(nx)$ |

Príklad 2.9. Rozviňme funkciu $f(x) = 4 - x$, $x \in \langle 0, \pi \rangle$ do kosínusového Fourierovho radu.

Riešenie: Pretože hľadáme kosínusový Fourierov rad, musíme funkciu $f(x)$ najprv dedefinovať tak, aby bola na rozšírenom intervale párna. Dostávame párnou funkciu

$$f_p(x) = \begin{cases} 4 - x & \text{pre } x \in \langle 0, \pi \rangle, \\ 4 + x & \text{pre } x \in \langle -\pi, 0 \rangle. \end{cases}$$



Obr. 1: Graf funkcie $f_p(x)$

Takto dedefinovaná funkcia má periódu $T = 2\pi \Rightarrow l = \pi$ a pre $n = 1, 2, \dots$ platí

$$a_0 = \frac{2}{l} \int_0^l f(x) dx = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} (4 - x) dx = \frac{2}{\pi} \left[4x - \frac{x^2}{2} \right]_0^{\pi} = \frac{2}{\pi} \left(4\pi - \frac{\pi^2}{2} \right) = 8 - \pi,$$

$$a_n = \frac{2}{l} \int_0^l f(x) \cos \frac{\pi n x}{l} dx = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} (4 - x) \cos \frac{\pi n x}{\pi} dx = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} (4 - x) \cos(nx) dx =$$

$$= \left| \begin{array}{ll} u = 4 - x & u' = -1 \\ v' = \cos(nx) & v = \frac{\sin(nx)}{n} \end{array} \right| = \frac{2}{\pi} \left[(4 - x) \frac{\sin(nx)}{n} \right]_0^{\pi} + \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{\sin(nx)}{n} dx =$$

$$= \frac{2}{\pi} \left[-\frac{\cos(nx)}{n^2} \right]_0^{\pi} = \frac{2}{\pi} \left(-\frac{\cos(\pi n)}{n^2} + \frac{\cos 0}{n^2} \right) = \frac{2}{\pi n^2} [1 - (-1)^n],$$

$$b_n = 0.$$

Dosadením do predpisu kosínusového Fourierovho radu dostávame

$$f(x) \approx \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos \frac{\pi n x}{l} = \frac{8 - \pi}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\pi n^2} [1 - (-1)^n] \cos(nx).$$

Neriešené úlohy:

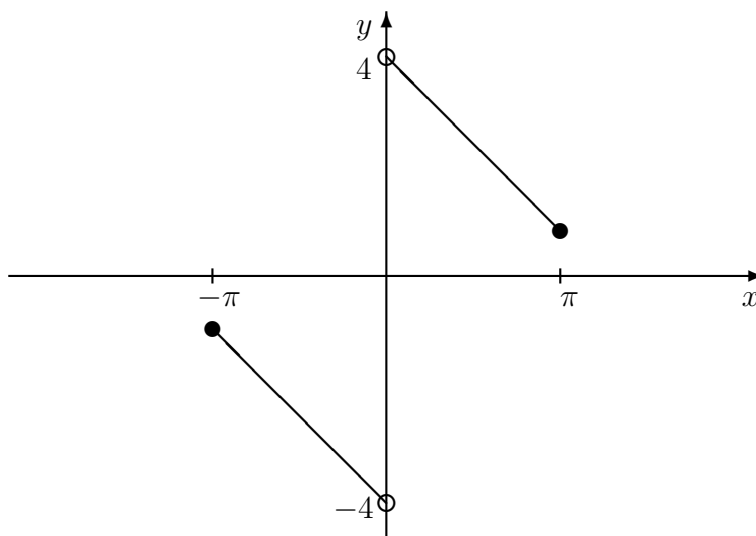
V nasledujúcich úlohách rozviňte funkciu $f(x)$ do kosínusového radu:

- | | | |
|------|--|--|
| 251. | $f(x) = x, x \in \langle 0, 1 \rangle$ | $\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{(\pi n)^2} [(-1)^n - 1] \cos(n\pi x)$ |
| 252. | $f(x) = \frac{x}{2}, x \in \langle 0, \pi \rangle$ | $\frac{\pi}{4} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\pi n^2} [(-1)^n - 1] \cos(nx)$ |
| 253. | $f(x) = \frac{\pi}{4} - \frac{x}{2}, x \in \langle 0, \pi \rangle$ | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\pi n^2} [(-1)^{(n+1)} + 1] \cos(nx)$ |
| 254. | $f(x) = x^2, x \in \langle 0, \pi \rangle$ | $\frac{\pi^2}{3} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{n^2} (-1)^n \cos(nx)$ |
| 255. | $f(x) = x(\pi - x), x \in \langle 0, \pi \rangle$ | $\frac{\pi^2}{6} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n^2} [(-1)^{n+1} - 1] \cos(nx)$ |
| 256. | $f(x) = x - \frac{x^2}{2}, x \in \langle 0, 2 \rangle$ | $\frac{1}{3} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{(\pi n)^2} [(-1)^{n+1} - 1] \cos \frac{n\pi x}{2}$ |

Príklad 2.10. Rozviňte funkciu $f(x) = 4 - x, x \in \langle 0, \pi \rangle$ do sínusového Fourierovho radu.

Riešenie: Pretože hľadáme sínusový Fourierov rad, musíme funkciu $f(x)$ najprv dodefinovať tak, aby bola na rozšírenom intervale nepárna. Dostávame nepárnu funkciu

$$f_n(x) = \begin{cases} 4 - x & \text{pre } x \in (0, \pi), \\ 0 & \text{pre } x = 0, \\ -4 - x & \text{pre } x \in \langle -\pi, 0 \rangle. \end{cases}$$



Obr. 2: Graf funkcie $f_n(x)$

Takto dodefinovaná funkcia má periódu $T = 2\pi \Rightarrow l = \pi$ a pre $n = 1, 2, \dots$ platí

$$a_n = 0,$$

$$\begin{aligned} b_n &= \frac{2}{l} \int_0^l f(x) \sin \frac{\pi nx}{l} dx = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi (4-x) \sin \frac{\pi nx}{\pi} dx = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi (4-x) \sin(nx) dx = \\ &= \left| \begin{array}{ll} u = 4-x & u' = -1 \\ v' = \sin(nx) & v = -\frac{\cos(nx)}{n} \end{array} \right| = \frac{2}{\pi} \left[-(4-x) \frac{\cos(nx)}{n} \right]_0^\pi - \frac{2}{\pi} \int_0^\pi \frac{\cos(nx)}{n} dx = \\ &= \frac{2}{\pi} \left[(\pi-4) \frac{\cos(n\pi)}{n} + \frac{4}{n} \right] - \frac{2}{\pi} \left[\frac{\sin(nx)}{n^2} \right]_0^\pi = \frac{2}{\pi n} [(\pi-4)(-1)^n + 4]. \end{aligned}$$

Dosadením do predpisu sínusového Fourierovho radu dostávame

$$f(x) \approx \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin \frac{\pi nx}{l} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\pi n} [(\pi-4)(-1)^n + 4] \sin(nx).$$

V nasledujúcich úlohách rozviňte funkciu $f(x)$ do sínusového radu:

- | | | |
|------|--|---|
| 257. | $f(x) = x, x \in \langle 0, 1 \rangle$ | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{n+1}}{n\pi} \sin(n\pi x)$ |
| 258. | $f(x) = \frac{x}{2}, x \in \langle 0, \pi \rangle$ | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} \sin(nx)$ |
| 259. | $f(x) = \frac{\pi}{4} - \frac{x}{2}, x \in \langle 0, \pi \rangle$ | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n} [(-1)^n + 1] \sin(nx)$ |
| 260. | $f(x) = x^2, x \in \langle 0, \pi \rangle$ | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\pi} \left[\frac{2(-1)^n - 2}{n^3} - \frac{\pi^2(-1)^n}{n} \right] \sin(nx)$ |
| 261. | $f(x) = x(\pi - x), x \in \langle 0, \pi \rangle$ | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\pi n^3} [1 - (-1)^n] \sin(nx)$ |
| 262. | $f(x) = x - \frac{x^2}{2}, x \in \langle 0, 2 \rangle$ | $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{8}{(\pi n)^3} [(-1)^{(n+1)} + 1] \sin \frac{n\pi x}{2}$ |

3 Diferenciálne rovnice

Definícia 3.1. *Diferenciálnou rovnicou n -tého rádu nazývame rovnicu*

$$F(x, y, y', y'', \dots, y^{(n)}) = 0,$$

pričom $y = y(x)$ je neznáma funkcia.

Definícia 3.2. *Riešením diferenciálnej rovnice $F(x, y, y', y'', \dots, y^{(n)}) = 0$ na intervale I nazývame každú n -krát diferencovateľnú funkciu $y = \varphi(x)$, $x \in I$, pre ktorú platí*

$$F(x, \varphi(x), \varphi'(x), \varphi''(x), \dots, \varphi^{(n)}(x)) = 0.$$

Všeobecné riešenie diferenciálnej rovnice n -tého rádu môžeme napísať v tvare $y = \varphi(x, c_1, c_2, \dots, c_n)$, kde c_1, c_2, \dots, c_n sú nezávislé konštanty.

Poznámka: Počet konštánt je rovnaký ako rád diferenciálnej rovnice. Ak za jednotlivé konštanty dosadíme konkrétne čísla, hovoríme o *partikulárnom riešení diferenciálnej rovnice*.

3.1 Diferenciálne rovnice prvého rádu so separovateľnými premennými

Definícia 3.3. *Diferenciálna rovnica tvaru*

$$\psi(y) dy = \varphi(x) dx,$$

kde funkcie $\varphi(x)$, $\psi(y)$ sú spojité na intervale I , sa nazýva *diferenciálna rovnica so separovanými premennými*.

Diferenciálnu rovnicu so separovanými premennými formálne riešime nasledovne:

$$\int \psi(y) dy = \int \varphi(x) dx$$

(za predpokladu, že tieto integrály existujú).

Po vypočítaní integrálov dostávame riešenie danej diferenciálnej rovnice, ktoré môžeme vyjadriť v explicitnom ($y(x)$ je jednoznačne vyjadrené) alebo implicitnom tvare ($y(x)$ nie je možné jednoznačne vyjadriť).

Definícia 3.4. Diferenciálna rovnica tvaru

$$\varphi_2(x) \psi_2(y) dy = \varphi_1(x) \psi_1(y) dx$$

sa nazýva **diferenciálna rovnica so separovateľnými premennými**.

Poznámka: Ak platí $\psi_1(y) \varphi_2(x) \neq 0$, tak sa predchádzajúca diferenciálna rovnica dá upraviť na separovanú diferenciálnu rovnicu

$$\frac{\psi_2(y)}{\psi_1(y)} dy = \frac{\varphi_1(x)}{\varphi_2(x)} dx.$$

Príklad 3.1. Nájďme všeobecné riešenie diferenciálnej rovnice $\frac{1}{x} y' = \frac{1}{1+x^2}$.

Riešenie: Najprv nahradíme $y' = \frac{dy}{dx}$, teda

$$\frac{1}{x} \frac{dy}{dx} = \frac{1}{1+x^2}.$$

Danú diferenciálnu rovnicu riešime metódou separácie premenných, t.j. obyčajne na ľavú stranu diferenciálnej rovnice presunieme všetky výrazy s premennou y a na pravej strane ponecháme zvyšok

$$dy = \frac{x}{1+x^2} dx.$$

Diferenciálnu rovnicu sme upravili na požadovaný tvar a obe strany môžeme integrovať, čím dostávame

$$\begin{aligned} \int dy &= \int \frac{x}{1+x^2} dx, \\ \int dy &= \frac{1}{2} \int \frac{2x}{1+x^2} dx. \end{aligned}$$

Po vypočítaní integrálov dostávame všeobecné riešenie danej diferenciálnej rovnice v tvare $y = \frac{1}{2} \ln(x^2 + 1) + c$, $c \in \mathbb{R}$.

Príklad 3.2. Nájďme partikulárne riešenie diferenciálnej rovnice $\cos^2 x y' = y \ln y$, ak $y\left(\frac{\pi}{4}\right) = e$.

Riešenie: Najprv nájdeme všeobecné riešenie diferenciálnej rovnice. Postupujeme rovnako ako v Príklade 3.1, t.j. nahradíme $y' = \frac{dy}{dx}$. Pomocou separácie premenných upravujeme diferenciálnu rovnicu, ktorú následne integrujeme

$$\begin{aligned} \cos^2 x \frac{dy}{dx} &= y \ln y, \\ \frac{1}{y \ln y} dy &= \frac{1}{\cos^2 x} dx, \\ \int \frac{1}{y \ln y} dy &= \int \frac{1}{\cos^2 x} dx. \end{aligned}$$

Výpočtom integrálov dostávame všeobecné riešenie diferenciálnej rovnice v tvare

$$\ln |\ln |y|| = \operatorname{tg} x + c, \quad c \in \mathbb{R}.$$

Dosadením začiatočnej podmienky $y\left(\frac{\pi}{4}\right) = e$ do všeobecného riešenia diferenciálnej rovnice vypočítame konkrétnu hodnotu konštanty c

$$\ln |\ln |e|| = \operatorname{tg} \frac{\pi}{4} + c \Rightarrow 0 = 1 + c \Rightarrow c = -1.$$

Partikulárne riešenie danej diferenciálnej rovnice je $\ln |\ln |y|| - \operatorname{tg} x + 1 = 0$.

Neriešené úlohy:

Riešte nasledujúce diferenciálne rovnice metódou separácie premenných:

- | | | |
|-----|---|---|
| 1. | $y' = 3x^2 + 4x$ | $y = x^3 + 2x^2 + c$ |
| 2. | $y' = e^{2x}$ | $y = \frac{e^{2x}}{2} + c$ |
| 3. | $y' = x e^x$ | $y = x e^x - e^x + c$ |
| 4. | $xy' = \ln x$ | $y = \frac{\ln^2 x}{2} + c$ |
| 5. | $y' = y - 1$ | $y = 1 + c e^x$ |
| 6. | $y' = e^{-y}$ | $y = \ln x + c $ |
| 7. | $y' = 3y$ | $y = c e^{3x}$ |
| 8. | $y' = e^{x-y}$ | $y = \ln e^x + c $ |
| 9. | $y' = \frac{x^2 + x}{y + 1}$ | $\frac{y^2}{2} + y = \frac{x^3}{3} + \frac{x^2}{2} + c$ |
| 10. | $\frac{x}{y + 1} - \frac{yy'}{x + 1} = 0$ | $3x^2 + 2x^3 - 3y^2 - 2y^3 + c = 0$ |
| 11. | $y' = \frac{6x - 9x^2}{2y + 4}$ | $y^2 + 4y = 3x^2 - 3x^3 + c$ |
| 12. | $yy' + x = 1$ | $y^2 = 2x - x^2 + c$ |
| 13. | $(1 + e^x)yy' = e^x$ | $\frac{y^2}{2} = \ln(1 + e^x) + c$ |
| 14. | $y' \sin x - y \cos x = 0$ | $y = c \sin x$ |
| 15. | $y' \sin y \cos x - \cos y \sin x = 0$ | $\cos y = c \cos x$ |
| 16. | $\frac{1 + y^2}{1 + x^2} - y' = 0$ | $y = \operatorname{tg}(c + \operatorname{arctg} x)$ |
| 17. | $x(1 + 2y) + (x^2 + 1)y' = 0$ | $y = \frac{1}{2} \left(\frac{c}{x^2 + 1} - 1 \right)$ |
| 18. | $x\sqrt{1 + y^2} + yy'\sqrt{1 + x^2} = 0$ | $\sqrt{1 + x^2} + \sqrt{1 + y^2} = c$ |
| 19. | $\frac{y'}{x} + e^y = 0$ | $y = -\ln \left \frac{x^2}{2} + c \right $ |
| 20. | $y' = \frac{y}{(y + 1)e^{2x}}$ | $y + \ln y = -\frac{e^{-2x}}{2} + c$ |
| 21. | $y - y^2 + xy' = 0$ | $y = \frac{1}{1 - cx}$ |

22. $(x^2 + x)y' - y - 1 = 0$

$$y = \frac{cx}{x+1} - 1$$

23. $y' = (2 - y)^2 e^x$

$$y = 2 - \frac{1}{e^x + c}$$

24. $x^2 e^y y' = x^3 + x^3 e^y$

$$y = \ln \left| c e^{\frac{x^2}{2}} - 1 \right|$$

25. $xy y' = (1 + x^2)(1 + y^2)$

$$\ln(1 + y^2) = \ln x^2 + x^2 + c$$

26. $y \ln y + xy' = 0$

$$y = e^{\frac{c}{x}}$$

27. $y' = 2\sqrt{y} \ln x$

$$y = (x \ln x - x + c)^2$$

28. $\frac{x}{\sqrt{1-x^2}} + \frac{y y'}{\sqrt{1-y^2}} = 0$

$$\sqrt{1-y^2} + \sqrt{1-x^2} = c$$

29. $(x+1)y' + xy = 0$

$$y = c(x+1)e^{-x}$$

30. $e^x \sin^3 y + (1 + e^{2x}) \cos y y' = 0$

$$\operatorname{arctg} e^x - \frac{1}{2 \sin^2 y} = c$$

31. $\sin x \cos y + y' \operatorname{tg} y \cos x = 0$

$$\frac{1}{\cos y} = \ln |\cos x| + c$$

V nasledujúcich úlohách nájdite metódou separácie premenných partikulárne riešenie rovnice, ktoré spĺňa danú začiatočnú podmienku, :

