

Obyčejné diferenciální rovnice (NMMA336)

Petr Velička *

přednášející: doc. RNDr. Tomáš Bárta, Ph.D. †

LS 2024/25

*petrvel@matfyz.cz

†bart@karlin.mff.cuni.cz

1 Lokální existence řešení

Diferenciální rovnice nás doprovází v každé oblasti lidského života. Neexistuje obecná teorie, která by nám umožnila vyřešit všechny diferenciální rovnice najednou. Musíme se proto omezit jen na část rovnic.

Úmluva 1.1. V této přednášce budeme studovat systém rovnic

$$x' = f(x, t) \quad (1)$$

za trvalého předpokladu $\Omega \in \mathbb{R}^{n+1}$ otevřená, $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$ spojitá.

Definice 1.2. Buď I otevřený interval. Funkci $x(t) : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ nazveme *řešením* diferenciální rovnice (1) v Ω , jestliže pro všechna $t \in I$ platí

- (i) $(x(t), t) \in \Omega$,
- (ii) existuje vlastní $x'(t)$,
- (iii) $x'(t) = f(x(t), t)$.

Takto definované řešení je nutně spojitě a má spojitou derivaci (je třídy C^1), tzv. klasické řešení. Dále si poznamenejme, že platí tzv. princip nalepování: Pokud máme $x(t)$ řešení na (a, t_0) a na (t_0, b) , pak už je řešením na celém (a, b) . To plyne z toho, že $x'_-(t_0) = \lim_{t \rightarrow t_0^-} x'(t) = \lim_{t \rightarrow t_0^-} f(x(t), t) = f(x(t_0), t_0)$, přičemž tatáž rovnost platí i pro derivaci zprava.

Lemma 1.3. *Nechť I je otevřený interval, $x(t) : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ spojitá splňující $(x(t), t) \in \Omega$ pro každé $t \in I$ a nechť $t_0 \in I$. Potom je ekvivalentní*

- (i) x je řešení (1) splňující $x(t_0) = x_0$,
- (ii) pro každé $t \in I$ platí $x(t) = x_0 + \int_{t_0}^t f(x(s), s) ds$.

Důkaz. Víme, že platí $x'(s) = f(x(s), s)$ pro všechna $s \in I$, což je spojitá funkce, kterou můžeme zintegrovat na $[t_0, t]$. Potom z Newtonova-Leibnizova vzorce máme $x(t) - x(t_0) = \int_{t_0}^t x'(s) ds = \int_{t_0}^t f(x(s), s) ds$. Tedy $x(t) = x_0 + \int_{t_0}^t f(x(s), s) ds$.

Pro důkaz opačné strany si uvědomíme, že pro každé $t \in I$ je pravá strana diferencovatelná, tedy $x'(t) = f(x(t), t)$ a po dosazení $t = t_0$ dostáváme $x(t_0) = x_0$. \square

Teď si zadefinujeme několik pojmů, které charakterizují množiny funkcí, které se chovají jistým způsobem podobně nebo stejně.

Definice 1.4. Řekneme, že funkce množiny $M \subset C(K, \mathbb{R}^n)$ jsou

1. *stejně spojitě*, jestliže pro každé $x \in K$ a každé $\varepsilon > 0$ existuje $\delta > 0$ takové, že $\|f(x) - f(y)\| < \varepsilon$ pro všechna $y \in (x - \delta, x + \delta)$ a všechny $f \in M$.

2. *stejně omezené*, jestliže existuje $C > 0$ takové, že $\|f\| \leq C$ pro všechna $f \in M$.

Věta 1.5 (Arzela-Ascoli). *Nechť funkce $x_n(t)$ jsou stejně omezené a stejně spojitě na $[0, T]$. Potom z nich lze vybrat stejnoměrně konvergující posloupnost. (bez důkazu)*

Následující věta nám říká, že na nějakém okolí libovolného bodu existuje řešení zkoumané diferenciální rovnice.

Věta 1.6 (Peano). *Nechť $(x_0, t_0) \in \Omega$. Pak existuje $\delta > 0$ a funkce $x(t) : (t_0 - \delta, t_0 + \delta) \rightarrow \mathbb{R}^n$, která je řešením (1) a splňuje $x(t_0) = x_0$.*

K důkazu této věty budeme potřebovat pomocné lemma:

Lemma 1.7. *Pokud $\Omega = \mathbb{R}^{n+1}$ a f je omezená na Ω , pak pro každé $T > 0$ existuje řešení (1) na $(t_0 - T, t_0 + T)$ splňující $x(t_0) = x_0$.*

Důkaz. Řešme “porušenou” úlohu $P_\lambda: x(t) = x_0 + \int_{t_0}^t f(x(s - \lambda), s) ds$ pro $t > t_0$ a $x(t) = x_0$ pro $t \in [t_0 - \lambda, t_0]$. Na $I_1 := (t_0, t_0 + \lambda]$ definujeme $x(t) = x_0 + \int_{t_0}^t f(x(s - \lambda), s) ds$. Na $I_2 := (t_0 + \lambda, t_0 + 2\lambda]$ definujeme $x(t)$ obdobně a indukci pokračujeme dokud $t_0 + k\lambda$ nebude větší než T . Tímto je “porušená” úloha vyřešena na $[t_0 - \lambda, t_0 + T]$.

