



OPERAČNÍ PROGRAM PRAHA
ADAPTABILITA



Příklady k přednášce 1. Úvod



Michael Šebek
Automatické řízení 2019

08.02.2019



Kyvadlo řízené momentem

- Pohybová rovnice (2. Newtonův zákon pro rotaci)

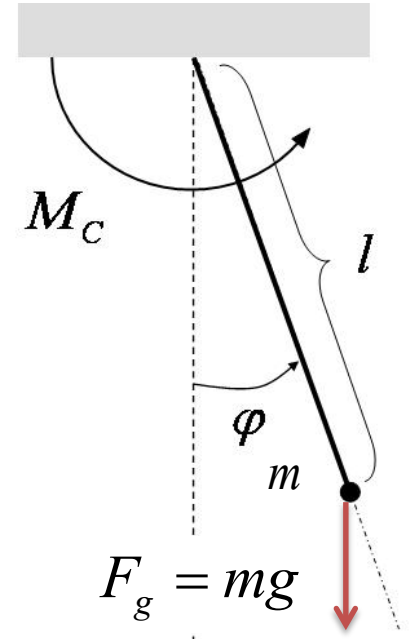
$$\begin{aligned} J\ddot{\varphi} &= \sum M \quad \text{pro moment setrvačnosti } J = ml^2 \\ &= M_c - F_g l \sin \varphi \\ &= M_c - mgl \sin \varphi \end{aligned}$$

- Nelineární model vstup-výstup s $y = \varphi, u = M_c$

$$\begin{aligned} ml^2\ddot{\varphi} + mgl \sin \varphi &= M_c \\ ml^2\ddot{y} + mgl \sin y &= u \end{aligned}$$

- Nelineární stavový model s $x_1 = \varphi = y, x_2 = \dot{\varphi} = \dot{y}, u = M_c$

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{g}{l} \sin x_1 + \frac{1}{ml^2} u \\ y &= x_1 \end{aligned}$$





Jen pro zajímavost: přesné řešení?

- Při hledání řešení (Mathieuovy) rovnice $ml^2\ddot{\varphi} + mgl \sin \varphi = 0$
- „první integrál pohybu“ (výpočtem rychlosti z kinetické energie)

$$\frac{d\varphi}{dt} = \sqrt{\frac{2g}{l} (\cos \varphi - \cos \varphi_0)}$$

- Dále bychom postupovali metodou separace proměnných

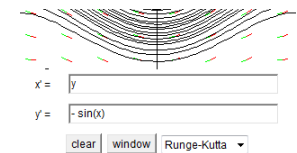
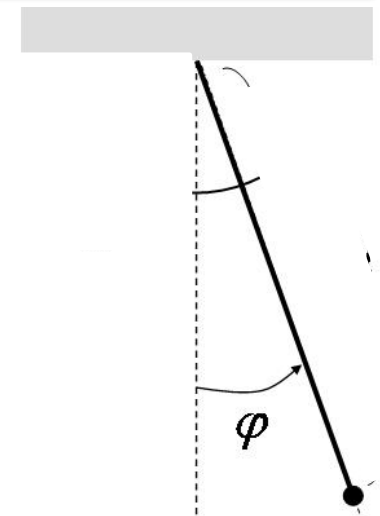
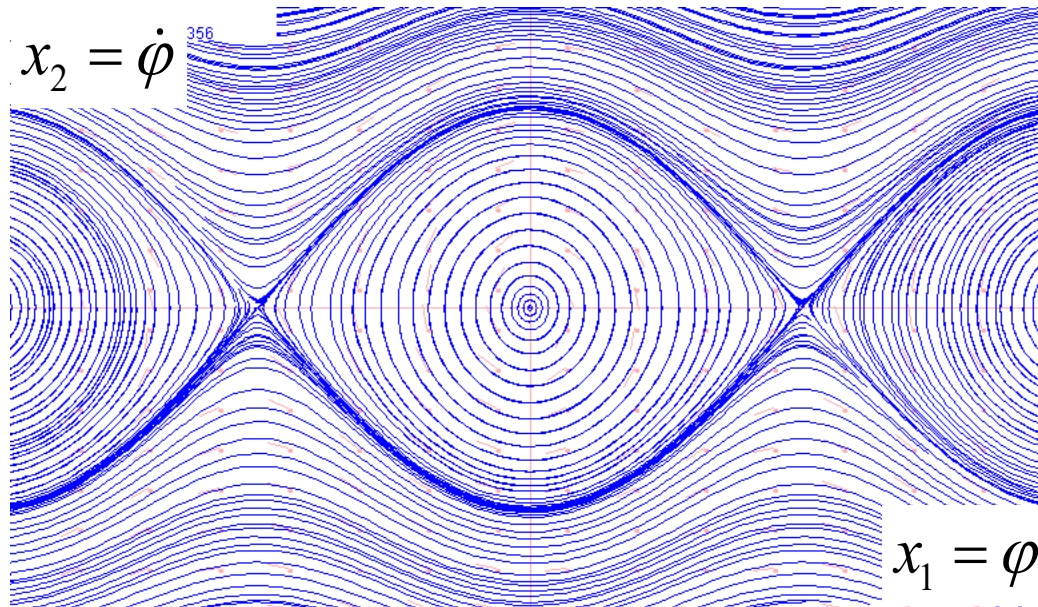
$$\frac{d\varphi}{\sqrt{\frac{2g}{l} (\cos \varphi - \cos \varphi_0)}} = dt \rightarrow \int \frac{d\varphi}{\sqrt{\frac{2g}{l} (\cos \varphi - \cos \varphi_0)}} = t + C_1$$

- To ale vede na eliptický integrál, který patří mezi tzv. neelementární (je dokázáno, že ho nelze sestavit z elementárních funkcí)
- Přesné řešení **tak jednoduché** rovnice
(v uzavřeném tvaru) tedy **neexistuje!**



