

Obyčejné diferenciální rovnice

Zápisky z přednášek

Zimní semestr 2025/26

Obsah

I.	Motivace	3
II.	Lineární rovnice prvního řádu	3
1	Metody řešení	3
1.i	Metoda separace proměnných	3
1.ii	Bernoulliho rovnice	3
1.iii	Metoda variace konstant	4
1.iv	Metoda integračního faktoru	4
2	Věta o existenci a jednoznačnosti	4
III.	Soustava lineárních diferenciálních rovnic	5
1	Systémy s diagonální maticí A	6
2	Diagonalizace	6
3	Princip superpozice řešení pro homogenní soustavy	6
3.i	Fundamentální systém	7
4	Exponenciální matice	7
5	Metody řešení soustav lineárních rovnic	7
5.i	1. Eulerova metoda (pro matici s konstantními koeficienty)	7
6	Rovinné systémy	8
6.i	Body rovnováhy	8
7	Obecné řešení nehomogenního problému	8
8	Tok lineárního systému	9
IV.	Nelineární diferenciální rovnice	9
V.	Soustava nelineárních diferenciálních rovnic - lokální chování	10
1	Existence a jednoznačnost	11
2	Maximální interval existence	11
3	Tok definovaný diferenciální rovnicí	11
4	Linearizace	11
5	Stabilní a nestabilní varieta	12
6	Věta Hartman-Grobman	12
7	Stabilita	12
8	Body rovnováhy	12
9	Body rovnováhy nelineárního systému	12
10	Složené body rovnováhy	13
VI.	Soustava nelineárních diferenciálních rovnic - globální chování	13
1	Dynamické systémy	13
2	Limitní množiny, atraktory	14
3	Periodické orbity	15
4	Poincarého zobrazení	15
4.i	Poincarého zobrazení pro rovinný systém	16
4.ii	Zobecnění pro systémy vyšších dimenzí	16
5	Stabilní varieta periodických orbit	16
6	Poincarého-Bendixsonova teorie	16
VII.	Bifurkace	16

I. Motivace

Motivací pro studium obyčejných diferenciálních rovnic (ODR) může být například rovnice $y' = x(y - 1)$, kterou lze jednoduše řešit analyticky, pokud se ji ale pokusíme vyřešit pomocí nějaké numerické metody, narazíme na spoustu problémů. Je tedy dobré znát a umět analyzovat chování různých systémů obyčejných diferenciálních rovnic, abychom se těmto problémům mohli vyhýbat nebo aspoň věděli, že mohou nastat.

II. Lineární rovnice prvního řádu

1 Metody řešení

1.i Metoda separace proměnných

Rovnice se separovatelnými proměnnými je rovnice typu

$$\frac{dy}{dx} = g(x)h(y), \quad \langle x, y \rangle \in \mathbb{R}$$

Použití separační metody je korektní za těchto předpokladů:

- $g(x)$ je spojitá
- $h(x)$ je spojitá

Metoda má tři kroky:

1. Separace

$$\begin{aligned}\frac{dy}{dx} &= g(x)h(y) \\ \frac{dy}{h(y)} &= g(x) dx\end{aligned}$$

Pozorování Tato rovnice je speciálním tvarem rovnice v diferenciálech $M(x, y) dx + N(x, y) dy = 0$

2. Integrace

$$\begin{aligned}\int \frac{dy}{h(y)} &= \int g(x) dx \\ H(y) &= G(x) + C, \quad C \in \mathbb{R}\end{aligned}$$

Existence těchto funkcí je zaručena předpoklady.

3. Inverze

$$y = H^{-1}(G(x) + C)$$

Existence inverzní funkce k funkci H je také zaručena předpoklady.

1.ii Bernoulliiova rovnice

Kanonický tvar Bernoulliiovy rovnice je

$$y' + a(x)y = g(x)y^p,$$

kde $a(x), g(x)$ jsou spojitě na J a $p \in \mathbb{R}$. Jedná se tedy o nelineární rovnici pro p různé od jedničky a nuly. Je-li $p = 0 \vee p = 1$ je rovnice lineární a separovatelná respektive separovatelná, Řešíme tedy případ $p \in \mathbb{R} \setminus \{0, 1\}$. Za hledanou funkci dosadíme součin funkcí $y = uv$.

$$\begin{aligned}(uv)' + auv &= g \cdot (uv)^p \\ u'v + uv' + auv &= g \cdot (uv)^p \\ u'v + u(v' + av) &= g \cdot (uv)^p\end{aligned}$$

Zde bychom se chtěli zbavit závorky $v' + av$ nalezením vhodné funkce v . Položíme tedy

$$v' + av = 0$$

Tuto rovnici řešíme separací. Stačí nalézt jakoukoliv funkci která této rovnici vyhovuje, můžeme tedy konstantu uvažovat nulovou, nebo jakoukoliv jinou která nám vyhovuje. Dalším krokem je dosazení v do rovnice

$$u'v = g \cdot (uv)^p$$

$$\frac{du}{u^p} = gv^{p-1}$$

Rovnici pro u lze znovu řešit separací. Hledanou funkci teď dostaneme prostou desubstitucí $y = uv$. Můžeme si všimnout, že Bernoulliho metoda se skládá ze dvou metod separace proměnných.

1.iii Metoda variace konstant

Prvně navržena Lagrangem. Znovu řešíme rovnici typu

$$y' + a(x)y = g(x)$$

Při metodě variace konstant nejdříve určíme řešení homogenní rovnice (znovu separací)

$$y_h' + a(x)y_h = 0$$

$$y_h = Ce^{-\int a \, dx}$$

Nyní uvažujeme $C = C(x)$ a dosadíme y_h do původní rovnice. Tím dostaneme rovnici pro $C(x)$ a neznámá funkce je potom $y = C(x)e^{-\int a \, dx}$.

