

Drsná matematika III – 6. týden

Diferenciální rovnice

Jan Slovák

Masarykova univerzita
Fakulta informatiky

26. – 30. 10. 2015

Obsah přednášky

- 1 Literatura
- 2 Modely založené na změnách
 - Lineární a nelineární modely
 - Tlumený oscilátor
- 3 ODR 1. řádu
 - Rovnice se separovanými proměnnými
 - Systémy ODR prvního řádu
 - Obecné věty

Kde je dobré číst?

- Zuzana Došlá, Roman Plch, Petr Sojka, Diferenciální počet funkcí více proměnných s programem Maple, MU Brno, 1999, 273 s.
- J. Slovák, M. Panák, M. Bulant, Matematika drsně a svižně, Muni Press, Brno 2013, v+773 s., elektronická edice www.math.muni.cz/Matematika_drsne_svizne
- Riley, K.F., Hobson, M.P., Bence, S.J. Mathematical Methods for Physics and Engineering, second edition, Cambridge University Press, Cambridge 2004, ISBN 0 521 89067 5, xxiii + 1232 pp.

Lineární model prvního řádu

Derivace pracuje s okamžitými změnami studovaných veličin. Ze stejných důvodů jsme kdysi zaváděli diference a právě vztahy mezi hodnotami veličin a změnami těch samých nebo jiných veličin vedly k rovnicím.

Nejjednodušším modelem bylo úročení vkladů nebo půjček a totéž pro tzv. Malthusiánský model populace. Přírůstek byl úměrný hodnotě.

V rámci spojitého modelování by stejný požadavek vedl na rovnici vztahující derivaci funkce $y'(x)$ s její hodnotou

$$y'(x) = r \cdot y(x)$$

s konstantou úměrnosti r . Je snadné uhodnout řešení této rovnosti

$$y(x) = C e^{rx}$$

s libovolnou konstantou C .

Tuto konstantu určíme jednoznačně volbou tzv. **počáteční hodnoty** $y_0 = y(x_0)$ v nějakém bodě x_0 .

Pokud je část růstu v našem modelu dána konstatním působením nezávislém na hodnotě y nebo x (např. paušální poplatky za vedení účtu nebo přirozený úbytek populace třeba v důsledku porážek na jatkách), přidáme na pravé straně konstantu s :

$$y'(x) = r \cdot y(x) + s.$$

Zjevně bude řešením této rovnice funkce

$$y(x) = C e^{rx} - \frac{s}{r}.$$

K tomuto závěru je velice lehké dojít, pokud si uvědomíme, že množinou všech řešení první (homogenní) rovnice je jednorozměrný vektorový prostor, zatímco řešení druhé (nehomogenní) rovnice se obdrží přičtením kteréhokoliv jednoho jejího řešení ke všem řešením předchozí rovnice. Lze pak snadno najít konstantní řešení $y(x) = k$ pro $k = -\frac{s}{r}$.

Nelineární model prvního řádu

U diferenčních rovnic jsme diskutovali tzv. logistický model populačního růstu založený na předpokladu, že poměr změny velikosti populace $p(n+1) - p(n)$ a její velikosti $p(n)$ je v afinní závislosti na samotné velikosti populace.

Nyní můžeme stejně zavést spojitý model pro populaci $p(t)$ závislou na čase t jako

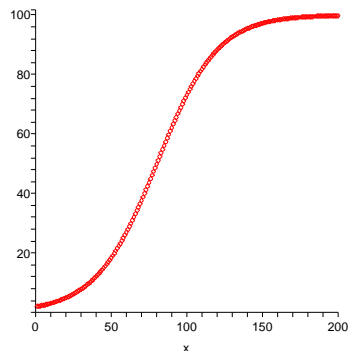
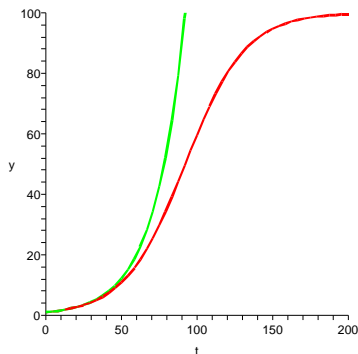
$$p'(t) = p(t) \left(-\frac{r}{K} p(t) + r \right),$$

tj. při hodnotě $p(t) = K$ pro velkou konstantu K je přírůstek nulový, zatímco pro $p(t)$ blízké nule je poměr rychlosti růstu populace k její velikosti blízký r (což je malé číslo v řádu setin vyjadřující rychlost růstu populace za dobrých podmínek.)