Položme $\lambda = \frac{1}{n}$ pro $n = 1, 2, \dots$. Pišme dále jen x_n namísto $x_{1/n}$, tedy řešení úloh $P_{\frac{1}{n}}$ tvoří posloupnost funkcí. Ukážeme, že jsou stejně spojitě a stejně omezené. Stejná omezenost plyne z toho, že $\|x_n(t)\| = \|x_0 + \int_{t_0}^t f(x(s - \frac{1}{n}), s) ds\| \leq \|x_0\| + \int_{t_0}^t \|f(x(s - \frac{1}{n}), s)\| ds$. Ale funkce f je omezená, tedy máme $\|x_n(t)\| \leq \|x_0\| + (T - t_0) \cdot K$, kde K je příslušná konstanta omezenosti f . Stejnou spojitost máme z odhadu $\|x_n(t) - x_n(r)\| = \|\int_r^t f(x(s - \frac{1}{n}), s) ds\| \leq |t - r| \cdot K$. V poslední nerovnosti jsme odhadli integrál součinem délky intervalu a konstantou omezenosti funkce f . Stačí položit $\delta = \frac{\varepsilon}{K}$, potom $\|x_n(t) - x_r(t)\| < \delta K = \varepsilon$.

Tedy dle Věty 1.5 můžeme z posloupnosti x_n vybrat stejnoměrně konvergentní podposloupnost x_{n_k} . Zbývá dokázat, že její limita řeší naši rovnici.

konec 1. přednášky (21.2.2025)

Zřejmě pro $k \rightarrow \infty$ platí $x_{n_k} \rightarrow x(t)$ a pokud $\int_{t_0}^t f(x_{n_k}(s - \frac{1}{n_k}), s) ds$ konverguje k $\int_{t_0}^t f(x(s - \frac{1}{n}), s) ds$, máme hotovo. Tato vlastnost plyne z toho, že $\|\int_{t_0}^t f(x_{n_k}(s - \frac{1}{n_k}), s) - f(x(s), s) ds\| \leq \int_{t_0}^t \|f(x_{n_k}(s - \frac{1}{n_k}), s) - f(x(s - \frac{1}{n_k}), s)\| + \|f(x(s - \frac{1}{n_k}), s) - f(x(s), s)\| ds$.

Jelikož f je spojitá, musí být stejnoměrně spojitá na kompaktní množině $[t_0, t_0 + T] \times \overline{B(0, r) \cap \Omega}$, jinými slovy platí, že pro $\varepsilon > 0$ existuje δ takové, že pro každé dva body x, y takové, že $\|x - y\| < \delta$ máme, že $f(x, s) - f(y, \hat{s}) < \varepsilon$.

Ze stejnoměrné konvergence x_{n_k} máme, že pro $\delta > 0$ existuje k_0 takové, že pro všechna $k \geq k_0$ platí $\|x_{n_k}(s - \frac{1}{n_k}) - x(s - \frac{1}{n_k})\| < \delta$.

Jelikož x je spojitá, na kompaktním intervalu $[t_0, t_0 + T]$ je také stejnoměrně spojitá. Potom pro $\delta > 0$ existuje k_1 takové, že pro všechna $k \geq k_1$ platí $\|x(s - \frac{1}{n_k}) - x(s)\| < \delta$.

Potom pro všechna $k \geq \max\{k_0, k_1\}$ platí, že náš integrál je menší nebo roven $\int_{t_0}^t \varepsilon + \varepsilon ds \leq T \cdot 2\varepsilon$, tedy jsme opravdu našli požadované řešení.

Existence řešení na $[t_0 - T, t_0]$ se ukáže podobně. \square

Důkaz Věty 1.6. Uvažujme dvě koule kolem bodu (x_0, t_0) takové, že $K_1 \subset K_2 \subset$

$$\Omega. \text{ Definujeme } \tilde{f}(x, t) = \begin{cases} f(x, t) & \text{v } K_1, \\ \text{spojitě v } K_2 \setminus K_1 & \\ 0, & (x, t) \in \mathbb{R}^{n+1} \setminus K_2 \end{cases}.$$

Z Lemmatu 1.7 máme, že rovnice $x' = \tilde{f}(x, t)$ má řešení x splňující počáteční podmínku $x(t_0) = x_0$. Nazveme toto řešení \tilde{x} . Potom ze spojitosti \tilde{x} . Tedy existuje $\delta > 0$ takové, že graf \tilde{x} na $(t_0 - \delta, t_0 + \delta)$ leží v K_1 . Restrikce \tilde{x} na tento interval nám tedy dává řešení původní rovnice. \square

2 Jednoznačnost řešení

V této kapitole se budeme věnovat otázce jednoznačnosti řešení diferenciálních rovnic. V praxi to často požadujeme, například proto, aby nějaká simulace byla deterministická.