32. $y' = 3x^2 + 4x, y(1) = 3$

$$y = x^3 + 2x^2$$

33. $y' = e^{2x}, y(0) = 1$

$$y = \frac{e^{2x}}{2} + \frac{1}{2}$$

34. $y' = x e^x, y(1) = 2$

$$y = x e^x - e^x + 2$$

35. $xy' = \ln x, y(e) = \frac{7}{2}$

$$y = \frac{\ln^2 x}{2} + 3$$

36. $y' = y - 1, y(0) = 2$

$$y = 1 + e^x$$

37. $y' = e^{-y}, y(1) = 0$

$$y = \ln |x|$$

38. $y' = 3y, y(0) = 2$

$$y = 2 e^{3x}$$

39. $y' = e^{x-y}, y(1) = 1$

$$y = x$$

40. $(1 + e^x) y y' = e^x, y(0) = \sqrt{2 \ln 2}$

$$\frac{y^2}{2} = \ln(1 + e^x)$$

41. $y' \sin y \cos x - \cos y \sin x = 0, y(0) = \frac{\pi}{4}$

$$\cos y = \frac{\sqrt{2}}{2} \cos x$$

42. $y - y^2 + xy' = 0, y(2) = \frac{1}{5}$

$$y = \frac{1}{1+2x}$$

43. $y' = (2 - y)^2 e^x, y(0) = \frac{3}{2}$

$$y = 2 - \frac{1}{e^x + 1}$$

44. $y \ln y + xy' = 0, y(3) = e$

$$y = e^{\frac{3}{x}}$$

45. $(x+1)y' + xy = 0, y(0) = 1$

$$y = (x+1)e^{-x}$$

46. $y' \sin x - y \cos x = 0, y\left(\frac{\pi}{2}\right) = 1$

$$y = \sin x$$

47. $\frac{1+y^2}{1+x^2} - y' = 0, y(0) = 1$

$$y = \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \operatorname{arctg} x\right)$$

48. $\frac{x}{1+y} - \frac{y y'}{1+x} = 0, y(0) = 1$

$$3x^2 + 2x^3 - 3y^2 - 2y^3 + 5 = 0$$

3.2 Lineárne diferenciálne rovnice prvého rádu

Definícia 3.5. *Lineárnou diferenciálnou rovnicou prvého rádu s pravou stranou nazývame rovnicu*

$$y' + p(x)y = q(x),$$

kde $p(x)$, $q(x)$ sú funkcie spojité na intervale I .

Poznámka: Ak $q(x) = 0$, tak diferenciálnu rovnicu $y' + p(x)y = 0$ nazývame **lineárnou diferenciálnou rovnicou prvého rádu bez pravej strany**. Lineárna diferenciálna rovnica prvého rádu bez pravej strany sa rieši separáciou premenných.

Riešenie lineárnej diferenciálnej rovnice s pravou stranou pozostáva z riešenia rovnice bez pravej strany a nejakého partikulárneho riešenia rovnice s pravou stranou. Ukážeme dva spôsoby riešenia uvedenej diferenciálnej rovnice.

Spôsob A: Riešenie hľadáme nasledujúcim spôsobom:

1. Vyriešime lineárnu diferenciálnu rovnicu prvého rádu bez pravej strany (t. j. položíme pravú stranu rovnú nule). Jej riešenie vyjadríme v tvare $y = c f(x)$, kde c je integračná konštanta, $c \in \mathbb{R}$.
2. Použijeme metódu variácie konštanty, t. j. konštantu c nahradíme funkciou $c(x)$, a hľadáme riešenie v tvare $y = c(x) f(x)$.
3. Zderivujeme y , čím dostávame $y' = c'(x) f(x) + c(x) f'(x)$.
4. Dosadíme y , y' do pôvodnej diferenciálnej rovnice s pravou stranou a vypočítame jej všeobecné riešenie (potrebujeme určiť $c(x)$).
5. V prípade, že diferenciálna rovnica bola zadaná pomocou začiatočnej podmienky, určíme konštantu c (podobne ako v Príklade 3.2) a zapíšeme partikulárne riešenie diferenciálnej rovnice.

Spôsob B: Diferenciálnu rovnicu

$$y' + p(x)y = q(x),$$

vynásobíme tzv. integračným faktorom $IF = e^{\int p(x) dx}$ a dostaneme

$$y' \cdot e^{\int p(x) dx} + p(x) \cdot e^{\int p(x) dx} y = q(x) \cdot e^{\int p(x) dx}.$$

Všimnime si, že ľavá strana takto upravenej rovnice predstavuje deriváciu súčinu hľadaného riešenia a integračného faktora

$$[y \cdot e^{\int p(x) dx}]' = q(x) \cdot e^{\int p(x) dx}.$$

Integrovaním oboch strán vzniknutej rovnice dostaneme

$$y \cdot e^{\int p(x) dx} = \int q(x) \cdot e^{\int p(x) dx} dx + c, \quad c \in \mathbb{R}.$$

Prenásobením oboch strán rovnice výrazom $e^{-\int p(x) dx}$ eliminujeme hľadané riešenie y

$$y = e^{-\int p(x) dx} \cdot \int q(x) \cdot e^{\int p(x) dx} dx + c \cdot e^{-\int p(x) dx}, \quad c \in \mathbb{R}.$$

Príklad 3.3. *Nájdime všeobecné riešenie diferenciálnej rovnice $y' - 5y = 2x$.*

Riešenie spôsobom A: Najprv riešime diferenciálnu rovnicu bez pravej strany $y' - 5y = 0$ využitím separácie premenných

$$\frac{dy}{dx} = 5y \Rightarrow \frac{dy}{y} = 5dx \Rightarrow \int \frac{dy}{y} = \int 5dx.$$

Po vypočítaní integrálov dostávame

$$\ln |y| = 5x + c_1, \quad c_1 \in \mathbb{R} \Rightarrow |y| = e^{5x+c_1} \Rightarrow |y| = e^{5x} e^{c_1} \Rightarrow y = c e^{5x}, \quad c \in \mathbb{R}.$$

Všeobecné riešenie diferenciálnej rovnice bez pravej strany je $y = c e^{5x}$. Riešenie diferenciálnej rovnice s pravou stranou nájdeme metódou variácie konštanty. Riešenie hľadáme v tvare $y = c(x) e^{5x}$, pričom takto zvolené riešenie a jeho prvá derivácia $y' = c'(x) e^{5x} + c(x) 5 e^{5x}$ musia vyhovovať zadanej diferenciálnej rovnici. Dosadením týchto výrazov do diferenciálnej rovnice a následnými úpravami dostaneme hľadanú funkciu $c(x)$

$$\begin{aligned} c'(x) e^{5x} + c(x) 5 e^{5x} - 5 c(x) e^{5x} &= 2x, \\ c'(x) e^{5x} &= 2x, \\ c'(x) &= 2x e^{-5x}, \\ c(x) &= \int 2x e^{-5x} dx. \end{aligned}$$

Integrál $\int 2x e^{-5x} dx$ vypočítame pomocou metódy per partes, pričom výsledok je

$$c(x) = -2 e^{-5x} \left(\frac{x}{5} + \frac{1}{25} \right) + k, \quad k \in \mathbb{R}.$$

Všeobecné riešenie diferenciálnej rovnice s pravou stranou je v tvare

$$y = c(x) e^{5x} = \left[-2 e^{-5x} \left(\frac{x}{5} + \frac{1}{25} \right) + k \right] e^{5x} = -\frac{2x}{5} - \frac{2}{25} + k e^{5x}, k \in \mathbb{R}.$$

Riešenie spôsobom B: Diferenciálnu rovnicu

$$y' - 5y = 2x$$

vynásobíme integračným faktorom $IF = e^{\int p(x) dx} = e^{\int -5 dx} = e^{-5x}$ a dostaneme

$$y' \cdot e^{-5x} - 5 \cdot e^{-5x} y = 2x \cdot e^{-5x}.$$

Všimnime si, že ľavá strana takto upravenej rovnice predstavuje deriváciu súčinu hľadaného riešenia a integračného faktora

$$[y \cdot e^{-5x}]' = 2x \cdot e^{-5x}.$$

Integrovaním oboch strán vzniknutej rovnice dostaneme

$$y \cdot e^{-5x} = \int 2x \cdot e^{-5x} dx.$$

Integrál $\int 2x e^{-5x} dx$ vzniknutý na pravej strane vypočítame pomocou metódy per partes

$$\int 2x \cdot e^{-5x} dx = -2 e^{-5x} \left(\frac{x}{5} + \frac{1}{25} \right) + c, c \in \mathbb{R}.$$

Rovnica je teraz v tvare

$$y \cdot e^{-5x} = -2 e^{-5x} \left(\frac{x}{5} + \frac{1}{25} \right) + c, c \in \mathbb{R}.$$

Prenásobením oboch strán rovnice výrazom e^{5x} eliminujeme hľadané riešenie y . Všeobecné riešenie diferenciálnej rovnice je v tvare

$$y = \left[-2 e^{-5x} \left(\frac{x}{5} + \frac{1}{25} \right) + c \right] e^{5x} = -\frac{2x}{5} - \frac{2}{25} + c e^{5x}, c \in \mathbb{R}.$$

Neriešené úlohy:

V nasledujúcich úlohách nájdite všeobecné riešenie diferenciálnej rovnice:

49. $y' - 2y = e^{2x}$

$y = ce^{2x} + xe^{2x}$

50. $y' + 2y = e^{-x}$

$y = ce^{-2x} + e^{-x}$

51. $y' - 2y = x$

$y = ce^{2x} - \frac{x}{2} - \frac{1}{4}$

52. $y' - \frac{3y}{x} = 2$

$y = cx^3 - x$

53. $y' + y = e^{3x}$

$y = ce^{-x} + \frac{e^{3x}}{4}$

54. $y' + xy = x^3$

$y = ce^{-\frac{x^2}{2}} + x^2 - 2$

55. $y' - \frac{2y}{x} = x + 1$

$y = cx^2 - x + x^2 \ln|x|$

56. $xy' - 2y = xe^{-\frac{1}{x}}$

$y = cx^2 + x^2 e^{-\frac{1}{x}}$

57. $y' - \frac{y}{x} = \ln x$

$y = cx + \frac{x}{2} \ln^2 x$

58. $y' + \frac{y}{x} = x^5 + 2$

$y = \frac{c}{x} + x + \frac{x^6}{7}$

59. $y' + \frac{y}{x} = \frac{1}{x^2}$

$y = \frac{\ln|x| + c}{x}$

60. $y' + \frac{2y}{x} = \frac{1}{x^3}$

$y = \frac{\ln|x| + c}{x^2}$

61. $y' + \frac{3y}{x} = \frac{e^x}{x^2}$

$y = \frac{c}{x^3} + \frac{e^x}{x^2} - \frac{e^x}{x^3}$

62. $y' + y = 2x^2 - 2x + 1$

$y = ce^{-x} + 2x^2 - 6x + 7$

63. $y' + 4y = 16x$

$y = ce^{-4x} + 4x - 1$

64. $xy' + y = x \sin x$

$y = -\cos x + \frac{c + \sin x}{x}$

65. $y' - \frac{2y}{x+1} = \sqrt{(1+x)^5}$

$y = c(x+1)^2 + \frac{2}{3} \sqrt{(x+1)^7}$

66. $y' - \frac{y}{2(x+1)} = \sqrt{x+1}$

$y = c\sqrt{x+1} + x\sqrt{x+1}$

67. $xy' + y = 1 + \ln x$

$y = \frac{c}{x} + \ln x$

68. $xy' + y = x \ln x$

$y = \frac{c}{x} + \frac{1}{2} x \ln x - \frac{x}{4}$

69. $xy' - y = (x-1)^2$

$y = cx + x^2 - 2x \ln|x| - 1$

70. $x^2y' + xy = -1$

$y = \frac{c}{x} - \frac{\ln|x|}{x}$

71. $x^2y' + xy = 3x^3 + 2x^2 + x$

$y = \frac{c}{x} + x^2 + x + 1$

72. $x^2y' - xy = x^4 e^{-x}$

$y = cx - x^2 e^{-x} - x e^{-x}$

73. $x^2y' + 2xy = x^2 + 2$

$y = \frac{1}{x^2} \left(\frac{x^3}{3} + 2x + c \right)$

74. $x^2y' - 2xy = x^2 \ln x$

$y = cx^2 - x \ln x - x$

75. $y' \cos x + y \sin x = 1$

$y = c \cos x + \sin x$

76. $y' \cos x - y \sin x = \sin(2x)$

$y = \frac{c - \cos(2x)}{2 \cos x}$

77. $y' - y \operatorname{tg} x = 2 \cos^2 x$

$3y = 2 \operatorname{tg} x (3 - \sin^2 x) + \frac{c}{\cos x}$

$$\begin{array}{ll}
78. & y' + \frac{xy}{1+x^2} = \frac{1}{x(1+x^2)} & y = \frac{1}{2\sqrt{1+x^2}} \left(\ln \left| \frac{1-\sqrt{1+x^2}}{1+\sqrt{1+x^2}} \right| + c \right) \\
79. & y' + \frac{4xy}{x^2+1} = \frac{1}{(x^2+1)^3} & y = \frac{\operatorname{arctg} x + c}{(x^2+1)^2} \\
80. & y' + \frac{2xy}{x^2+1} = \frac{1}{x^2+1} & y = \frac{x+c}{x^2+1} \\
81. & y' + \frac{y}{x+1} = x^2+1 & y = \frac{1}{x+1} \left(\frac{x^4}{4} + \frac{x^3}{3} + \frac{x^2}{2} + x + c \right) \\
82. & y' + \frac{3y}{x} = \frac{3}{x^4} & y = \frac{3 \ln|x| + c}{x^3}
\end{array}$$

V nasledujúcich úlohách nájdite partikulárne riešenie diferenciálnej rovnice, ktoré spĺňa danú začiatočnú podmienku:

$$\begin{array}{ll}
83. & y' - 2y = e^{2x}, y(0) = \frac{1}{2} & y = \frac{1}{2}e^{2x} + xe^{2x} \\
84. & y' - 2y = x, y(0) = 1 & y = \frac{5}{4}e^{2x} - \frac{x}{2} - \frac{1}{4} \\
85. & y' - \frac{3y}{x} = 2, y(-1) = -1 & y = 2x^3 - x \\
86. & xy' - 2y = xe^{-\frac{1}{x}}, y(1) = \frac{1}{e} & y = x^2e^{-\frac{1}{x}} \\
87. & y' - \frac{2y}{x} = x+1, y(1) = 0 & y = x^2 - x + x^2 \ln|x| \\
88. & xy' + y = 1 + \ln x, y(e) = 2 & y = \frac{e}{x} + \ln x \\
89. & y' - \frac{y}{x} = \ln x, y(1) = 3 & y = 3x + \frac{x}{2} \ln^2 x \\
90. & y' - \frac{y}{2(x+1)} = \sqrt{x+1}, y(3) = 2 & y = -2\sqrt{x+1} + x\sqrt{x+1} \\
91. & x^2y' + xy = 3x^3 + 2x^2 + x, y(2) = 2 & y = -\frac{10}{x} + x^2 + x + 1 \\
92. & x^2y' - xy = x^4e^{-x}, y(1) = -\frac{2}{e} & y = -x^2e^{-x} - xe^{-x} \\
93. & y' \cos x - y \sin x = \sin(2x), y(0) = 0 & y = \frac{1-\cos(2x)}{2 \cos x} \\
94. & y' - y \operatorname{tg} x = 2 \cos^2 x, y(0) = 0 & 3y = 2 \operatorname{tg} x (3 - \sin^2 x) \\
95. & y' - y \cos x = \cos x, y(0) = 1 & y = 2e^{\sin x} - 1
\end{array}$$

3.3 Lineárne diferenciálne rovnice druhého rádu s konštantnými koeficientmi

Definícia 3.6. Lineárnou diferenciálnou rovnicou druhého rádu s konštantnými koeficientmi bez pravej strany nazývame rovnicu

$$y'' + ay' + by = 0,$$

kde $a, b \in \mathbb{R}$.