- Řešení nelineárních stavových rovnic ve „fázovém prostoru“ - pro 2. řád je 2D

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\sin x_1\end{aligned}$$



- Složité křivky, nelze je popsat elementárními funkcemi
- SW: <http://www.bae.ncsu.edu/people/faculty/seaboch/phase/newphase.html>



nelineární stavový model

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2, u)$$

$$\dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2, u)$$

$$y = h(x_1, x_2, u)$$

pracovní bod

$$x_{1,p}, x_{2,p}, u_p$$

pozor: musí platit

$$\dot{x}_{1,p} = f_1(x_{1,p}, x_{2,p}, u_p)$$

$$\dot{x}_{2,p} = f_2(x_{1,p}, x_{2,p}, u_p)$$

$$y_p = h(x_{1,p}, x_{2,p}, u_p)$$

lineární odchytková aproximace

$$\Delta \dot{x}_1 = \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_{\substack{x_{1,p} \\ x_{2,p} \\ u_p}} \Delta x_1 + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_{\substack{x_{1,p} \\ x_{2,p} \\ u_p}} \Delta x_2 + \left. \frac{\partial f_1}{\partial u} \right|_{\substack{x_{1,p} \\ x_{2,p} \\ u_p}} \Delta u$$

$$\Delta \dot{x}_2 = \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right|_{\substack{x_{1,p} \\ x_{2,p} \\ u_p}} \Delta x_1 + \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right|_{\substack{x_{1,p} \\ x_{2,p} \\ u_p}} \Delta x_2 + \left. \frac{\partial f_2}{\partial u} \right|_{\substack{x_{1,p} \\ x_{2,p} \\ u_p}} \Delta u$$

$$\Delta y = \left. \frac{\partial h}{\partial x_1} \right|_{\substack{x_{1,p} \\ x_{2,p} \\ u_p}} \Delta x_1 + \left. \frac{\partial h}{\partial x_2} \right|_{\substack{x_{1,p} \\ x_{2,p} \\ u_p}} \Delta x_2 + \left. \frac{\partial h}{\partial u} \right|_{\substack{x_{1,p} \\ x_{2,p} \\ u_p}} \Delta u$$

protože pracovní bod je řešením rovnic!



Kyvadlo – stavová linearizace v obecné poloze

Nelineární
stavový
model

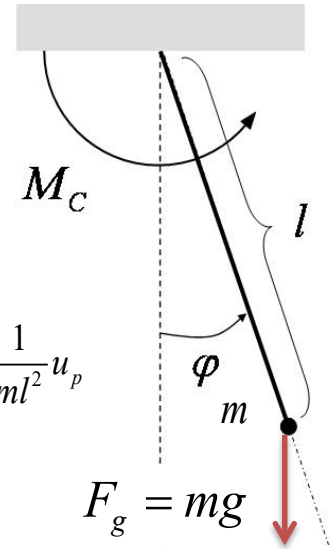
$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{g}{l} \sin x_1 + \frac{1}{ml^2} u \\ y &= x_1 \end{aligned}$$

$$x_1 = \varphi = y$$

$$x_2 = \dot{\varphi}$$

$$u = M_c$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_{1,p} &= x_{2,p} \\ \dot{x}_{2,p} &= -\frac{g}{l} \sin x_{1,p} + \frac{1}{ml^2} u_p \\ y_p &= x_{1,p} \end{aligned}$$



V obecném pracovním bodě $x_{1,p}, x_{2,p}, u_p, y_p$

$$\Delta \dot{x}_1 = 0 \times \Delta x_1 + 1 \times \Delta x_2 + 0 \times \Delta u$$

$$\Delta \dot{x}_2 = \left(-\frac{g}{l} \cos x_{1,p} + 0 \right) \times \Delta x_1 + (0 + 0) \times \Delta x_2 + \left(0 + \frac{1}{ml^2} \right) \times \Delta u$$

$$\Delta y = 1 \times \Delta x_1 + 0 \times \Delta x_2 + 0 \times \Delta u$$

a lineární odchylová
aproximace je

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x}_1 &= \Delta x_2 \\ \Delta \dot{x}_2 &= -\frac{g}{l} \cos x_{1,p} \Delta x_1 + \frac{1}{ml^2} \Delta u \\ \Delta y &= \Delta x_1 \end{aligned}$$



Kyvadlo – stavová linearizace v dolní poloze

- pracovní bod v dolní poloze

$$x_{1,p} = 0, x_{2,p} = 0, u_p = 0$$

- je ekvilibrum $\dot{x}_{1,p} = 0, \dot{x}_{2,p} = 0$
(plyne z označení stavů a nelineárních rovnic)

- dále $\cos x_{1,p} = \cos 0 = 1$, takže

- lineární odchylková aproximace
je

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x}_1 &= \Delta x_2 \\ \Delta \dot{x}_2 &= -\frac{g}{l} \Delta x_1 + \frac{1}{ml^2} \Delta u \\ \Delta y &= \Delta x_1 \end{aligned}$$

$$\leftarrow x_{1,p} = x_{2,p} = u_p = 0$$

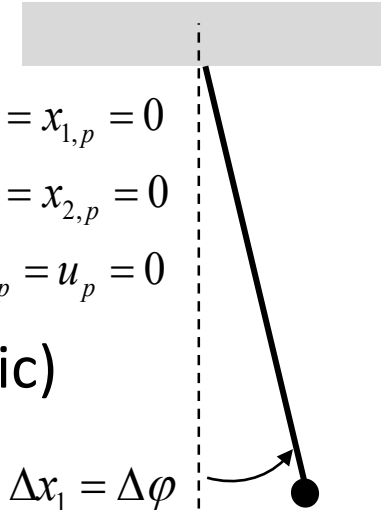
$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{g}{l} \sin x_1 + \frac{1}{ml^2} u \\ y &= x_1 \end{aligned}$$

$$\varphi_p = x_{1,p} = 0$$

$$\dot{\varphi}_p = x_{2,p} = 0$$

$$M_p = u_p = 0$$

$$\Delta x_1 = \Delta \varphi$$





Kyvadlo – stavová linearizace v horní poloze

- pracovní bod horní poloze

$$x_{1,p} = \pi, x_{2,p} = 0, u_p = 0$$

- je také ekvilibrum $\dot{x}_{1,p} = 0, \dot{x}_{2,p} = 0$
(plyne z označení stavů a nelineárních rovnic)