Definice 2.1. Řekneme, že rovnice (1) má v Ω vlastnost *globální jednoznačnosti*, jestliže pro libovolná řešení $(x, I), (y, J)$ splňující $x(t_0) = y(t_0)$ pro nějaké $t_0 \in I \cup J$, potom $x(t) = y(t)$ pro všechna $t \in I \cup J$. Řekneme, že rovnice (1) má v Ω vlastnost *lokální jednoznačnosti*, jestliže pro libovolná řešení $(x, I), (y, J)$ splňující $x(t_0) = y(t_0)$ pro nějaké $t_0 \in I \cup J$, potom existuje δ takové, že $x(t) = y(t)$ pro všechna $t \in (t_0 - \delta, t_0 + \delta)$.

Věta 2.2. *Rovnice (1) má v Ω vlastnost globální jednoznačnosti právě tehdy, když má vlastnost lokální jednoznačnosti.*

Důkaz. Implikace směrem doprava je triviální (funkce, které se rovnají na celé množině se nutně musí rovnat i na nějakém okolí zkoumaného bodu).

Pro důkaz opačné implikace necht' máme dvě řešení $(x, I), (y, J)$ splňující $x(t_0) = y(t_0) = x_0$ pro nějaké $t_0 \in I \cap J$. Bez újmy na obecnosti necht' $I \cup J = (a, b)$. Položme $M = \{t : x(t) = y(t)\}$. Tato množina je díky předpokladu neprázdná, necht' $c := \sup M$.

Pro spor předpokládejme, že $c < b$. Potom platí $x(c) = \lim_{t \rightarrow c^-} x(t) = \lim_{t \rightarrow c^-} y(t)$, což se díky spojitosti y rovná $y(c)$. Tedy c je maximum M . Ale díky lokální jednoznačnosti existuje okolí $(c, x(c))$, na kterém platí $x = y$. Tedy $x(c + \delta) = y(c + \delta)$ pro nějaké $\delta > 0$, což je spor s tím, že $c = \sup M$. \square

Definice 2.3. Funkce f se nazývá *lokálně lipschitzovská vzhledem k x v Ω* , jestliže pro každé $(x_0, t_0) \in \Omega$ existují L a $\delta > 0$ takové, že

$$|f(x, t) - f(y, t)| \leq L|x - y|$$

pro všechna $(x, t), (y, t) \in U(x_0, \delta) \times (t_0 - \delta, t_0 + \delta)$.

Věta 2.4. *Necht' f je lokálně lipschitzovská vzhledem k x v Ω . Potom rovnice (1) má v Ω vlastnost lokální jednoznačnosti.*

Důkaz. Volme $(x_0, t_0) \in \Omega$ a dvě řešení $(x, I), (y, J)$ taková, že $y(t_0) = x(t_0) = x_0$. Vezmeme $\delta_1 > 0$ tak, aby f byla lipschitzovská na δ_1 -okolí (x_0, t_0) . Necht' $\delta \leq \frac{1}{2L}$ je takové, že navíc $\delta < \delta_1$ a t takové, aby $(x(t), t), (y(t), t) \in U(x_0, \delta) \times (t_0 - \delta, t_0 + \delta)$. Potom platí

$$\|x(t) - y(t)\| = \left\| x_0 + \int_{t_0}^t f(x(s), s) ds - \left(x_0 + \int_{t_0}^t f(y(s), s) ds \right) \right\| \leq$$

$$\left| \int_{t_0}^t \|f(x(s), s) - f(y(s), s)\| ds \right| \leq \left| \int_{t_0}^t L\|x(s) - y(s)\| ds \right| \leq L \cdot \gamma \cdot \delta \leq \frac{\gamma}{2}$$

pro $\gamma := \sup \|x(s) - y(s)\|$. To platí pro všechna t , tedy $\gamma = \sup \|x(t) - y(t)\| \leq \frac{\gamma}{2}$, z čehož plyne $\gamma = 0$, což implikuje rovnost $x(t)$ a $y(t)$. \square

Zavedeme značení $f \in C_x^1(\Omega)$, jestliže $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ existují a jsou spojité v Ω pro každé i .

Lemma 2.5. *Nechť $f \in C_x^1(\Omega)$. Potom f je lokálně lipschitzovská vzhledem k x v Ω .*

Důkaz. Mějme $(x_0, t_0) \in \Omega$. Nechť $\delta > 0$ je takové, že množina

$$M = \overline{U(x_0, \delta) \times (t_0 - \delta, t_0 + \delta)}$$

je podmnožinou Ω . Z kompaktnosti M máme, že parciální derivace $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ jsou omezené konstantou K .

Dále mějme dva body $(x, t), (y, t) \in M$. Potom $|f(x, t) - f(y, t)| = |f(x + 0(y - x), t) - f(x + 1(y - x)t)| = |[f(x + s(y - x), t)]_0^1| = |\int_0^1 \frac{d}{ds} f(x + s(y - x), t) ds|$. Pro derivaci f platí $\frac{d}{ds} f(x + s(y - x), t) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i}(x + s(y - x), t)(y_i - x_i)$. Z toho máme, že

$$\left| \int_0^1 \frac{d}{ds} f(x + s(y - x), t) ds \right| \leq \int_0^1 \sum_{i=1}^n K |y_i - x_i| ds = \sum_{i=1}^n K \max_i |y_i - x_i| =$$

$$nK \max |y_i - x_i| \leq nK |y - x|,$$

kde poslední nerovnost plyne z faktu, že $|y - x| = \sqrt{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|^2}$.

