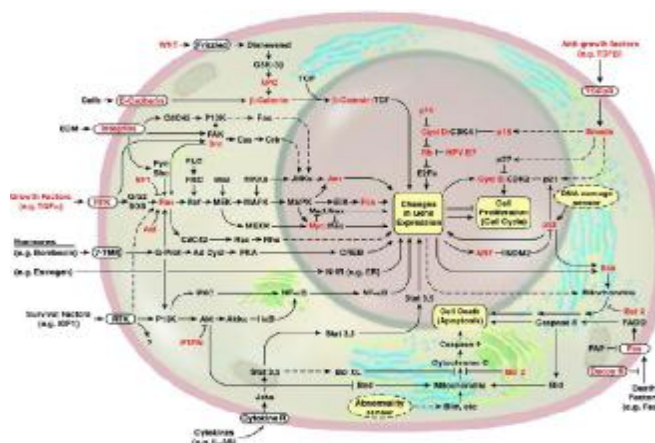


# Automatické řízení: skrytá technologie

Brzy bude téměř všechno inteligentní

Miloš Schlegel  
ZČU v Plzni, FAV, Katedra kybernetiky  
Říjen, 2007

## Signálové obvody savčí buňky

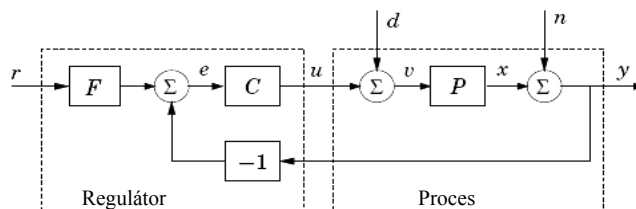


## Obsah

- Úvodní mini-kurz automatického řízení
- Historická exkurze
- FAV / KKY a Rexcontrols: pro praxi
- Mechatronická laboratoř
- Video z naší laboratoře
- Závěr

## Úvodní mini-kurz automatického řízení

## Zpětnovazební řízení



### Součásti regulační smyčky:

$P$  řízený systém (proces)

$C$  zpětnovazební regulátor

$F$  dopředný filtr

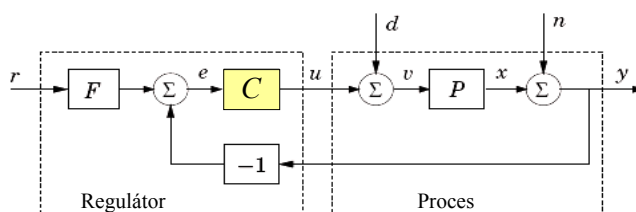
$r$  požadovaná (referenční) veličina

$e$  regulační odchylka

$d$  porucha na vstupu procesu

$n$  porucha na výstupu procesu (šum měření)

## Návrh regulátoru



### Základní požadavky na funkci regulační smyčky:

Zajistit aby regulovaná veličina  $y$  sledovala požadovanou hodnotu  $r$

Zajistit necitlivost chování smyčky ke změnám procesu  $P$

Potlačit vliv poruchy  $d$  na regulovanou veličinu  $y$

Potlačit vliv šumu  $n$  na akční veličinu  $u$



Stabilita, Robustnost, Kvalita řízení

## Prakticky neřiditelný systém



## Obtížně říditelný systém

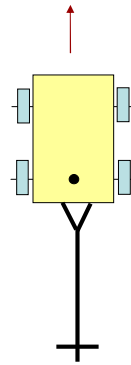


## Další obtížně říditelné soustavy

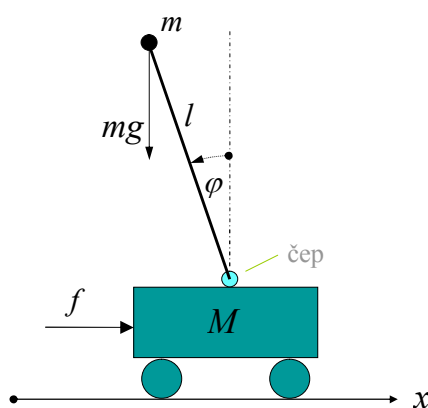
Start raketoplánu



Tlačení vozíku



## Inverzní kyvadlo na vozíku



- $m$  hmota kyvadla
- $l$  délka kyvadla
- $g$  gravitační zrychlení
- $M$  hmota vozíku
- $f$  urychlovací síla
- $\varphi$  úhel kyvadla
- $x$  poloha vozíku
- $J$  moment setrvačnosti kyvadla

## Dynamický systém

### Autonomní systém

$$\dot{x} = f(x), \quad x(0) = x_0 \quad (*)$$

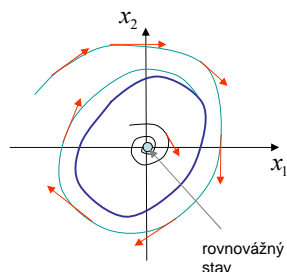
$$x \in \mathbb{R}^n, f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$$

$x$  je stav systému

$\dot{x}$  je rychlost pohybu stavu ve stavovém prostoru

$f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$  je vektorové pole definující  $\dot{x}$

množina rovnovážných stavů  $\hat{=} \{x: f(x) = 0\}$

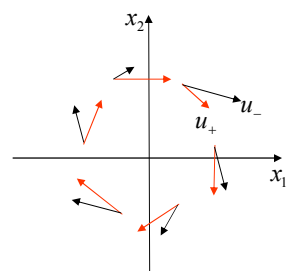


### Systém s řízením

$$\dot{x} = f(x, u), \quad x(0) = x_0 \quad (**)$$

$$x \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}^m, f: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$$

řízení  $u$  řídí vektorové pole  $f(x, u)$



### Lineární systém

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad x(0) = x_0 \quad (***)$$

$$x \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}^m, A \in \mathbb{R}^{n \times n}, B \in \mathbb{R}^{n \times m}$$

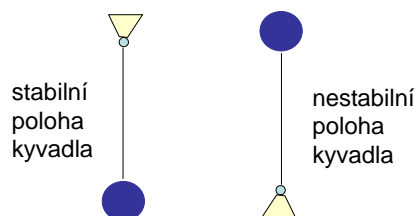
## Stabilita

### Stavový model lineárního systému

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad x(0) = x_0 \quad (***)$$

$$x \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}^m, A \in \mathbb{R}^{n \times n}, B \in \mathbb{R}^{n \times m}$$

Systém (\*\*\*) je stabilní, jestliže všechna vlatní čísla matice  $A$  mají zápornou reálnou část.