Derivováním ověříme, že následující funkce je řešením pro každou konstantu $C \in \mathbb{R}$

$$p(t) = \frac{K}{1 + CK e^{-rt}}.$$

Srovnání diskrétního a spojitého modelu



Srovnáním červeného grafu řešení s $K = 100$, $r = 0,05$ a $C = 1$ (volba C odpovídá $p(0) = 1$) s řešením diferenciální rovnice (napravo) vidíme, že skutečně oba přístupy k modelování populací dávají docela podobné výsledky. Pro srovnání je do levého obrázku zeleně vkresleno řešení Malthusiánského modelu s odpovídajícími daty.

Zkusme si popsat jednoduchý model pro pohyb nějakého tělesa upnutého k jednomu bodu silnou pružinou. Je-li $y(t)$ výchylka našeho tělesa od bodu $y_0 = y(0) = 0$, pak lze uvažovat, že zrychlení $y''(t)$ v čase t bude úměrné velikosti výchylky, avšak s opačným znaménkem. Dostáváme tedy tzv. rovnici oscilátoru

$$y''(t) = -y(t).$$

Tato rovnice odpovídá systému rovnic

$$x'(t) = -y(t), \quad y'(t) = x(t).$$

Řešením takového systému je

$$x(t) = R \cos(t - \tau), \quad y(t) = R \sin(t - \tau)$$

s libovolnou nezápornou konstantou R , která určuje maximální amplitudu, a konstantou τ , která určuje fázový posun.

Pro určení jednoznačného řešení potřebujeme proto znát nejen počáteční polohu y_0 , nýbrž také rychlost pohybu v tomto okamžiku. Těmito dvěma údaji bude určena jak amplituda tak fázový posun jednoznačně.

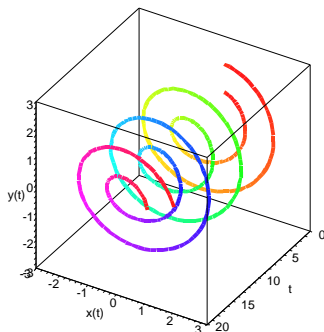
Předpokládejme, že vlivem vlastností materiálu pružiny bude také působit síla úměrná okamžité rychlosti pohybu našeho objektu, s opačným znaménkem než má amplituda.

To vyjádříme dodatečným členem s první derivací a naše rovnice je

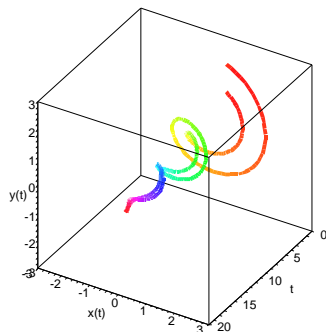
$$y''(t) = -y(t) - \alpha y'(t),$$

kde α je konstanta, která vyjadřuje velikost tlumení. Na obrázku jsou fázové diagramy pro řešení s dvěmi různými počátečními podmínkami. Nalevo je nulové tlumení, napravo je $\alpha = 0.3$

Tlumene oscilace



Tlumene oscilace



Samotné oscilace jsou vyjádřeny hodnotami na ose y , hodnoty x zobrazují rychlost pohybu.

Definition

Diferenciální rovnice prvního řádu je

$$F(y', y, x) = 0$$

s nějakou pevnou funkcí F , která každé trojici reálných čísel přiřadí jedno reálné číslo.

Zápis připomíná implicitně zadané funkce $y(x)$, nicméně navíc je tu závislost na derivaci hledané funkce y .

Obvykle pracujeme s rovnicemi, které jsou vyřešeny vzhledem k derivaci, tj.