Tedy f je lokálně Lipschitzovská s konstantou $n \cdot K$. □

Rule of thumb (just for fun): platí f spojitá \Rightarrow existuje řešení, $f \in C^1 \Rightarrow$ řešení je určeno jednoznačně.

konec 2. přednášky (28.2.2025)

3 Maximální řešení

V této kapitole se budeme věnovat otázce rozšíření řešení na co největší podmnožinu prostoru, v němž toto řešení hledáme. Bez újmy na obecnosti budeme dále předpokládat, že f je spojitá (ne nutně lipschitzovská) na Ω (což znamená, že nutně nemusíme mít jednoznačnost řešení).

Definice 3.1. Řešení (\hat{x}, \hat{I}) diferenciální rovnice (1) nazýváme *prodloužením* řešení (x, I) , jestliže $\hat{I} \supset I$ a $\hat{x}(t) = x(t)$ pro každé $t \in I$. Řešení (x, I) se nazve *maximální*, jestliže nemá žádné netriviální $(\hat{I} \supsetneq I)$ prodloužení.

Věta 3.2. Každé řešení rovnice (1) má alespoň jedno maximální prodloužení.

Důkaz. Mějme řešení (x, I) takové, že $I = (a, b)$. Budeme induktivně prodloužovat za bod b (na druhou stranu se to pak udělá analogicky). Položme $x_0 = x$, $b_0 = b$, $I_0 = I$. V n -tém kroku dostaneme řešení (x_n, I_n) , kde $I_n = (a, b_n)$. Dále definujeme $\omega_n = \sup\{z > b_n; (x_n, I_n) \text{ lze prodloužit na } (a, z)\}$. Pokud příslušná množina je prázdná, jsme hotovi, neboť řešení již nejde prodloužit, tedy je maximální.

V opačném případě můžeme definovat $b_{n+1} = \frac{b_n + \omega_n}{2}$ (pokud $\omega_n < \infty$), případně $b_{n+1} = b_n + 1$. Tímto postupem získám rostoucí posloupnost b_n , která musí mít limitu. Označme tuto limitu β . Dále položíme $\tilde{I} = (a, \beta)$, $\tilde{x} = x_n(t)$, pro všechna $t \in \tilde{I}$ zvolím n tak, aby $t \in I_n$. Na volbě n nezávisí, neboť na příslušných intervalech jsou funkce x_n stejné.

Dokážeme, že takto definované řešení (\tilde{x}, \tilde{I}) je maximální. Pro spor budeme předpokládat, že existuje rozšíření na $(a, \hat{\beta})$ takové, že $\hat{\beta}$. Okamžitě vidíme, že $\beta < \infty$. Vezmeme n takové, aby $\beta - b_n < \hat{\beta} - \beta$ a $\beta - b_n < 1$ (existuje díky tomu, že b_n konvergují k β). V tom případě (x_n, I_n) má prodloužení až do $\hat{\beta}$, tedy $\omega_n \geq \hat{\beta}$. Pak ale (pokud $\omega_n = \infty$) $b_{n+1} = b_n + 1 > \beta$, máme spor, případně pro ω_n konečné máme $b_{n+1} = \frac{b_n + \omega_n}{2} > \frac{2\beta - \hat{\beta} + \hat{\beta}}{2} = \beta$, opět jsme došli ke sporu. \square

V případě f lipschitzovské se důkaz dá výrazně zjednodušit. Budeme uvažovat všechna prodloužení řešení x (platí jednoznačnost), dostaneme lineárně uspořádanou množinu, potom díky Zornovu lemmatu existuje maximální prvek.

Věta 3.3 (Picard). Nechť $f \in C_x^1(\Omega)$. Pak pro každé $(x_0, t_0) \in \Omega$ existuje právě jedno maximální řešení x diferenciální rovnice (1) v Ω splňující $x(t_0) = x_0$.

Důkaz. Plyne z Peanovy věty (Věta 1.6) a Věty 3.2. \square

Lemma 3.4. Řešení (x, I) diferenciální rovnice (1) lze prodloužit za bod b právě tehdy, když platí všechny

- (i) $b < \infty$;
- (ii) existuje $\lim_{t \rightarrow b^-} x(t) =: x_0 \in \mathbb{R}^n$;
- (iii) $(x_0, b) \in \Omega$.

Důkaz. Nutnost těchto podmínek plyne triviálně z podstaty prodloužení (cvičení). Dokážeme, že jde o podmínky postačující. Nechť tedy máme (x_0, b) jakou novou počáteční podmínku, dle Peanovy vety existuje řešení \hat{x} na $(b - \delta, b + \delta)$

splňující tuto počáteční podmínku. Definujeme $\hat{x}(t) = \begin{cases} x(t), & t < b \\ \tilde{x}(t), & t \geq b \end{cases}$. Potom \hat{x} je řešení (díky principu nalepování) a navíc prodlužuje x za bod b , což jsme chtěli dokázat. \square

Na závěr si uvedeme jednu důležitou větu, která nám poskytne představu o tom, jak vypadají maximální řešení diferenciálních rovnic.