1.iv Metoda integračního faktoru

Navržena Eulerem. Řešíme rovnici typu

$$y' + a(x)y = g(x)$$

Metoda integračního faktoru spočívá v tom přenásobit obě strany nějakou vhodnou funkcí abychom levou stranu dostali pod společnou derivaci. Pro naši rovnici je vhodným integračním faktorem funkce $e^{\int a \, dx}$

$$y' + a(x)y = g(x) \quad \cdot e^{A(x)},$$

kde $A(x) = \int a \, dx$. Zde použijeme znalosti že

$$\frac{d}{dx}(e^A y) = Ae^A y \frac{dA}{dx} + e^A \frac{dy}{dx},$$

potom

$$\frac{d}{dx}(e^A y) = ge^A$$

$$\int \frac{d}{dx}(e^A y) \, dx = \int ge^A \, dx$$

$$e^A y = \int ge^A \, dx$$

$$y = e^{-A} \int ge^A \, dx$$

2 Věta o existenci a jednoznačnosti

Chtěli bychom vědět za jakých podmínek má smysl ODR řešit, s tím nám pomůže následující věta.

Věta Mějme obyčejnou diferenciální rovnici prvního řádu

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

Necht' f a $\frac{\partial f}{\partial y}$ jsou spojité na $G \subseteq \mathbb{R}^2$ a nechteť $[x_0, y_0] \in G$, pak existuje právě jedno maximální řešení Cauchyovy úlohy

$$y' = f(x, y), \quad y(x_0) = y_0$$

Důležité je si v praxi uvědomit co věta říká a co neříká, to se pokusíme ilustrovat na následujících příkladech.

Příklad 2.1 Mějme následující Cauchyho úlohu

$$y' = y, \quad y(0) = 0$$

Funkce f a $\frac{\partial f}{\partial y}$ jsou určitě spojité na $G = \mathbb{R}^2$ a bod $[0, 0] \in G$. Rovnice tedy splňuje podmínky existence jednoznačného maximálního řešení. To dostaneme třeba separací proměnných.

$$y' = y$$

$$\frac{dy}{y} = dx, \quad y \neq 0$$

$$\ln(|y|) = x + C$$

$$y = \pm K e^x \quad K \in \mathbb{R}^+, x \in \mathbb{R}$$

To je tedy obecné řešení, vidíme ale že pro danou počáteční podmínku řešení neexistuje, přitom ale splňujeme požadavky věty o existenci a jednoznačnosti. Věta nám ale neříká, že pro každou počáteční podmínku řešení existuje, říká jen že pro nějakou počáteční podmínku řešení existovat bude a že bude jednoznačné.

Příklad 2.2 Mějme následující Cauchyho úlohu

$$y' = \sqrt{|y|}, \quad y(0) = 0$$

Funkce f je spojitá na \mathbb{R} ale její derivace už jen na $\mathbb{R} \setminus \{0\}$ množinou na které hledáme řešení je $G = \mathbb{R} \times \mathbb{R} \setminus \{0\}$. Pro jednoduchost vyřešíme rovnici pouze pro $y > 0$.

$$\frac{dy}{\sqrt{y}} = dx$$

$$2\sqrt{y} = x + C$$

$$y = \frac{1}{4}(x + C)^2$$

$$0 = \frac{1}{4}(0 + C)^2 \Rightarrow C = 0$$

$$y = \frac{x^2}{4} \quad x \in \mathbb{R}$$

To je ale v podstatě neočekávaný výsledek, vždyť přece počáteční podmínka neleží v oblasti G . To je ale právě ono, tím že PP neleží v oblasti G , pak větu nelze užít a neříká nám o řešení nic. Věta **neříká** právě tehdy když $[x_0, y_0] \in G$ pak řešení existuje a je jednoznačné, to je důležité si uvědomit.

III. Soustava lineárních diferenciálních rovnic

Máme homogenní soustavu ODR ve tvaru

$$X' = AX. \tag{1}$$

Pozorování Každá homogenní soustava má triviální řešení $X = 0$.

1 Systémy s diagonální maticí A

Tedy systémy bez vzájemného propojení (uncoupled systems) jsou rovnice typu

$$X' = AX, \quad (2)$$

kde matice A je diagonální. Pro takové systémy lze jednoduše najít řešení, při přidání počáteční podmínky, pomocí separace proměnných

$$x'_i = a_{ii}x_i \longrightarrow x_i = c_i e^{a_{ii}t}.$$

nebo ekvivalentní maticový zápis

$$X(t) = \text{diag}(e^{a_{ii}t}) \cdot C,$$

kde $C = X(0)$.

2 Diagonalizace

Je technika, která nám pomůže převést obecný homogenní lineární systém (1) na systém s diagonální maticí.

Definice (*homeomorfismus*) O zobrazení říkáme, že je homeomorfní pokud je bijektivní, spojitě a inverzní zobrazení je též spojitě.

Věta Mějme matici A typu $n \times n$, jež má n různých reálných vlastních čísel λ_i . Pak $\{V_i\}$ (množina vlastních vektorů) tvoří bázi v \mathbb{R}^n . Matice $P = (V_1 \mid \dots \mid V_n)$ je invertibilní a

$$P^{-1}AP = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n).$$

Věta (*Obecněji*) Lineární transformace T n -tého řádu, která vektoru $Y \in \mathbb{R}^n$ přiřadí stavový vektor $X = TY$ systému (2), zobrazuje systém (2) na opět lineární systém

$$Y' = BY, \quad (3)$$

kde matice $B = T^{-1}AT$ a systémy (2) a (3) jsou homeomorfní v \mathbb{R}^n . Zachovávali-li zobrazení i orientaci pohybu, říkáme že jsou systémy navzájem topologicky ekvivalentní.