- dále $\cos x_{1,p} = \cos \pi = -1$, takže

- lineární odchytková aproximace
je

$$\begin{aligned}\Delta \dot{x}_1 &= \Delta x_2 \\ \Delta \dot{x}_2 &= \frac{g}{l} \Delta x_1 + \frac{1}{ml^2} \Delta u \\ \Delta y &= \Delta x_1\end{aligned}$$

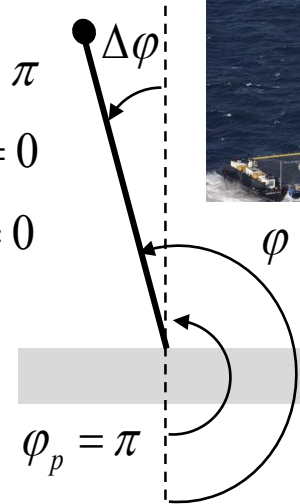
$$\begin{aligned}\leftarrow & \\ x_{1,p} &= \pi \\ x_{2,p} &= u_p = 0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{g}{l} \sin x_1 + \frac{1}{ml^2} u \\ y &= x_1\end{aligned}$$

$$\varphi_p = x_{1,p} = \pi$$

$$\dot{\varphi}_p = x_{2,p} = 0$$

$$M_p = u_p = 0$$





Kyvadlo – stavová linearizace ve vodorovné poloze

- pracovní bod ve vodorovné poloze doprava

$$x_{1,p} = \pi/2, x_{2,p} = 0, u_p = mgl$$

- je také ekvilibrrium $\dot{x}_{1,p} = 0, \dot{x}_{2,p} = 0$

(plyne z označení stavů a nelineárních rovnic)

- neboť klidový moment vyrovnává tíhové zrychlení

- dále $\cos x_{1,p} = \cos \pi/2 = 0$, takže

- lineární odchylková aproximace

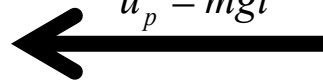
je

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x}_1 &= \Delta x_2 \\ \Delta \dot{x}_2 &= \frac{1}{ml^2} \Delta u \\ \Delta y &= \Delta x_1 \end{aligned}$$

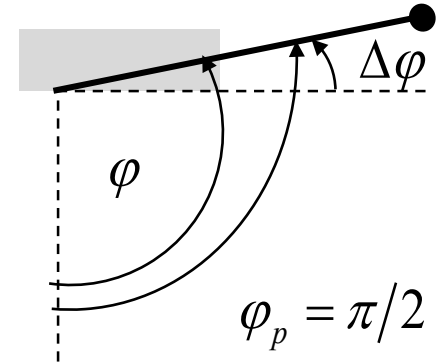
$$x_{1,p} = \pi/2$$

$$x_{2,p} = 0$$

$$u_p = mgl$$



$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{g}{l} \sin x_1 + \frac{1}{ml^2} u \\ y &= x_1 \end{aligned}$$



- „volný pád“ pro konstantní Δu



Linearizace vnějšího modelu pro SISO 2. řád

V případě LTI SISO systému 2.řádu má IO model skalární tvar

$$g(\ddot{y}, \dot{y}, y, \ddot{u}, \dot{u}, u) = 0$$

Lineární odchylková aproximace v pracovním bodě

$$\ddot{y}_p, \dot{y}_p, y_p, \ddot{u}_p, \dot{u}_p, u_p$$

je pak

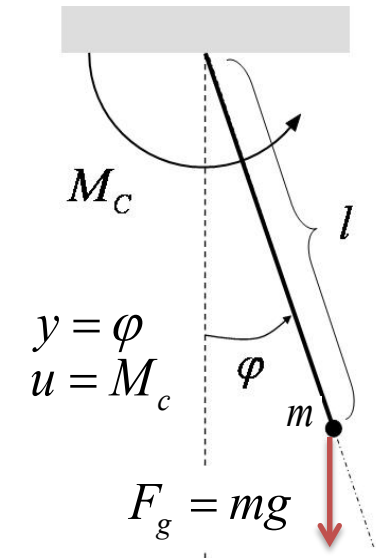
$$\left. \frac{\partial g}{\partial \ddot{y}} \right|_p \Delta \ddot{y} + \left. \frac{\partial g}{\partial \dot{y}} \right|_p \Delta \dot{y} + \left. \frac{\partial g}{\partial y} \right|_p \Delta y = - \left. \frac{\partial g}{\partial \ddot{u}} \right|_p \Delta \ddot{u} - \left. \frac{\partial g}{\partial \dot{u}} \right|_p \Delta \dot{u} - \left. \frac{\partial g}{\partial u} \right|_p \Delta u$$



Kyvadlo – vnější linearizace v obecné poloze

Nelineární model $ml^2 \ddot{y} + mgl \sin y = u$

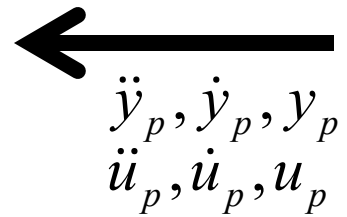
V obecném pracovním bodě $\ddot{y}_p, \dot{y}_p, y_p, \ddot{u}_p, \dot{u}_p, u_p$,
který splňuje $ml^2 \ddot{y}_p + mgl \sin y_p = u_p$



$$ml^2 \times \Delta \ddot{y} + 0 \times \Delta \dot{y} + mgl \cos y_p \times \Delta y = 0 \times \Delta \ddot{u} + 0 \times \Delta \dot{u} + 1 \times \Delta u$$

a lineární odchylková aproximace je

$$ml^2 \Delta \ddot{y} + mgl \cos y_p \Delta y = \Delta u$$



$$ml^2 \ddot{y} + mgl \sin y = u$$



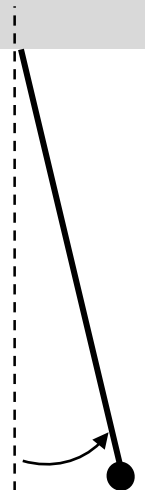
Kyvadlo – vnější linearizace v dolní poloze