Věta 3.5 (Opuštění kompaktu). *Nechť $K \subset \Omega$ je kompaktní, nechť (x, I) je maximální řešení rovnice (1) splňující $(x(t_0), t_0) \in K$ pro nějaké $t_0 \in I$. Potom existují $t_1 > t_0 > t_2$ taková, že $(x(t_1), t_1) \notin K$ a $(x(t_2), t_2) \notin K$.*

Důkaz. Pro spor budeme předpokládat, že takové t_1 neexistuje, chceme dojít ke sporu s maximalitou řešení. Mějme řešení x na (a, b) a $(x(t), t) \in K$ pro všechna $t \in [t_0, b)$. Ukážeme, že toto řešení můžeme prodloužit za b . Využijeme k tomu Lemma 3.4.

Zřejmě platí $b < \infty$ (díky kompaktnosti K). Dále dokážeme, že existuje $\lim_{t \rightarrow b^-} x(t)$ pomocí Bolzanovy-Cauchyovy podmínky. Mějme $s, t \in (t_0, b)$. Dále díky Lagrangeově větě o střední hodnotě máme

$$\|x(s) - x(t)\| \leq \|x'(\xi)\| |s - t| = \|f(x(\xi), \xi)\| |s - t| \leq M |s - t|,$$

kde poslední nerovnost plyne z toho, že funkce f je omezená na kompaktu K konstantou M . Nakonec $(x_0, b) = \lim_{t \rightarrow b^-} (x(t), t)$, tedy z uzavřenosti K máme, že $(x_0, b) \in K \subset \Omega$.

Zjistili jsme, že řešení lze prodloužit za bod b , což je spor s jeho maximalitou. Důkaz pro t_2 se udělá obdobně. \square

4 Závislost na počáteční podmínce

Lemma 4.1 (Gronwall). *Nechť $w(t), g(t)$ jsou nezáporné a spojité na nějakém intervalu I a nechť $t_0 \in I, K \geq 0$. Nechť pro každé $t \in I$ platí*

$$w(t) \leq K + \left| \int_{t_0}^t w(s)g(s)ds \right|.$$

Potom pro každé $t \in I$ platí

$$w(t) \leq K \exp \left(\left| \int_{t_0}^t g(s)ds \right| \right).$$

Důkaz. Definujeme $\Phi(t) := K + \int_{t_0}^t w(s)g(s)ds + \varepsilon$ pro $t > t_0$. Okamžitě z předpoklady vidíme, že $w(t) \leq \Phi(t)$. Zderivujeme funkci $\Phi(t)$, dostáváme $\Phi'(t) = w(t)g(t) \leq \Phi(t)g(t)$ což po vydělení $\Phi(t)$ (je nenulové díky přičtení ε) nám dává $\frac{\Phi'(t)}{\Phi(t)} \leq g(t)$, což můžeme přintegrovat od t_0 do t , čímž dostaneme $\int_{t_0}^t \frac{\Phi'(s)}{\Phi(s)} ds \leq \int_{t_0}^t g(s)ds$. Po vyčíslení integrálů dostaneme $\log(\Phi(t) - \Phi(t_0)) \leq \int_{t_0}^t g(s)ds$. Je-li \exp je rostoucí funkce, můžeme psát $\frac{\Phi(t)}{\Phi(t_0)} \leq \exp \left(\int_{t_0}^t g(s)ds \right)$.

Nakonec dostáváme $w(t) \leq \Phi(t) \leq (K + \varepsilon) \exp \left(\int_{t_0}^t g(s)ds \right)$. Požadované tvrzení získáme posláním ε do 0. \square

konec 3. přednášky (7.3.2025)

Lemma 4.2. *Nechť f je globálně L -lipschitzovská v Ω vzhledem k x . Potom pro libovolná dvě řešení $(x, I), (y, J)$ v Ω a body $t, t_0 \in I \cap J$ platí*

$$\|x(t) - y(t)\| \leq \|x(t_0) - y(t_0)\| \exp(L|t - t_0|).$$

Důkaz. Můžeme psát

$$\|x(t) - y(t)\| = \left\| x(t_0) + \int_{t_0}^t f(x(s), s)ds - \left(y(t_0) + \int_{t_0}^t f(y(s), s)ds \right) \right\| \leq$$

$$\|x(t_0) - y(t_0)\| + \left\| \int_{t_0}^t |f(x(s), s) - f(y(s), s)| ds \right\| \leq$$

$$\|x(t_0) - y(t_0)\| + \left\| \int_{t_0}^t L|x(s) - y(s)|ds \right\|.$$

Poté z Gronwallova lemmatu dostáváme, že

$$\|x(t) - y(t)\| \leq K e^{\left| \int_{t_0}^t L ds \right|} = K e^{|t - t_0|L},$$

kde funkci $w(s)$ ze znění lemmatu odpovídá výraz $\|x(s) - y(s)\|$. \square

Jednoduchým důsledkem tohoto lemmatu je mj. jednoznačnost řešení (stačí uvažovat řešení s $x(t_0) = y(t_0)$).