Proces diagonalizace provedeme následovně: definujeme lineární transformaci souřadnic

$$Y = P^{-1}X$$

kde P je invertibilní matice definovaná v předchozí větě. Potom

$$X = PY$$

$$Y' = P^{-1}X' = P^{-1}AX = P^{-1}APY$$

a tím dostaneme diagonalizovaný systém

$$Y' = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)Y,$$

který má řešení

$$Y(t) = \text{diag}(e^{\lambda_1 t}, \dots, e^{\lambda_n t})Y(0)$$

A potom, protože $Y(0) = P^{-1}X(0)$ a $X(t) = PY(t)$, lze jednoduše odvodit že (1) má řešení

$$X(t) = PE(t)P^{-1}X(0),$$

kde $E(t)$ je diagonální matice

$$E(t) = \text{diag}(e^{\lambda_1 t}, \dots, e^{\lambda_n t}).$$

3 Princip superpozice řešení pro homogenní soustavy

Jestliže X_1, \dots, X_n jsou řešení homogenní soustavy ODR na intervalu J a C_1, \dots, C_n jsou libovolné konstanty, pak lineární kombinace $C_1X_1 + \dots + C_nX_n$ je opět řešením soustavy na J .

3.i Fundamentální systém

4 Exponenciální matice

O lineární rovnici víme, že obecné řešení má tvar $x = ce^{at}$, chtěli bychom najít nějakou paralelu k systémům rovnic, přece jenom je jejich zápis velice podobný. K tomu se nám bude hodit exponenciální matice.

Věta Je-li A typu $n \times n$ reálná či komplexní matice, tak maticová řada $\sum_{k=0}^{\infty} \frac{A^k t^k}{k!}$ konverguje k matici e^{At} třídy $n \times n$, která má vlastnosti:

1. $\frac{d}{dt}e^{At} = Ae^{At} = e^{At}A$
2. $e^{(t+s)A} = e^{At}e^{As}$
3. $e^{A0} = \mathbb{I} \wedge e^{At}$ je invertibilní $\wedge e^{At}e^{-At} = \mathbb{I}$, kde \mathbb{I} je jednotková matice.

Bude-li $X(0) = u_j$ pak

$$X = e^{At} = e^{\lambda_j t} e^{At} e^{-\lambda_j t} u_j = e^{\lambda_j t} e^{(A - \lambda_j I)t} = e^{\lambda_j t} (I + (A - \lambda_j I)t + \dots) u_j = e^{\lambda_j t} u_j.$$

Věta (Základní věta pro lineární systémy) Necht' A je typu $n \times n$. Potom pro dané $X_0 \in \mathbb{R}^n$, má Cauchyho problém

$$\begin{aligned} X' &= AX \\ X(0) &= X_0 \end{aligned}$$

jednoznačné řešení

$$X(t) = e^{At} X_0.$$

Věta (Cayley-Hamilton) Necht' ... je charakteristický polynom matice typu Pak maticový polynom získaný zaměněním ... za ... do ... splňuje

5 Metody řešení soustav lineárních rovnic

5.i 1. Eulerova metoda (pro matici s konstantními koeficienty)

Řešení odhadujeme ve tvaru $x_i = u_i e^{\{\lambda_i\}t}$, kde (u_i, λ_i) je vlastní pár matice A . Může nastat několik případů

5.i.i n lineárně nezávislých vektorů

Věta Necht' matice A má n lineárně nezávislých vektorů V^1, \dots, V^n , které jsou příslušné k (ne nutně různým!) vlastním číslům. Potom

$$V^1 e^{\{\lambda_1\}t}, V^2 e^{\{\lambda_2\}t}, \dots, V^n e^{\{\lambda_n\}t},$$

je fundamentální systém řešení soustavy na \mathbb{R} .

To může nastat má-li matice A n různých vlastních čísel, matice A je symetrická, ...

5.i.ii komplexní vlastní číslo

Dostaneme-li komplexní vlastní číslo $\lambda_i = \alpha + \beta i$, výsledkem by mělo být

$$X_1 = V^1 e^{(\alpha + \beta i)t}$$

to je ale komplexní funkce a taková nás moc nezajímá, protože jsme řešili reálný problém, chtěli bychom tedy reálné výsledky. Zkusíme zda by soustavu neřešila pouze reálná část výsledku.

$$\operatorname{Re}(x') = (\operatorname{Re}(x))' = \operatorname{Re}(Ax) = A \cdot \operatorname{Re}(x) \setminus (\operatorname{Re}(x))' = A \cdot \operatorname{Re}(x) \setminus X' = A \cdot X$$

to znamená, že reálná část je řešením, to samé platí pro imaginární část. Mějme tedy komplexní vlastní číslo $\lambda = \alpha + \beta i$ a odpovídající vlastní vektor $U = V + Wi$.