Riešenie danej lineárnej diferenciálnej rovnice druhého rádu budeme hľadať v tvare $y = e^{\lambda x}$, kde λ je riešením charakteristickej rovnice diferenciálnej rovnice $\lambda^2 + a\lambda + b = 0$. Charakteristickú rovnicu dostaneme z diferenciálnej rovnice tak, že príslušné derivácie y nahradíme mocninami premennej λ . Môžu nastať tri prípady:

1. Ak $\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R}$, $\lambda_1 \neq \lambda_2$, tak koreňu λ_1 prislúcha riešenie diferenciálnej rovnice v tvare $y_1 = e^{\lambda_1 x}$ a koreňu λ_2 prislúcha riešenie diferenciálnej rovnice v tvare $y_2 = e^{\lambda_2 x}$. Potom všeobecné riešenie diferenciálnej rovnice zapíšeme ako lineárnu kombináciu riešení y_1 a y_2 v tvare

$$y = c_1 e^{\lambda_1 x} + c_2 e^{\lambda_2 x}, \quad c_1, c_2 \in \mathbb{R}.$$

2. Ak $\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R}$, $\lambda_1 = \lambda_2$, tak koreňu λ_1 prislúchajú dve riešenia diferenciálnej rovnice v tvare $y_1 = e^{\lambda_1 x}$ a $y_2 = x e^{\lambda_1 x}$. Potom všeobecné riešenie diferenciálnej rovnice zapíšeme ako lineárnu kombináciu riešení y_1 a y_2 v tvare

$$y = c_1 e^{\lambda_1 x} + c_2 x e^{\lambda_1 x}, \quad c_1, c_2 \in \mathbb{R}.$$

3. Ak $\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{C}$, $\lambda_1 = \alpha + \beta i$ a $\lambda_2 = \alpha - \beta i$, tak $y_1 = e^{\alpha x} \cos(\beta x)$ a $y_2 = e^{\alpha x} \sin(\beta x)$. Potom všeobecné riešenie diferenciálnej rovnice zapíšeme ako lineárnu kombináciu riešení y_1 a y_2 v tvare

$$y = c_1 e^{\alpha x} \cos(\beta x) + c_2 e^{\alpha x} \sin(\beta x), \quad c_1, c_2 \in \mathbb{R}.$$

Príklad 3.4. *Nájdime riešenie diferenciálnej rovnice $y'' - 6y' + 5y = 0$.*

Riešenie: Nahradením derivácií y mocninami λ zapíšeme charakteristickú rovnicu danej diferenciálnej rovnice

$$\lambda^2 - 6\lambda + 5 = 0.$$

Jej koreňmi sú $\lambda_1 = 5$, $\lambda_2 = 1$. Teda $\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R}$ a $\lambda_1 \neq \lambda_2$, a tak im odpovedajú riešenia $y_1 = e^{\lambda_1 x} = e^{5x}$, $y_2 = e^{\lambda_2 x} = e^x$. Potom riešenie diferenciálnej rovnice je v tvare

$$y = c_1 e^{5x} + c_2 e^x, \quad c_1, c_2 \in \mathbb{R}.$$

Príklad 3.5. *Nájdime riešenie diferenciálnej rovnice $y'' - 6y' + 9y = 0$.*

Riešenie: Nahradením derivácií y mocninami λ zapíšeme charakteristickú rovnicu danej diferenciálnej rovnice

$$\lambda^2 - 6\lambda + 9 = 0.$$

Jej 2-násobným koreňom je $\lambda = 3$ a tak mu odpovedajú riešenia $y_1 = e^{\lambda_1 x} = e^{3x}$, $y_2 = x e^{\lambda_1 x} = x e^{3x}$. Potom riešenie danej diferenciálnej rovnice je v tvare

$$y = c_1 e^{3x} + c_2 x e^{3x}, \quad c_1, c_2 \in \mathbb{R}.$$

Príklad 3.6. *Nájdime riešenie diferenciálnej rovnice $y'' - 2y' + 2y = 0$.*

Riešenie: Nahradením derivácií y mocninami λ zapíšeme charakteristickú rovnicu danej diferenciálnej rovnice

$$\lambda^2 - 2\lambda + 2 = 0.$$

Jej koreňmi sú komplexné združené čísla $\lambda_1 = \alpha + \beta i = 1 + i$, $\lambda_2 = \alpha - \beta i = 1 - i$, ktorým odpovedajú riešenia $y_1 = e^{\alpha x} \cos(\beta x) = e^x \cos x$, $y_2 = e^{\alpha x} \sin(\beta x) = e^x \sin x$. Potom riešenie danej diferenciálnej rovnice je v tvare

$$y = c_1 e^x \cos x + c_2 e^x \sin x, \quad c_1, c_2 \in \mathbb{R}.$$

Neriešené úlohy:

Riešte nasledujúce lineárne diferenciálne rovnice druhého rádu:

- | | | |
|------|-----------------------|---|
| 96. | $y'' - y' - 2y = 0$ | $y = c_1 e^{2x} + c_2 e^{-x}$ |
| 97. | $y'' - 2y' - 8y = 0$ | $y = c_1 e^{-2x} + c_2 e^{4x}$ |
| 98. | $y'' + 3y' - 4y = 0$ | $y = c_1 e^x + c_2 e^{-4x}$ |
| 99. | $y'' + y' - 6y = 0$ | $y = c_1 e^{2x} + c_2 e^{-3x}$ |
| 100. | $y'' - 4y' + 3y = 0$ | $y = c_1 e^x + c_2 e^{3x}$ |
| 101. | $y'' - 6y' + 8y = 0$ | $y = c_1 e^{2x} + c_2 e^{4x}$ |
| 102. | $y'' - 5y' + 6y = 0$ | $y = c_1 e^{2x} + c_2 e^{3x}$ |
| 103. | $y'' + 4y' + 3y = 0$ | $y = c_1 e^{-x} + c_2 e^{-3x}$ |
| 104. | $y'' + 3y' + 2y = 0$ | $y = c_1 e^{-x} + c_2 e^{-2x}$ |
| 105. | $y'' + 2y' = 0$ | $y = c_1 e^{-2x} + c_2$ |
| 106. | $y'' - 3y' = 0$ | $y = c_1 e^{3x} + c_2$ |
| 107. | $y'' - 6y' + 9y = 0$ | $y = c_1 e^{3x} + c_2 x e^{3x}$ |
| 108. | $y'' - 8y' + 16y = 0$ | $y = c_1 e^{4x} + c_2 x e^{4x}$ |
| 109. | $y'' + 2y' + y = 0$ | $y = c_1 e^{-x} + c_2 x e^{-x}$ |
| 110. | $y'' + 4y' + 5y = 0$ | $y = c_1 e^{-2x} \cos x + c_2 e^{-2x} \sin x$ |
| 111. | $y'' + 2y' + 2y = 0$ | $y = c_1 e^{-x} \cos x + c_2 e^{-x} \sin x$ |

$$112. \quad y'' - 2y' + 5y = 0 \qquad y = c_1 e^x \cos(2x) + c_2 e^x \sin(2x)$$

$$113. \quad y'' + y = 0 \qquad y = c_1 \cos x + c_2 \sin x$$

$$114. \quad y'' - 4y' + 5y = 0 \qquad y = c_1 e^{2x} \cos x + c_2 e^{2x} \sin x$$

Definícia 3.7. *Lineárnou diferenciálnou rovnicou druhého rádu s konštantnými koeficientmi s pravou stranou nazývame rovnicu*

$$y'' + a y' + b y = f(x),$$

kde $a, b \in R$ a $f(x)$ je spojité funkcia.

Riešenie danej lineárnej diferenciálnej rovnice s pravou stranou dostaneme ako súčet riešenia rovnice bez pravej strany a partikulárneho riešenia rovnice s pravou stranou. Budeme sa zaoberať dvoma typmi lineárnych diferenciálnych rovníc druhého rádu:

1) Lineárne diferenciálne rovnice druhého rádu, kde na pravej strane rovnice sú nasledovné funkcie:

- a) $f(x) = P_m(x) e^{\alpha x}$, kde $P_m(x)$ je polynóm stupňa m a $\alpha \in R$ je k -násobným koreňom charakteristickej rovnice danej diferenciálnej rovnice bez pravej strany,
- b) $f(x) = \left(P_{n_1}^{(1)}(x) \cos \beta x + P_{n_2}^{(2)}(x) \sin \beta x \right) e^{\alpha x}$, kde $P_{n_1}^{(1)}(x)$, $P_{n_2}^{(2)}(x)$ sú polynómy stupňa n_1, n_2 , $\alpha, \beta \in R$, $\beta \neq 0$ a $\alpha + \beta i$ je k -násobným koreňom charakteristickej rovnice danej diferenciálnej rovnice bez pravej strany,
- c) $f(x) = f_1(x) + f_2(x)$.

Potom partikulárne riešenia rovnice s pravou stranou sú v tvare v prípade

- a) $y^* = (b_0 + b_1 x + b_2 x^2 + \dots + b_m x^m) e^{\alpha x} x^k$, kde $\alpha \in R$ je k -násobným koreňom charakteristickej rovnice danej diferenciálnej rovnice bez pravej strany,
- b) $y^* = \left(Q_m^{(1)}(x) \cos \beta x + Q_m^{(2)}(x) \sin \beta x \right) e^{\alpha x} x^k$, kde $\alpha, \beta \in R$, $\beta \neq 0$ a $\alpha + \beta i$ je k -násobným koreňom charakteristickej rovnice danej diferenciálnej rovnice bez pravej strany a $Q_m^{(1)}(x)$, $Q_m^{(2)}(x)$ sú polynómy stupňa $m = \max\{n_1, n_2\}$,
- c) $y^* = y_1^* + y_2^*$, kde y_1^*, y_2^* sú riešenia diferenciálnej rovnice s pravými stranami $f_1(x)$, $f_2(x)$.

2) Lineárne diferenciálne rovnice druhého rádu, kde na pravej strane rovnice nie je žiadna z predchádzajúcich funkcií, riešime pomocou Lagrangeovej metódy variácie konštant:

1. Vyriešime lineárnu diferenciálnu rovnicu druhého rádu bez pravej strany (t.j. položíme pravú stranu rovnú nule). Jej riešenie dostávame ako lineárnu kombináciu dvoch lineárne nezávislých riešení y_1 a y_2 v tvare $y = c_1 y_1 + c_2 y_2$, $c_1, c_2 \in \mathbb{R}$.
2. Použijeme metódu variácie konštant, t.j. konštanty c_1, c_2 nahradíme funkciami $c_1(x), c_2(x)$, a hľadáme riešenie v tvare $y = c_1(x) y_1 + c_2(x) y_2$.
3. Funkcie $c_1(x)$ a $c_2(x)$ dostaneme riešením systému rovníc

$$\begin{aligned} c_1'(x) y_1 + c_2'(x) y_2 &= 0 \\ c_1'(x) y_1' + c_2'(x) y_2' &= f(x). \end{aligned}$$

Ak tento systém riešime pomocou Cramerovho pravidla, tak

$$c_1(x) = \int \frac{W_1(x)}{W(x)} dx \quad \text{a} \quad c_2(x) = \int \frac{W_2(x)}{W(x)} dx,$$

kde

$$W(x) = \begin{vmatrix} y_1 & y_2 \\ y_1' & y_2' \end{vmatrix}; \quad W_1(x) = \begin{vmatrix} 0 & y_2 \\ f(x) & y_2' \end{vmatrix}; \quad W_2(x) = \begin{vmatrix} y_1 & 0 \\ y_1' & f(x) \end{vmatrix}.$$

Príklad 3.7. Nájďme riešenie diferenciálnej rovnice $y'' - 8y' + 16y = x e^{2x}$.

Riešenie: Najprv riešime diferenciálnu rovnicu bez pravej strany

$$y'' - 8y' + 16y = 0.$$

Nahradením derivácií y mocninami λ zapíšeme charakteristickú rovnicu danej diferenciálnej rovnice

$$\lambda^2 - 8\lambda + 16 = 0.$$

Jej 2-násobným koreňom je $\lambda = 4$, ktorému odpovedajú riešenia $y_1 = e^{4x}$, $y_2 = x e^{4x}$. Potom riešenie danej diferenciálnej rovnice bez pravej strany je v tvare

$$y = c_1 e^{4x} + c_2 x e^{4x}, \quad c_1, c_2 \in \mathbb{R}.$$

Riešenie diferenciálnej rovnice s pravou stranou je v tvare

$$y = c_1 e^{4x} + c_2 x e^{4x} + y^*, \quad c_1, c_2 \in \mathbb{R},$$

kde tvar y^* určíme podľa funkcie na pravej strane zadanej diferenciálnej rovnice. Keďže pravá strana rovnice je rovná $x e^{2x}$, máme typ $f(x) = P_m(x) e^{\alpha x}$, kde $m = 1$ a $\alpha = 2$. Potom

$$y^* = (b_0 + b_1 x + b_2 x^2 + \dots + b_m x^m) e^{\alpha x} x^k = (ax + b) e^{2x} x^0 = (ax + b) e^{2x},$$

lebo $\alpha = 2$ nie je koreňom (teda je 0-násobným koreňom, t. j. $k = 0$) charakteristickej rovnice diferenciálnej rovnice bez pravej strany. Zderivujeme y^*

$$(y^*)' = a e^{2x} + 2(ax + b) e^{2x},$$

$$(y^*)'' = 2a e^{2x} + 2a e^{2x} + 4(ax + b) e^{2x} = 4a e^{2x} + 4(ax + b) e^{2x}$$

a následne dosadíme y^* , $(y^*)'$, $(y^*)''$ za y , y' , y'' do zadanej diferenciálnej rovnice s pravou stranou

$$4a e^{2x} + 4(ax + b) e^{2x} - 8 [a e^{2x} + 2(ax + b) e^{2x}] + 16(ax + b) e^{2x} = x e^{2x}.$$

Úpravou a porovnaním koeficientov polynómov na oboch stranách rovnice dostaneme $a = b = \frac{1}{4}$ a teda $y^* = \frac{1}{4}(x + 1)e^{2x}$. Riešenie danej diferenciálnej rovnice je v tvare

$$y = c_1 e^{4x} + c_2 x e^{4x} + y^* = c_1 e^{4x} + c_2 x e^{4x} + \frac{1}{4}(x + 1)e^{2x}, \quad c_1, c_2 \in \mathbb{R}.$$

Príklad 3.8. *Nájdime riešenie diferenciálnej rovnice $y'' + y = 2 \sin x - \cos x$.*

Riešenie: Najprv riešime diferenciálnu rovnicu bez pravej strany

$$y'' + y = 0.$$

Nahradením derivácií y mocninami λ zapíšeme charakteristickú rovnicu danej diferenciálnej rovnice

$$\lambda^2 + 1 = 0.$$

Jej koreňmi sú $\lambda_1 = i$, $\lambda_2 = -i$, ktorým odpovedajú riešenia $y_1 = \cos x$, $y_2 = \sin x$. Potom riešenie danej diferenciálnej rovnice bez pravej strany je v tvare

$$y = c_1 \cos x + c_2 \sin x, \quad c_1, c_2 \in \mathbb{R}.$$

Riešenie diferenciálnej rovnice s pravou stranou je v tvare

$$y = c_1 \cos x + c_2 \sin x + y^*, \quad c_1, c_2 \in \mathbb{R},$$

kde tvar y^* určíme podľa funkcie na pravej strane zadanej diferenciálnej rovnice. Keďže pravá strana rovnice je rovná $2 \sin x - \cos x$, máme typ $f(x) = \left(P_{n_1}^{(1)}(x) \cos \beta x + P_{n_2}^{(2)}(x) \sin \beta x \right) e^{\alpha x}$, kde $n_1 = n_2 = 0$, $\alpha = 0$ a $\beta = 1$. Potom

$$y^* = \left(Q_m^{(1)}(x) \cos \beta x + Q_m^{(2)}(x) \sin \beta x \right) e^{\alpha x} x^k = (a \cos x + b \sin x)x,$$

lebo $m = \max\{n_1, n_2\} = \max\{0, 0\} = 0$, $\alpha + \beta i = i$ je jednoduchým koreňom (teda je 1-násobným koreňom, t. j. $k = 1$) charakteristickej rovnice diferenciálnej rovnice bez pravej strany. Zderivujeme y^*

$$\begin{aligned}(y^*)' &= (-a \sin x + b \cos x)x + (a \cos x + b \sin x), \\ (y^*)'' &= (-a \cos x - b \sin x)x + (-a \sin x + b \cos x) - a \sin x + b \cos x,\end{aligned}$$

a následne dosadíme y^* , $(y^*)'$, $(y^*)''$ za y , y' , y'' do zadanej diferenciálnej rovnice s pravou stranou

$$(-a \cos x - b \sin x)x + (-a \sin x + b \cos x) - a \sin x + b \cos x - (a \cos x + b \sin x)x = 2 \sin x - \cos x.$$

Úpravou a porovnaním koeficientov polynómov na oboch stranách rovnice dostaneme $a = -1$, $b = -\frac{1}{2}$ a teda $y^* = (-\cos x - \frac{1}{2} \sin x)x$. Riešenie diferenciálnej rovnice je v tvare

$$y = c_1 \cos x + c_2 \sin x + y^* = c_1 \cos x + c_2 \sin x - \left(\cos x + \frac{1}{2} \sin x \right) x.$$

Príklad 3.9. *Nájdime riešenie diferenciálnej rovnice $y'' - y' - 2y = 4x - 2e^x$.*

Riešenie: Najprv riešime diferenciálnu rovnicu bez pravej strany

$$y'' - y' - 2y = 0.$$

Nahradením derivácií y mocninami λ zapíšeme charakteristickú rovnicu danej diferenciálnej rovnice

$$\lambda^2 - \lambda - 2 = 0.$$

Jej koreňmi sú $\lambda_1 = 2$, $\lambda_2 = -1$, ktorým odpovedajú riešenia $y_1 = e^{2x}$, $y_2 = e^{-x}$.

Potom riešenie danej diferenciálnej rovnice bez pravej strany je v tvare

$$y = c_1 e^{2x} + c_2 e^{-x}, \quad c_1, c_2 \in \mathbb{R}.$$

Riešenie danej diferenciálnej rovnice s pravou stranou je v tvare

$$y = c_1 e^{2x} + c_2 e^{-x} + y^*, \quad c_1, c_2 \in \mathbb{R},$$

kde tvar y^* určíme podľa funkcie na pravej strane zadanej diferenciálnej rovnice.