Definice 4.3. Necht f je spojitá a lokálně lipschitzovská vzhledem k x v Ω . Potom definujeme *řešící funkci* $\varphi : G \subset \mathbb{R}^{n+2} \rightarrow \mathbb{R}^n$ předpisem $\varphi(t; t_0, x_0) := x(t)$, kde $x : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ je řešení splňující počáteční podmínku $x(t_0) = x_0$ a $t \in I$. Zde G je maximální možná, tj. obsahuje všechny trojice $(t; t_0, x_0) \in \mathbb{R}^{n+2}$ pro něž výraz $\varphi(t; t_0, x_0)$ má smysl.

Například, uvažujeme-li rovnici $x'(t) = x(t)$. Obecným řešením této rovnice je funkce $x(t) = ce^t$, vyřešením rovnice s počáteční podmínkou dostaneme řešící funkci $\varphi(t; t_0, x_0) = x_0 e^{t-t_0}$.

Věta 4.4. Množina G z předchozí definice je otevřená a φ je spojitá na G .

Důkaz. Intermezzo: otevřenost G znamená, že pro každé $(x_0, t_0) \in \Omega$ a t existuje $r > 0$ takové, že pokud $\|(y_0, s_0) - (t_0, x_0)\|$, potom řešení y procházející bodem (y_0, s_0) je definované v bodech $(t - r, t + r)$, spojitost pak odpovídá tomu, že toto řešení bude po celou dobu “blízko” toho původního.

Bez újmy na obecnosti necht $t_0 > t$. Vezměme $(t; t_0, x_0) \in G$, buď x maximální řešení s počáteční podmínkou $x(t_0) = x_0$. Pak $[t_0, t] \subset D_x$ (řešení je definováno na celém tomto intervalu). Vezměme $\delta > 0$ tak malé, aby $[t_0, t + 2\delta] \subset D_x$ (to můžeme, neboť D_x je otevřená) a zároveň $K_\delta := \{(y, s) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R} : s \in [t_0 - \delta, t + \delta] \wedge |y(s) - x(s)| \leq \delta\} \subset \Omega$. Takto definovaná množina K_δ je kompaktní a tedy f je na K_δ omezená konstantou c_0 (spojitá funkce na kompaktu) díky čemuž z lokální lipschitzovskosti plyne globální L -lipschitzovskost vzhledem k x .

Dokážeme, že řešení “blízko” toho původního neopustí “rouru” K_δ . Zvolme $\varepsilon > 0$ takové, aby $\varepsilon < \frac{\delta}{2(1+c_0)e^{L(t-t_0+2\delta)}}$. Vezměme y_0, s_0 tak, aby $|s_0 - t_0| < \varepsilon$, $|x_0 - y_0| < \varepsilon$. Dále vezmeme y maximální řešení s podmínkou $y(s_0) = y_0$. Chceme dokázat, že y je definované aspoň na intervalu $[s_0, t + \delta]$ a platí $|y(s) - x(s)| \leq \delta$ pro všechna $s \in [s_0, t + \delta]$.

Můžeme psát

$$|y(s_0) - x(s_0)| \leq |y(s_0) - x(t_0)| + |x(t_0) - x(s_0)| \leq |y_0 - x_0| + |x'(t_0)| |t_0 - s_0| \leq (1 + c_0)\varepsilon,$$

kde ξ je konstanta z Lagrangeovy věty, která ve vícerozměrném prostoru platí pouze jako neostrá nerovnost.

Dále odhadujeme (použijeme Lemma 4.2)

$$|y(s) - x(s)| \leq |y(s_0) - x(s_0)| e^{L|s-s_0|} \leq (1 + c_0)\varepsilon e^{L|s-s_0|} \leq (1 + c_0)\varepsilon e^{L(t-t_0+2\delta)},$$

kde uvažujeme pouze body s , pro které existuje $y(s)$ a y leží v K_δ na $[s_0, s]$. Z volby ε dostáváme navíc

$$|y(s) - x(s)| \leq (1 + c_0)\varepsilon e^{L(t-t_0+2\delta)} < \frac{\delta}{2}. \quad (2)$$

Maximální řešení y opustí kompakt (Věta 3.5) K_δ někde za časem s_0 . Označme γ čas prvního opuštění (přesněji řečeno infimum všech časů, kdy to už není v tom kompaktu). Na intervalu $[s_0, \gamma]$ platí odhad (2), tedy $|y(\gamma) - x(\gamma)| < \frac{\delta}{2}$,

z čehož máme $\gamma = t + \delta$, to znamená, že kompakt nemůžeme opustit jinak než za časem t . Tím jsme dokázali otevřenost G .