- pracovní bod dolní poloze

$$\ddot{y}_p = 0, \dot{y}_p = 0, y_p = 0, \ddot{u}_p = 0, \dot{u}_p = 0, u_p = 0$$

- je ekvilibrrium
- protože $\cos y_p = \cos 0 = 1$, takže
- lineární odchytková aproximace

$$\begin{aligned} \ddot{y}_p &= \ddot{\varphi}_p = 0 \\ \dot{y}_p &= \dot{\varphi}_p = 0 \\ y_p &= \varphi_p = 0 \\ \ddot{u}_p &= \dot{M}_p = 0 \\ \dot{u}_p &= \dot{M}_p = 0 \\ u_p &= M_p = 0 \\ \Delta y &= \Delta \varphi \end{aligned}$$



$$ml^2 \Delta \ddot{y} + mgl \Delta y = \Delta u$$



$$ml^2 \ddot{y} + mgl \sin y = u$$

$$\begin{aligned} \ddot{y}_p &= 0, \dot{y}_p = 0, y_p = 0 \\ \ddot{u}_p &= 0, \dot{u}_p = 0, u_p = 0 \end{aligned}$$



Kyvadlo – vnější linearizace v horní poloze

- pracovní bod horní poloze

$$\ddot{y}_p = 0, \dot{y}_p = 0, y_p = \pi, \ddot{u}_p = 0, \dot{u}_p = 0, u_p = 0$$

- je také ekvilibrrium

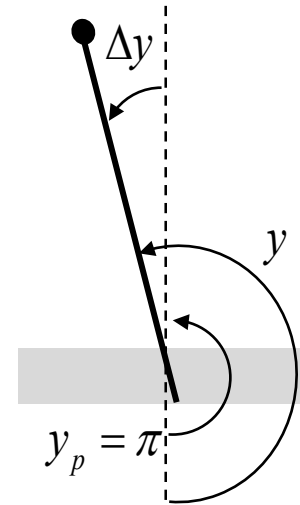
- dále $\cos y_p = \cos \pi = -1$, takže

- lineární odchytková aproximace je

$$ml^2 \Delta \ddot{y} - mgl \Delta y = \Delta u$$



$$\ddot{y}_p = 0, \dot{y}_p = 0, y_p = \pi \\ \ddot{u}_p = 0, \dot{u}_p = 0, u_p = 0$$



$$\ddot{y}_p = \ddot{\varphi}_p = 0 \\ \dot{y}_p = \dot{\varphi}_p = 0 \\ y_p = \varphi_p = \pi \\ \ddot{u}_p = \dot{M}_p = 0 \\ \dot{u}_p = \dot{M}_p = 0 \\ u_p = M_p = 0$$



Kyvadlo – vnější linearizace ve vodorovné poloze

Automatické řízení - Kybernetika a robotika

- pracovní bod ve vodorovné poloze doprava

$$\ddot{y}_p = 0, \dot{y}_p = 0, y_p = \pi/2, \ddot{u}_p = 0, \dot{u}_p = 0, u_p = mgl$$

- je také ekvilibrrium, neboť klidový moment vyrovnává vliv tíhového zrychlení

- dále $\cos \varphi_p = \cos \pi/2 = 0$, takže

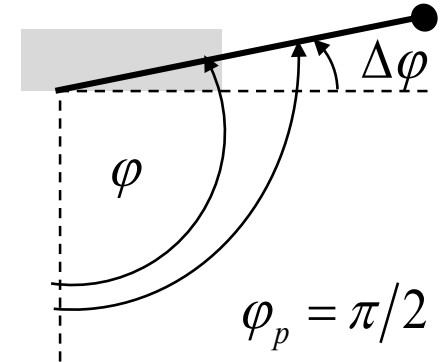
- lineární odchylková aproximace je

$$ml^2 \Delta \ddot{y} = \Delta u$$



$$ml^2 \ddot{y} + mgl \sin y = u$$

$$\ddot{y}_p = 0, \dot{y}_p = 0, y_p = \pi/2 \\ \ddot{u}_p = 0, \dot{u}_p = 0, u_p = mgl$$



- „volný pád“ pro konstantní Δu



Kyvadlo – ještě jednou totéž maticově

$$\begin{aligned}
 x_1 &= \varphi = y, x_2 = \dot{\varphi} = \dot{y}, u = M_c \\
 \dot{x}_1 &= x_2 \\
 \dot{x}_2 &= -\frac{g}{l} \sin x_1 + \frac{1}{ml^2} u \\
 y &= x_1
 \end{aligned}
 \quad
 \begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \mathbf{f} \left(\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, u \right) = \begin{bmatrix} f_1(x_1, x_2, u) \\ f_2(x_1, x_2, u) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ -\frac{g}{l} \sin x_1 + \frac{1}{ml^2} u \end{bmatrix} \\
 y &= \mathbf{h} \left(\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, u \right) = h(x_1, x_2, u) = x_1
 \end{aligned}$$

$$\mathbf{A} = \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{(\mathbf{x}_p, \mathbf{u}_p)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{bmatrix} \Bigg|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}_p \\ \mathbf{u}=\mathbf{u}_p}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{g}{l} \cos x_{1,p} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}} \right|_{(\mathbf{x}_p, \mathbf{u}_p)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u} \end{bmatrix} \Bigg|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}_p \\ \mathbf{u}=\mathbf{u}_p}} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{ml^2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \left. \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{(\mathbf{x}_p, \mathbf{u}_p)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h}{\partial x_1} & \frac{\partial h}{\partial x_2} \end{bmatrix} \Bigg|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}_p \\ \mathbf{u}=\mathbf{u}_p}} = [1 \quad 0], \quad \mathbf{D} = \left. \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{u}} \right|_{(\mathbf{x}_p, \mathbf{u}_p)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h}{\partial u} \end{bmatrix} \Bigg|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}_p \\ \mathbf{u}=\mathbf{u}_p}} = 0$$