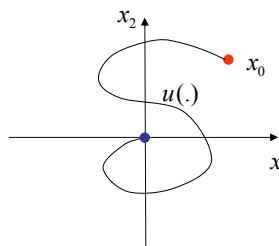
## Řiditelnost

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad (*)$$

$$x \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}^m, A \in \mathbb{R}^{n \times n}, B \in \mathbb{R}^{n \times m}$$

$x$  je stav systému,  $u$  je řízení

Systém (\*) je říditelný, jestliže je libovolný počáteční stav  $x_0$  převoditelný řízením  $u$  na konečném intervalu do počátku stavového prostoru  $\mathbb{R}^n$ .



Systém (\*) je říditelný právě tehdy, jestliže

$$\text{rank} \begin{bmatrix} B & AB & \dots & A^{n-1}B \end{bmatrix} = n.$$

## Stavová zpětná vazba

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad (*)$$

$$x \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}^m, A \in \mathbb{R}^{n \times n}, B \in \mathbb{R}^{n \times m}$$

Zpětnou vazbu

$$u = Fx, \quad F \in \mathbb{R}^{m \times n}$$

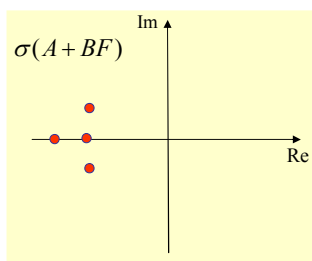
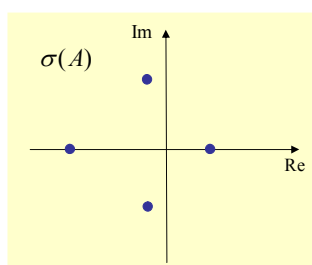
nazýváme **lineární stavovou** zpětnou vazbou.

Uzavřený systém je potom popsán rovnicí

$$\dot{x} = (A + BF)x$$

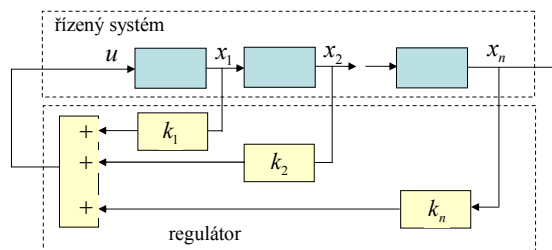
Jestliže je systém (\*) říditelný, potom mu lze přiřadit stavovou zpětnou vazbu libovolná vlastní čísla. Tedy pro libovolnou symetrickou množinu<sup>1</sup>  $\Lambda = \{\lambda_1, \dots, \lambda_n\}$  existuje stavová zpětná vazba  $F$  takova, že  $\Lambda$  tvoří množinu vlastních čísel matice  $A + BF$  (neboli  $\sigma(A + BF) = \Lambda$ ).

<sup>1</sup>  $\Lambda$  je symetrická jestliže  $\lambda \in \Lambda \Rightarrow \bar{\lambda} \in \Lambda$

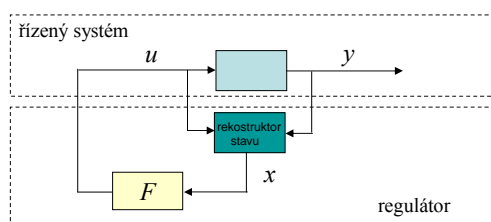


## Realizace stavového regulátoru

Stav řízeného systému je měřitelný.



Stav řízeného systému je neměřitelný.



## Příklad: regulace rychlosti automobilu

$$F_m - F_o = ma$$

$$ku - bv = m\dot{v}$$

$$m\dot{v} + bv = ku$$

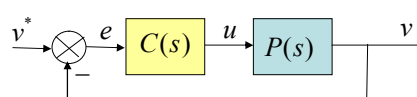
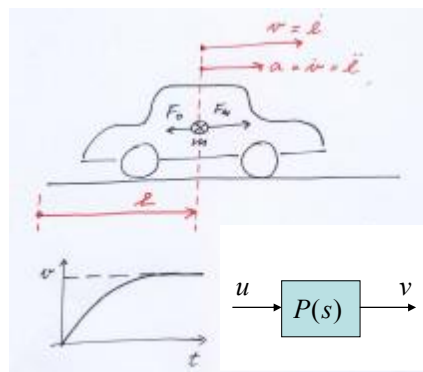
$$msV(s) + bV(s) = kU(s)$$

$$(ms + b)V(s) = kU(s)$$

Přenos mezi řízením  $u$  a rychlostí  $v$ :

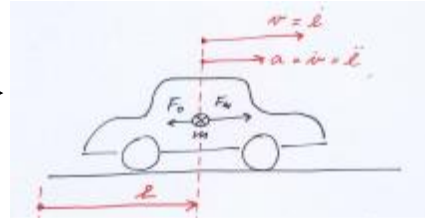
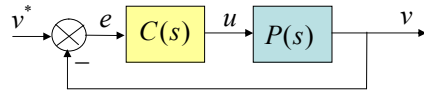
$$P(s) = \frac{V(s)}{U(s)} = \frac{k}{ms + b}$$

Návrh regulátoru rychlosti spočívá v nalezení vhodného přenosu regulátoru  $C(s)$ , který zajistí  $v^*(t) = v(t), \forall t$ .