Keďže pravá strana rovnice je rovná $4x - 2e^x$, máme typ $f(x) = f_1(x) + f_2(x)$, kde $f_1(x) = 4x$ a $f_2(x) = -2e^x$.

Potom $y^* = y_1^* + y_2^*$, pričom y_1^* je riešenie diferenciálnej rovnice $y'' - y' - 2y = 4x$ a y_2^* je riešenie diferenciálnej rovnice $y'' - y' - 2y = -2e^x$.

Vypočítame najprv y_1^* . V tomto prípade máme pravú stranu $f_1(x) = P_m(x) e^{\alpha x} = 4x$, teda $m = 1$ a $\alpha = 0$. Potom

$$y_1^* = (ax + b) e^{0x} x^0 = (ax + b),$$

lebo $\alpha = 0$ nie je koreňom (teda je 0-násobným koreňom, t. j. $k = 0$) charakteristickej rovnice diferenciálnej rovnice bez pravej strany. Keďže $(y_1^*)' = a$ a $(y_1^*)'' = 0$, dostávame

$$-a - 2(ax + b) = 4x.$$

Úpravou a porovnaním koeficientov polynómov na oboch stranách rovnice dostaneme $a = -2$, $b = 1$ a teda $y_1^* = -2x + 1$.

Podobne vypočítame aj y_2^* . V tomto prípade máme pravú stranu $f_2(x) = P_m(x) e^{\alpha x} = -2e^x$, teda $m = 0$ a $\alpha = 1$. Potom

$$y_2^* = c e^x x^0 = c e^x,$$

lebo $\alpha = 1$ nie je koreňom (teda je 0-násobným koreňom, t. j. $k = 0$) charakteristickej rovnice diferenciálnej rovnice bez pravej strany.

Keďže $(y_2^*)' = c e^x$ a $(y_2^*)'' = c e^x$, dostávame

$$c e^x - c e^x - 2c e^x = -2 e^x.$$

Úpravou dostaneme $c = 1$ a teda $y_2^* = e^x$. Riešenie danej diferenciálnej rovnice je v tvare

$$y = c_1 e^{2x} + c_2 e^{-x} + y_1^* + y_2^* = c_1 e^{2x} + c_2 e^{-x} - 2x + 1 + e^x, \quad c_1, c_2 \in \mathbb{R}.$$

Príklad 3.10. *Nájdime riešenie diferenciálnej rovnice $y'' + y = \frac{1}{\cos x}$.*

Riešenie: Najprv riešime diferenciálnu rovnicu bez pravej strany

$$y'' + y = 0.$$

Nahradením derivácií y mocninami λ zapíšeme charakteristickú rovnicu danej diferenciálnej rovnice

$$\lambda^2 + 1 = 0.$$

Jej koreňmi sú $\lambda_1 = i$, $\lambda_2 = -i$, ktorým odpovedajú riešenia $y_1 = \cos x$, $y_2 = \sin x$. Potom riešenie danej diferenciálnej rovnice bez pravej strany je v tvare

$$y = c_1 \cos x + c_2 \sin x, \quad c_1, c_2 \in \mathbb{R}.$$

Keďže na pravej strane danej diferenciálnej rovnice nie je ani jedna z funkcií typu $f(x) = P_m(x) e^{\alpha x}$, $f(x) = \left(P_{n_1}^{(1)}(x) \cos \beta x + P_{n_2}^{(2)}(x) \sin \beta x \right) e^{\alpha x}$ a ani ich súčet, túto diferenciálnu rovnicu budeme riešiť pomocou Lagrangeovej metódy variácie konštant. Jej riešenie budeme hľadať v tvare

$$y = c_1(x) \cos x + c_2(x) \sin x,$$

kde potrebujeme určiť funkcie $c_1(x)$ a $c_2(x)$. Pre funkcie $c_1(x)$, $c_2(x)$ platí

$$c_1(x) = \int \frac{W_1(x)}{W(x)} dx \quad \text{a} \quad c_2(x) = \int \frac{W_2(x)}{W(x)} dx,$$

kde

$$\begin{aligned} W(x) &= \begin{vmatrix} y_1 & y_2 \\ y_1' & y_2' \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos x & \sin x \\ -\sin x & \cos x \end{vmatrix} = \cos^2 x + \sin^2 x = 1, \\ W_1(x) &= \begin{vmatrix} 0 & y_2 \\ f(x) & y_2' \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & \sin x \\ \frac{1}{\cos x} & \cos x \end{vmatrix} = -\frac{\sin x}{\cos x}, \\ W_2(x) &= \begin{vmatrix} y_1 & 0 \\ y_1' & f(x) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos x & 0 \\ -\sin x & \frac{1}{\cos x} \end{vmatrix} = 1. \end{aligned}$$

Po dosadení dostávame

$$\begin{aligned} c_1(x) &= \int \frac{W_1(x)}{W(x)} dx = \int \frac{-\sin x}{\cos x} dx = \ln |\cos x| + k_1, \\ c_2(x) &= \int \frac{W_2(x)}{W(x)} dx = \int 1 dx = x + k_2. \end{aligned}$$

Riešenie danej diferenciálnej rovnice je v tvare

$$\begin{aligned} y &= c_1(x) \cos x + c_2(x) \sin x = (\ln |\cos x| + k_1) \cos x + (x + k_2) \sin x = \\ &= k_1 \cos x + k_2 \sin x + \ln |\cos x| \cos x + x \sin x, \quad k_1, k_2 \in \mathbb{R}. \end{aligned}$$

Neriešené úlohy:

Riešte diferenciálnu rovnicu $y'' - 5y' + 6y = f(x)$, ak:

115. $f(x) = e^x(6x + 1)$

$$y = c_1 e^{2x} + c_2 e^{3x} + e^x(3x + 5)$$

116. $f(x) = 12x^2 - 2x + 1$

$$y = c_1 e^{2x} + c_2 e^{3x} + 2x^2 + 3x + 2$$

117. $f(x) = 5e^{\frac{x}{2}}$

$$y = c_1 e^{2x} + c_2 e^{3x} + \frac{4}{3} e^{\frac{x}{2}}$$

118. $f(x) = 39 \sin(3x)$

$$y = c_1 e^{2x} + c_2 e^{3x} - \frac{\sin(3x) - 5 \cos(3x)}{2}$$

119. $f(x) = 3e^{2x}$

$$y = c_1 e^{2x} + c_2 e^{3x} - 3x e^{2x}$$

120. $f(x) = x e^{3x}$

$$y = c_1 e^{2x} + c_2 e^{3x} + \left(\frac{x^2}{2} - x \right) e^{3x}$$

Riešte diferenciálnu rovnicu $y'' - y' - 12y = f(x)$, ak:

- | | |
|--------------------------------|--|
| 121. $f(x) = 4$ | $y = c_1 e^{4x} + c_2 e^{-3x} - \frac{1}{3}$ |
| 122. $f(x) = \cos(2x)$ | $y = c_1 e^{4x} + c_2 e^{-3x} - \frac{8 \cos(2x) + \sin(2x)}{130}$ |
| 123. $f(x) = e^{-x}(5x^2 - 1)$ | $y = c_1 e^{4x} + c_2 e^{-3x} - \left(\frac{x^2}{2} - \frac{3x}{10} + \frac{9}{100}\right) e^{-x}$ |
| 124. $f(x) = 7e^{4x}$ | $y = c_1 e^{4x} + c_2 e^{-3x} + x e^{4x}$ |
| 125. $f(x) = 7x e^{-3x}$ | $y = c_1 e^{4x} + c_2 e^{-3x} - \left(\frac{x^2}{2} + \frac{x}{7}\right) e^{-3x}$ |
| 126. $f(x) = \sin x - \cos x$ | $y = c_1 e^{4x} + c_2 e^{-3x} + \frac{7 \cos x - 6 \sin x}{85}$ |

Riešte diferenciálnu rovnicu $y'' + 6y' + 5y = f(x)$, ak:

- | | |
|-------------------------------|---|
| 127. $f(x) = 5x + 1$ | $y = c_1 e^{-x} + c_2 e^{-5x} - 1 + x$ |
| 128. $f(x) = 20e^{5x}$ | $y = c_1 e^{-x} + c_2 e^{-5x} + \frac{e^{5x}}{3}$ |
| 129. $f(x) = e^{-5x}$ | $y = c_1 e^{-x} + c_2 e^{-5x} - \frac{1}{4} x e^{-5x}$ |
| 130. $f(x) = 10 \sin(5x)$ | $y = c_1 e^{-x} + c_2 e^{-5x} - \frac{3 \cos(5x) + 2 \sin(5x)}{13}$ |
| 131. $f(x) = 13 \cos x$ | $y = c_1 e^{-x} + c_2 e^{-5x} + \cos x + \frac{3}{2} \sin x$ |
| 132. $f(x) = 17e^{-x} \cos x$ | $y = c_1 e^{-x} + c_2 e^{-5x} + e^{-x}(4 \sin x - \cos x)$ |
| 133. $f(x) = e^{-x}(4x + 3)$ | $y = c_1 e^{-x} + c_2 e^{-5x} + \frac{x(1+x)}{2} e^{-x}$ |

Riešte diferenciálnu rovnicu $y'' + 4y' = f(x)$, ak:

- | | |
|-----------------------------|--|
| 134. $f(x) = \sin x$ | $y = c_1 + c_2 e^{-4x} - \frac{4 \cos x + \sin x}{17}$ |
| 135. $f(x) = 3x^2 + 3x + 2$ | $y = c_1 + c_2 e^{-4x} + \frac{8x^2 + 6x + 13}{32} x$ |
| 136. $f(x) = e^{-4x}$ | $y = c_1 + c_2 e^{-4x} - \frac{1}{4} x e^{-4x}$ |

Riešte diferenciálnu rovnicu $y'' + 4y = f(x)$, ak:

- | | |
|----------------------------|--|
| 137. $f(x) = 2$ | $y = c_1 \cos(2x) + c_2 \sin(2x) + \frac{1}{2}$ |
| 138. $f(x) = e^x \sin(2x)$ | $y = c_1 \cos(2x) + c_2 \sin(2x) + \frac{\sin(2x) - 4 \cos(2x)}{17} e^x$ |
| 139. $f(x) = \cos x$ | $y = c_1 \cos(2x) + c_2 \sin(2x) + \frac{\cos x}{3}$ |
| 140. $f(x) = \sin(2x)$ | $y = c_1 \cos(2x) + c_2 \sin(2x) - \frac{x \cos(2x)}{4}$ |
| 141. $f(x) = -5x e^x$ | $y = c_1 \cos(2x) + c_2 \sin(2x) + \frac{2-5x}{5} e^x$ |
| 142. $f(x) = x^2 - 6x + 5$ | $y = c_1 \cos(2x) + c_2 \sin(2x) + \frac{2x^2 - 12x + 9}{8}$ |

Riešte diferenciálnu rovnicu $y'' - 2y' + 5y = f(x)$, ak:

- | | |
|-----------------------------|--|
| 143. $f(x) = 5x - 2$ | $y = c_1 e^x \cos(2x) + c_2 e^x \sin(2x) + x$ |
| 144. $f(x) = e^x(4x + 6)$ | $y = c_1 e^x \cos(2x) + c_2 e^x \sin(2x) + \frac{2x+3}{2} e^x$ |
| 145. $f(x) = 5x^2 + x + 15$ | $y = c_1 e^x \cos(2x) + c_2 e^x \sin(2x) + x^2 + x + 3$ |

146. $f(x) = 34 \sin(2x)$ $y = c_1 e^x \cos(2x) + c_2 e^x \sin(2x) + 8 \cos(2x) + 2 \sin(2x)$

147. $f(x) = -\cos x$ $y = c_1 e^x \cos(2x) + c_2 e^x \sin(2x) - \frac{2 \cos x - \sin x}{10}$

148. $f(x) = [\sin(2x) + \cos(2x)] e^x$ $y = c_1 e^x \cos(2x) + c_2 e^x \sin(2x) + \frac{\sin(2x) - \cos(2x)}{4} x e^x$

Riešte diferenciálnu rovnicu $y'' - y' - 6y = f(x)$, ak:

149. $f(x) = 6x^2 + 8x - 7 + e^{2x}$ $y = c_1 e^{3x} + c_2 e^{-2x} - x^2 - x + 1 - \frac{1}{4} e^{2x}$

150. $f(x) = 52 \sin(2x) - 5 e^{3x}$ $y = c_1 e^{3x} + c_2 e^{-2x} + \cos(2x) - 5 \sin(2x) - x e^{3x}$

151. $f(x) = 10(e^{-2x} + x e^{3x})$ $y = c_1 e^{3x} + c_2 e^{-2x} + \frac{e^{3x}(5x^2 - 2x)}{5} - 2x e^{-2x}$

152. $f(x) = 12 + 50 \sin x - 52 \cos(2x)$

$$y = c_1 e^{3x} + c_2 e^{-2x} + \cos x - 7 \sin x + 5 \cos(2x) + \sin(2x) - 2$$

Riešte nasledujúce lineárne diferenciálne rovnice druhého rádu:

153. $y'' + 2y' = e^{-x}$ $y = c_1 e^{-2x} + c_2 - e^{-x}$

154. $y'' - 2y' = 3e^{2x}$ $y = c_1 e^{2x} + c_2 + \frac{3x e^{2x}}{2}$

155. $y'' + 4y' + 5y = 5x^2 - 32x + 5$ $y = c_1 e^{-2x} \cos x + c_2 e^{-2x} \sin x + x^2 - 8x + 7$

156. $y'' + 2y' + 2y = 2x^2 - 16x + 2$ $y = c_1 e^{-x} \cos x + c_2 e^{-x} \sin x + x^2 - 10x + 10$

157. $y'' - y' - 2y = 3 \sin x + 11 \cos x$ $y = c_1 e^{2x} + c_2 e^{-x} - 2 \sin x - 3 \cos x$

158. $y'' - 6y' + 9y = 2 \sin x + 36 \cos x$ $y = c_1 e^{3x} + c_2 x e^{3x} - 2 \sin x + 3 \cos x$

159. $y'' - 8y' + 16y = 3x e^x$ $y = c_1 e^{4x} + c_2 x e^{4x} + \left(\frac{x}{3} + \frac{2}{9}\right) e^x$

160. $y'' - 2y' = 25 \sin x$ $y = c_1 + c_2 e^{2x} - 5 \sin x + 10 \cos x$

161. $y'' - 2y' + 5y = 5x^2 + x - 5$ $y = c_1 e^x \cos(2x) + c_2 e^x \sin(2x) + x^2 + x - 1$

162. $y'' - 5y' = (x + 1)e^{-x} + e^x$ $y = c_1 + c_2 e^{5x} + \frac{6x+13}{36} e^{-x} - \frac{e^x}{4}$

163. $y'' - 5y' = 5 - \frac{2}{5} e^{5x} - 2x e^{5x}$ $y = c_1 + c_2 e^{5x} - x - \frac{x^2 e^{5x}}{5}$

164. $y'' + y = x^3 - 1 - 2x e^x$ $y = c_1 \cos x + c_2 \sin x + x^3 - 6x - 1 - e^x(x - 1)$

165. $y'' + y = -x + \cos x + \sin x$ $y = c_1 \cos x + c_2 \sin x - x + \frac{x(\sin x - \cos x)}{2}$

166. $y'' - 4y' + 5y = e^{2x} + 4 \cos x$ $y = c_1 e^{2x} \cos x + c_2 e^{2x} \sin x + e^{2x} + \frac{\cos x - \sin x}{2}$

Riešte nasledujúce lineárne diferenciálne rovnice metódou variácie konštant:

167. $y'' + y = \frac{1}{\sin x}$ $y = c_1 \cos x + c_2 \sin x - x \cos x + \sin x \ln |\sin x|$

168. $y'' + y = \frac{1}{\cos^3 x}$ $y = c_1 \cos x + c_2 \sin x - \frac{1}{2 \cos x} + \sin x \operatorname{tg} x$

169. $y'' + y = \frac{2}{\sin^3 x}$ $y = c_1 \cos x + c_2 \sin x + 2 \cos x \operatorname{cotg} x - \frac{1}{\sin x}$

170. $y'' - 2y' + y = \frac{e^x}{x}$ $y = c_1 e^x + c_2 x e^x - x e^x + x e^x \ln |x|$

171. $y'' - 2y' + y = \frac{e^x}{x^2 + 1}$ $y = c_1 e^x + c_2 x e^x - \frac{e^x}{2} \ln(x^2 + 1) + x e^x \operatorname{arctg} x$

$$172. \quad y'' + 4y' + 4y = e^{-2x} \ln x \qquad y = c_1 e^{-2x} + c_2 x e^{-2x} + \frac{x^2}{4} e^{-2x} (3 - 2 \ln x)$$

$$173. \quad y'' + y = \cotg x \qquad y = c_1 \cos x + c_2 \sin x + \frac{\sin x}{2} \ln \left| \frac{1 - \cos x}{1 + \cos x} \right|$$

$$174. \quad y'' + 2y' + 2y = \frac{1}{e^x \sin x}$$
$$y = c_1 e^{-x} \cos x + c_2 e^{-x} \sin x - x e^{-x} \cos x + e^{-x} \sin x \ln |\sin x|$$

4 Funkcia komplexnej premennej

Definícia 4.1. Na množine M komplexných čísel je definovaná **komplexná funkcia f komplexnej premennej**, ak ku každému komplexnému číslu $z \in M$ je priradené práve jedno komplexné číslo $w = f(z)$. Množinu M nazývame **definičným oborom funkcie f** a množinu L všetkých čísel $f(z)$, $z \in M$ nazývame **oborom hodnôt funkcie f** . Komplexnú funkciu f komplexnej premennej s definičným oborom M môžeme zapísať aj v tvare

$$f(z) = u(x, y) + i v(x, y),$$

kde $z = x + i y$ a $u(x, y)$, $v(x, y)$ sú reálne funkcie dvoch reálnych premenných x a y .

