Návrh jednoduchých robustních regulátorů a jejich realizace pomocí programovatelného automatu Simatic S7-300

Radek Matušů

Ústav automatizace a řídicí techniky
Fakulta aplikované informatiky
Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Česká republika

E-mail: rmatusu@fai.utb.cz

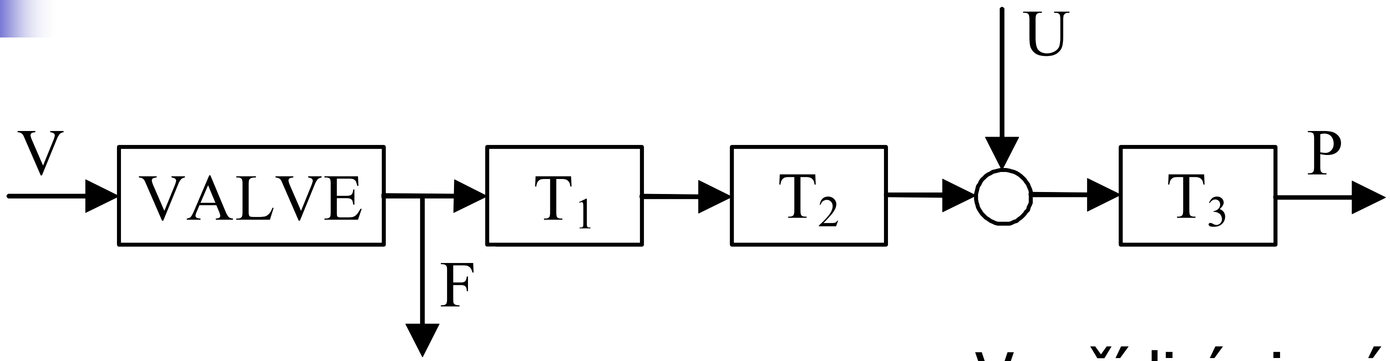
Motivace

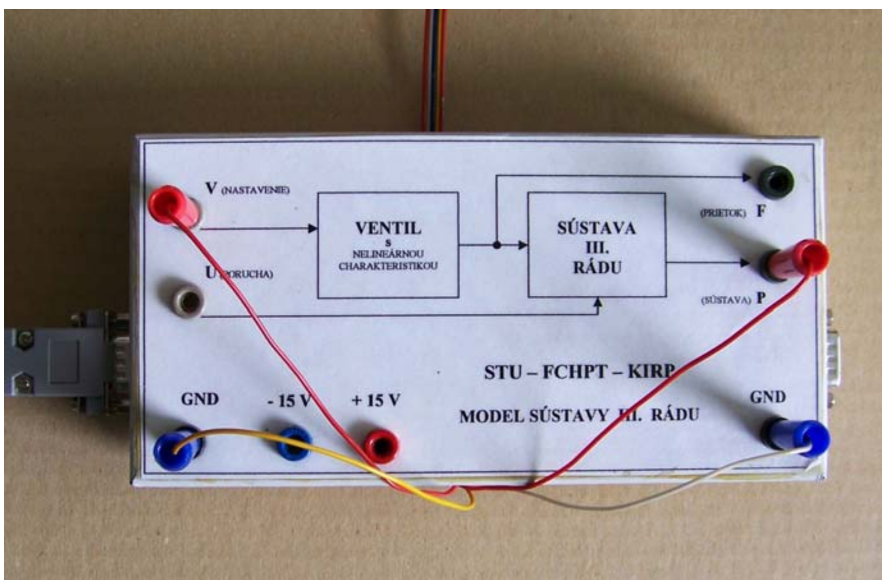
- Stručné seznámení s dosavadními výsledky spolupráce mezi ÚAŘT FAI UTB ve Zlíně a OIRP ÚIAM FChPT STU v Bratislave
- Návrh a aplikace spojitých robustně stabilizujících PI regulátorů
- Plánovaná doba trvání 20-25 minut

Hlavní cíle a nástroje

- Návrh jednoduchých algoritmů řízení
  - Algebraické metody
  - Stanovení (robustně) stabilizujících regulátorů
- Aplikace na elektrickém laboratorním modelu, který je uvažován jako systém s parametrickou neurčitostí
- Realizace pomocí řídicího systému na bázi PLC Simatic S7-300 (Siemens)
- Společná publikační činnost…

Řízený systém = laboratorní model





- V – řídicí signál pro otevření ventilu (0 – 10V)
- F – signál reprezentující otevření ventilu (0 – 10V)
- P – výstupní signál procesu (0 – 10V)
- U – porucha (0 – 10V)

