

Diferenciální rovnice – základní pojmy. Rovnice se separovanými proměnnými.

Vyšší matematika, Inženýrská matematika

LDF MENDELU



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Podpořeno projektem Průřezová inovace studijních programů Lesnické a dřevařské fakulty MENDELU v Brně (LDF) s ohledem na disciplíny společného základu <http://akademie.ldf.mendelu.cz/cz> (reg. č. CZ.1.07/2.2.00/28.0021) za přispění finančních prostředků EU a státního rozpočtu České republiky.

Diferenciální rovnice je vztah mezi neznámou funkcí a jejími derivacemi. **Řádem diferenciální rovnice** rozumíme řád nejvyšší derivace neznámé funkce v dané rovnici.

Příklady diferenciálních rovnic:

- $xy' - y^3 = 0$ je diferenciální rovnice prvního řádu
- $yy'' - 3xy' = \sqrt{xy}$ je diferenciální rovnice druhého řádu
- $y''' - 4y' + 5y = x$ je diferenciální rovnice třetího řádu

Definice (DR prvního řádu)

Diferenciální rovnice prvního řádu rozřešená vzhledem k derivaci je rovnice tvaru

$$(DR) \quad y' = \varphi(x, y),$$

kde φ je funkce dvou proměnných.

Řešením rovnice (DR) na intervalu I rozumíme každou funkci $y = y(x)$, která rovnici na I splňuje.

- Zpravidla lze téměř všechna řešení rovnice (DR) vyjádřit pomocí jediného vzorce, který obsahuje nějakou konstantu c , tj. $y = y(x, c)$, případně $\phi(y, x, c) = 0$. Všechna tato řešení nazýváme **obecné řešení**. Obecné řešení může, ale nemusí obsahovat úplně všechna řešení.
- **Partikulárním řešením** rozumíme jednu konkrétní funkci, která rovnici splňuje. Volbou konkrétní konstanty v obecném řešení obdržíme jedno partikulární řešení.
- Graf libovolného partikulárního řešení se nazývá **integrální křivka**.

Diferenciální rovnici

$$y' = \varphi(x, y)$$

můžeme chápat jako předpis, který každému bodu $(x, y) \in D(\varphi)$ přiřadí směrnici tečny k integrální křivce, která tímto bodem prochází.

Pokud pro dostatečný počet bodů (x, y) nakreslíme krátké úsečky (tzv. **lineární elementy**) procházející těmito body a mající směrnici $\varphi(x, y)$ (jsou to tečny k integrálním křivkám), dostáváme tzv. **směrové pole**. Někdy je možné tímto způsobem odhadnout tvar integrálních křivek.

Příklad

Pomocí směrového pole odhadněte tvar integrálních křivek rovnice $y' = -\frac{x}{y}$.

Příklad

Pomocí směrového pole odhadněte tvar integrálních křivek rovnice $y' = -\frac{x}{y}$.

$$-\frac{x}{y} = c, \quad c \in \mathbb{R}, \quad y \neq 0 \implies y = -\frac{x}{c}$$

Konstanta c vyjadřuje směrnici tečny k integrální křivce (kreslíme jako krátkou úsečku – lineární element).

$$c = 0: \quad x = 0$$

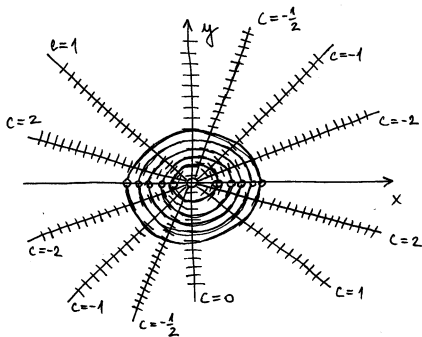
$$c = 1: \quad y = -x$$

$$c = 2: \quad y = -\frac{1}{2}x$$

$$c = -1: \quad y = x$$

$$c = -2: \quad y = \frac{1}{2}x$$

$$c = -\frac{1}{2}: \quad y = 2x$$



Integrální křivky jsou půlkružnice se středem v počátku.

Definice (Počáteční úloha)

Nechť $x_0, y_0 \in \mathbb{R}$. Úloha najít řešení rovnice (DR), které splňuje tzv. **počáteční podmínku**

$$y(x_0) = y_0,$$

se nazývá **počáteční úloha**. Jejím řešením je funkce, která splňuje počáteční podmínku a je na nějakém otevřeném intervalu obsahujícím bod x_0 řešením rovnice (DR).

- Řešení počáteční úlohy je partikulární řešení, jehož integrální křivka prochází bodem (x_0, y_0) .
- Má-li počáteční úloha jediné řešení, znamená to, že bodem (x_0, y_0) prochází jediná integrální křivka.
- Má-li každá počáteční úloha jediné řešení, znamená to, že integrální křivky se nikde neprotínají.