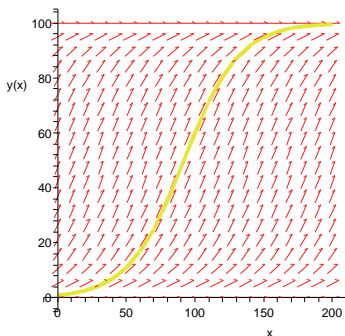
$$y' = f(x, y),$$

dále se omezíme jen na tento případ.

Všimněme si také konvence, že z kontextu víme, která je nezávislá proměnná pro funkci y .

Taková rovnice zadává pro každou hodnotu (x, y) v rovině vektor $(1, f(x, y))$, tj. rychlost se kterou nám rovnice grafu řešení prikazuje pohybovat se rovinou. Např. pro logistický model

$$p' = p \left(-\frac{r}{K}p + r \right)$$



Intuitivně lze na základě takových obrázků očekávat, že pro každou počáteční podmínku bude existovat právě jedno řešení naší rovnice.

Užitečným typem rovnic, pro který známe elementární postup k řešení jsou tzv. *rovnice se separovanými proměnnými*:

$$y'(x) = f(x) \cdot g(y(x))$$

pro dvě dostatečně hladké funkce jedné reálné proměnné f a g . Obecné řešení tu lze získat integrací, tj. nalezením primitivních funkcí

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

Pak totiž spočtením funkce $y(x)$ z implicitně zadaného vztahu $F(x) + C = G(y)$ s libovolnou konstantou C vede k řešení.

Skutečně, derivováním této rovnosti (s použitím pravidla pro derivování složené funkce $G(y(x))$) dostaneme skutečně

$$\frac{1}{g(y)} \cdot y'(x) = f(x).$$

Příklad rovnice

Najdeme řešení rovnice

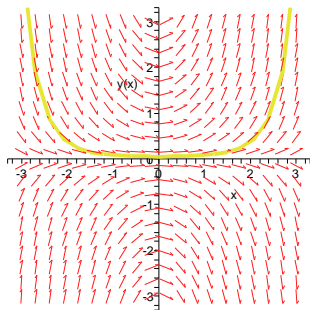
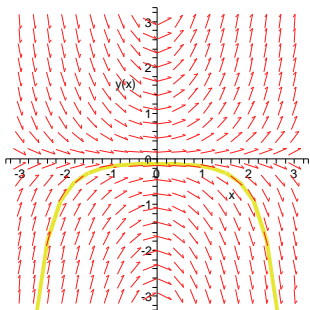
$$y'(x) = x \cdot y(x).$$

Přímým výpočtem dostaneme $\ln |y(x)| = \frac{1}{2}x^2 + C$. Odtud to vypadá (alespoň pro kladná y) na

$$y(x) = e^{\frac{1}{2}x^2 + C} = D \cdot e^{\frac{1}{2}x^2},$$

kde D je nyní libovolná kladná konstanta.

Ve skutečnosti dostaneme všechna řešení, když uvážíme všechna reálná D

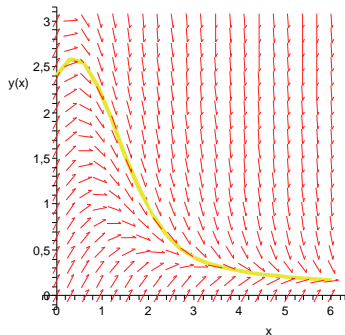
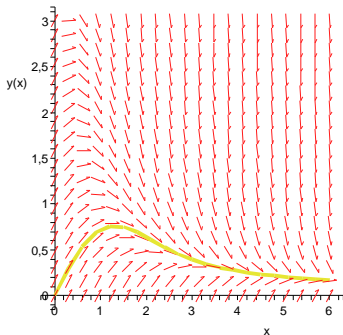


Na obrázku jsou vynesena dvě řešení, která ukazují na nestabilitu rovnice vůči počátečním podmínkám: Jestliže pro libovolné x_0 volíme y_0 blízké nule, pak se nám dramaticky mění chování výsledného řešení. Navíc si povšimněme konstantního řešení $y(x) = 0$, které odpovídá počáteční podmínce $y(x_0) = 0$.