$$\Delta \dot{x}_1 = \Delta x_2$$

$$\Delta \dot{x}_2 = -\frac{g}{l} \cos x_{1,p} \Delta x_1 + \frac{1}{ml^2} \Delta u(t)$$

$$\Delta y(t) = \Delta x_1$$



Kyvadlo - aproximace v obecné poloze

$$x_1 = \varphi = y, x_2 = \dot{\varphi} = \dot{y}, u = M_c$$

$$\Delta \dot{x}_1 = \Delta x_2$$

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{g}{l} \sin x_1 + \frac{1}{ml^2} u$$

$$\Delta \dot{x}_2 = -\frac{g}{l} \cos x_{1,p} \Delta x_1 + \frac{1}{ml^2} \Delta u(t)$$

$$y = x_1$$

$$\Delta y(t) = \Delta x_1$$

Nelineární

Lineární

dole

$$x_{1,p} = y_p = \varphi_p = 0 \quad x_{2,p} = \dot{y}_p = \dot{\varphi}_p = 0 \quad \rightarrow \quad \cos 0 = 1$$

nahore

$$x_{1,p} = y_p = \varphi_p = \pi \quad x_{2,p} = \dot{y}_p = \dot{\varphi}_p = 0 \quad \rightarrow \quad \cos \pi = -1$$

vodorovně

$$x_{1,p} = y_p = \varphi_p = \pi/2 \quad x_{2,p} = \dot{y}_p = \dot{\varphi}_p = 0 \quad \rightarrow \quad \cos \pi/2 = 0$$



Kyvadlo - aproximace IO v obecné poloze

Automatické řízení - Kybernetika a robotika

$$ml^2 \ddot{y} + mgl \sin y - u = 0$$

$$g(\ddot{y}, \dot{y}, y, u) = 0$$

$$\left. \frac{\partial g}{\partial y} \right|_p = mgl \cos y_p, \quad \left. \frac{\partial g}{\partial \dot{y}} \right|_p = 0, \quad \left. \frac{\partial g}{\partial \ddot{y}} \right|_p = ml^2, \quad \left. \frac{\partial g}{\partial u} \right|_p = -1$$

$$ml^2 \Delta \ddot{y} + mgl \cos y_p \Delta y = \Delta u$$

dole

$$x_{1,p} = y_p = \varphi_p = 0 \quad x_{2,p} = \dot{y}_p = \dot{\varphi}_p = 0 \quad \rightarrow \quad \cos 0 = 1$$

nahoře

$$x_{1,p} = y_p = \varphi_p = \pi \quad x_{2,p} = \dot{y}_p = \dot{\varphi}_p = 0 \quad \rightarrow \quad \cos \pi = -1$$

vodorovně

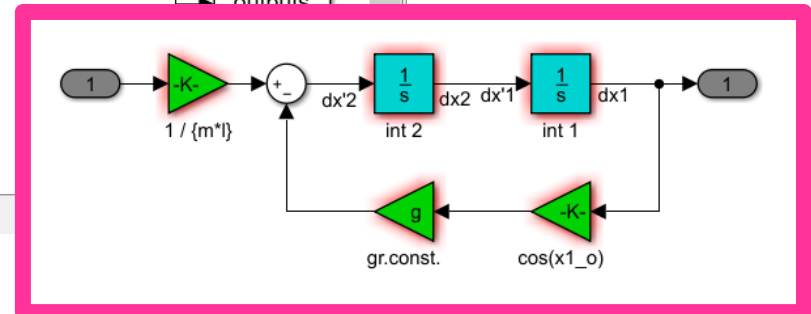
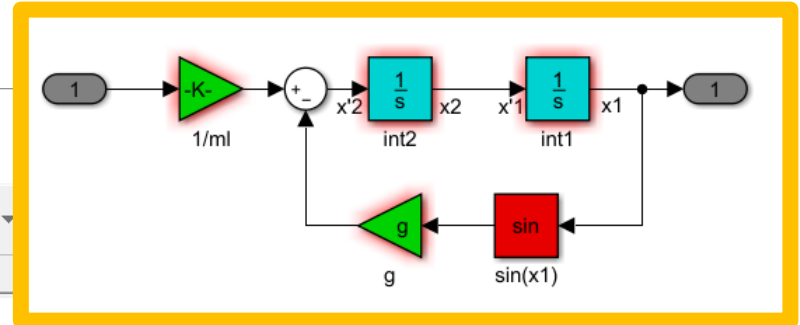
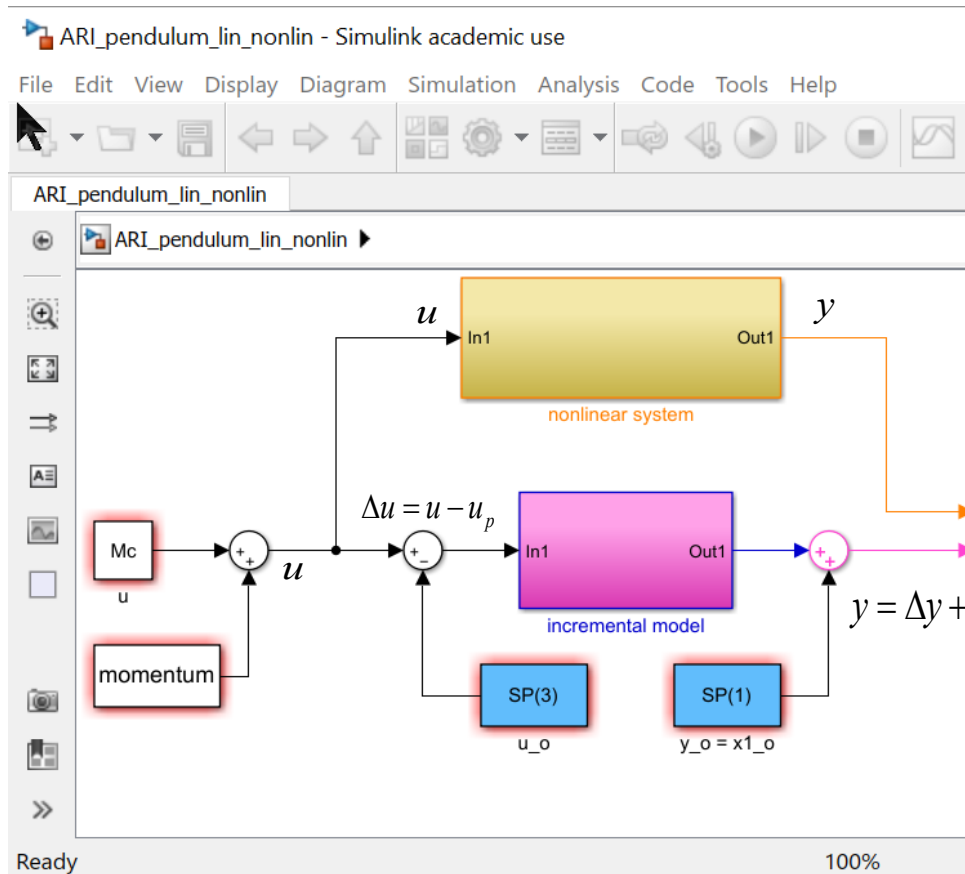
$$x_{1,p} = y_p = \varphi_p = \pi/2 \quad x_{2,p} = \dot{y}_p = \dot{\varphi}_p = 0 \quad \rightarrow \quad \cos \pi/2 = 0$$