4.1 Analytická funkcia a derivácia funkcie komplexnej premennej

Definícia 4.2. Funkciu f komplexnej premennej nazývame **analytickou** v bode a , $a \neq \infty$, ak existuje také okolie bodu a , že v každom jeho bode má funkcia f spojitú deriváciu.

Definícia 4.3. Bod a sa nazýva **regulárny**, ak je v danom bode funkcia f analytická. Bod a , v ktorom funkcia f nie je analytická, sa nazýva **singulárny**.

Veta 4.1. Funkcia komplexnej premennej $f(z) = u(x, y) + i v(x, y)$, kde $z = x + i y$, má v komplexnom čísle a deriváciu $f'(z)$ práve vtedy, keď funkcie $u(x, y)$, $v(x, y)$ sú v čísle a diferencovateľné a platia Cauchy–Riemanove vzťahy

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial v}{\partial x}.$$

Ak funkcia komplexnej premennej $f(z)$ má v komplexnom čísle a deriváciu, tak

$$f'(z) = \frac{\partial u}{\partial x} + i \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y} - i \frac{\partial u}{\partial y}.$$

Príklad 4.1. Ukážme, že funkcia $f(z) = x^3 - 3xy^2 + i(3x^2y - y^3)$ je analytická.

Riešenie: Aby funkcia $f(z)$ bola analytická, musia pre ňu platiť Cauchy–Riemanove vzťahy

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \wedge \quad \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial v}{\partial x}.$$

Zo zadania funkcie vyplýva, že

$$u(x, y) = x^3 - 3xy^2 \quad \text{a} \quad v(x, y) = 3x^2y - y^3.$$

Vypočítame parciálne derivácie

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 3x^2 - 3y^2, \quad \frac{\partial v}{\partial y} = 3x^2 - 3y^2,$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = -6xy, \quad \frac{\partial v}{\partial x} = 6xy.$$

Keďže platia Cauchy–Riemanove vzťahy, tak funkcia $f(z) = x^3 - 3xy^2 + i(3x^2 - y^3)$ je analytická.

Príklad 4.2. *Nájdime funkciu $v(x, y)$ tak, aby funkcia $f(z) = u(x, y) + i v(x, y)$ bola analytická, ak $u(x, y) = 2xy + 3x$.*

Riešenie: Ak chceme, aby funkcia $f(z)$ bola analytická, musia pre ňu platiť Cauchy–Riemanove vzťahy. Keďže $\frac{\partial u}{\partial x} = 2y + 3$, z prvého Cauchy–Riemanovho vzťahu dostaneme

$$\frac{\partial v}{\partial y} = 2y + 3 \Rightarrow v(x, y) = \int (2y + 3) dy = 2 \frac{y^2}{2} + 3y + c(x) = y^2 + 3y + c(x).$$

Pretože

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 2x \quad \text{a} \quad -\frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{\partial [y^2 + 3y + c(x)]}{\partial x} = -c'(x),$$

využitím druhého Cauchy–Riemanovho vzťahu dostávame

$$2x = -c'(x)$$

$$c(x) = -\int (2x) dx = -2 \frac{x^2}{2} + k = -x^2 + k.$$

Teda

$$v(x, y) = y^2 + 3y - x^2 + k$$

a

$$f(z) = u(x, y) + i v(x, y) = (2xy + 3x) + i(y^2 + 3y - x^2 + k), \quad k \in \mathbb{R}.$$

Príklad 4.3. *Nájdime funkciu $u(x, y)$ tak, aby funkcia $f(z) = u(x, y) + i v(x, y)$ bola analytická, ak $v(x, y) = 2xy + 3x$ a je daná začiatočná podmienka $f(0) = i$.*

Riešenie: Postupujeme rovnako ako v Príklade 4.2. Ak chceme, aby funkcia $f(z)$ bola analytická, musia pre ňu platiť Cauchy–Riemanove vzťahy. Keďže $\frac{\partial v}{\partial y} = 2x$, z prvého Cauchy–Riemanovho vzťahu dostaneme

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 2x \Rightarrow u(x, y) = \int 2x dx = 2 \frac{x^2}{2} + c(y) = x^2 + c(y).$$

Pretože

$$\frac{\partial v}{\partial x} = 2y + 3 \quad \text{a} \quad -\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial [x^2 + c(y)]}{\partial y} = -c'(y),$$

využitím druhého Cauchy–Riemanovho vzťahu dostávame

$$2y + 3 = -c'(y),$$

$$c(y) = -\int (2y + 3) dy = -2\frac{y^2}{2} - 3y + k = -y^2 - 3y + k.$$

Teda

$$u(x, y) = x^2 - y^2 - 3y + k$$

a

$$f(z) = u(x, y) + i v(x, y) = (x^2 - y^2 - 3y + k) + i(2xy + 3x), \quad k \in \mathbb{R}.$$

Keďže $f(z) = f(x + yi)$, začiatočnú podmienku $f(0) = i$ môžeme prepísať do tvaru $f(0 + 0i) = i$. Na základe zadanej začiatočnej podmienky vypočítame presnú hodnotu k dosadením do funkcie $f(z)$

$$f(z) = (x^2 - y^2 - 3y + k) + i(2xy + 3x) \Rightarrow f(0 + 0i) = (0^2 - 0^2 - 3 \cdot 0 + k) + i(2 \cdot 0 \cdot 0 + 3 \cdot 0) = i.$$

Z toho vyplýva

$$k = i.$$

Teda

$$f(z) = (x^2 - y^2 - 3y + i) + i(2xy + 3x) = (x^2 - y^2 - 3y) + i(2xy + 3x + 1).$$

Neriešené úlohy:

Rozhodnite, či funkcia $f(z)$, kde $z = x + iy$, je analytická:

- | | |
|--|-------------------|
| 1. $f(z) = x^3 - 3xy^2 - 2y + i(3x^2y - y^3 + 2x)$ | je analytická |
| 2. $f(z) = x^3 - 15xy^2 + i(3x^2 - y^3)$ | nie je analytická |
| 3. $f(z) = 2e^x \sin y - 2ie^x \cos y$ | je analytická |
| 4. $f(z) = z^2 + 2z$ | je analytická |
| 5. $f(z) = \operatorname{Re} z$ | nie je analytická |

Nájdite funkciu $u(x, y)$, resp. $v(x, y)$ tak, aby funkcia $f(z) = u(x, y) + iv(x, y)$ bola analytická, ak:

- | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|
| 6. $u(x, y) = 3x^2 - 3y^2 - 2xy + 2y$ | $v(x, y) = x^2 - y^2 + 6xy - 2x + c$ |
| 7. $u(x, y) = x^3 - 3xy^2 - 2y$ | $v(x, y) = 3x^2y - y^3 + 2x + c$ |

- | | | |
|-----|---|--|
| 8. | $u(x, y) = x^2 - y^2 + xy$ | $v(x, y) = -\frac{x^2}{2} + \frac{y^2}{2} + 2xy + c$ |
| 9. | $v(x, y) = -2x^3 - y^3 + 3x^2y + 6xy^2$ | $u(x, y) = x^3 + 6x^2y - 3xy^2 - 2y^3 + c$ |
| 10. | $u(x, y) = 4e^x \sin y$ | $v(x, y) = -4e^x \cos y + c$ |

Nájdite funkciu $u(x, y)$, resp. $v(x, y)$ tak, aby funkcia $f(z) = u(x, y) + i v(x, y)$ bola analytická, ak je daná začiatočná podmienka:

- | | | |
|-----|---|--|
| 11. | $u(x, y) = 3x^2 - 3y^2 - 2xy + 2y, f(0) = i$ | $v(x, y) = x^2 - y^2 + 6xy - 2x + 1$ |
| 12. | $u(x, y) = x^3 - 3xy^2 - 2y, f(i) = -2 - i$ | $v(x, y) = 3x^2y - y^3 + 2x$ |
| 13. | $u(x, y) = x^2 - y^2 + xy, f(1 + i) = 2i$ | $v(x, y) = -\frac{x^2}{2} + \frac{y^2}{2} + 2xy + i$ |
| 14. | $v(x, y) = -2x^3 - y^3 + 3x^2y + 6xy^2, f(0) = 0$ | $u(x, y) = x^3 + 6x^2y - 3xy^2 - 2y^3$ |
| 15. | $u(x, y) = 4e^x \sin y, f(\pi i) = 5i$ | $v(x, y) = -4e^x \cos y + 1$ |

4.2 Rezíduum funkcie

Definícia 4.4. Nech z_0 je izolovaný singulárny bod funkcie $f(z)$, ktorá je na medzikruží $M : 0 < |z - z_0| < R$ analytická. Nech Laurentov rad funkcie $f(z)$ v bode z_0 pre dané medzikružie je

$$f(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n (z - z_0)^n.$$

Koeficient a_{-1} v Laurentovom rade sa nazýva **rezíduum funkcie $f(z)$ v bode z_0** a označujeme ho $\text{res } f(z_0)$.

Pre rezíduum funkcie $f(z)$ v bode z_0 platí

$$\text{res } f(z_0) = \frac{1}{2\pi i} \int_C f(z) dz,$$

kde C je jednoduchá uzavretá kladne orientovaná po častiach hladká krivka, ktorá leží v medzikruží M a v jej vnútri leží bod z_0 .

V ďalšom texte sa budeme zaoberať iba racionálnymi funkciami. Póly m -tého stupňa budú body, v ktorých menovateľ racionálnej funkcie má m -násobný nulový bod a súčasne čitateľ je v týchto bodoch rôzny od nuly.

Veta 4.2. Nech funkcia f má v bode z_0 k -násobný pól, potom platí

$$\text{res } f(z_0) = \frac{1}{(k-1)!} \lim_{z \rightarrow z_0} \frac{d^{k-1}}{dz^{k-1}} [(z - z_0)^k f(z)].$$

Príklad 4.4. Vypočítajte rezíduum funkcie $f(z) = \frac{1}{z(z-i)^3}$ v jej póloch.

Riešenie: Funkcia $f(z)$ má jeden jednoduchý pól $z_1 = 0$ a jeden trojnásobný pól $z_2 = i$. Pre rezíduum funkcie $f(z)$ v jednoduchom ($k = 1$) póle $z_1 = 0$ platí

$$\operatorname{res} f(z_1) = \lim_{z \rightarrow z_1} [(z - z_1)f(z)],$$

teda

$$\operatorname{res} f(0) = \lim_{z \rightarrow 0} \left[(z - 0) \frac{1}{z(z-i)^3} \right] = \lim_{z \rightarrow 0} \frac{1}{(z-i)^3} = \frac{1}{(-i)^3} = \frac{1}{i} = -i.$$

Pre rezíduum funkcie $f(z)$ v trojnásobnom ($k = 3$) póle $z_2 = i$ platí

$$\operatorname{res} f(z_2) = \frac{1}{2!} \lim_{z \rightarrow z_2} \frac{d^2}{dz^2} [(z - z_2)^3 f(z)],$$

teda

$$\begin{aligned} \operatorname{res} f(i) &= \frac{1}{2} \lim_{z \rightarrow i} \frac{d^2}{dz^2} \left[(z - i)^3 \frac{1}{z(z-i)^3} \right] = \frac{1}{2} \lim_{z \rightarrow i} \left(\frac{1}{z} \right)'' = \\ &= \frac{1}{2} \lim_{z \rightarrow i} \left(-\frac{1}{z^2} \right)' = \frac{1}{2} \lim_{z \rightarrow i} \frac{2}{z^3} = \frac{1}{i^3} = -\frac{1}{i} = i. \end{aligned}$$

Neriešené úlohy:

Vypočítajte rezíduum funkcie $f(z)$ vo všetkých jej póloch:

- | | |
|---|---|
| 16. $f(z) = \frac{z^2}{z+3}$ | $\operatorname{res}(-3) = 9$ |
| 17. $f(z) = \frac{e^{\pi z}}{z^2+1}$ | $\operatorname{res}(-i) = -\frac{i}{2}, \operatorname{res}(i) = \frac{i}{2}$ |
| 18. $f(z) = \frac{z^4}{(z-2)^3}$ | $\operatorname{res}(2) = 24$ |
| 19. $f(z) = \frac{1}{(z^2+1)^3}$ | $\operatorname{res}(-i) = \frac{3i}{16}, \operatorname{res}(i) = -\frac{3i}{16}$ |
| 20. $f(z) = \frac{1}{(z-i)^3}$ | $\operatorname{res}(i) = 0$ |
| 21. $f(z) = \frac{\sin z}{z^2}$ | $\operatorname{res}(0) = 1$ |
| 22. $f(z) = \frac{1}{z(z-i)^3}$ | $\operatorname{res}(i) = i, \operatorname{res}(0) = -i$ |
| 23. $f(z) = \frac{z^2}{(z^2+1)^2}$ | $\operatorname{res}(i) = -\frac{i}{4}, \operatorname{res}(-i) = \frac{i}{4}$ |
| 24. $f(z) = \frac{1}{z^4(z^2+1)^2}$ | $\operatorname{res}(0) = 0, \operatorname{res}(i) = -\frac{5i}{4}, \operatorname{res}(-i) = \frac{5i}{4}$ |
| 25. $f(z) = \frac{z^3+z^2+2}{z(1-z^2)^2}$ | $\operatorname{res}(0) = 2, \operatorname{res}(1) = -\frac{3}{4}, \operatorname{res}(-1) = -\frac{5}{4}$ |

4.3 Integrál funkcie komplexnej premennej

Veta 4.3. (Cauchyho integrálna veta) Nech G je otvorená množina. Nech funkcia $f(z)$ je analytická na oblasti G . Nech C je uzavretá kladne orientovaná po častiach hladká krivka, ktorá leží so svojím vnútrom v oblasti G . Potom platí

$$\oint_C f(z)dz = 0.$$

Veta 4.4. Nech C, C_1, C_2, \dots, C_n sú uzavreté kladne orientované krivky a nech C_1, C_2, \dots, C_n ležia vnútri krivky C tak, že žiadne dve a ani ich vnútra nemajú spoločné body. Nech krivka C a jej vnútro, bez vnútra kriviek C_1, C_2, \dots, C_n ležia v oblasti G . Nech $f(z)$ je analytická na oblasti G . Potom platí

$$\oint_C f(z)dz = \oint_{C_1} f(z)dz + \oint_{C_2} f(z)dz + \dots + \oint_{C_n} f(z)dz.$$

Veta 4.5. (Cauchyho integrálna formula) Nech na oblasti G je funkcia $f(z)$ analytická. Nech C je uzavretá kladne orientovaná krivka, ktorá leží so svojím vnútrom v oblasti G . Nech bod z_0 leží vnútri krivky C . Potom platí

$$f(z_0) = \frac{1}{2\pi i} \oint_C \frac{f(z)}{(z - z_0)} dz.$$

Veta 4.6. Nech na oblasti G je funkcia $f(z)$ analytická. Nech C je uzavretá kladne orientovaná krivka, ktorá leží so svojím vnútrom A v oblasti G . Potom funkcia $f(z)$ má v každom bode $z_0 \in A$ deriváciu ľubovoľného rádu, pre ktorú platí

$$f^{(n)}(z_0) = \frac{n!}{2\pi i} \oint_C \frac{f(z)}{(z - z_0)^{n+1}} dz, n = 1, 2, \dots$$

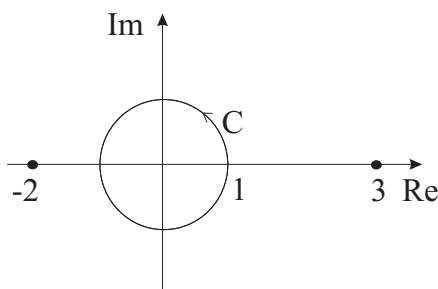
Veta 4.7. (Základná veta o rezíduách) Nech C je uzavretá kladne orientovaná krivka. Ak je funkcia $f(z)$ spojitá a analytická s výnimkou konečného počtu singulárnych bodov z_k , potom platí

$$\oint_C f(z)dz = 2\pi i \sum_{k=1}^n \operatorname{res} f(z_k), k = 1, 2, \dots, n.$$

Príklad 4.5. Vypočítajte $\oint_C \frac{z^2 + 1}{(z - 3)(z + 2)} dz$ po uzavretej krivke $|z| = 1$.