## PI regulátor

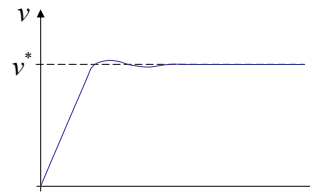


Zákon řízení PI regulátoru

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau$$

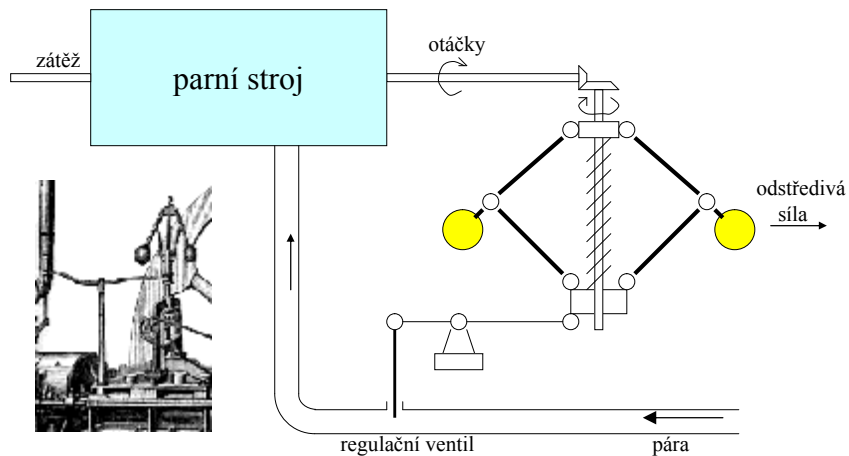
$K_p$  a  $K_I$  jsou návrhové parametry regulátoru.

PI regulátor reguluje na nulovou odchylku v ustáleném stavu při konstantní poruše a požadované hodnotě.



## Historická exkurze

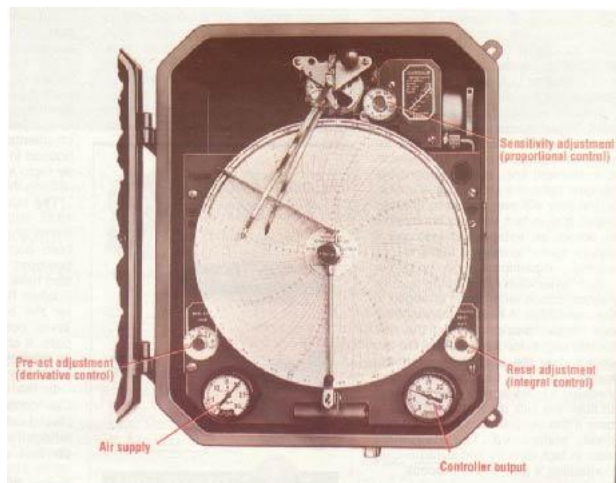
## Wattův odstředivý regulátor (1781)



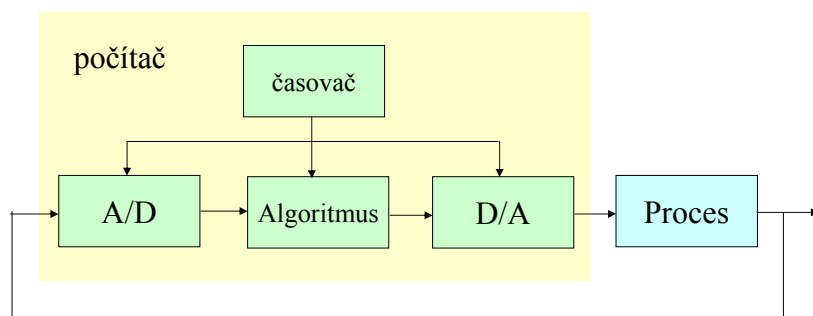
## Wattův odstředivý regulátor

- Nejstarší odstředivé regulátory pracovaly uspokojivě.
- Vážné problémy nastaly kolem roku 1868: 75 000 regulátorů v Anglii kmitalo!
- Královský astronom Airy (1840, 1851)
- První teoretická práce o zpětné vazbě Maxwell (článek „On governors“, 1868)
- Vyšněgradského analýza (1876)

## První průmyslový PID regulátor Taylor Instruments (1940)



## Řízení počítačem 1955\*



pionýrské období 1955, přímé číslicové řízení 1962, minipočítače 1967, mikropočítače 1972, programovatelné automaty, signálové procesory 1980, víceprocesorové prostředky 1990

## Současný průmyslový regulátor



## Příklad ze současnosti

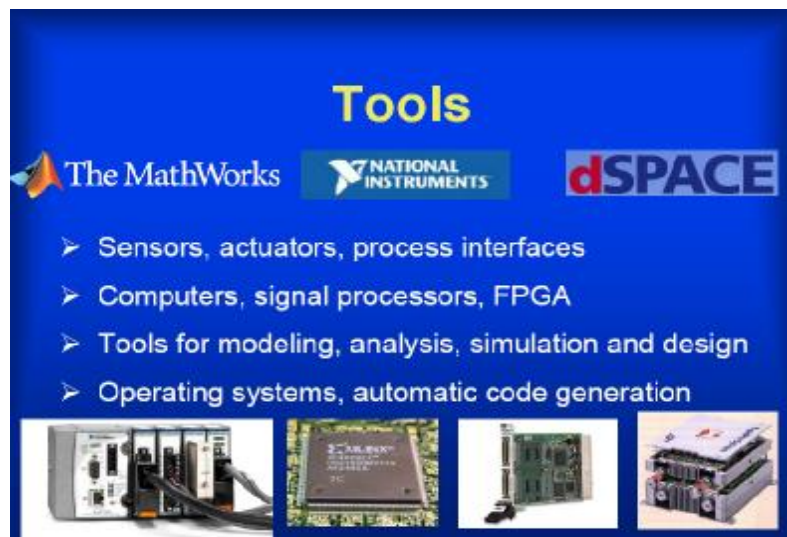
### Osobní vozítko



Nakloň se dopředu a pojedeš dopředu.  
Nakloň se více a pojedeš rychleji.  
Narovnej se a zastavíš.  
Nakloň se dozadu a pojedeš dozadu.  
Otoč zápěstím na příslušnou stranu a zatočíš.