Jestliže lehce pozměníme rovnici na

$$y'(x) = 1 - x \cdot y(x),$$

narazíme naopak na stabilní chování viditelné na následujícím obrázku. Tuto rovnici už ale neumíme řešit pomocí separace proměnných.



Zato umíme stejným postupem řešit logistický model populace.

Obecná lineární rovnice první řádu

Jde o rovnici tvaru $y' = a(t)y + b(t)$ se spojitými koeficienty $a(t)$ a $b(t)$.

V případě $b(t) = 0$ snadno najdeme řešení $y(t) = y_0 F(t, t_0)$, kde

$$F(t, s) = e^{\int_s^t a(x) dx}$$

Obecné řešení s počáteční podmínkou $y(t_0) = y_0$ je pak

$$y(t) = y_0 F(t, t_0) + \int_{t_0}^t F(t, s) b(s) ds.$$

Vzpomeňte podobnost s obecnou lineární diferencí rovnicí prvního řádu.

Tranformace souřadnic

homogenní rovnice $y' = f\left(\frac{y}{t}\right)$ převedeme transformací $z = \frac{y}{t}$ pro $t \neq 0$ na

$$z' = \frac{1}{t}(f(z) - z).$$

rovnice **Bernoulliho typu** $y' = f(t)y + g(t)y^r$, kde $r \neq 0, 1$, jsou transformací $z = y^{1-r}$ převedeny na obecnou lineární rovnici.

Existence i jednoznačnost řešení skutečně platí pro všechny rozumné funkce f , my si výsledek sformulujeme pro dosti velkou třídu rovnic takto:

Theorem (O existenci a jednoznačnosti řešení ODR)

Nechť funkce $f(x, y) : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ má spojitě parciální derivace. Pak pro každý bod $(x_0, y_0) \in \mathbb{R}^2$ existuje maximální interval $[x_0 - a, x_0 + b]$, kde $a, b \in \mathbb{R}$ jsou kladná čísla, a právě jedna funkce $y(x) : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, která je řešením rovnice

$$y' = f(x, y)$$

a splňuje $y(x_0) = y_0$.

Náznak důkazu

Funkce $y(x)$ je řešením naší rovnice tehdy a jen tehdy, když

$$y(x) = y_0 + \int_{x_0}^x y'(x) dx = y_0 + \int_{x_0}^x f(x, y(x)) dx.$$

Pravá strana tohoto výrazu je ovšem, až na konstantu, integrální operátor

$$L(y)(x) = y_0 + \int_{x_0}^x f(x, y(x)) dx$$

a při řešení diferenciální rovnice hledáme pevný bod pro tento operátor L , tj. chceme najít funkci $y = y(x)$ s $L(y) = y$.

Důkaz spočívá v odhadu, že pro dostatečně malý interval kolem x_0 bude takový operátor zmenšovat vzdálenost funkcí. Z obecné věty o kontrakci pak vyplývá hledané tvrzení.

Na řešení rovnice $y'(x) = f(x, y)$ lze také pohlížet jako na hledání (parametrizované) křivky $(x(t), y(t))$ v rovině, kde jsme již předem pevně zvolili parametrizaci proměnné $x(t) = t$. Takto můžeme nejen zapomenout na tuto pevnou volbu pro jednu proměnnou x , nýbrž hlavně přibrat libovolný počet proměnných.

Například v rovině můžeme psát takový systém ve tvaru

$$x'(t) = f(t, x(t), y(t)), \quad y'(t) = g(t, x(t), y(t))$$

se dvěma funkcemi $f, g : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$ se spojitými derivacemi. Obdobně pro více proměnných.

Jednoduchým příkladem v rovině může sloužit systém rovnic

$$x'(t) = -y(t), \quad y'(t) = x(t).$$

Snadno lze uhádnout (nebo aspoň ověřit), že řešením takového systému je

$$x(t) = R \cos t, \quad y(t) = R \sin t$$

s libovolnou nezápornou konstantou R a křivky řešení budou právě parametrizované kružnice o poloměru R .