Riešenie: Funkcia $f(z) = \frac{z^2+1}{(z-3)(z+2)}$ má dva singulárne body (jednoduché póly) $z_0 = -2$ a $z_1 = 3$. Ani jeden z nich však neleží vnútri krivky C , teda kružnice so stredom v bode $[0, 0]$ a polomerom $r = 1$. Preto na základe Vety 4.3, je výsledný integrál rovný nule,

$$\oint_C \frac{z^2 + 1}{(z - 3)(z + 2)} dz = 0.$$

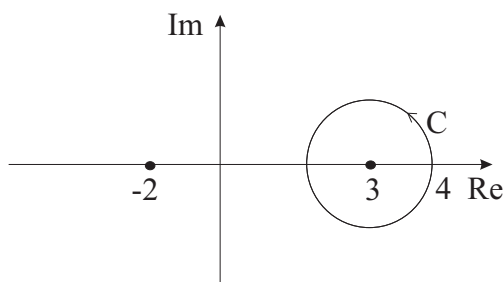


Obr. 5: Znáročenie krivky a singulárnych bodov z Príkladu 4.5

Príklad 4.6. Vypočítajte $\oint_C \frac{z^2 + 1}{(z - 3)(z + 2)} dz$ po uzavretej krivke $|z - 3| = 1$.

Riešenie: Funkcia $f(z) = \frac{z^2+1}{(z-3)(z+2)}$ má dva singulárne body (jednoduché póly) $z_1 = -2$ a $z_2 = 3$. Vnútri krivky C , teda kružnice so stredom v bode $[3, 0]$ a polomerom $r = 1$ leží len jeden pól, $z_2 = 3$. Preto na základe Vety 4.7, výsledný integrál vypočítame takto,

$$\oint_C \frac{z^2 + 1}{(z - 3)(z + 2)} dz = 2\pi i \operatorname{res}[f(3)] = 2\pi i \lim_{z \rightarrow 3} \left[(z - 3) \frac{z^2 + 1}{(z - 3)(z + 2)} \right] = 2\pi i \frac{3^2 + 1}{3 + 2} = 4\pi i.$$

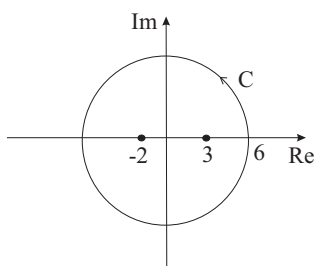


Obr. 6: Znáročenie krivky a singulárnych bodov z Príkladu 4.6

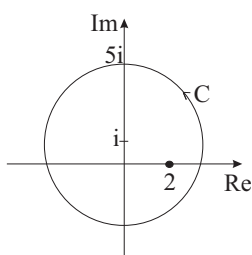
Príklad 4.7. Vypočítajte $\oint_C \frac{z^2 + 1}{(z - 3)(z + 2)} dz$ po uzavretej krivke $|z| = 6$.

Riešenie: Funkcia $f(z) = \frac{z^2+1}{(z-3)(z+2)}$ má dva singulárne body (jednoduché póly) $z_1 = -2$ a $z_2 = 3$. Vnútri krivky C , teda kružnice so stredom v bode $[0, 0]$ a polomerom $r = 6$ ležia obidva póly. Preto na základe Vety 4.7, výsledný integrál vypočítame takto,

$$\begin{aligned} \oint_C \frac{z^2+1}{(z-3)(z+2)} dz &= 2\pi i \operatorname{res}[f(-2)] + 2\pi i \operatorname{res}[f(3)] = \\ &= 2\pi i \lim_{z \rightarrow -2} \left[(z+2) \frac{z^2+1}{(z-3)(z+2)} \right] + 2\pi i \lim_{z \rightarrow 3} \left[(z-3) \frac{z^2+1}{(z-3)(z+2)} \right] = \\ &= 2\pi i \frac{(-2)^2+1}{-2-3} + 2\pi i \frac{3^2+1}{3+2} = -2\pi i + 4\pi i = 2\pi i. \end{aligned}$$



Obr. 7: Znáročenie krivky a singulárnych bodov z Príkladu 4.7



Obr. 8: Znáročenie krivky a singulárnych bodov z Príkladu 4.8

Príklad 4.8. Vypočítajte $\oint_C \frac{z^3 - 4z^2 - 10}{(z-2)^3} dz$ po uzavretej krivke $|z - i| = 4$.

Riešenie: Funkcia $f(z) = \frac{z^3-4z^2-10}{(z-2)^3}$ má jeden singulárny bod (trojnásobný pól) $z_1 = 2$. Pól $z_1 = 2$ leží vnútri krivky C , teda kružnice so stredom v bode $[0, i]$ a polomerom $r = 4$. Preto na základe Vety 4.7, výsledný integrál vypočítame takto,

$$\begin{aligned} \oint_C \frac{z^3 - 4z^2 - 10}{(z-2)^3} dz &= 2\pi i \operatorname{res} f(2) = \frac{2\pi i}{2!} \lim_{z \rightarrow 2} \left[(z-2)^3 \frac{z^3 - 4z^2 - 10}{(z-2)^3} \right]'' = \\ &= \pi i \lim_{z \rightarrow 2} [z^3 - 4z^2 - 10]'' = \pi i \lim_{z \rightarrow 2} [3z^2 - 8z]' = \\ &= \pi i \lim_{z \rightarrow 2} [6z - 8] = \pi i (6 \cdot 2 - 8) = 4\pi i. \end{aligned}$$

Neriešené úlohy:

Vypočítajte integrál funkcie po kladne orientovanej uzavretej krivke C .

26. $\oint_C \frac{z^2}{z+3} dz, C : |z+1| = 1$ 0
27. $\oint_C \frac{z^2}{z+3} dz, C : |z+2| = 2$ $18\pi i$
28. $\oint_C \frac{z^3 + 2z^2 - 10}{z-2} dz, C : |z| = 1$ 0
29. $\oint_C \frac{z^3 + 2z^2 - 10}{z-2} dz, C : |z| = 4$ $12\pi i$
30. $\oint_C \frac{z}{z^2 + 9} dz, C : |z-2| = 1$ 0
31. $\oint_C \frac{z}{z^2 + 9} dz, C : |z+4i| = 2$ πi
32. $\oint_C \frac{z}{z^2 + 9} dz, C : |z-3i| = 1$ πi
33. $\oint_C \frac{z}{z^2 + 9} dz, C : |z| = 5$ $2\pi i$
34. $\oint_C \frac{\sin z}{z^2 - 7z + 10} dz, C : |z+4| = 1$ 0
35. $\oint_C \frac{\sin z}{z^2 - 7z + 10} dz, C : |z| = 3$ $-\frac{2}{3}\pi i \sin 2$
36. $\oint_C \frac{\sin z}{z^2 - 7z + 10} dz, C : |z-6| = 2$ $\frac{2}{3}\pi i \sin 5$
37. $\oint_C \frac{\sin z}{z^2 - 7z + 10} dz, C : |z-4| = 4$ $\frac{2}{3}\pi i (\sin 5 - \sin 2)$
38. $\oint_C \frac{e^z \cos \pi z}{z^2 + 2z} dz, C : |z-2i| = 1$ 0
39. $\oint_C \frac{e^z \cos \pi z}{z^2 + 2z} dz, C : |z| = 1$ πi
40. $\oint_C \frac{e^z \cos \pi z}{z^2 + 2z} dz, C : |z+2| = 1$ $-\frac{\pi i}{e^2}$
41. $\oint_C \frac{e^z \cos \pi z}{z^2 + 2z} dz, C : |z+1| = 3$ $(1 - \frac{1}{e^2})\pi i$
42. $\oint_C \frac{e^{\pi z}}{z^2 + 1} dz, C : |z-3| = 1$ 0
43. $\oint_C \frac{e^{\pi z}}{z^2 + 1} dz, C : |z-i| = 1$ $-\pi$

44. $\oint_C \frac{e^{\pi z}}{z^2 + 1} dz, C : |z + i| = 1$ π
45. $\oint_C \frac{e^{\pi z}}{z^2 + 1} dz, C : |z| = 2$ 0
46. $\oint_C \frac{\sin z}{z^2} dz, C : |z - 4| = 2$ 0
47. $\oint_C \frac{\sin z}{z^2} dz, C : |z| = 2$ $2\pi i$
48. $\oint_C \frac{z^4}{(z - 2)^3} dz, C : |z + 2i| = 1$ 0
49. $\oint_C \frac{z^4}{(z - 2)^3} dz, C : |z - 3| = 2$ $48\pi i$
50. $\oint_C \frac{z^3 + 2z^2 - 10}{(z - 2)^3} dz, C : |z| = 4$ $16\pi i$
51. $\oint_C \frac{1}{(z - i)^3} dz, C : |z + 2i| = 2$ 0
52. $\oint_C \frac{1}{(z - i)^3} dz, C : |z + i| = 3$ 0
53. $\oint_C \frac{z^5 - 8z}{(z - i)^3} dz, C : |z - 2| = 1$ 0
54. $\oint_C \frac{z^5 - 8z}{(z - i)^3} dz, C : |z - 2i| = 2$ 20π
55. $\oint_C \frac{1}{(z^2 + 1)^3} dz, C : |z - 3| = 1$ 0
56. $\oint_C \frac{1}{(z^2 + 1)^3} dz, C : |z - i| = 1$ $\frac{3}{8}\pi$
57. $\oint_C \frac{1}{(z^2 + 1)^3} dz, C : |z + i| = 1$ $-\frac{3}{8}\pi$
58. $\oint_C \frac{1}{(z^2 + 1)^3} dz, C : |z| = 2$ 0
59. $\oint_C \frac{1}{z(z - i)^3} dz, C : |z + 2| = 1$ 0
60. $\oint_C \frac{1}{z(z - i)^3} dz, C : |z| = 1/2$ 2π
61. $\oint_C \frac{1}{z(z - i)^3} dz, C : |z - i| = 1/2$ -2π
62. $\oint_C \frac{1}{z(z - i)^3} dz, C : |z| = 2$ 0

63. $\oint_C \frac{z^2}{(z^2 + 1)^2} dz, C : |z| = 1/2$ 0
64. $\oint_C \frac{z^2}{(z^2 + 1)^2} dz, C : |z - i| = 1$ $\frac{\pi}{2}$
65. $\oint_C \frac{z^2}{(z^2 + 1)^2} dz, C : |z + i| = 1$ $-\frac{\pi}{2}$
66. $\oint_C \frac{z^2}{(z^2 + 1)^2} dz, C : |z| = 2$ 0
67. $\oint_C \frac{1}{z^4(z^2 + 1)^2} dz, C : |z - 2| = 1$ 0
68. $\oint_C \frac{1}{z^4(z^2 + 1)^2} dz, C : |z| = 1/2$ 0
69. $\oint_C \frac{1}{z^4(z^2 + 1)^2} dz, C : |z - i| = 1/2$ $\frac{5}{2}\pi$
70. $\oint_C \frac{1}{z^4(z^2 + 1)^2} dz, C : |z + i| = 1/2$ $-\frac{5}{2}\pi$
71. $\oint_C \frac{1}{z^4(z^2 + 1)^2} dz, C : |z| = 2$ 0
72. $\oint_C \frac{z^3 + z^2 + 2}{z(1 - z^2)^2} dz, C : |z + 3| = 1$ 0
73. $\oint_C \frac{z^3 + z^2 + 2}{z(1 - z^2)^2} dz, C : |z| = 1/4$ $4\pi i$
74. $\oint_C \frac{z^3 + z^2 + 2}{z(1 - z^2)^2} dz, C : |z - 1| = 1/4$ $-\frac{3}{2}\pi i$
75. $\oint_C \frac{z^3 + z^2 + 2}{z(1 - z^2)^2} dz, C : |z + 1| = 1/4$ $-\frac{5}{2}\pi i$
76. $\oint_C \frac{z^3 + z^2 + 2}{z(1 - z^2)^2} dz, C : |z| = 3$ 0

5 Laplaceova transformácia

5.1 Laplaceova transformácia

Laplaceova transformácia je transformácia, ktorá umožňuje zjednodušiť riešenie niektorých typov úloh týkajúcich sa predovšetkým diferenciálnych rovníc. Každéj funkcii $f(t)$ z určitej triedy funkcií, budeme ju nazývať **predmetom** (originálom, vzorom), určíme na základe určitých pravidiel jej **obraz** $F(p)$, $p \in \mathbb{C}$, pričom zložitejším operáciám v množine predmetov $\{f(t)\}$ by mali odpovedať jednoduchšie operácie v množine obrazov $\{F(p)\}$. Uvedenú vlastnosť zapisujeme v tvare $f(t) \doteq F(p)$ a hovoríme, že predmet $f(t)$ korešponduje s obrazom $F(p)$. Laplaceov obraz $F(p)$ je pritom daný pomocou vzťahu

$$F(p) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-pt} dt.$$

V ďalšom texte je uvedené zhrnutie korešpondencií základných funkcií a viet, ktoré môžeme využiť pri zložitejších funkciách. Celé znenie viet je uvedené v učebnici [3].

Tabuľka korešpondencií základných funkcií

Predmet		Obraz
1	\doteq	$\frac{1}{p}$
e^{at}	\doteq	$\frac{1}{p-a}$
t^n	\doteq	$\frac{n!}{p^{n+1}}$
$\sin(\omega t)$	\doteq	$\frac{\omega}{p^2 + \omega^2}$
$\cos(\omega t)$	\doteq	$\frac{p}{p^2 + \omega^2}$

Základné vety korešpondencií $f(t) \doteq F(p)$

- $\sum_{k=1}^n c_k f_k(t) \doteq \sum_{k=1}^n c_k F_k(p)$ (veta o lineárnosti)
- $f(\lambda t) \doteq \frac{1}{\lambda} F\left(\frac{p}{\lambda}\right)$, $\lambda > 0$ (veta o podobnosti)
- $e^{at} f(t) \doteq F(p-a)$ (veta o tlnení)

4. Ak $f(t, \lambda) \doteq F(p, \lambda)$, tak $\frac{\partial f(t, \lambda)}{\partial \lambda} \doteq \frac{\partial F(p, \lambda)}{\partial \lambda}$ (veta o o derivovaní podľa parametra)
5. $f(t - \tau) \eta(t - \tau) \doteq e^{-\tau p} F(p)$, $\tau > 0$ (veta o posunutí)
6. $f(t + \tau) \eta(t) \doteq e^{\tau p} \left[F(p) - \int_0^{\tau} f(t) e^{-pt} dt \right]$ (veta o predstihu)
7. $f'(t) \doteq p F(p) - f(0+)$ (veta o derivovaní predmetu)
 $f^{(n)}(t) \doteq p^n F(p) - p^{n-1} f(0+) - \dots - f^{(n-1)}(0+)$
8. $\int_0^t f(\tau) d\tau \doteq \frac{F(p)}{p}$ (veta o integrovaní predmetu)
9. $-t f(t) \doteq F'(p)$ (veta o derivovaní obrazu)
10. $\frac{f(t)}{t} \doteq \int_p^{\infty} F(z) dz$ (veta o integrovaní obrazu)
11. $(f * g)(t) \doteq F(p) G(p)$ (veta o násobení obrazov)
12. $p F(p) G(p) \doteq f(0+) g(t) + (f' * g)(t) = g(0+) f(t) + (g' * f)(t)$ (Duhamelov integrál)
13. $(f * g)(t) = h(t) = \int_0^t f(\tau) g(t - \tau) d\tau$ (veta o konvolučnom súčine, konvolúcia)

Poznámka: Funkcia $\eta(t)$ sa nazýva Heavisideova (jednotková) funkcia a je definovaná nasledovne

$$\eta(t) = \begin{cases} 0 & \text{pre } t < 0, \\ 1 & \text{pre } t \geq 0. \end{cases}$$

Príklad 5.1. Nájďme Laplaceov obraz $F(p)$ ku predmetu $f(t) = 4t^2 - 2 + 7e^{3t} - \frac{\cos(2t)}{5}$.

Riešenie: Využitím vety o lineárnosti (1) (násobiť predmet $f(t)$ konštantou c znamená násobiť obraz $F(p)$ rovnakou konštantou c) môžeme zapísať

$$4t^2 - 2 + 7e^{3t} - \frac{\cos(2t)}{5} = 4 \cdot t^2 - 2 \cdot 1 + 7 \cdot e^{3t} - \frac{1}{5} \cdot \cos(2t).$$

Podľa tabuľky korešpondencií platí

$$t^2 \doteq \frac{2}{p^3}, \quad 1 \doteq \frac{1}{p}, \quad e^{3t} \doteq \frac{1}{p-3}, \quad \cos(2t) \doteq \frac{p}{p^2+4},$$

preto po úprave dostávame

$$4t^2 - 2 + 7e^{3t} - \frac{\cos(2t)}{5} \doteq 4 \frac{2}{p^3} - 2 \frac{1}{p} + 7 \frac{1}{p-3} - \frac{1}{5} \frac{p}{p^2+4} = \frac{8}{p^3} - \frac{2}{p} + \frac{7}{p-3} - \frac{p}{5(p^2+4)}.$$

Príklad 5.2. Nájďme Laplaceov obraz $F(p)$ ku predmetu $f(t) = 8t e^{-t}$.

Riešenie: K súčinu $t e^{-t}$ vieme podľa základných viet nájsť obraz dvoma spôsobmi a to využitím vety o tlmení (3) alebo využitím vety o derivovaní obrazu (9).