$$\begin{aligned} X &= Ue^{\lambda t} = (V + Wi)e^{\alpha + \beta i} = (V + Wi)e^{\alpha t}e^{\beta it} = \\ &= (V + Wi)e^{\alpha t}(\cos(\beta t) + i \sin(\beta t)) = e^{\alpha t}(V \cos(\beta t) - W \sin(\beta t)) + \\ &\quad + ie^{\alpha t}(W \cos(\beta t) + V \sin(\beta t)) \end{aligned}$$

$$\operatorname{Re}(X) = e^{\alpha t}(V \cos(\beta t) - W \sin(\beta t))$$

$$\operatorname{Im}(X) = e^{\alpha t}(W \cos(\beta t) + V \sin(\beta t))$$

$$X = C_1 \operatorname{Re}(X) + C_2 \operatorname{Im}(X)$$

5.i.iii méně než n lineárně nezávislých vlastních vektorů

6 Rovinné systémy

Jsme-li v \mathbb{R}^2 označujeme systém (1) jako rovinný. Diagonalizujeme-li systém

$$X' = AX$$

$$X' = BX, \quad B = PAP^{-1},$$

kde $P = (V_1 \mid V_2)$, pak nastává právě jedna z možností

1. $B = \operatorname{diag}(\lambda_1, \lambda_2)$ má-li A 2 různá vlastní čísla $\lambda_{1,2}$,
2. $B = \begin{pmatrix} \lambda & 1 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix}$ je-li λ dvonásobné reálné vlastní číslo,
3. $B = \begin{pmatrix} \alpha & -\beta \\ \beta & \alpha \end{pmatrix}$ je-li $\lambda_{1,2} = \alpha \pm i\beta$ sdružené komplexní vlastní číslo.

Potom lze určit řešení jako

1. $X(t) = \operatorname{diag}(e^{\lambda_1 t}, e^{\lambda_2 t})X(0)$
2. $X(t) = e^{\lambda t} \begin{pmatrix} 1 & t \\ 0 & 1 \end{pmatrix} X(0)$
3. $X(t) = e^{\alpha t} \begin{pmatrix} \cos(\beta t) & -\sin(\beta t) \\ \sin(\beta t) & \cos(\beta t) \end{pmatrix} X(0)$

6.i Body rovnováhy

Bod pro nějž platí $F(X^*) = 0$ nazýváme bod rovnováhy. Pro lineární systém $F(X) = AX + B$. Pro lineární homogenní systém je bodem rovnováhy počátek. Rozlišujeme následující body rovnováhy pro rovinný homogenní systém

- Uzel: $\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R} \quad \wedge \quad \lambda_1 \neq \lambda_2$
- Sedlo: $\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R} \quad \wedge \quad \lambda_1 \lambda_2 < 0$
- Ohnisko: $\lambda_{1,2} \in \mathbb{C}$
- Střed: $\lambda_{1,2} = \pm i\beta$

7 Obecné řešení nehomogenního problému

Mějme soustavu ve tvaru

$$X' = AX + F(t), \tag{4}$$

kde A je matice typu $n \times n$ a $F(t)$ je spojitá vektorová funkce.

Definice (*Fundamentální matice*) Libovolné řešení rovnice

$$X' = AX.$$

značíme $\Phi(t)$ a nazýváme ho fundamentální systém nebo fundamentální matice. $\Phi(t)$ je $n \times n$ a splňuje

$$\Phi'(t) = A\Phi(t) \quad \forall t \in \mathbb{R}.$$

Věta Je-li $\Phi(t)$ fundamentální systém rovnice (1), potom řešení nehomogenní rovnice (4) s počáteční podmínkou $X(0) = X_0$ je jednoznačné a ve tvaru

$$X(t) = \Phi(t)\Phi^{-1}(0)X_0 + \int_0^t \Phi(t)\Phi^{-1}(\tau)F(\tau) d\tau.$$

Pozorování

Definice (*Princip superpozice*) Necht' $X_C = C_1X_1 + \dots + C_nX_n$ je obecné řešení homogenního problému a necht' X_P je řešení Pak obecné řešení má tvar

$$X = X_C + X_P$$

7.n.i Metoda variace konstant

8 Tok lineárního systému

Uvažujme systém

$$X' = AX.$$

Definice (*Tok lineárního systému*) Množina zobrazení $e^{At} : \mathbb{R}^n \mapsto \mathbb{R}^n$ se nazývá tokem lineárního systému. (Popisuje pohyb bodů ... po trajektoriích systém ...)

Definice (*Hyperbolický lineární systém ODR*) Mají-li všechna vlastní čísla matice A nenulovou reálnou část, říkáme o lineárním systému ODR že je hyperbolický

Definice (*Invariantní množina*) Podmnožina $E \subset \mathbb{R}^n$ se nazývá invariantní k toku e^{At} , jestliže platí $e^{At}E \in E$ pro $\forall t \in \mathbb{R}$

Definice Mějme lineární systém $\dot{X} = AX$ a necht' $w_j = u_j + iv_j$ je zobecněný vlastní vektor matice A odpovídající vlastnímu číslu $\lambda_j = \alpha_j + i\beta_j$ a necht' $\{u_1, \dots, u_r, v_{k+1}, \dots, v_r\}$ je báze \mathbb{R}^n , ($n = 2r - k$).

- Pak podprostor vytvořený zobecněnými vlastními vektory jimž odpovídají vlastní čísla se zápornou reálnou částí se nazývá **stabilní podprostor** a značíme ho $E^s = \text{span}\{u_j, v_j : \alpha_j < 0\}$
- Podprostor vytvořený zobecněnými vlastními vektory jimž odpovídají vlastní čísla s kladnou reálnou částí se nazývá **nestabilní podprostor** a značíme ho $E^u = \text{span}\{u_j, v_j : \alpha_j > 0\}$
- Podprostor vytvořený zobecněnými vlastními vektory jimž odpovídají vlastní čísla s nulovou reálnou částí se nazývá **centrální podprostor** a značíme ho $E^c = \text{span}\{u_j, v_j : \alpha_j = 0\}$

Věta Vlastnosti řešení lineárního systému v invariantních podprostorech

- Je-li $X_0 \in E^s$ pak pro $\forall t \in \mathbb{R}$ je $\lim_{t \rightarrow \infty} e^{At}X_0 = 0$. Bod rovnováhy je asymptoticky stabilní.
- Je-li $X_0 \in E^u$ pak pro $\forall t \in \mathbb{R}$ je $\lim_{t \rightarrow \infty} e^{At}X_0 = \pm\infty$. Bod rovnováhy je asymptoticky nestabilní.