Nelineární a linearizovaný model

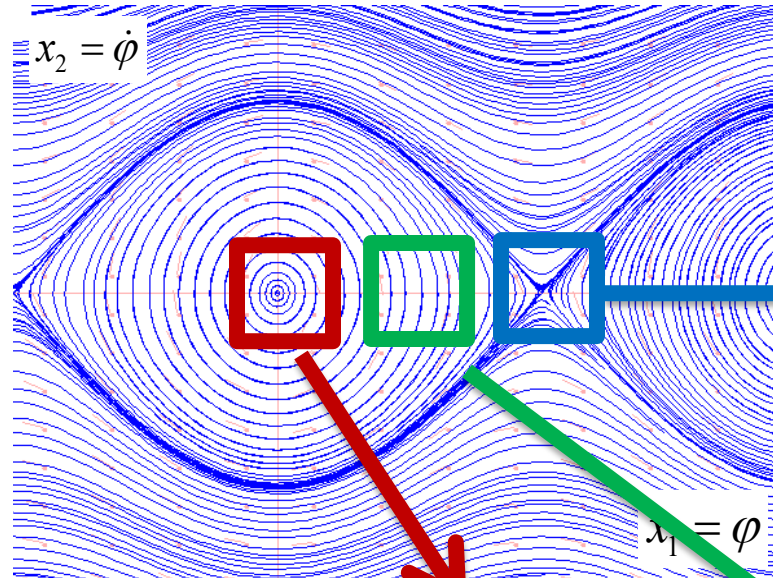
Automatické řízení - Kybernetika a robotika

ARI_pendulum_lin_nonlin





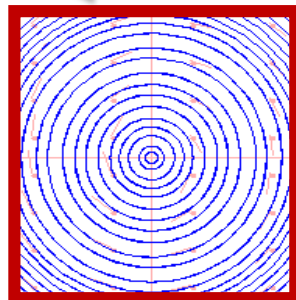
- Linearizace ve fázovém portrétu



$$x_{1p} = 0, x_{2p} = 0$$

$$\Delta \dot{x}_1 = \Delta x_2$$

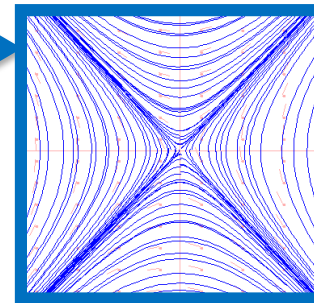
$$\Delta \dot{x}_2 = -\Delta x_1$$



kružnice

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\sin x_1 \end{aligned}$$

hyperboly



$$x_{1p} = \pi, x_{2p} = 0$$

$$\Delta \dot{x}_1 = \Delta x_2$$

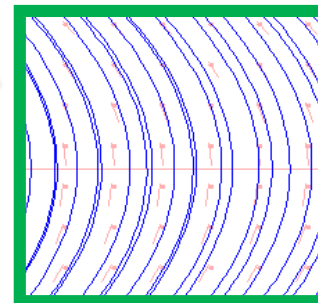
$$\Delta \dot{x}_2 = \Delta x_1$$

$$x_{1p} = \frac{\pi}{2}, x_{2p} = 0$$

$$\Delta \dot{x}_1 = \Delta x_2$$

$$\Delta \dot{x}_2 = -1$$

$$(\Delta u = -1)$$

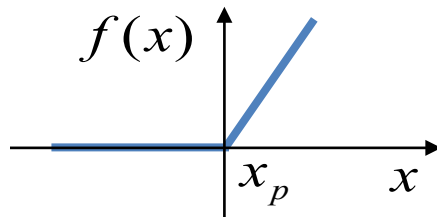


paraboly

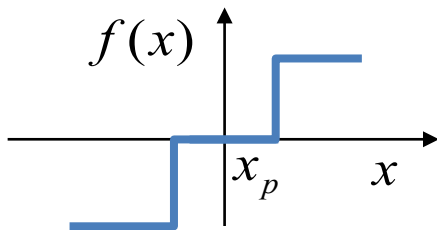
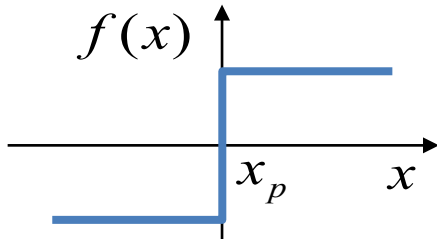