## Vložené systémy

- Odhaduje se, že v roce 2010 bude kolem 90% veškerého programového kódu implementováno do vložených systémů. Kolem roku 2020 bude téměř všechno inteligentní.
- Dramaticky vzroste složitost. Např. vložené systémy do automobilu budou obsahovat: tisíce funkcí, 10M řádek kódu, 5 různých sběrnic, 80 mikrokontrolérů.
- Jak takové systémy spolehlivě navrhovat, oživovat a aktualizovat?



**Tools**

The MathWorks NATIONAL INSTRUMENTS dSPACE

- Sensors, actuators, process interfaces
- Computers, signal processors, FPGA
- Tools for modeling, analysis, simulation and design
- Operating systems, automatic code generation

The slide features four small images at the bottom: a rack of electronic modules, a close-up of a circuit board with a large chip, a single circuit board, and a multi-bay hardware device.

## Rapid Prototyping

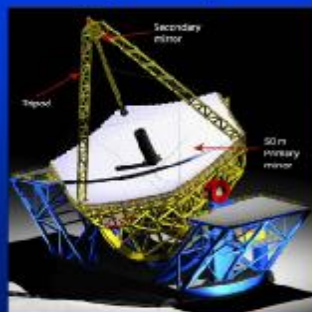


Driven: "We prototyped a full-authority engine control system ... in just 3 man-months. In past projects, it took us at least 2 man-years and over \$500,000 to develop similar ECU systems."