Diferenciální rovnice $y' = f(x)$

Rovnice

$$y' = f(x)$$

je nejjednodušším příkladem diferenciální rovnice. Tuto rovnici splňuje každá primitivní funkce k funkci f . Obecné řešení lze tedy vyjádřit vzorcem

$$y(x, c) = \int f(x) dx + c.$$

Příklad

Řešte diferenciální rovnici $y' = 2x$. Najděte všechna řešení a řešení počáteční úlohy a podmínkou $y(1) = 3$. Nakreslete integrální křivky.

Příklad

Řešte diferenciální rovnici $y' = 2x$. Najděte všechna řešení a řešení počáteční úlohy a podmínkou $y(1) = 3$. Nakreslete integrační křivky.

- Všechna řešení = obecné řešení:

$$y = x^2 + c, \quad c \in \mathbb{R}$$

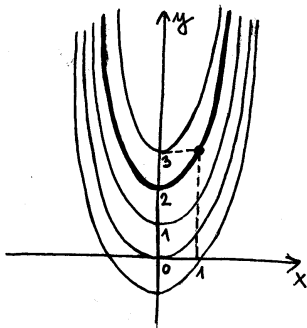
- Řešení počáteční úlohy:

podmínku $y(1) = 3$ dosadíme do obecného řešení a najdeme hodnotu konstanty, pro kterou je podmínka splněna:

$$3 = 1^2 + c \implies c = 2$$

$$y_p = x^2 + 2$$

- Integrační křivky:



Definice (DR se separovanými proměnnými)

Nechť f a g jsou funkce spojité na nějakých otevřených intervalech. Diferenciální rovnice

$$(S) \quad y' = f(x)g(y)$$

se nazývá **diferenciální rovnice se separovanými proměnnými**.

Použijeme-li označení derivace $y' = \frac{dy}{dx}$, můžeme rovnici (S) ekvivalentně vyjádřit ve tvaru

$$\frac{dy}{dx} = f(x)g(y).$$

Postup řešení rovnice $y' = f(x)g(y)$

- Najdeme řešení rovnice $g(y) = 0$. Tato řešení jsou konstantními řešeními rovnice (S).

Postup řešení rovnice $y' = f(x)g(y)$

- Najdeme řešení rovnice $g(y) = 0$. Tato řešení jsou konstantními řešeními rovnice (S).
- Dále předpokládáme, že $g(y) \neq 0$. Derivaci y' nahradíme podílem $\frac{dy}{dx}$

$$\frac{dy}{dx} = f(x)g(y)$$

a upravíme tak, aby na každé straně byla pouze jedna proměnná:

$$\frac{dy}{g(y)} = f(x) dx.$$

Postup řešení rovnice $y' = f(x)g(y)$

- Najdeme řešení rovnice $g(y) = 0$. Tato řešení jsou konstantními řešeními rovnice (S).
- Dále předpokládáme, že $g(y) \neq 0$. Derivaci y' nahradíme podílem $\frac{dy}{dx}$

$$\frac{dy}{dx} = f(x)g(y)$$

a upravíme tak, aby na každé straně byla pouze jedna proměnná:

$$\frac{dy}{g(y)} = f(x) dx.$$

- Získanou rovnost zintegrujeme

$$\int \frac{dy}{g(y)} = \int f(x) dx.$$

Postup řešení rovnice $y' = f(x)g(y)$

- Po zintegrování dostaneme rovnost

$$G(y) = F(x) + c,$$

kde G je primitivní funkce k funkci $\frac{1}{g}$ a F je primitivní funkce k funkci f .

Postup řešení rovnice $y' = f(x)g(y)$

- Po zintegrování dostaneme rovnost

$$G(y) = F(x) + c,$$

kde G je primitivní funkce k funkci $\frac{1}{g}$ a F je primitivní funkce k funkci f .

- Rovnicí $G(y) = F(x) + c$ je určeno obecné řešení (implicitní tvar). Pokud je to možné, vyjádříme z této rovnice y (tím dostaneme explicitní tvar obecného řešení).

Postup řešení rovnice $y' = f(x)g(y)$

- Po zintegrování dostaneme rovnost

$$G(y) = F(x) + c,$$

kde G je primitivní funkce k funkci $\frac{1}{g}$ a F je primitivní funkce k funkci f .

- Rovnicí $G(y) = F(x) + c$ je určeno obecné řešení (implicitní tvar). Pokud je to možné, vyjádříme z této rovnice y (tím dostaneme explicitní tvar obecného řešení).
- Je-li možné získat některé z konstantních řešení z obecného řešení vhodnou volbou konstanty c , pak toto řešení zahrneme do obecného.