Někdy lineární aproximace neexistuje

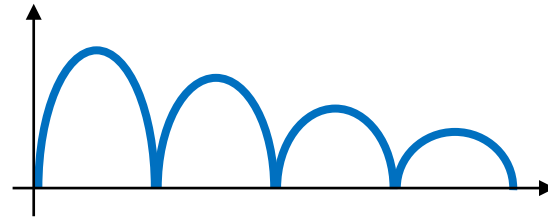
- Nehladká funkce: diody, tlumiče



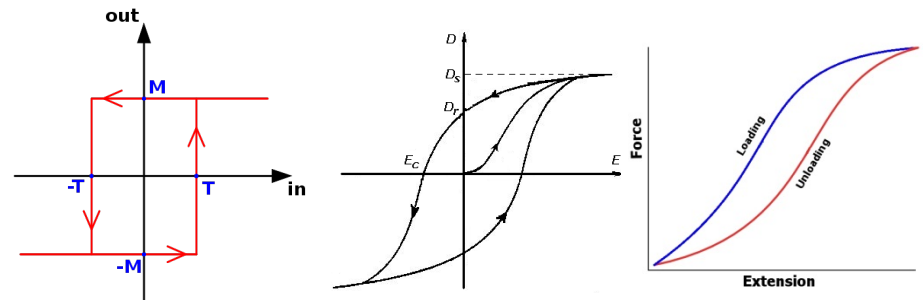
- Nespojité funkce: relé, Coulombovo tření



- Různé funkce, přepínání, (event-driven) skákající míč



- Není to funkce (v matematickém smyslu): hystereze (závislost na dráze)



elektrická: ferroelektrický materiál

elastická: gumička

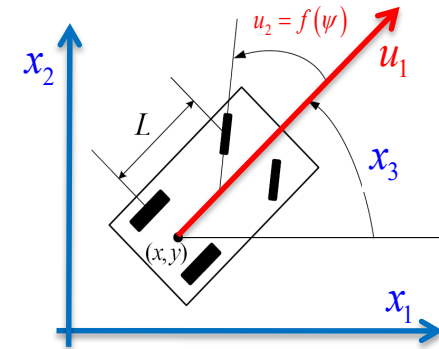
termostat, Schmidtův spínač



Někdy lineární aproximace existuje, ale nepomůže

- Některé nelineární soustavy nepomůže lineárně aproximovat
- Příklad: kinematika auta v rovině

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= u_1 \cos x_3 \\ \dot{x}_2 &= u_1 \sin x_3 \\ \dot{x}_3 &= u_2\end{aligned}$$



- Přibližná linearizace v okolí bodu (0,0,0) je

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= u_1 \\ \dot{x}_2 &= 0 \\ \dot{x}_3 &= u_2\end{aligned} \quad \text{není říditelná} \quad \mathbf{A} = \mathbf{0}_{3 \times 3}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \text{Con} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

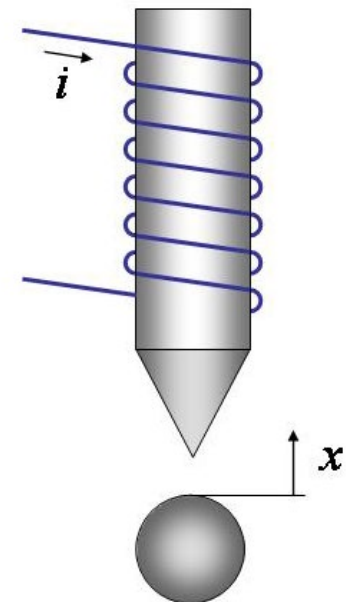
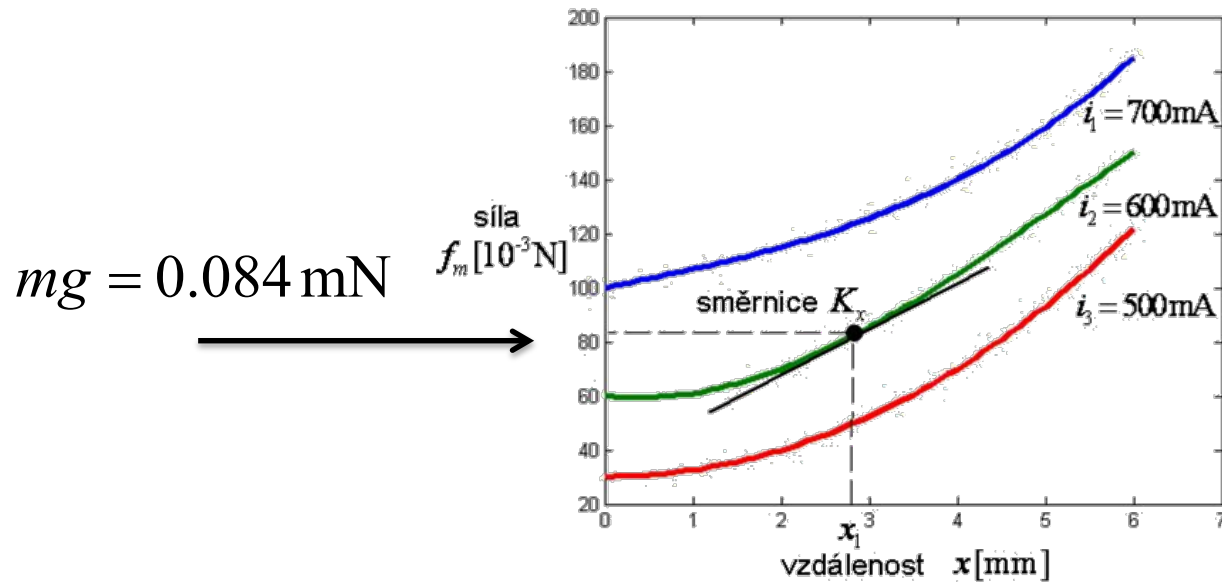
- Intuitivně známý fakt: autem nelze přímo pohnout „do strany“
- Můžeme popojíždět vpřed-vzad s střídavým natáčením kol, ale to už je nelineární řízení
- To plyne z tzv. ne-holonomického omezení $\dot{x}_1 \sin x_3 - \dot{x}_2 \cos x_3 = 0$ které platí, pokud kola nekloužou do strany