Dokážeme spojitost φ na G . Vezměme dva body $(t; t_0, x_0)$ a $(s; s_0, y_0)$ jako minule a uvažujme rozdíl

$$\begin{aligned} |\varphi(t; t_0, x_0) - \varphi(s; s_0, y_0)| &\leq |\varphi(t; t_0, x_0) - \varphi(s; t_0, x_0)| + \\ |\varphi(s; t_0, x_0) - \varphi(s; s_0, y_0)| &\leq |x(t) - x(s)| + |x(s) - y(s)| \leq \\ c_0(t - s) + |x(s_0) - y(s_0)|e^{L|s-s_0|} &\leq c_0|t - s| + (1 + c_0)e^{L|s-s_0|}|x_0 - y_0|, \end{aligned}$$

čímž jsme ukázali lipschitzovskost, a tedy spojitost φ na G . \square

Z hlediska praktických aplikací často uvažujeme rovnici (1) ve tvaru $x' = f(x, t, \lambda)$ závislém na hodnotě parametru λ . Přidejme druhou rovnici $\lambda' = 0$ a počáteční podmínky $x(t_0) = 0$ a $\lambda(t_0) = \lambda_0$, čímž jsme závislost na parametru převedli na závislost na počáteční podmínce (v případě, že f je závislý na λ lipschitzovsky).

Označme pro účely následující věty $\frac{\partial}{\partial w}$ derivaci ve směru $w \in \mathbb{R}^n$ dle proměnné x_0 .

Věta 4.5. *Nechť $f \in C_x^1(\Omega)$, $w \in \mathbb{R}^n$. Potom $\frac{\partial \varphi}{\partial w}(t, t_0, x_0)$ existuje v každém bodě G . Označíme-li $x(t) = \varphi(t, t_0, x_0)$ a $u(t) = \frac{\partial \varphi}{\partial w}(t, t_0, x_0)$, pak funkce u je řešením rovnice ve variacích*

$$u' = \nabla_x f(x(t), t)u, u(t_0) = w. \quad (3)$$

konec 4. přednášky (14.3.2025)

Důkaz. Větu dokážeme za silnějšího předpokladu $f \in C_x^2(\Omega)$.

Vezmeme pevně bod (x_0, t_0) a víme, že tímto bodem prochází právě jedno maximální řešení, označíme ho $x(t)$. Dále označme $A(t) = \nabla_x f(x(t), t)$. Potom $A(t)$ je matice $n \times n$. Vezmeme pevné $w \in \mathbb{R}^n$ a označme $u(t)$ maximální řešení počáteční úlohy (3).

Dle Věty 5.4 existuje právě jedno řešení a je definované na celém intervalu, kde je definovaná $A(t)$. Chceme dokázat, že $u(t) = \frac{\partial}{\partial w}\varphi(t, t_0, x_0)$. Z definice máme, že

$$\frac{\partial}{\partial w}\varphi(t, t_0, x_0) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h}(\varphi(t, t_0, x_0 + hw) - \varphi(t, t_0, x_0)).$$

Vezmeme t pevné tak, aby $(t, t_0, x_0) \in G$, tedy $x(t)$ je dobře definované. Vezmeme dost malé tak, aby $\varphi(t, t_0, x_0 + hw)$ bylo definované. Položme $y_h(t) := \varphi(t, t_0, x_0 + hw)$.

Definujeme funkci $\eta_h(t) = \frac{1}{h}(y_h(t) - x(t)) - u(t)$. Ukážeme, že $\lim_{h \rightarrow 0} \eta_h(t) = 0$. Pišme

$$\eta'_h(t) = \frac{1}{h}(y'_h(t) - x'(t)) - u'(t) = \frac{1}{h}(f(y_h(t), t) - f(x(t), t)) - \nabla_x f(x(t), t)u(t).$$

Použijeme Taylorův rozvoj prvního řádu pro funkci f , dostaneme

$$\eta'_h(t) = \frac{1}{h}(\nabla_x f(x(t), t)(y_h(t) - x(t)) + \frac{1}{2}(y_h(t) - x(t))^T \frac{\partial^2}{\partial x^2} f(x(t), t)(y_h(t) - x(t)) - \nabla_x f(t, x(t))u(t).$$

Tedy máme, že

$$\eta'_h(t) = \nabla_x f(x(t), t) \left[\frac{1}{h}(y_h(t) - x(t)) - u(t) \right] + \frac{1}{h}z_n(t).$$

Potom $\eta'_h(t) = A(t)\eta_h(t) + z_n(t)$.