Postup řešení rovnice $y' = f(x)g(y)$

- Po zintegrování dostaneme rovnost

$$G(y) = F(x) + c,$$

kde G je primitivní funkce k funkci $\frac{1}{g}$ a F je primitivní funkce k funkci f .

- Rovnicí $G(y) = F(x) + c$ je určeno obecné řešení (implicitní tvar). Pokud je to možné, vyjádříme z této rovnice y (tím dostaneme explicitní tvar obecného řešení).
- Je-li možné získat některé z konstantních řešení z obecného řešení vhodnou volbou konstanty c , pak toto řešení zahrneme do obecného.
- Je-li zadána počáteční podmínka, pak ji dosadíme do obecného řešení, odkud určíme konkrétní hodnotu konstanty c . Tuto hodnotu pak dosadíme zpět do obecného řešení a získáme tak partikulární řešení – řešení počáteční úlohy. Také zjistíme, zda počáteční podmínku případně nespĺňuje některé konstantní řešení, které v obecném řešení není zahrnuto.

Příklad

Řešte počáteční úlohu $y' = -\frac{x}{y}$, $y(0) = -1$.

Příklad

Řešte počáteční úlohu $y' = -\frac{x}{y}$, $y(0) = -1$.

$$f(x) = -x, g(y) = \frac{1}{y}, y \neq 0$$

- Nemá konstantní řešení, neboť $\frac{1}{y} \neq 0$.
- Nekonstantní řešení:
- Integrovní křivky: půlkružnice

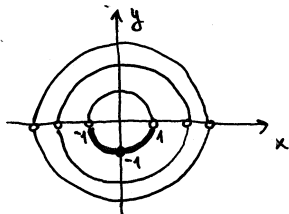
$$\begin{aligned}\frac{dy}{dx} &= -\frac{x}{y} \\ y \, dy &= -x \, dx \\ \frac{y^2}{2} &= -\frac{x^2}{2} + c\end{aligned}$$

$x^2 + y^2 = C$, $C > 0$ ($C = 2c$) ... implicitní tvar obecného řešení

$y = \pm\sqrt{C - x^2}$... explicitní tvar obecného řešení

- Dosazení počáteční podmínky:

$$0^2 + (-1)^2 = C \implies C = 1 \implies \boxed{y_p = -\sqrt{1 - x^2}}$$



Příklad

Najděte všechna řešení rovnici $y' = \frac{2y}{x}$.

Příklad

Najděte všechna řešení rovnici $y' = \frac{2y}{x}$.

$$f(x) = \frac{2}{x}, g(y) = y, x \neq 0$$

- Konstantní řešení: $y = 0$
- Nekonstantní řešení:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{2y}{x}$$
$$\frac{1}{y} dy = \frac{2}{x} dx$$

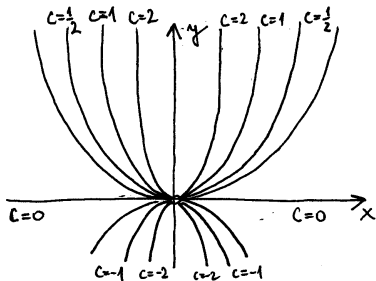
$$\ln |y| = \ln x^2 + c$$

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

$$|y| = x^2 e^c$$

$$y = Cx^2 \quad (C = \pm e^c \neq 0)$$

- Integrovní křivky:
dvě polopřímky a poloviny parabol
vycházející z počátku



Konstantní řešení lze pro $C = 0$ zahrnout do obecného vzorce.

⇒ obecné řešení: $y = Cx^2, C \in \mathbb{R}$.

Příklad

Najděte všechna řešení rovnice $y' = 2\sqrt{y-1}$.

Příklad

Najděte všechna řešení rovnice $y' = 2\sqrt{y-1}$.

$$f(x) = 1, g(y) = 2\sqrt{y-1}, y \geq 1$$

- Konstantní řešení: $y = 1$
- Nekonstantní řešení:

$$\frac{dy}{dx} = 2\sqrt{y-1}$$

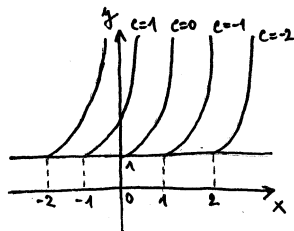
$$\frac{1}{2}(y-1)^{-\frac{1}{2}} dy = dx$$

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

$$y-1 = (x+c)^2, x > -c$$

$$y = (x+c)^2 + 1, x > -c$$

- Integrální křivky:
přímka a pravé poloviny
parabol



Konstantní řešení nelze zahrnout do obecného vzorce.

\implies obecné řešení: $y = (x+c)^2, x > -c, c \in \mathbb{R}$, další řešení: $y = 1$.