1. Podľa tabuľky korešpondencií platí

$$t \doteq \frac{1}{p^2}.$$

Využitím vety o tlmení (3) (násobiť predmet $f(t)$ výrazom e^{at} , $a = -1$, znamená odčítať od argumentu p obrazu $F(p)$ konštantu a) môžeme zapísať

$$t e^{-t} \doteq \frac{1}{(p+1)^2}$$

a nakoniec využitím vety o lineárnosti (1) (násobiť predmet $f(t)$ konštantou $c = 8$ znamená násobiť obraz $F(p)$ rovnakou konštantou $c = 8$) dostávame

$$8t e^{-t} \doteq \frac{8}{(p+1)^2}.$$

2. Podľa tabuľky korešpondencií platí

$$e^{-t} \doteq \frac{1}{p+1}.$$

Využitím vety o derivovaní obrazu (9) (násobiť predmet $f(t)$ výrazom $-t$ znamená derivovať obraz $F(p)$) platí

$$-t e^{-t} \doteq \left(\frac{1}{p+1} \right)' = \frac{-1}{(p+1)^2}.$$

Nakoniec z vety o lineárnosti (1) (násobiť predmet $f(t)$ konštantou $c = -8$ znamená násobiť obraz $F(p)$ rovnakou konštantou $c = -8$) dostávame

$$8t e^{-t} \doteq \frac{8}{(p+1)^2}.$$

Čitateľ si môže vybrať jednoduchší postup.

Príklad 5.3. Nájďme Laplaceov obraz $F(p)$ ku predmetu $f(t) = t^2 \cos t$.

Riešenie: Podľa tabuľky korešpondencií platí

$$\cos t \doteq \frac{p}{p^2 + 1}.$$

Využitím vety o derivovaní obrazu (9) (násobiť predmet $f(t)$ výrazom $-t$ znamená derivovať obraz $F(p)$) môžeme zapísať

$$-t \cos t \doteq \left(\frac{p}{p^2 + 1} \right)' = \frac{1 - p^2}{(p^2 + 1)^2}.$$

Opätovným využitím vety o derivovaní obrazu (9) (násobiť predmet $f(t)$ výrazom $-t$ znamená derivovať obraz $F(p)$) dostaneme

$$t^2 \cos t = -t(-t \cos t) \doteq \left(\frac{1 - p^2}{(p^2 + 1)^2} \right)' = \frac{2p(p^2 - 3)}{(p^2 + 1)^3}.$$

Príklad 5.4. Nájďme Laplaceov obraz $F(p)$ ku predmetu $f(t) = \frac{\sin(2t)}{t}$.

Riešenie: Podľa tabuľky korešpondencií platí

$$\sin(2t) \doteq \frac{2}{p^2 + 4}.$$

Využitím vety o integrovaní obrazu (10) (deliť predmet $f(t)$ výrazom t znamená integrovať obraz $F(p)$ na intervale (p, ∞)) môžeme zapísať

$$\begin{aligned} \frac{\sin(2t)}{t} &\doteq \int_p^\infty \frac{2}{z^2 + 4} dz = 2 \lim_{a \rightarrow \infty} \int_p^a \frac{1}{z^2 + 4} dz = 2 \lim_{a \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{z}{2} \right]_p^a = \\ &= \lim_{a \rightarrow \infty} \left(\operatorname{arctg} \frac{a}{2} - \operatorname{arctg} \frac{p}{2} \right) = \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{p}{2}. \end{aligned}$$

Teda

$$\frac{\sin(2t)}{t} \doteq \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{p}{2}.$$

Príklad 5.5. Nájďme Laplaceov obraz $F(p)$ ku predmetu $f(t) = \int_0^t \tau^3 e^{-2\tau} d\tau$.

Riešenie: Podľa tabuľky korešpondencií platí

$$\tau^3 \doteq \frac{6}{p^4}.$$

Využitím vety o tlení (3) (násobiť predmet $f(t)$ výrazom e^{at} , $a = -2$, znamená odčítať od argumentu p obrazu $F(p)$ konštantu a) môžeme zapísať

$$\tau^3 e^{-2\tau} \doteq \frac{6}{(p + 2)^4}.$$

Nakoniec použijeme vetu o integrovaní predmetu (8) (integrovať predmet $f(t)$ na intervale $\langle 0, t \rangle$ znamená predeliť obraz $F(p)$ argumentom p) a dostaneme

$$\int_0^t \tau^3 e^{-2\tau} d\tau \doteq \frac{6}{p(p+2)^4}.$$

Príklad 5.6. *Nájdime Laplaceov obraz $F(p)$ ku predmetu $f(t) = (t-1) \cos(t-1) \eta(t-1)$.*

Riešenie: Na základe Príkladu 5.3 platí

$$t \cos t \doteq \frac{p^2 - 1}{(p^2 + 1)^2}.$$

Využitím vety o posunutí (5) (odčítať od argumentu t konštantu $\tau = 1$ v predmete $f(t)$ a takto vzniknutý výraz vynásobiť jednotkovou funkciou v tvare $\eta(t - \tau)$ znamená vynásobiť obraz $F(p)$ výrazom $e^{-\tau p}$) dostaneme

$$(t-1) \cos(t-1) \eta(t-1) \doteq \frac{p^2 - 1}{(p^2 + 1)^2} e^{-p}.$$

Príklad 5.7. *Nájdime Laplaceov obraz $F(p)$ ku predmetu $f(t) = e^{3t} t \cos t \cos(2t)$.*

Riešenie: Prvým krokom bude prepis súčiny $\cos t \cos(2t)$ pomocou vzorca

$$\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)],$$

teda

$$\cos t \cos(2t) = \cos(2t) \cos t = \frac{1}{2} [\cos t + \cos(3t)].$$

Preto

$$e^{3t} t \cos t \cos(2t) = \frac{1}{2} e^{3t} t \cos t + \frac{1}{2} e^{3t} t \cos(3t).$$

Na základe Príkladu 5.3 platí

$$t \cos t \doteq \frac{p^2 - 1}{(p^2 + 1)^2}$$

a podľa tabuľky korešpondencií

$$\cos(3t) \doteq \frac{p}{p^2 + 9}.$$

Využitím vety o derivovaní obrazu (9) (násobiť predmet $f(t)$ výrazom $-t$ znamená derivovať obraz $F(p)$) môžeme zapísať

$$-t \cos(3t) \doteq \left(\frac{p}{p^2 + 9} \right)' = \frac{9 - p^2}{(p^2 + 9)^2}.$$

Využitím vety o lineárnosti (1) (násobiť predmet $f(t)$ konštantou $c = -1$ znamená násobiť obraz $F(p)$ rovnakou konštantou $c = -1$) môžeme zapísať

$$t \cos(3t) \doteq \frac{p^2 - 9}{(p^2 + 9)^2}.$$

Nakoniec využitím vety o tlení (3) (násobiť predmet $f(t)$ výrazom e^{at} , $a = 3$, znamená odčítať od argumentu p obrazu $F(p)$ konštantu a) a následne využitím vety o lineárnosti (1) (násobiť predmet $f(t)$ konštantou $c = \frac{1}{2}$ znamená násobiť obraz $F(p)$ rovnakou konštantou $c = \frac{1}{2}$) dostaneme

$$\frac{1}{2} e^{3t} t \cos t \doteq \frac{1}{2} \frac{(p-3)^2 - 1}{[(p-3)^2 + 1]^2} \quad \text{a} \quad \frac{1}{2} e^{3t} t \cos(3t) \doteq \frac{1}{2} \frac{(p-3)^2 - 9}{[(p-3)^2 + 9]^2}.$$

Preto

$$e^{3t} t \cos t \cos(2t) \doteq \frac{1}{2} \frac{(p-3)^2 - 1}{[(p-3)^2 + 1]^2} + \frac{1}{2} \frac{(p-3)^2 - 9}{[(p-3)^2 + 9]^2}.$$

Neriešené úlohy:

V nasledujúcich úlohách nájdite Laplaceov obraz $F(p)$ ku predmetu $f(t)$:

- | | |
|--|--|
| 1. $f(t) = 4t^3 - 2t + 5e^{3t}$ | $F(p) = \frac{24}{p^4} - \frac{2}{p^2} + \frac{5}{p-3}$ |
| 2. $f(t) = 3t^2 - 7 + 3 \cos(2t) - 5 \sin(3t)$ | $F(p) = \frac{6}{p^3} - \frac{7}{p} + \frac{3p}{p^2 + 4} - \frac{15}{p^2 + 9}$ |
| 3. $f(t) = t^2 - 3t + 2 + \cos(2t)$ | $F(p) = \frac{2}{p^3} - \frac{3}{p^2} + \frac{2}{p} + \frac{p}{p^2 + 4}$ |
| 4. $f(t) = (t-1)(t-2) + \sin(4t)$ | $F(p) = \frac{2}{p^3} - \frac{3}{p^2} + \frac{2}{p} + \frac{4}{p^2 + 16}$ |
| 5. $f(t) = \cos^2(2t) - \sin^2(2t) - 3 \cos \frac{t}{2}$ | $F(p) = \frac{p}{p^2 + 16} - \frac{12p}{4p^2 + 1}$ |
| 6. $f(t) = 4 \cos^2 t + 2 \sin^2 t + 8 \sin(2t) - 5$ | $F(p) = -\frac{2}{p} + \frac{p+16}{p^2 + 4}$ |
| 7. $f(t) = 2 \sin^2 t + 2 \sin t \cos t - 1$ | $F(p) = \frac{2-p}{p^2 + 4}$ |
| 8. $f(t) = 2 \cos(2t) \cos(3t)$ | $F(p) = \frac{p}{p^2 + 25} + \frac{p}{p^2 + 1}$ |
| 9. $f(t) = \cos(5t) \sin(3t) - \sin^2(3t)$ | $F(p) = \frac{4}{p^2 + 64} - \frac{1}{p^2 + 4} - \frac{1}{2p} + \frac{p}{2p^2 + 72}$ |
| 10. $f(t) = \sin^3 t$ | $F(p) = \frac{6}{(p^2 + 9)(p^2 + 1)}$ |
| 11. $f(t) = (t^3 - 4)e^{-2t}$ | $F(p) = \frac{6}{(p+2)^4} - \frac{4}{p+2}$ |

- | | | |
|-----|---|---|
| 12. | $f(t) = \sin(2t) e^{3t} + \cos(2t) e^{-3t}$ | $F(p) = \frac{2}{(p-3)^2 + 4} + \frac{p+3}{(p+3)^2 + 4}$ |
| 13. | $f(t) = [\sin^2 t + \cos(5t) \cos(3t)] 2e^{2t}$ | $F(p) = \frac{1}{p-2} + \frac{p-2}{(p-2)^2 + 64}$ |
| 14. | $f(t) = t [\cos(2t) + \sin(3t)]$ | $F(p) = \frac{p^2 - 4}{(p^2 + 4)^2} + \frac{6p}{(p^2 + 9)^2}$ |
| 15. | $f(t) = (t+1) \sin(2t) + t^2 \sin t$ | $F(p) = \frac{2}{p^2 + 4} + \frac{4p}{(p^2 + 4)^2} + \frac{6p^2 - 2}{(p^2 + 1)^3}$ |
| 16. | $f(t) = t e^{2t} \sin(3t)$ | $F(p) = \frac{6(p-2)}{[(p-2)^2 + 9]^2}$ |
| 17. | $f(t) = \frac{e^{2t} - 1}{t}$ | $F(p) = \ln \frac{p}{p-2}$ |
| 18. | $f(t) = \frac{e^{2t} - e^{3t}}{t}$ | $F(p) = \ln \frac{p-3}{p-2}$ |
| 19. | $f(t) = \frac{\sin^2(2t)}{t}$ | $F(p) = \frac{1}{2} \ln \frac{\sqrt{p^2 + 16}}{p}$ |
| 20. | $f(t) = \frac{1 - e^{-3t}}{t e^t}$ | $F(p) = \ln \frac{p+4}{p+1}$ |
| 21. | $f(t) = \frac{\cos t - 1}{t e^t}$ | $F(p) = \ln \frac{p+1}{\sqrt{(p+1)^2 + 1}}$ |
| 22. | $f(t) = \frac{\sin(4t) \sin(2t)}{t}$ | $F(p) = \frac{1}{4} \ln \frac{p^2 + 36}{p^2 + 4}$ |
| 23. | $f(t) = \frac{\sin(5t) \cos(3t)}{t}$ | $F(p) = \frac{1}{2} \left(\pi - \operatorname{arctg} \frac{p}{8} - \operatorname{arctg} \frac{p}{2} \right)$ |
| 24. | $f(t) = \frac{e^{-2t} \sin t}{t}$ | $F(p) = \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} (p+2)$ |
| 25. | $f(t) = \frac{\sin^3 t}{t}$ | $F(p) = \frac{\pi}{4} - \frac{3}{4} \operatorname{arctg} p + \frac{1}{4} \operatorname{arctg} \frac{p}{3}$ |
| 26. | $f(t) = \frac{\sin(6t) \sin(3t)}{t e^{3t}}$ | $F(p) = \frac{1}{4} \ln \frac{(p+3)^2 + 81}{(p+3)^2 + 9}$ |
| 27. | $f(t) = \cos(t-1) \eta(t-1)$ | $F(p) = \frac{p e^{-p}}{p^2 + 1}$ |
| 28. | $f(t) = e^{t-2} \eta(t-2)$ | $F(p) = \frac{e^{-2p}}{p-1}$ |
| 29. | $f(t) = \int_0^t (\tau - \cos \frac{\tau}{2} + e^{-\tau} \tau^3) d\tau$ | $F(p) = \frac{1}{p^3} - \frac{4}{4p^2 + 1} + \frac{6}{p(p+1)^4}$ |
| 30. | $f(t) = \int_0^t (\tau+1) \cos(3\tau) d\tau$ | $F(p) = \frac{1}{p^2 + 9} + \frac{p^2 - 9}{p(p^2 + 9)^2}$ |

$$31. \quad f(t) = \int_0^t e^{-2\tau} e^{\tau-t} d\tau \qquad F(p) = \frac{1}{(p+2)(p+1)}$$

$$32. \quad f(t) = \int_0^t e^{2\tau} \sin(3\tau) d\tau \qquad F(p) = \frac{3}{p(p-2)^2 + 9p}$$

5.2 Spätná Laplaceova transformácia

Obrátený postup, teda ak ku známemu obrazu $F(p)$ priradíme korešpondujúci predmet $f(t)$, nazývame **spätná Laplaceova transformácia**. Pomocou nej môžeme nájsť riešenie niektorých diferenciálnych rovníc resp. systémov obyčajných diferenciálnych rovníc oveľa jednoduchšie a rýchlejšie. K danému obrazu spätná Laplaceova transformácia priradí predmet $f(t)$ v tvare

$$f(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{a-i\infty}^{a+i\infty} F(p) e^{pt} dp.$$

Ak funkcia $F(p)$ je analytická až na konečný počet singulárnych bodov $a_k \in C$, $k = 1, \dots, m$ a a_k sú póly funkcie $F(p)$, tak k danému obrazu $F(p)$ môžeme nájsť predmet $f(t)$:

1. pomocou rezíduí v póloch

$$f(t) = \begin{cases} \sum_k \operatorname{res} [F(p) e^{pt}]_{p=a_k} & \text{pre } t > 0, \\ 0 & \text{pre } t \leq 0, \end{cases}$$

2. rozkladom $F(p)$ na parciálne zlomky a následným použitím tabuľky korešpondencií základných funkcií a základných viet.

Príklad 5.8. Pomocou spätnej Laplaceovej transformácie nájdime predmet $f(t)$ k obrazu $F(p) = \frac{p-2}{p(p+4)}$.

Riešenie: Úlohu vyriešime pre porovnanie oboma spôsobmi.