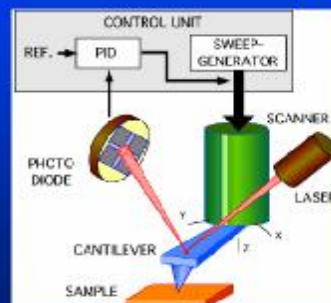


## Instruments Giga to Nano

### Adaptive Optics



### Atomic Force Microscope



## DLR Robots and Hands

*LWR III: 7 joints weight/load ~ 1*

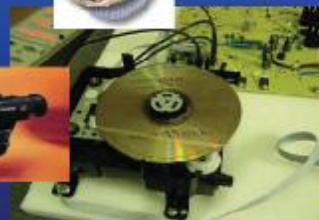
*150 W, 3 cables*

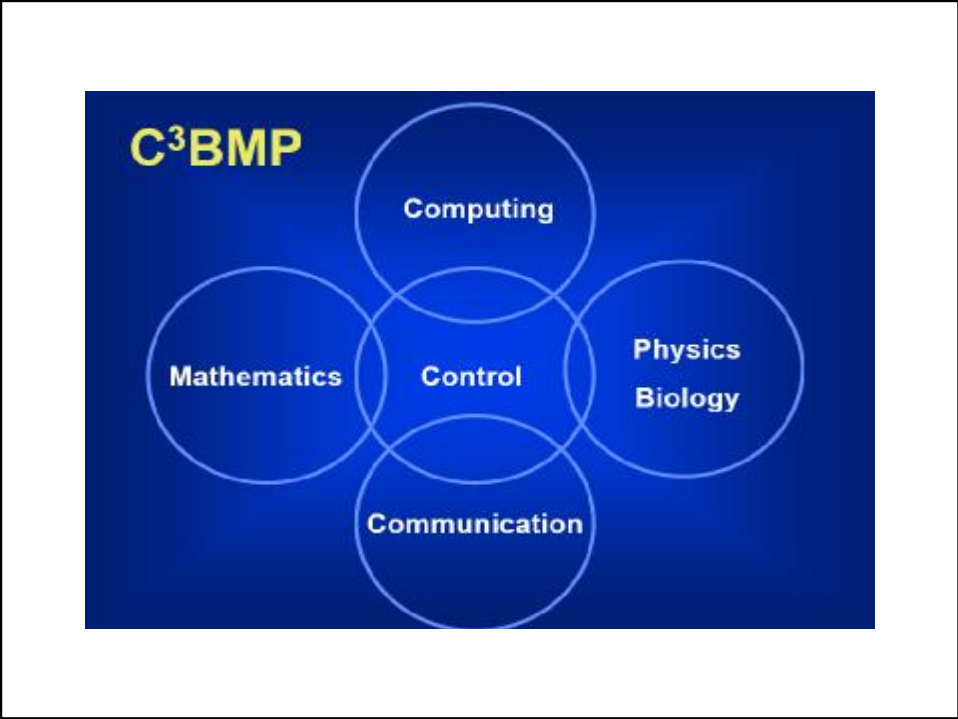
*Hand II: 13 joints 3 kg finger force*



*Gerd Hirzinger DLR*

## Consumer Electronics

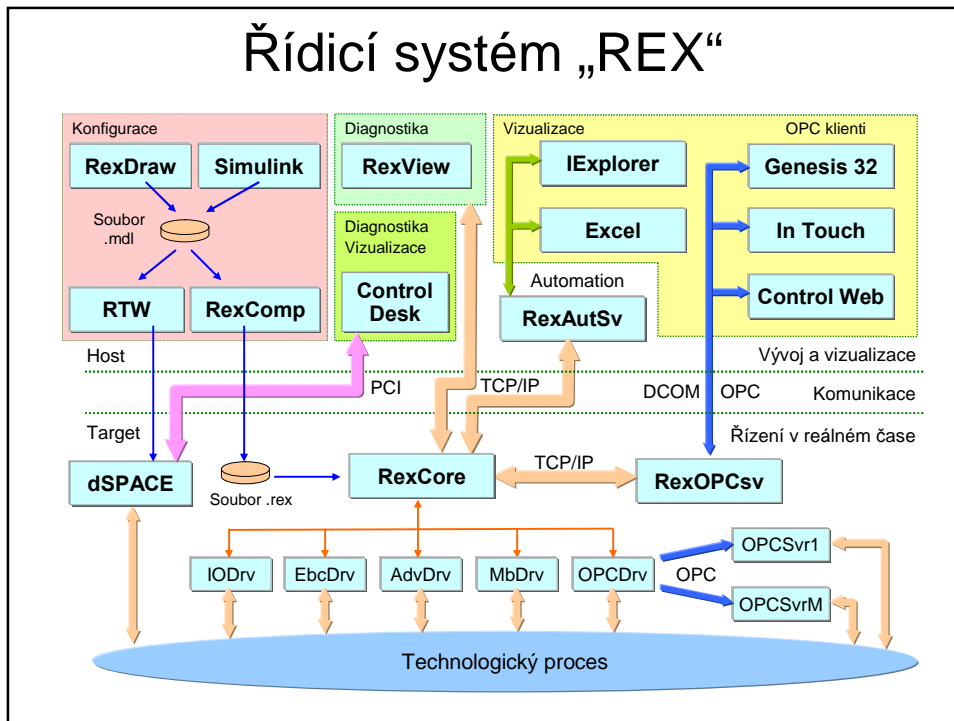




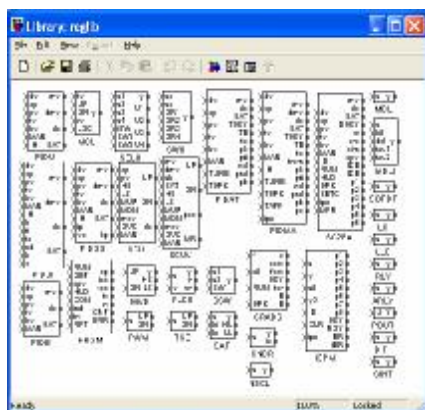
**KKY a Rexcontrols: pro praxi**



# Řídicí systém „REX“

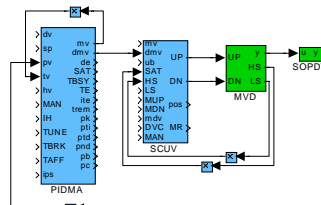


## Knihovna pokročilých algoritmů pro vložené řízení



### Inteligentní regulátory:

- PID s automatickým nalaďením
- Regulátor pro aktivní tlumení vibrací s automatickým nalaďením
- Prediktivní regulátor
- Regulátor teploty s klouzavým režimem a automatickým nalaďením



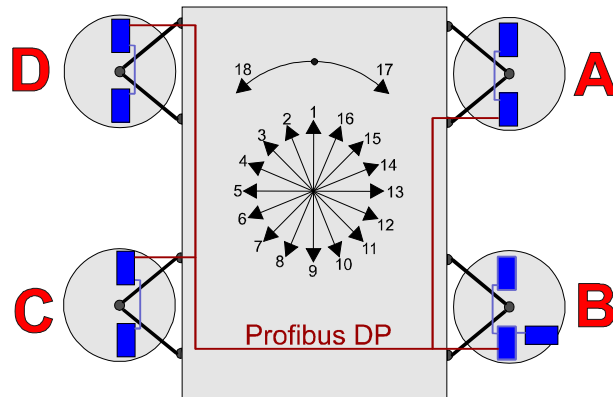
## Poháněcí stanice pasové dopravy na krácejícím pontonu



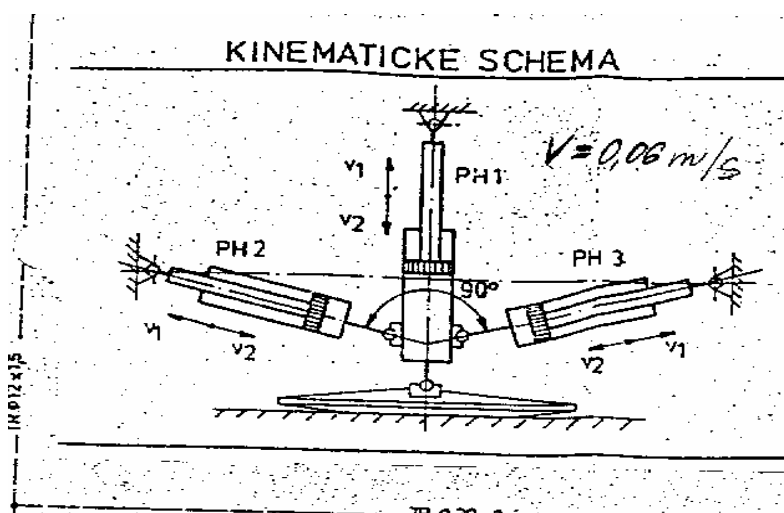
## Krácející ponton



## Kráčející ponton – pohled shora



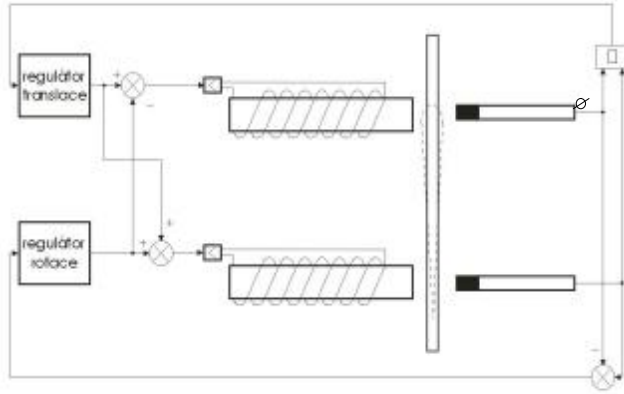
## Hydraulický systém „tlapy“ se třemi stupni volnosti



## Aktivní tlumení vibrací

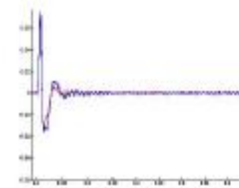
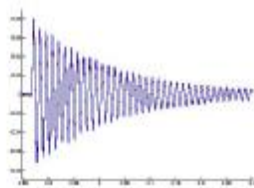


## Princip aktivního tlumení lopatky

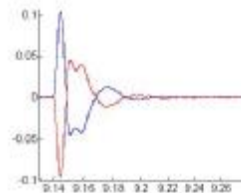
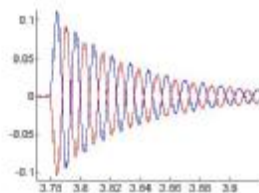