IV. Nelineární diferenciální rovnice

Nelineární ODR v normálním tvaru nazýváme rovnici

$$y^n = f(t, y^{n-1}, y^{n-2}, \dots, y),$$

zde y^n značí n -tou derivaci. Tato rovnice má několik jednoduchých řešení ve speciálních případech.

1. $\ddot{y} = f(\dot{y}, t)$

Zde provedeme redukci řádu vhodnou substitucí.

$$z(t) = \dot{y}(t), \quad \dot{z}(t) = \ddot{y}(t)$$

Tím dostaneme systém rovnic, který už je jednoduché vyřešit.

$$\dot{y} = z$$

$$\dot{z} = f(t, z)$$

2. $\ddot{y} = f(\dot{y}, y)$

Zde znovu zavedeme vhodnou substituci

$$z = \dot{y} \rightarrow \dot{z} = \ddot{y}$$

Tady si uvědomíme, že

$$\dot{z} = \ddot{y} = f(y, z) = \frac{dz}{dt} = \frac{dz}{dy} \frac{dy}{dt} = \frac{dz}{dy} z$$

Našli jsme tedy obyčejnou diferenciální rovnici $\frac{dz}{dy} = \frac{1}{z} f(y, z)$, jejímž řešením je funkce z , potom pro hledanou funkci víme že $y = \int z dt$

V. Soustava nelineárních diferenciálních rovnic - lokální chování

Soustavou nelineárních diferenciálních rovnic nazýváme

$$X' = F(t, X), \quad X(0) = X_0. \quad (5)$$

Nechť E je otevřená podmnožina \mathbb{R}^n , $X_0 \in E$ a nechť $F \in \mathcal{C}^1(E)$ pak

$$\dot{X} = F(X), \quad X(0) = X_0, \quad (6)$$

nazýváme nelineárním autonomním systémem obyčejných diferenciálních rovnic. Poznamenejme, že jakýkoliv neautonomní systém lze autonomizovat přidáním jedné proměnné.

Oproti lineárním systémům může u nelineárních systémů nastat tzv. blow up. To znamená, že řešení utíká do nekonečna v nějakém konečném čase, to je samozřejmě nefyzikální. Ilustrujeme to na příkladě.

Příklad V.1

$$\dot{x} = x^2, \quad x(0) = 1$$

$$\frac{dx}{x^2} = dt$$

$$-\frac{1}{x} = t + C$$

$$x = -\frac{1}{t-1}, \quad t \in (-\infty, 1)$$

Je vidět, že

$$\lim_{t \rightarrow 1^-} x(t) = \infty,$$

tomu říkáme blow up řešení.

1 Existence a jednoznačnost

Věta Necht' E je otevřená podmnožina \mathbb{R}^n , $X_0 \in E$ a necht' $F \in \mathcal{C}^1(E)$. Pak existuje $a > 0$ takové, že počáteční problém $\dot{X} = F(X)$, $X(0) = X_0$ má jediné řešení na $\langle -a, a \rangle$

Věta (Barrowův vzorec) Je-li řešení $x(t)$ rovnice $\dot{X} = F(X)$ na intervalu $I = (t_0, t_1)$, $F \in \mathcal{C}^1(I)$ a $F(X) \neq 0$ na I . Označme $a = \lim_{t \rightarrow t_0^+} x(t)$, $b = \lim_{t \rightarrow t_1^-} x(t)$. Pak

$$t_1 - t_0 = \int_a^b \frac{1}{F(z)} dz$$

To nám říká pár věcí:

- Vzorec udává čas, který potřebuje řešení k tomu, aby vystoupalo (resp. zklesalo) z hodnoty a do hodnoty b
- Řešení konvergující k b zleva (resp. zprava) pro $t \rightarrow T$ (T je krajní bod intervalu, na kterém je řešení definováno) se napojí v konečném čase na stacionární řešení $x = b$, právě tehdy když následující integrál konverguje (pro malé δ)

$$\int_{b-\delta}^b \frac{1}{F(z)} dz$$
$$\left(\text{resp. } \int_b^{b-\delta} \frac{1}{F(z)} dz \right)$$

Věta Necht' E je otevřená podmnožina \mathbb{R}^n obsahující X_0 a necht' $F \in \mathcal{C}^1(E)$. Necht' $u_1(t)$ a $u_2(t)$ je řešení nelineární soustavy na I_1 respektive na I_2 . Pak $0 \in I_1 \cap I_2$ a je-li I libovolný otevřený interval obsahující 0 , který je zároveň podintervalem $I_1 \cap I_2$ pak $u_1(t) = u_2(t)$ pro $\forall t \in I$.

Věta Necht' E je otevřená podmnožina \mathbb{R}^n a $F \in \mathcal{C}^1$. Pak pro $\forall X_0 \in E$ existuje největší otevřený interval (α, β) na němž má počáteční problém (6) jediné řešení $X(t)$. Tzn. má-li (6) řešení $Y(t)$ na $I \subset (\alpha, \beta)$. Pak $X(t) = Y(t)$ pro $\forall t \in I$.