- Diferenciální rovnice typu $y' = f(x)$ a $y' = g(y)$ jsou speciální případy rovnic se separovanými proměnnými pro $g(y) = 1$, resp. $f(x) = 1$.
- Počáteční úloha pro rovnici se separovanými proměnnými nemusí mít vždy jediné řešení.

Řešení, které má jednoznačnost porušenou v každém bodě (tj. každým bodem jeho integrální křivky prochází jiná integrální křivka), se nazývá **singulární řešení**.

Singulárními řešeními rovnice se separovanými proměnnými $y' = f(x)g(y)$ mohou být pouze konstantní řešení, tj. řešení, která splňují rovnici $g(y) = 0$.

Například počáteční úloha $y' = 2\sqrt{y-1}$, $y(0) = 1$ má dvě řešení:

$$y_1 = 1,$$
$$y_2 = \begin{cases} 1 & \text{pro } x \leq 0 \\ x^2 & \text{pro } x > 0, \end{cases}$$

viz předchozí příklad. Funkce $y_1 = 1$ je singulární řešení rovnice.

Definice (Homogenní DR)

Nechť f je spojitá funkce. Diferenciální rovnice

$$(1) \quad y' = f\left(\frac{y}{x}\right)$$

se nazývá **homogenní diferenciální rovnice**.

Postup řešení rovnice $y' = f\left(\frac{y}{x}\right)$

- Zavedeme novou funkci u substitucí $u = \frac{y}{x}$.

Platí

$$y = ux \quad \text{a tedy} \quad y' = u'x + u.$$

Postup řešení rovnice $y' = f\left(\frac{y}{x}\right)$

- Zavedeme novou funkci u substitucí $u = \frac{y}{x}$.

Platí

$$y = ux \quad \text{a tedy} \quad y' = u'x + u.$$

- Po dosazení do rovnice dostaneme

$$\begin{aligned}u'x + u &= f(u) \\ u' &= \frac{f(u) - u}{x},\end{aligned}$$

což je rovnice se separovanými proměnnými. Tuto rovnici vyřešíme, tj. najdeme neznámou funkci u .

Postup řešení rovnice $y' = f\left(\frac{y}{x}\right)$

- Zavedeme novou funkci u substitucí $u = \frac{y}{x}$.

Platí

$$y = ux \quad \text{a tedy} \quad y' = u'x + u.$$

- Po dosazení do rovnice dostaneme

$$\begin{aligned}u'x + u &= f(u) \\ u' &= \frac{f(u) - u}{x},\end{aligned}$$

což je rovnice se separovanými proměnnými. Tuto rovnici vyřešíme, tj. najdeme neznámou funkci u .

- K nalezení řešení y původní homogenní rovnice použijeme opět substituci $u = \frac{y}{x}$ (dosadíme do vztahu pro u a pokud je to možné, tak vyjádříme y).

Příklad

Najděte všechna řešení rovnice $xy' = y \ln \frac{y}{x}$.

Příklad

Najděte všechna řešení rovnice $xy' = y \ln \frac{y}{x}$.

$$y' = \frac{y}{x} \ln \frac{y}{x}, \quad u = \frac{y}{x} \Rightarrow y = xu \Rightarrow y' = u + xu'$$

$$u + xu' = u \ln u$$

$$u' = \frac{u \ln u - u}{x} \quad \dots \text{rovnice se separovanými proměnnými}$$

- Konstantní řešení: $u(\ln u - 1) = 0 \Rightarrow \ln u = 1 \Rightarrow u = e$.
- Nekonstantní řešení:

$$\frac{du}{dx} = \frac{u(\ln u - 1)}{x}$$

$$\frac{du}{u(\ln u - 1)} = \frac{dx}{x}$$

$$\ln |\ln u - 1| = \ln |x| + c$$

$$|\ln u - 1| = |x|e^c$$

$$\ln u - 1 = Cx \quad (C = \pm e^c \neq 0)$$

$$u = e^{Cx+1}, C \in \mathbb{R} \text{ (pro } C = 0 \text{ konst. řeš.)} \Rightarrow y = xe^{Cx+1}, C \in \mathbb{R}$$

- Využití systémů Sage, Maxima, Wolfram Alpha:

<http://user.mendelu.cz/marik/akademie/>

- Matematické výpočty online (MAW) - diferenciální rovnice:

<http://um.mendelu.cz/maw-html/index.php?lang=cs&form=ode>

Příklad

Najděte všechna řešení diferenciální rovnice $y' = -\frac{x}{y}$ a řešení splňující počáteční podmínku $y(0) = -1$.

Řešení pomocí Wolfram Alpha (<http://www.wolframalpha.com/>):

- Všechna řešení:

`solve y'=-x/y`

- Řešení počáteční úlohy:

`solve y'=-x/y, y(0)=-1`