## Výsledky regulace

Řízení stavovou zpětnou vazbou navrženou technikou přiřazení pólů

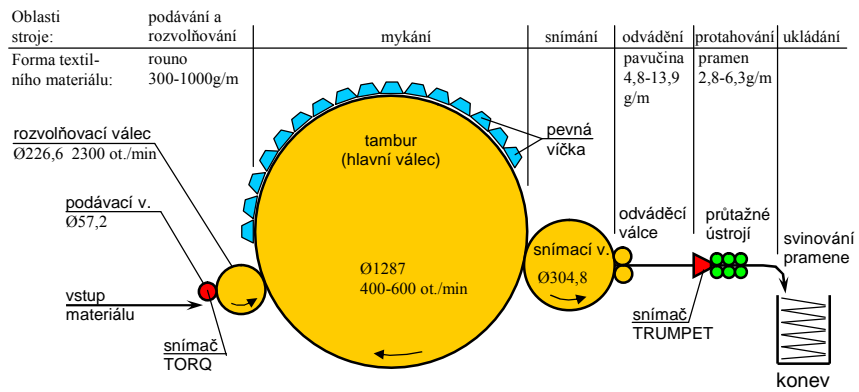


Posuv bez regulace a s regulací



Natočení bez regulace a s regulací

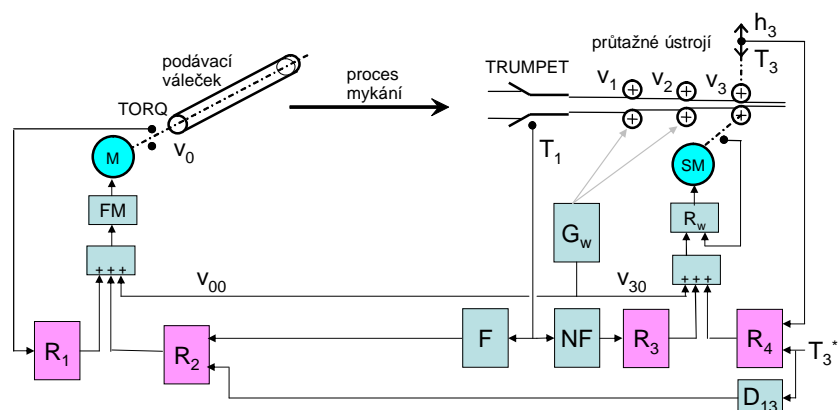
## Mykací stroj



## Průtažné zařízení mykacího stroje

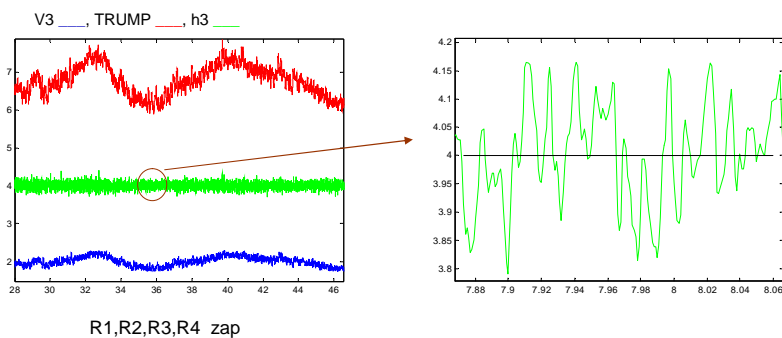


## Princip regulace

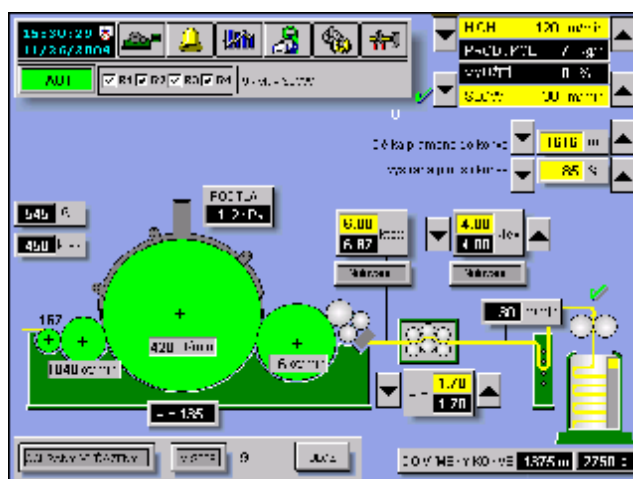


- $R_1$  dopředná vazba od momentu na podávacím válečku (TORQ)
- $R_2$  zpětnovazební regulace od jemnosti pramene před průtahem (TRUMPET)
- $R_3$  dopředná vazba od jemnosti pramene před průtahem (TRUMPET)
- $R_4$  zpětnovazební regulace od výstupní jemnosti pramene ( $h_3$ )