1. Ak chceme nájsť predmet $f(t)$ pomocou rezíduí, musíme najprv nájsť póly funkcie $F(p) = \frac{p-2}{p(p+4)}$. Funkcia $F(p)$ má dva jednoduché póly ($k = 0$) a to $a_1 = 0$, $a_2 = -4$. Podľa Vety 4.2 rezíduá v týchto póloch sú nasledovné

$$\operatorname{res} [F(p) e^{pt}]_{p=a_1} = \operatorname{res} [F(p) e^{pt}]_{p=0} = \lim_{p \rightarrow 0} \left[(p-0) \frac{p-2}{p(p+4)} e^{pt} \right] = -\frac{1}{2} e^0 = -\frac{1}{2},$$

$$\operatorname{res} [F(p) e^{pt}]_{p=a_2} = \operatorname{res} [F(p) e^{pt}]_{p=-4} = \lim_{p \rightarrow -4} \left[(p+4) \frac{p-2}{p(p+4)} e^{pt} \right] = \frac{3}{2} e^{-4t}.$$

Teda

$$f(t) = \operatorname{res} [F(p) e^{pt}]_{p=0} + \operatorname{res} [F(p) e^{pt}]_{p=-4} = -\frac{1}{2} + \frac{3}{2} e^{-4t}.$$

2. Rozkladom $F(p)$ na parciálne zlomky dostaneme

$$F(p) = \frac{p-2}{p(p+4)} = \frac{-\frac{1}{2}}{p} + \frac{\frac{3}{2}}{p+4}.$$

Z tabuľky korešpondencií vyplýva

$$-\frac{1}{2} \frac{1}{p} \doteq -\frac{1}{2} 1 = -\frac{1}{2}, \quad \frac{3}{2} \frac{1}{p+4} \doteq \frac{3}{2} e^{-4t}.$$

Využitím vety o lineárnosti (1) (násobiť predmet $f(t)$ konštantou c znamená násobiť obraz $F(p)$ rovnakou konštantou c) dostávame

$$f(t) = -\frac{1}{2} + \frac{3}{2} e^{-4t}.$$

Príklad 5.9. Pomocou spätnej Laplaceovej transformácie nájdime predmet $f(t)$ ku obrazu

$$F(p) = \frac{p+3}{(p+1)^3}.$$

Riešenie: Úlohu vyriešime pomocou rezíduí. Funkcia $F(p)$ má práve jeden trojnásobný pól ($k=3$) a to $a=-1$. Podľa Vety 4.2 rezíduum v póle $a=-1$ je

$$\begin{aligned} \operatorname{res} [F(p) e^{pt}]_{p=a} &= \operatorname{res} [F(p) e^{pt}]_{p=-1} = \frac{1}{2!} \lim_{p \rightarrow -1} \left[(p+1)^3 \frac{p+3}{(p+1)^3} e^{pt} \right]'' = \\ &= \frac{1}{2} \lim_{p \rightarrow -1} [(p+3) e^{pt}]'' = \frac{1}{2} \lim_{p \rightarrow -1} [e^{pt} + (p+3) t e^{pt}]' = \\ &= \frac{1}{2} \lim_{p \rightarrow -1} [t e^{pt} + t e^{pt} + (p+3) t^2 e^{pt}] = \\ &= \frac{1}{2} (2t e^{-t} + 2t^2 e^{-t}) = t e^{-t} (1+t). \end{aligned}$$

Preto

$$f(t) = \operatorname{res} [F(p) e^{pt}]_{p=-1} = t e^{-t} (1+t).$$

Neriešené úlohy:

V nasledujúcich úlohách nájdite pomocou spätnej Laplaceovej transformácie predmet $f(t)$ ku obrazu $F(p)$:

$$33. \quad F(p) = \frac{2}{p(p-2)(p-3)}$$

$$f(t) = \frac{1}{3} - e^{2t} + \frac{2}{3} e^{3t}$$

34. $F(p) = \frac{4p^2 + 16p - 8}{p^3 - 4p}$ $f(t) = 2 - 3e^{-2t} + 5e^{2t}$
35. $F(p) = \frac{p^2 + p + 1}{p^3 + 6p^2 + 11p + 6}$ $f(t) = \frac{1}{2}e^{-t} - 3e^{-2t} + \frac{7}{2}e^{-3t}$
36. $F(p) = \frac{3p^2 - 10p + 4}{p^3 - p^2 - 4p + 4}$ $f(t) = e^t - e^{2t} + 3e^{-2t}$
37. $F(p) = \frac{1}{(p+3)(p+1)^2}$ $f(t) = \frac{2te^{-t} - e^{-t} + e^{-3t}}{4}$
38. $F(p) = \frac{1}{p(p-2)^2}$ $f(t) = \frac{1 - e^{2t} + 2te^{2t}}{4}$
39. $F(p) = \frac{p^2 - 2p + 2}{p^3 - 2p^2 + p}$ $f(t) = te^t - e^t + 2$
40. $F(p) = \frac{p}{(p+3)(p-1)^2}$ $f(t) = \frac{3}{16}e^t + \frac{1}{4}te^t - \frac{3}{16}e^{-3t}$
41. $F(p) = \frac{p^2}{p^3 + 5p^2 + 8p + 4}$ $f(t) = e^{-t} - 4te^{-2t}$
42. $F(p) = \frac{p^2 - 3p + 2}{p^3 + 2p^2 + p}$ $f(t) = 2 + 6te^{-t} - e^{-t}$
43. $F(p) = \frac{1}{(p+3)(p+1)^3}$ $f(t) = \frac{2t^2e^{-t} - 2te^{-t} + e^{-t} - e^{-3t}}{8}$
44. $F(p) = \frac{p+1}{p^2(p-1)(p+2)}$ $f(t) = -\frac{3}{4} - \frac{t}{2} + \frac{2}{3}e^t + \frac{1}{12}e^{-2t}$
45. $F(p) = \frac{p}{(p-1)^3}$ $f(t) = \frac{t^2e^t}{2} + te^t$
46. $F(p) = \frac{1}{p^2(p+1)^2}$ $f(t) = 2e^{-t} + te^{-t} + t - 2$
47. $F(p) = \frac{p^3 - 2p^2 + 4}{p^3(p-2)^2}$ $f(t) = \frac{1}{4} + t + \frac{t^2}{2} - \frac{e^{2t}}{4} + \frac{te^{2t}}{2}$
48. $F(p) = \frac{7p^2 - 2p + 5}{p^3 - p^2 + p - 1}$ $f(t) = 5e^t + 2\cos t$
49. $F(p) = \frac{1}{p(p^2 - 2p + 2)}$ $f(t) = \frac{1 - e^t \cos t + e^t \sin t}{2}$
50. $F(p) = \frac{4p + 3}{(p-1)(p^2 + 2p + 5)}$ $f(t) = \frac{7e^t - 7\cos(2t)e^{-t}}{8} + \frac{9\sin(2t)e^{-t}}{8}$
51. $F(p) = \frac{p}{(p-2)(p+1)(p^2+1)}$ $f(t) = \frac{2}{15}e^{2t} + \frac{1}{6}e^{-t} - \frac{1}{10}(3\cos t + \sin t)$
52. $F(p) = \frac{p^2 + 2p + 3}{p(p^2 + 2p + 5)}$ $f(t) = \frac{3 + 2e^{-t}\cos(2t) + e^{-t}\sin(2t)}{5}$
53. $F(p) = \frac{2p^3 + 2p^2 + 3p + 2}{p(p+1)(p^2+1)}$ $f(t) = 2 + \frac{e^{-t} - \cos t + \sin t}{2}$

$$\begin{array}{ll}
54. & F(p) = \frac{1}{(p-2)(p-3)(p^2+1)} & f(t) = -\frac{e^{2t}}{5} + \frac{e^{3t}}{10} + \frac{\cos t + \sin t}{10} \\
55. & F(p) = \frac{p^3 + p^2 + p + 1}{p^2(p^2 + 2p + 2)} & f(t) = \frac{t}{2} + e^{-t} \cos t - \frac{1}{2} e^{-t} \sin t \\
56. & F(p) = \frac{1}{(p^2 + 2p + 2)(p^2 + 2p + 5)} & f(t) = \frac{e^{-t} \sin t}{3} - \frac{e^{-t} \sin(2t)}{6} \\
57. & F(p) = \frac{-p^2}{(p+1)^2(p^2+1)} & f(t) = \frac{e^{-t} - t e^{-t} - \cos t}{2}
\end{array}$$

5.3 Riešenie diferenciálnych rovníc pomocou spätnej Laplaceovej transformácie

Spätňú Laplaceovu transformáciu môžeme využiť na zjednodušenie riešenia diferenciálnych rovníc vyšších rádov. Dôležité je, aby pre danú diferenciálnu rovnicu n -tého rádu bolo k dispozícii n podmienok. Pri tomto spôsobe vychádzame z predpokladu korešpondencie výrazu $x(t) \doteq X(p)$. Diferenciálnu rovnicu v závislosti na reálnej premennej t prevedieme pomocou Laplaceovej transformácie na tzv. operátorový tvar, na rovnicu v závislosti na komplexnej premennej p , a takto získanú rovnicu vyriešime. Takéto riešenie bude obrazom riešenia pôvodnej diferenciálnej rovnice a nájdeme ho obráteným postupom pomocou spätnej Laplaceovej transformácie. Postupujeme nasledovne:

1. Aplikáciou vety o derivovaní predmetu (7) a využitím daných podmienok diferenciálnej rovnice nájdeme obrazy k $x'(t)$, $x''(t)$, $x'''(t)$, \dots , $x^{(n)}(t)$.
2. Pomocou tabuľky korešpondencií a viet nájdeme obraz pravej strany diferenciálnej rovnice.
3. Porovnaním oboch strán dostaneme operátorovú rovnicu pre $X(p)$ a p , z ktorej vyjadríme $X(p)$ a pomocou spätnej Laplaceovej transformácie k nej nájdeme prislúchajúci predmet $x(t)$, ktorý je riešením pôvodnej diferenciálnej rovnice.

Príklad 5.10. Riešme diferenciálnu rovnicu $x''' - 3x' + 2x = 8t e^{-t}$, ak $x(0) = 0$, $x'(0) = 0$, $x''(0) = 1$.

Riešenie: Predpokladáme, že $x(t) \doteq X(p)$. Podľa vety o derivovaní predmetu (7) a využitím

daných podmienok platí

$$x'(t) \doteq p X(p) - x(0) = p X(p) - 0 = p X(p),$$

$$x''(t) \doteq p^2 X(p) - p x(0) - x'(0) = p^2 X(p) - p \cdot 0 - 0 = p^2 X(p),$$

$$x'''(t) \doteq p^3 X(p) - p^2 x(0) - p x'(0) - x''(0) = p^3 X(p) - p^2 \cdot 0 - p \cdot 0 - 1 = p^3 X(p) - 1.$$

Obrazom funkcie na pravej strane diferenciálnej rovnice je podľa Príkladu 5.2

$$8t e^{-t} \doteq \frac{8}{(p+1)^2}.$$

Využitím vzťahu $x(t) \doteq X(p)$ dostaneme operátorovú rovnicu

$$p^3 X(p) - 1 - 3p X(p) + 2 X(p) = \frac{8}{(p+1)^2}.$$

Z toho si vyjadríme

$$X(p) = \frac{9 + 2p + p^2}{(p+1)^2(p^3 - 3p + 2)} = \frac{p^2 + 2p + 9}{(p+1)^2(p-1)^2(p+2)}.$$

Riešenie diferenciálnej rovnice $x(t)$ môžeme nájsť pomocou rezíduí alebo rozkladom na parciálne zlomky. Rozložíme $X(p)$ na parciálne zlomky

$$X(p) = \frac{1}{p+2} - \frac{1}{p-1} + \frac{1}{(p-1)^2} + \frac{2}{(p+1)^2}.$$

Pomocou tabuľky korešpondencií platí

$$\frac{1}{p+2} \doteq e^{-2t}, \quad \frac{1}{p-1} \doteq e^t, \quad \frac{1}{p^2} \doteq t$$

a využitím vety o tlmení (3) (násobiť predmet $f(t)$ výrazom e^{at} znamená odčítať od argumentu p obrazu $F(p)$ konštantu a) dostávame

$$\frac{1}{(p-1)^2} \doteq t e^t, \quad \frac{2}{(p+1)^2} \doteq 2t e^{-t}.$$

Nakoniec využitím vety o lineárnosti (1) (násobiť predmet $f(t)$ konštantou c znamená násobiť obraz $F(p)$ rovnakou konštantou c) môžeme písať

$$x(t) = e^{-2t} - e^t + t e^t + 2t e^{-t}.$$

Neriešené úlohy:

V nasledujúcich úlohách použitím Laplaceovej transformácie nájdite riešenie $x(t)$ diferenciálnej rovnice:

58. $x'' - 5x' + 6x = 2$, $x(0) = 0$, $x'(0) = 0$ $x(t) = \frac{1}{3} - e^{2t} + \frac{2}{3}e^{3t}$
59. $x'' + 4x' + 3x = e^{-t}$, $x(0) = 0$, $x'(0) = 0$ $x(t) = \frac{2te^{-t} - e^{-t} + e^{-3t}}{4}$
60. $x'' - 2x' = e^{2t}$, $x(0) = 0$, $x'(0) = 0$ $x(t) = \frac{1 - e^{2t} + 2te^{2t}}{4}$
61. $x'' - x' = e^t$, $x(0) = 1$, $x'(0) = 0$ $x(t) = te^t - e^t + 2$
62. $x'' + 2x' - 3x = e^t$, $x(0) = 0$, $x'(0) = 1$ $x(t) = \frac{3}{16}e^t + \frac{1}{4}te^t - \frac{3}{16}e^{-3t}$
63. $x'' - 2x' + x = e^t$, $x(0) = 0$, $x'(0) = 1$ $x(t) = \frac{t^2e^t}{2} + te^t$
64. $x'' + 2x' + x = t$, $x(0) = 0$, $x'(0) = 0$ $x(t) = 2e^{-t} + te^{-t} + t - 2$
65. $x'' - 2x' + 2x = 1$, $x(0) = 0$, $x'(0) = 0$ $x(t) = \frac{1 - e^t \cos t + e^t \sin t}{2}$
66. $x'' - x' - 2x = \cos t$, $x(0) = 0$, $x'(0) = 0$ $x(t) = \frac{2}{15}e^{2t} + \frac{1}{6}e^{-t} - \frac{1}{10}(3 \cos t + \sin t)$
67. $x'' + 2x' + 5x = 3$, $x(0) = 1$, $x'(0) = 0$ $x(t) = \frac{3 + 2e^{-t} \cos(2t) + e^{-t} \sin(2t)}{5}$
68. $x'' + x' = \cos t$, $x(0) = 2$, $x'(0) = 0$ $x(t) = 2 + \frac{e^{-t} - \cos t + \sin t}{2}$
69. $x'' - 5x' + 6x = \sin t$, $x(0) = 0$, $x'(0) = 0$ $x(t) = -\frac{e^{2t}}{5} + \frac{e^{3t}}{10} + \frac{\cos t + \sin t}{10}$
70. $x'' + 2x' + x = \sin t$, $x(0) = 0$, $x'(0) = -1$ $x(t) = \frac{e^{-t} - te^{-t} - \cos t}{2}$

V nasledujúcich úlohách riešte diferenciálne rovnice iba v množine obrazov:

71. $x''' + 2x'' + x' = 2e^{-2t}$, $x(0) = 2$, $x'(0) = 1$, $x''(0) = 1$ $X(p) = \frac{2p^3 + 9p^2 + 15p + 12}{p(p+2)(p+1)^2}$
72. $x'' + x' = t \cos(2t)$, $x(0) = 0$, $x'(0) = 0$ $X(p) = \frac{p^2 - 4}{p(p+1)(p^2+4)^2}$
73. $x'' + 2x' + 2x = 2e^{-t} \sin t$, $x(0) = 1$, $x'(0) = 1$ $X(p) = \frac{p^3 + 5p^2 + 8p + 8}{(p^2 + 2p + 2)^2}$

Literatúra

- [1] *Berman, G. N.*, **Zbierka úloh z matematickej analýzy**, SVTL, Bratislava (1955).
- [2] *Demidovič, B. P.*, **Sbornik zadač po kursu matematičeskovo analiza**, Nauka, Moskva (1975).
- [3] *Džurina, J. – Grinčová, A. – Pirč, V.*, **Matematická analýza 2**, Košice (2005), ISBN 80-8073-413-5.
- [4] *Eliáš, J. – Horváth J. – Kajan, J.*, **Zbierka úloh z vyššej matematiky 3**, ALFA, Bratislava (1967), ISBN 63-003-71.
- [5] *Eliáš, J. – Horváth J. – Kajan, J.*, **Zbierka úloh z vyššej matematiky 4**, ALFA, Bratislava (1968), ISBN 63-026-70.
- [6] *Galajda, P. – Schröter, Š.*, **Funkcie komplexnej premnnej a operátorový počet**, ALFA, Bratislava (1991).
- [7] *Grinčová, A.*, **Matematika II a jej využitie v ekonómii**, FEI TUKE, Košice (2012), ISBN 978-80-553-0851-7.
- [8] *Greguš, M. – Švec, M. – Šeda, V.*, **Obyčajné diferenciálne rovnice**, ALFA, Bratislava (1985).
- [9] *Ivan, J.*, **Matematika II**, ALFA, Bratislava (1989).
- [10] *Jirásek, F. – Krieglstein, E. – Tichý, Z.*, **Sbírka řešených příkladů z matematiky**, SNTL/ALFA, Praha (1982).
- [11] *Kluvánek, I. – Mišík, L. – Švec, M.*, **Matematika II**, SVTL, Bratislava (1961).
- [12] *Kondáš, J. – Kudláč, M.*, **Zbierka riešených a neriešených úloh z matematickej analýzy II**, FEI TUKE, Košice (2005), ISBN 80-8073-428-3.
- [13] *Mišík, L.*, **Funkcionálna analýza** (1989).
- [14] *Pirč, V. – Haščák, A.*, **Matematická analýza II**, Elfa s.r.o. Košice (1999), ISBN 80-88964-06-7.
- [15] *Pták, P.*, **Calculus II**, ČVUT, Praha (1997), ISBN 80-01-01207-7.
- [16] *Rudin, W.*, **Principles of mathematical analysis**, McGraw Hill, New York (1976).

- [17] *Šoltés, V. – Švidroňová, E.*, **Zbierka úloh z vyššej matematiky II**, Edičné stredisko TU v Košiciach (1992).
- [18] *Knežo, D. – Kimáková, Z. – Andrejiová, M.*, **Matematika 2**, Edičné stredisko TU v Košiciach (2010), ISBN 978-80-553-0546-2.
- [19] *Walter, W.*, **Analysis 2. Berlin**, Springer – Verlag (1995).

Názov: MATEMATIKA III v príkladoch

Autori: Anna Grinčová, Jana Petrillová

Vydavateľ: Technická univerzita v Košiciach

Rok: 2022

Vydanie: prvé

Rozsah: 91 strán

ISBN

ISBN