Na takové systémy umíme přímo rozšířit platnost věty o jednoznačnosti a řešení:

Theorem (O existenci a jednoznačnosti řešení systémů ODR)

Nechť funkce $f_i(t, x_1, \dots, x_n) : \mathbb{R}^{n+1} \rightarrow \mathbb{R}$, $i = 1, \dots, n$ všechny mají spojité partiální derivace. Pak pro každý bod $(t_0, z_1, \dots, z_n) \in \mathbb{R}^2$ existuje interval $[t_0 - a, t_0 + a]$, s $a \in \mathbb{R}$ kladným, a právě jedna funkce $y(t) : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$, která je řešením systému rovnic

$$x_1'(t) = f_1(t, x_1(t), \dots, x_n(t)), \dots, x_n'(t) = f_n(t, x_1(t), \dots, x_n(t))$$

s počáteční podmínkou

$$x_1(t_0) = z_1, \dots, x_n(t_0) = z_n.$$

Navíc je i závislost řešení na počátečních podmínkách a případných dalších parametrech diferencovatelná.

Ve skutečnosti je možné se omezit na tzv. **autonomní systémy rovnic**, tj. ty kde pravá strana není explicitně závislá na čase t .

Obecný případ ve větě se z nich dostane stejným způsobem, jako jsme pracovali v rovině s jednou rovnicí $y'(x) = f(x, y)$.

Stejně tak je možné všechny dodatečné parametry λ zahrnout mezi proměnné, jestliže požadujeme (vektorovou) rovnost $\lambda' = 0$.

Dříve diskutovaný systém dvou autonomních rovnic, jehož řešení jsou parametrizované kružnice je dobrým příkladem.

Samotný systém rovnic (a každý obecný také) si pak můžeme představit jako „pole vektorů“ v rovině, prostoru atd., které udává „tok prostředí“. Řešením je pak křivka, která odpovídá skutečnému toku jedné „částičky“ tohoto prostředí.

Model „Lotka – Voltera“ pro dravce a kořist

Jako o něco složitější příklad si uveďme klasický populační model „dravec – kořist“, který zavedli ve dvacátých letech minulého století pánové Lotka a Volterra.

Označíme $x(t)$ vývoj počtu jedinců v populaci kořisti a $y(t)$ totéž pro dravce. Přepokládáme, že přírůstek kořisti by se řídil Malthusiánským modelem (tj. exponenciální růst), kdyby nebyli loveni. U dravce naopak očekáváme, že by bez kořisti pouze přirozeně vymíral (tj. exponenciální pokles stavů). Přitom ale ještě musíme uvážit interakci dravce s kořistí, kterou očekáváme přímo úměrnou počtu obou. Dostáváme tak tzv. Lotka–Volterra model

$$\begin{aligned}x'(t) &= \alpha x(t) - \beta y(t)x(t) \\y'(t) &= -\gamma y(t) + \delta x(t)y(t)\end{aligned}$$

Stabilita řešení

Theorem

Nechť $x(t)$ a $y(t)$ jsou dvě pevně zvolená řešení

$$x'(t) = f(t, x(t)), \quad y'(t) = g(t, y(t))$$

systemů rovnic, zadaná počátečními podmínkami $x(t_0) = x_0$ a $y(t_0) = y_0$. Potom

$$|x(t) - y(t)| \leq |x_0 - y_0| e^{C|t-t_0|} + \frac{B}{C} (e^{C|t-t_0|} - 1),$$

kde

$$C = \sup_{x \neq y; (t,x), (t,y) \in U} \frac{|f(t, x) - f(t, y)|}{|x - y|}$$

$$B = \sup_{(t,x) \in U} |f(t, x) - g(t, x)|$$

Diferencovatelnost řešení dle parametrů

Theorem

Uvažme otevřenou podmnožinu $U \subset \mathbb{R}^{n+k}$ a zobrazení $f : U \rightarrow \mathbb{R}^n$ se spojitými prvními derivacemi. Pak systém diferenciálních rovnic závislý na parametru $\lambda \in \mathbb{R}^k$ s počáteční podmínkou v bodě $x \in U$

$$y'(t) = f(y(t), \lambda), \quad y(0) = x$$

má jednoznačně určené řešení $y(t, x, \lambda)$, které je zobrazením se spojitými prvními derivacemi ve všech proměnných.

Věta souvisí s definicí řešení systému autonomních rovnic s tzv. toky vektorových polí.