2 Maximální interval existence

3 Tok definovaný diferenciální rovnicí

4 Linearizace

Mějme nelineární autonomní systém:

$$\dot{X} = F(X), \quad F(0) = 0$$

Provedeme Taylorův rozvoj prvního řádu okolo nuly:

$$f_i(X) = f_{i(0)} + \frac{\partial f_i}{\partial x_1}(0) \cdot x_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial x_n}(0) \cdot x_n + \omega_i,$$

kde ω_i je chyba způsobená zanedbáním členů vyšších řádů a $f_{i(0)} = 0$. Jako A označíme Jacobiho matici funkce $F(x)|_0$ (tedy v bodě 0). Potom soustava

$$\dot{X} = A \cdot X,$$

je linearizovaný systém k původnímu systému.

Věta Jestliže všechna vlastní čísla Jacobiho matice A mají záporné reálné části. Pak bod 0 je asymptoticky stabilní bod rovnováhy nelinearizované soustavy. Jestliže je alespoň jedna reálná část kladná, pak je bod 0 nestabilní bod rovnováhy nelinearizované soustavy.

Tato věta nám dává informaci o stabilitě počátku pouze ze znalosti Jacobiho matice soustavy. Nedává nám ale informaci o žádném jiném bodě mimo počátek, chtěli bychom ji proto zobecnit. Mějme tedy:

$$\dot{X} = F(X), \quad F(H) = 0$$

Bodem rovnováhy je tedy nějaký bod H a ne počátek. Provedeme-li znovu Taylorův rozvoj dostaneme

$$f_i(X) = f_i(H) + \frac{\partial f_i}{\partial x_1}(H) \cdot x_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial x_n}(H) \cdot x_n + \omega_i.$$

Provedeme transformaci soustavy tak, aby bod H byl počátkem soustavy nové.

$$u_1 = x_1 - h_1$$

$$u_2 = x_2 - h_2$$

$$\vdots$$

$$u_i = x_i - h_i$$

Tím dostaneme soustavu $\dot{U} = G(U)$, ve které je bod H počátkem. Sestavíme-li Jacobiho matici této soustavy, zjistíme že je stejná jako kdybychom vyhodnotili Jacobiho matici původního systému v bodě H . To znamená, že pro vyhodnocení stability obecného bodu rovnováhy nemusíme provádět transformaci, ale stačí jen vyhodnotit Jacobiho matici v daném bodě.

5 Stabilní a nestabilní varieta

6 Věta Hartman-Grobman

7 Stabilita

8 Body rovnováhy

Definice (*Bod rovnováhy*) Body rovnováhy jsou body pro něž platí

$$F(X_0) = 0.$$

Rozlišujeme několik druhů bodů rovnováhy:

- stabilní (Lyapunovsky) jestliže pro $\forall \varepsilon \exists \delta > 0$ tak, že $\|X^0\| < \delta \Rightarrow \|X(t, X^0)\| < \varepsilon$
tzn. řešení neuteče z nějaké oblasti dané ε .
- atraktor existuje-li $\delta > 0$ tak, že $\|X^0\| < \delta \Rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} X(t, X^0) = 0$
(je-li bod rovnováhy v nule)
- asymptoticky stabilní \Leftrightarrow je stabilní a atraktor
- nestabilní není-li stabilní

Definice (*Oblast atraktivity*)

Věta (*Hurwitzovo kritérium*)

9 Body rovnováhy nelineárního systému

Mějme nelineární systém ve tvaru:

$$\dot{x} = P(x, y)$$

$$\dot{y} = Q(x, y)$$

Definice (Topologické sedlo) Jestliže existují trajektorie $\Gamma_i = \{x \in E; x = \varphi(t, x_i), t \in \mathbb{R}\}$ takové, že $\lim_{t \rightarrow +\infty} \varphi(t, x_i) = x_0, i = 1, 2$ a dále existují trajektorie $\Gamma_i = \{x \in E; x = \varphi(t, x_i), t \in \mathbb{R}\}$ takové, že $\lim_{t \rightarrow -\infty} \varphi(t, x) = x_0, i = 3, 4$.

A existuje-li δ -okolí bodu x_0 takové, že ostatní trajektorie systému @system vycházející z bodu $X \in N_\delta(x_0) \setminus \{x_0\}$ opustí $N_\delta(x_0)$ při $t \rightarrow +\infty$ či $t \rightarrow -\infty$. Pak se x_0 nazývá topologické sedlo a trajektorie $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4$, se nazývají separatisy.

Topologické sedlo má variety:

- Stabilní varieta S v bodě $x_0 : S = \Gamma_1 \cup \Gamma_2 \cup \{x_0\}$
- Nestabilní varieta U v bodě $x_0 : U = \Gamma_3 \cup \Gamma_4 \cup \{x_0\}$

Lemma 9.1 Bud' $E \subset \mathbb{R}^n$, E je otevřená množina, $F \in \mathcal{C}^1(E)$, $x_0 \in E$, $F(x_0) = 0$.

- Je-li x_0 hyperbolický bod rovnováhy systému @system je x_0 topologické sedlo $\Leftrightarrow x_0$ je sedlo linearizace $\dot{X} = \mathcal{D}F(x_0)$
- $F \in \mathcal{C}^2(E)$
 - ▶ Bod rovnováhy je stabilní (nestabilní) uzel $\Leftrightarrow x_0$ je stabilní respektive nestabilní uzel linearizace $\dot{X} = \mathcal{D}F(x_0)$
 - ▶ Bod rovnováhy je stabilní (nestabilní) ohnisko $\Leftrightarrow x_0$ je stabilní respektive nestabilní ohnisko linearizace $\dot{X} = \mathcal{D}F(x_0)$
- Nehyperbolický bod rovnováhy x_0 je střed linearizace. Pak x_0 je je buď
 1. Střed
 2. Ohnisko
 3. Střed-ohnisko