Aproximace pro nelinearity dané grafem

Magnetický levitátor s kuličkou (zjednodušené magnetické ložisko)

- rovnice pohybu kuličky $m\ddot{x} = f_m(x, i) - mg$ kde síla elektromagnetu je teoreticky $f_m(x, i) \approx 1/x^2$, ale prakticky složitější
- experimentálně změřené křivky (kulička $d = 1\text{cm}$, $m = 8,4 \cdot 10^{-3}\text{ kg}$)



- ekvilibrium = magnetická síla vyruší gravitaci



$$\ddot{x}_p = 0, i_p = 600 \text{ mA}, x_p \approx 3 \text{ mm}, f_m(x_p, i_p) = mg, m = 8,4 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

$$m\ddot{x} = f_m(x, i) - mg$$

$$m(0 + \Delta\ddot{x}) = f_m(x_p, i_p) + \left. \frac{\partial f_m}{\partial x} \right|_{x_p, i_p} \Delta x + \left. \frac{\partial f_m}{\partial i} \right|_{x_p, i_p} \Delta i - mg$$

$$m\Delta\ddot{x} = \left. \frac{\partial f_m}{\partial x} \right|_{x_p, i_p} \Delta x + \left. \frac{\partial f_m}{\partial i} \right|_{x_p, i_p} \Delta i$$

určíme z grafu
jako směrnici

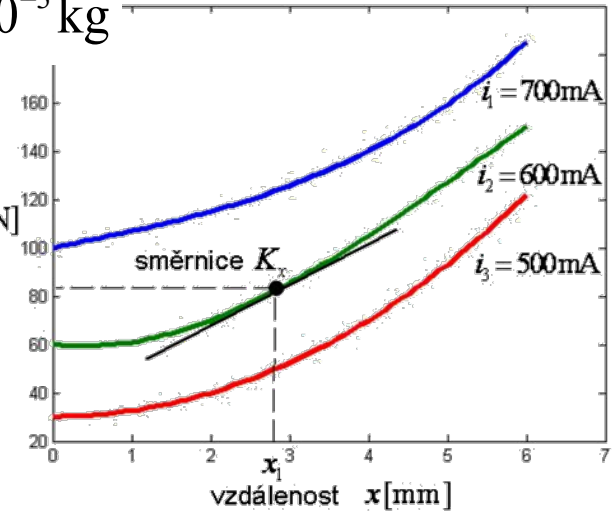
$$\left. \frac{\partial f_m}{\partial x} \right|_{x_p, i_p} \cong 14 \text{ N/m}$$

odhadneme z grafu

$$\left. \frac{\partial f_m}{\partial i} \right|_{x_p, i_p} \cong \frac{f(x_p, i_1) - f(x_p, i_3)}{i_1 - i_3} = \frac{122 \times 10^{-3} - 42 \times 10^{-3}}{(700 - 500) \times 10^{-3}} = 0.4 \text{ N/A}$$

Lineární aproximace je

$$\Delta\ddot{x} = 1667\Delta x + 47,6\Delta i$$



kde signály jsou v jednotkách SI $\Delta x[\text{m}], \Delta i[\text{A}]$

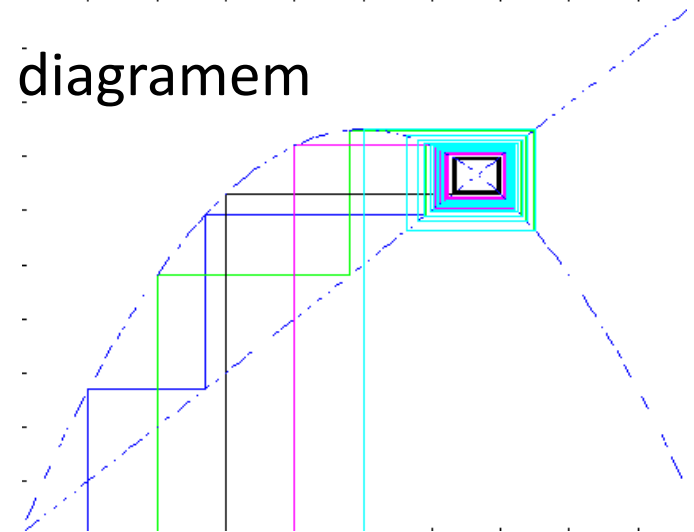
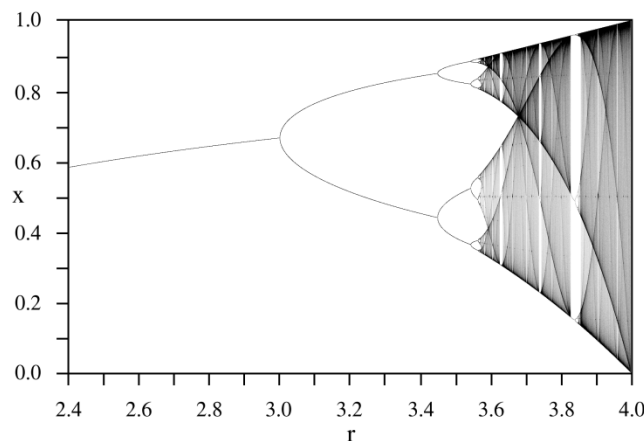


- Logistické zobrazení

$$x(k+1) = rx(k)(1-x(k))$$

- demografický model - vystihuje 2 jevy: pro malé populace optimismus (míra růstu roste úměrně s velikostí populace), pro velké populace vyhladovění (míra růstu klesá úměrně rozdílu „úživnost prostředí“ minus velikost populace)
- chování silně závisí na parametru r

řešení pavučinovým diagramem



- bifurkace