## Experimentální vyhodnocení



## Operátorský interface





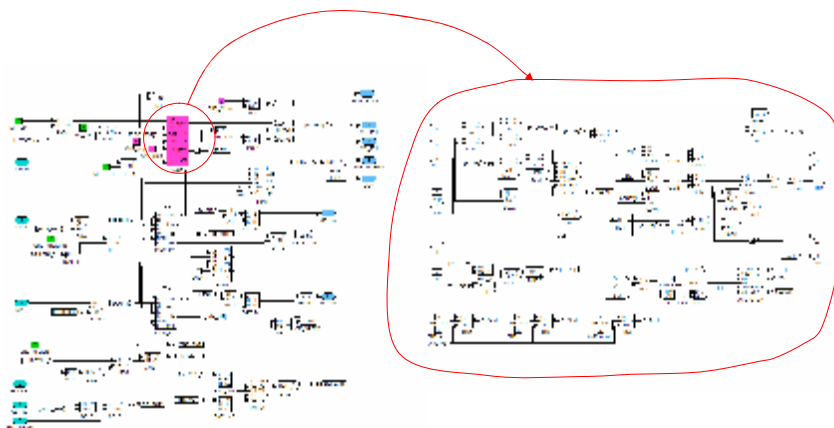
## Tryskový stav nové generace



## Zkušební provoz



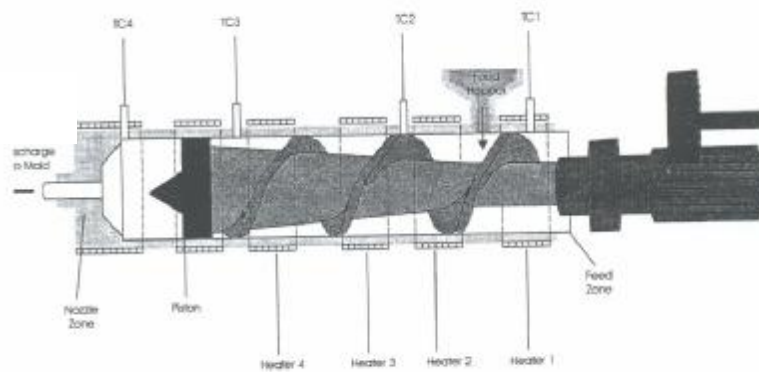
## Řízení motorů



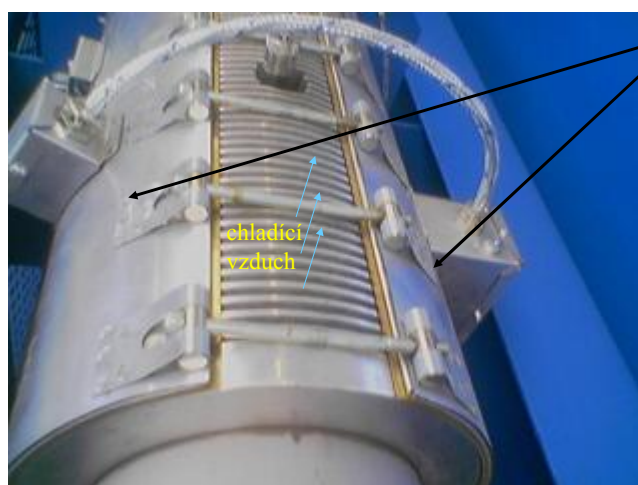
## Regulace teploty v zónách plastikářského lisu



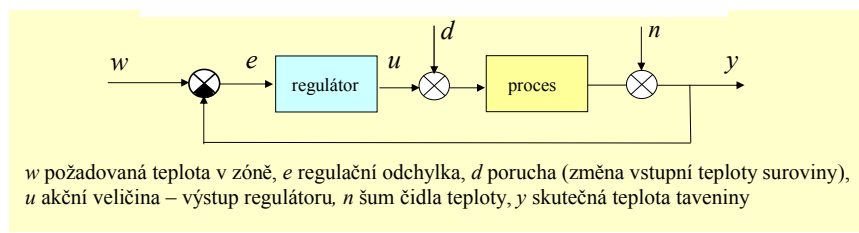
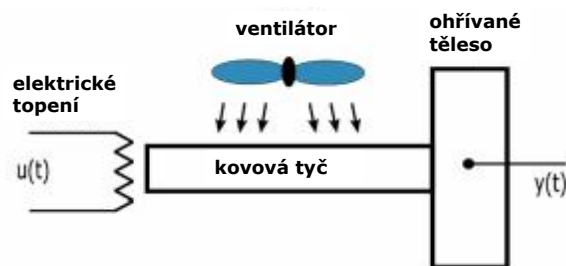
## Princip funkce plastikářského lisu



## Zóna s elektrickým topením a vzduchovým chlazením

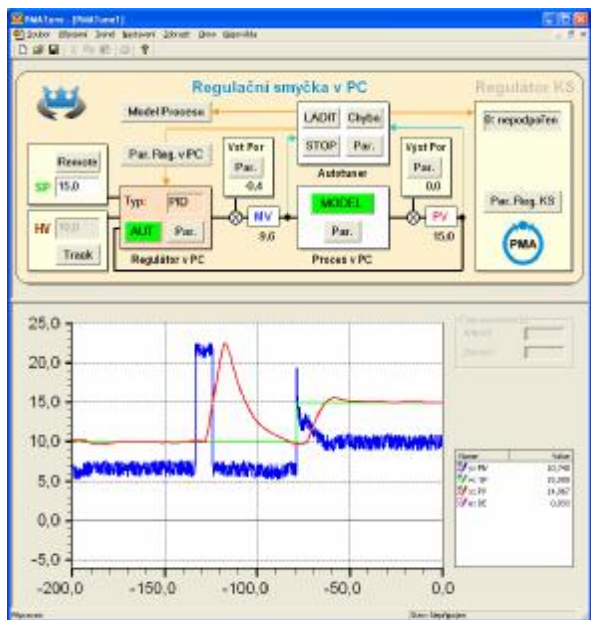


### Zjednodušený fyzikální model pro jednu zónu



PC program  
pro ladění PID  
regulátorů

PMA Tune



## Průmyslový regulátor s PID autotunerem vyvinutým na FAV



[www.pidlab.com](http://www.pidlab.com)

Applet PIDLab

Tvarování Nyquistovy křivky

jedním "tvarovacím bodem" :

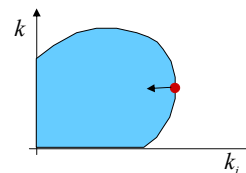
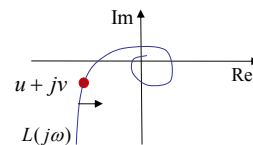
$$P(j\omega) = a(\omega) + jb(\omega)$$