Definice (Sektor) Sektor je oblast ohraničená separatisami

Sektorů máme tři typy, budeme je rozlišovat pouze dle obrázků

- Hyperbolický sektor
- Parabolický sektor
- Eliptický sektor

10 Složené body rovnováhy

VI. Soustava nelineárních diferenciálních rovnic - globální chování

1 Dynamické systémy

Definice (Dynamický systém) Dynamický systém na E je zobrazení

$$\varphi : \mathbb{R} \times E \mapsto E,$$

kde E je otevřená podmnožina \mathbb{R}^n a pokud $\varphi_t(x) = \varphi(t, x)$, potom φ_t splňuje

1. $\varphi_0(x) = x$ pro $\forall x \in E$
2. $\varphi_t \circ \varphi_s(x) = \varphi_{t+s}$ pro $\forall t, s \in \mathbb{R}$ and $x \in E$

Pozorování Je-li matice A typu $n \times n$ potom funkce $\varphi(t, x) = e^{At}x$ definuje dynamický systém na \mathbb{R}^n a také platí, že pro libovolné $x_0 \in \mathbb{R}^n$ je funkce $\varphi(t, x_0)$ řešení počáteční úlohy

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax \\ x(0) &= x_0.\end{aligned}$$

Obecně, je-li $\varphi(t, x)$ dynamický systém na $E \subset \mathbb{R}^n$, pak funkce

$$f(x) = \frac{d}{dt}\varphi(t, x) \big|_{t=0}$$

definuje vektorové pole na E a pro libovolné $x_0 \in E$, je $\varphi(t, x_0)$ řešením počáteční úlohy

$$\dot{x} = f(x)$$

$$x(0) = x_0.$$

Věta (*O globální existenci*) Pro $F \in \mathcal{C}^1(\mathbb{R}^n)$ a pro $\forall x_0 \in \mathbb{R}^n$, má počáteční problém

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \frac{F(x)}{1 + |F(x)|} \\ x(0) &= x_0, \end{aligned} \tag{7}$$

jednoznačné řešení $x(t)$ definované pro $\forall t \in \mathbb{R}$, tedy (7) definuje dynamický systém na \mathbb{R}^n , dále platí že (7) je topologicky ekvivalentní k $\dot{x} = F(x)$ na \mathbb{R}^n .

2 Limitní množiny, atraktory

Uvažme autonomní systém (6) s $F \in \mathcal{C}^1(E)$, kde E je otevřená podmnožina \mathbb{R}^n . Uvedli jsme že tato rovnice definuje dynamický systém $\varphi(t, x)$ na E . Pro $x \in E$ funkce $\varphi(\cdot, x) : \mathbb{R} \mapsto E$ definuje křivku řešení, trajektorii a orbitu systému (6) procházející bodem $x_0 \in E$.

Definice (*Trajektorie*) Trajektorií bodem x_0 nazýváme množinu

$$\Gamma_{x_0} = \{x \in E : x = \varphi(t, x_0), \forall t \in \mathbb{R}\},$$

speciálně množiny

$$\Gamma_{x_0}^+ = \{x \in E : x = \varphi(t, x_0), \forall t > 0\}$$

$$\Gamma_{x_0}^- = \{x \in E : x = \varphi(t, x_0), \forall t < 0\}$$

nazýváme pozitivní respektive negativní polotrajektorie.

Definice (*Limitní body*) Necht' Γ jsou trajektorie (6). Existuje-li posloupnost $\{t_n\} \rightarrow \infty$ s $n \rightarrow \infty$ tak, že $\lim_{n \rightarrow \infty} \varphi(t_n, x_0) = P$. Pak P se nazývá ω -limitní bod trajektorie Γ .

Obobně existuje-li posloupnost $\{t_n\} \rightarrow -\infty$ s $n \rightarrow \infty$ tak, že $\lim_{n \rightarrow \infty} \varphi(t_n, x_0) = P$. Pak P se nazývá α -limitní bod trajektorie Γ .

Definice (*Limitní trajektorie*) Množina všech ω -limitních (respektive α) bodů se nazývá ω -limitní (respektive α) trajektorie a značí se $\omega(\Gamma)$ (respektive $\alpha(\Gamma)$).

Věta Množiny $\omega(\Gamma)$, $\alpha(\Gamma)$ a trajektorie Γ systému (6) jsou uzavřené podmnožiny E a jsou-li kompaktní v \mathbb{R}^n pak jsou i souvislé a neprázdné.

Věta (*Atraktující množina*) Necht' množina $A \subset E$, A je uzavřená. Pak A se nazývá atraktující množina systému (6), existuje-li okolí \mathcal{U} množiny A takové, že pro $\forall x \in \mathcal{U}$ je $\varphi(t, x) \in \mathcal{U}$ pro $t > 0$ a $\varphi(t, x) \rightarrow A$ pro $t \rightarrow \infty$. Obsahuje-li A hustou orbitu, pak se nazývá atraktorem.

Z toho vyplývá pár věcí:

- Každý bod rovnováhy x_0 systému (6) je vlastní ω i α limitní množina. ($\varphi(t, x_0) = x_0 \forall t \in \mathbb{R}$)
- Má-li trajektorie Γ systému (6) jediný ω -limitní bod x_0 , pak je to bod rovnováhy systému.
- Stabilní uzel, nebo ohnisko jsou ω -limitní množiny každé trajektorie (u nelineárních systémů pouze v nějakém okolí).
- Ne každý ω -limitní bod je atraktor, viz sedlo

3 Periodické orbity

Definice (*Periodická orbita*) Periodickou orbitou systému (6) nazýváme každou uzavřenou trajektorii systému (6), která není bodem rovnováhy systému (6).