Pro h malé je vše v K_δ z Věty 4.4. Na K_δ jsou $\nabla_x f$ a $\nabla_x^2 f$ omezené $\leq M$. Zde předpokládáme, že $f \in C_x^2(\Omega)$. Potom z Lemmatu 4.2 můžeme psát

$$\|z_h(t)\| \leq \frac{1}{2}M\|y_h(t) - x(t)\|^2 \leq \frac{1}{2}M\|y_h(t_0) - x(t_0)\|^2 e^{2M|t-t_0|} \leq Ch^2\|w\|^2.$$

Uvědomíme si, že $\eta_h(t_0) = 0$ a napíšeme integrální rovnici odpovídající diferenciální rovnici pro η'_h

$$\eta_h(t) = \eta_h(t_0) + \int_{t_0}^t A(s)\eta_h(s) + z_n(s)ds,$$

Tedy $\|\eta_h(t)\| \leq \left| \int_{t_0}^t M\|\eta_h(s)\| + Chds \right| = C|t - t_0|h + \left| \int_{t_0}^t M\|\eta_h(s)ds \right|$. Použijeme Gronwallovo lemma (Lemma 4.1), dostaneme.

$$\|\eta_h(t)\| \leq \tilde{C}he^{M|t-t_0|},$$

tedy $\eta_h(t) \rightarrow 0$ pro $h \rightarrow 0$, čímž je důkaz ukončen. \square

Ukážeme si jednu aplikaci následující věty pro výpočet derivace řešící funkce.

Příklad 4.6. Mějme rovnici $x' = x$, její řešící funkce má tvar $\varphi(t, t_0, x_0) = x_0 e^{t-t_0}$. Potom $\frac{d}{dx}\varphi(t, t_0, x_0) = e^{t-t_0}$. Totéž můžeme spočítat z předchozí věty. Hledaná funkce řeší diferenciální rovnici $u' = u$ s počáteční podmínkou $u(t_0) = t$. Jejím řešením je e^{t-t_0} , což jsme chtěli dokázat.

Za uvedených předpokladů dokonce $\frac{d\varphi}{dw}$ závisí spojitě na x_0 tj. řešící funkce je diferencovatelná (má totální diferenciál) vzhledem k x_0 . Lze též ukázat, že φ je diferencovatelná vůči t a t_0 .

5 Lineární rovnice

Definice 5.1. Normu matice $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ definujeme

$$\|A\| = \sup\{|Ax|; x \in \mathbb{R}^n, |x| \leq 1\},$$

kde $|x| = \sqrt{x_1^2 + \dots + x_n^2}$ je norma vektoru $x \in \mathbb{R}^n$.

Věta 5.2 (Vlastnosti normy matice). *Nechť $A, B \in \mathbb{R}^{n \times n}$. Potom:*

(i) $\|A\| \geq 0$ a $\|A\| = 0$ právě když $A = 0$.

(ii) $\|aA\| = |a|\|A\|$ pro všechna $a \in \mathbb{R}$.

(iii) $\|A + B\| \leq \|A\| + \|B\|$.

(iv) $\|AB\| \leq \|A\|\|B\|$.

(v) $|Ax| \leq \|A\||x|$ pro $x \in \mathbb{R}^n$.

(vi) Je-li A regulární, pak $Ay \geq \frac{|y|}{\|A^{-1}\|}$ pro $y \in \mathbb{R}^n$.

Důkaz. První tři vlastnosti říkají, že operátor $\|\cdot\|$ je norma (cvičení).

Dokážeme vlastnost (v). Příklad $x = 0$ je triviální, nechť tedy $x \neq 0$. Položme $y = \frac{x}{|x|}$. Potom můžeme psát

$$|Ax| = |A(|x|y)| = |x|Ay = |x||Ay| \leq |x|\|A\|.$$

K důkazu vlastnosti (iv) můžeme psát $|ABx| \leq \|A\|\|B\||x|$, kde jsme dvakrát použili již dokázanou vlastnost (v). Potom

$$\|AB\| = \sup_{|x| \leq 1} |ABx| \leq \sup_{|x| \leq 1} \|A\|\|B\||x| \leq \|A\|\|B\| \cdot 1.$$

Nakonec, pro vlastnost (vi) položíme $v := Ay$, tedy $y = A^{-1}v$. Potom

$$|y| = |A^{-1}v| \leq \|A^{-1}\||v| = \|A^{-1}\||Ay|, \text{ tedy } |Ay| \geq \frac{|y|}{\|A^{-1}\|},$$

čímž je důkaz ukončen. □

Definice 5.3. Lineární rovnici rozumíme rovnici

$$x' = A(t)x + g(t), x(t_0) = x_0, \quad (4)$$

kde $A(t) : (a, b) \rightarrow \mathbb{R}^{n \times n}$, $g(t) : (a, b) \rightarrow \mathbb{R}^n$ jsou spojité.

V přednášce MA3 jste již studovali tento typ rovnic, teď se však budeme věnovat obecnějšímu případu, kdy A a g závisí na t .

Věta 5.4. *Nechť $t_0 \in (a, b)$, $x_0 \in \mathbb{R}^n$ je dáno. Pak existuje jediné řešení rovnice (4), definované na celém (a, b) .*

Důkaz. Rovnice (4) je ekvivalentní rovnici (1), kde $f(x, t) = A(t) \cdot x + g(t)$.
Můžeme psát

$$|f(x, t) - f(y, t)| = |A(t)x - A(t)y| \leq \|A(t)\| |x - y|.$$

Funkce $A(t)$ je omezená na kompaktních intervalech, tedy f je lipschitzovská.
Tedy pro každou počáteční podmínku existuje právě jedno maximální řešení.
Dokážeme, že toto řešení je definované na celém (a, b) .

konec 5. přednášky (21.3.2025)

□