$$C_{PI}(j\omega) = k - j \frac{k_i}{\omega}$$

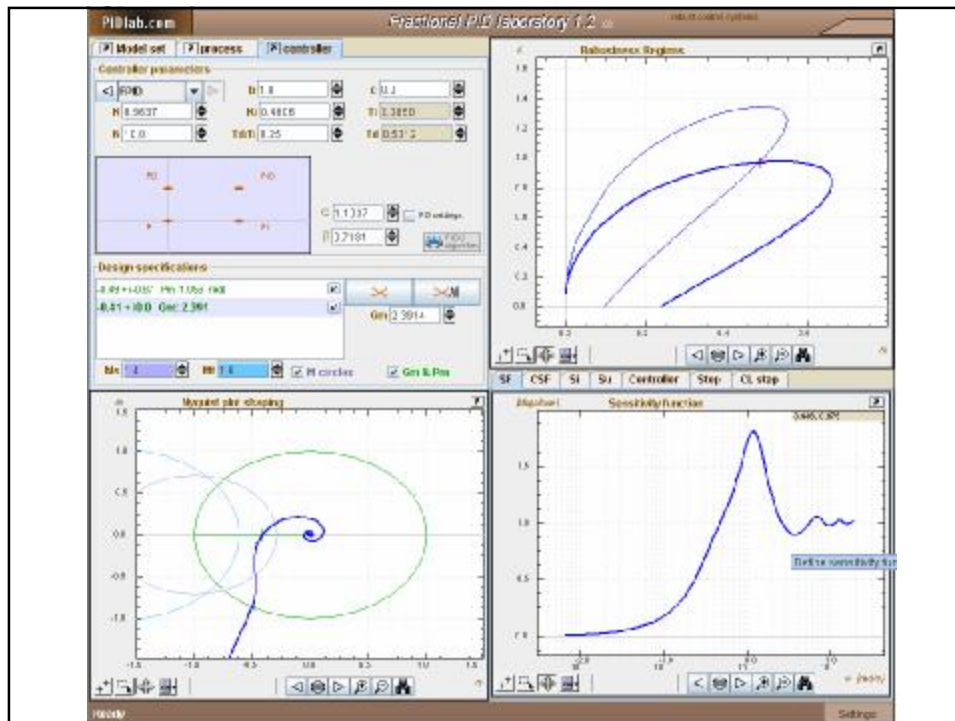
$$L(j\omega) = \left( k - j \frac{k_i}{\omega} \right) (a(\omega) + jb(\omega)) = u + jv$$

$$k = \frac{a(\omega)u + b(\omega)v}{a^2(\omega) + b^2(\omega)}$$

$$k_i = \frac{[a(\omega)v - b(\omega)u] \omega}{a^2(\omega) + b^2(\omega)}$$

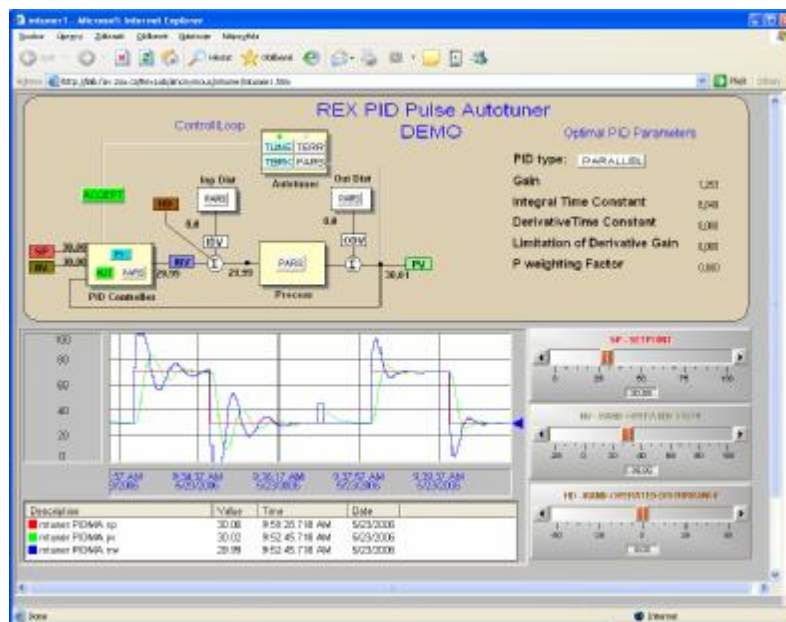


SCHLEGEL, M.; MERTL, J.; ČECH, M. Generalized robustness regions for PID controllers. In Process Control '03. Bratislava : Slovaca University of Technology, 2003. s. 108-114. ISBN 80-227-1902-1.  
VEČEREK, O.; SCHLEGEL, M. Design of H-infinity PI controllers by robustness regions method. In Process control 2004. Pardubice : University of Pardubice , 2004. s. 1-9. ISBN 80-7194-662-1.



## Mechatronická laboratoř

## Vzdálená a virtuální laboratoř AŘ



## Rotační inverzní kyvadlo

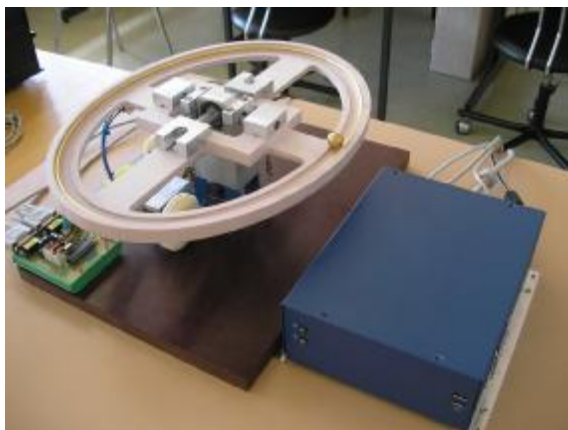


## Míč na rotujících discích

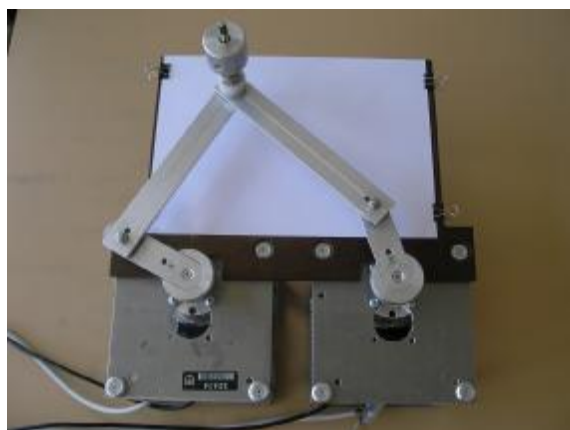




## Kulička na elipse



## Planární robot



## Aktivní tlumení vibrací



## Dvoukolové vozítko



## Laboratorní model procesu s topením a chlazením