Definice (*Stabilní periodická orbita*) Periodická orbita Γ se nazývá stabilní, jestliže pro $\forall \varepsilon > 0$ existuje okolí $\mathcal{N}_\varepsilon(\Gamma)$ křivky Γ takové, že pro $\forall x \in \mathcal{N}_\varepsilon(\Gamma)$ je $d(\Gamma_x^+, \Gamma) < \varepsilon$ tzn. $\forall x \in \mathcal{N}_\varepsilon(\Gamma)$ a $t \geq 0 \Rightarrow d(\varphi(t, x), \Gamma) < \varepsilon$.

Definice (*Nestabilní periodická orbita*) Nestabilní orbita je orbita, která není stabilní.

Definice (*Asymptoticky stabilní periodická orbita*) Asymptoticky stabilní orbita je orbita, která je stabilní a platí pro ni $\forall x \in \mathcal{N}_\varepsilon(\Gamma)$ je $\lim_{t \rightarrow \infty} d(\varphi_t(x), \Gamma) = 0$.

Pozorování

- Periodická orbita odpovídá periodickému řešení systému (6)

$$\varphi(t + T, x) = \varphi(t, x), \text{ kde } \min(T) \text{ je perioda.}$$

- Periodické orbity mají též stabilní a nestabilní variety

$$S(\Gamma) = \{x \in \mathcal{N} : d(\varphi_t(x), \Gamma) \rightarrow 0 \text{ pro } t \rightarrow +\infty\}$$

$$U(\Gamma) = \{x \in \mathcal{N} : d(\varphi_t(x), \Gamma) \rightarrow 0 \text{ pro } t \rightarrow -\infty\}$$

Věta Máme-li periodickou orbitu Γ rovinného systému (6) a existuje-li trajektorie mající Γ jako svoji ω -limitní množinu. Pak každá trajektorie v nějakém *vnějším* okolí má Γ jako ω -limitní množinu.

Této věty existují permutace pro vnější/vnitřní okolí a α / ω limitní množiny.

Definice (*Homoklinická orbita*) Je-li x^* bod rovnováhy systému (6) ω -limitní a zároveň α -limitní množinou nějaké orbity Γ systému (6), pak se Γ nazývá homoklinickou orbitou systému (6).

Definice (*Heteroklinická orbita*) Existují-li v systému (6) dva body rovnováhy x_1^*, x_2^* a je-li x_1^* ω -limitní množinou nějaké orbity Γ a současně x_2^* je α -limitní množina této orbity. Pak Γ se nazývá heteroklinická orbita.

4 Poincarého zobrazení

Definice (*Poincarého zobrazení*) Necht' Γ je periodickou orbitou systému (6) procházející bodem x_0 a necht' Σ je nadrovina kolmá na Γ v bodě x_0 . Pro $\forall x \in \Sigma$ dostatečně blízko x_0 tak, že řešení (6) procházející bodem x_0 v čase $t = 0$ prochází znovu plochou Σ v bodě $P(x)$ blízko x_0 . Pak $x \mapsto P(x)$ je Poincarého zobrazení.

Věta Necht' $E \subset \mathbb{R}^n$ je otevřená množina, $F \in \mathcal{C}^1$. Předpokládejme, že $\varphi_t(x)$ je periodické řešení (6) s periodou T a že cyklus

$$\Gamma = \{x \in \mathbb{R}^n : x = \varphi_t(x_0), 0 \leq t \leq T\}$$

je obsažen v E . Necht' Σ je ortogonální nadrovina k Γ v x_0

$$\Sigma = \{x \in \mathbb{R}^n : (x - x_0) \cdot F(x_0) = 0\}$$

Pak existuje okolí \mathcal{N}_δ a jediná funkce $\tau(x)$ definovaná a spojitě diferencovatelná pro $x \in \mathcal{N}_\delta(x_0)$ tak, že $\tau(x_0) = T$ a $\varphi_\tau(x) \in \Sigma$ pro $\forall x \in \mathcal{N}_\delta(x_0)$.

$$P(x) = \varphi_{\tau(x)}(x).$$

Pozorování Je-li $P \in \mathcal{C}^1$, $\mathcal{U} = \mathcal{N}_\delta(x_0) \cap \Sigma$, pak

- Pevné body $P(x)$ odpovídají periodickým orbitám $\varphi(\cdot, x)$ systému (6).
- K $P(x)$ existuje inverze $P^{-1} \in \mathcal{C}^1$.

4.i Poincarého zobrazení pro rovinný systém

Věta Necht' ... je počátek souřadnicového systému a je normála procházející Bod ... dělí přímkou ... na část ... uvnitř ... a na ... vně Necht' ... je vzdálenost od počátku na přímce ... pro ... na ... a pro ... na Dle definice Poincarého zobrazení definované na okolí ... a platí Použijeme ... k posouzení stability periodické orbity

Definujme posunutí po Pak Z věty o střední hodnotě ...

Věta Bud' ..., ... je otevřená množina, ..., ... je periodické řešení systému (6) s periodou Pak derivace Poincarého zobrazení ... podél přímky ... kolmé na ..., kde ... v ... je dáno jako Dále je ...

-
-
-

Definice Bud' ... Poincarého zobrazení. Pro ... rovinný periodický cyklus systému (6) a Pak ... je-li Pak se ... nazývá cyklus násobnosti ..., je-li ... pak je tzv. jednoduchý.

Pozorování Lze ukázat, že

- je-li ... sudé, pak ... je semistabilní cyklus.
- je-li ... liché, pak ...

4.ii Zobecnění pro systémy vyšších dimenzí

5 Stabilní varieta periodických orbit

Věta (*O stabilní varietě periodické orbity*)

6 Poincarého-Bendixsonova teorie

Věta

Věta

Věta

Důkaz

□

VII. Bifurkace

Definice

Věta

Věta