Identifikace v různých pracovních bodech

$$G(s)=\frac{\left[K^-,K^+\right]}{\left(\left[T^-,T^+\right]s+1\right)^2}e^{-\left[D^-,D^+\right]s}$$

$$G(s)=\frac{\left[K^-,K^+\right]}{\left[\left(T^-\right)^2,\left(T^+\right)^2\right]s^2+\left[2T^-,2T^+\right]s+1}e^{-\left[D^-,D^+\right]s}$$

$K^- = 0.37$ $\quad T^- = 9.2909$ $\quad D^- = 0.966$

$K^+ = 5.186$ $\quad T^+ = 11.0733$ $\quad D^+ = 2.181$

$$G(s)=\frac{\left[0.37,\,5.186\right]}{\left[86.3208,\,122.618\right]s^2+\left[18.5818,\,22.1466\right]s+1}e^{-\left[0.966,\,2.181\right]s}$$

- Uvažování jako systém s intervalovou neurčitostí zavede konzervatismus

Technická realizace řídicího systému

- PLC Simatic S7-300
  - Modulární
  - Různá CPU, Ethernet/PROFINET interface, přídavné moduly,…
  - „Rozumné“ rešení pro aplikace středního rozsahu
- Step7 (programování)
- WinCC (vizualizace)
- Tvorba uživatelského programu prostřednictvím bloku OB35 (obsahuje např. spojitý PID regulátor) – cyklus 100ms

Teoretický základ

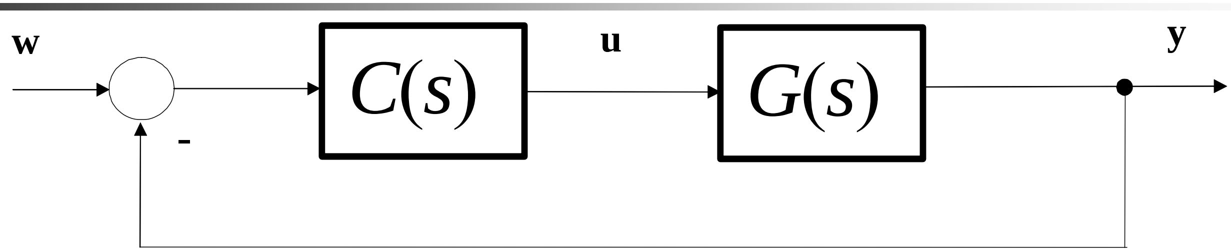
- Řízení systémů s intervalovou neurčitostí
- Využití regulátorů se standardní jednoduchou strukturou (**PI**, PID)
- Výpočet/vykreslení místa hranice stability + věta o 16 soustavách = stanovení všech stabilizujících PI regulátorů
- Volba jednoho/několika z nich pomocí algebraického přístupu

Hlavní reference

- Tan, N., Kaya, I.: Computation of stabilizing PI controllers for interval systems. In: *Proceedings of the 11th Mediterranean Conference on Control and Automation*, Rhodes, Greece, 2003.
- Söylemez, M. T., Munro, N., Baki, H.: Fast calculation of stabilizing PID controllers. *Automatica*, Vol. 39, No. 1, 2003, pp. 121-126.
- Barmish, B. R., Hollot, C. V., Kraus, F. J., Tempo, R.: Extreme point results for robust stabilization of interval plants with first order compensators. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. AC-37, 1992, pp. 707-714.

- Kučera, V.: Diophantine equations in control – a survey. *Automatica*, Vol. 29, No. 6, 1993, pp. 1361-1375.
- Vidyasagar, M.: *Control system synthesis: a factorization approach*. MIT Press, Cambridge, M.A., 1985.

Výpočet stabilizujících PI regulátorů



- Řízený systém: $G(s) = \dfrac{B(s)}{A(s)}$
- PI regulátor: $C(s) = k_P + \dfrac{k_I}{s} = \dfrac{k_P s + k_I}{s}$
- Po substituci a rozkladu: $G(j\omega) = \dfrac{B_E(-\omega^2) + j\omega B_O(-\omega^2)}{A_E(-\omega^2) + j\omega A_O(-\omega^2)}$
- Ze zpětnovazebního charakteristického polynomu:

$$k_P = \frac{\omega^2 A_O(-\omega^2) B_O(-\omega^2) - \left(-A_E(-\omega^2)\right) B_E(-\omega^2)}{-\omega^2 B_O^2(-\omega^2) - B_E^2(-\omega^2)}$$

$$k_I = \frac{\left(-A_E(-\omega^2)\right)\left(-\omega^2 B_O(-\omega^2)\right) - \omega^2 A_O(-\omega^2) B_E(-\omega^2)}{-\omega^2 B_O^2(-\omega^2) - B_E^2(-\omega^2)}$$

=> Hranice stability v rovině (k_P, k_I)

(vhodný rozsah frek.: přes $\mathrm{Im}\left[G(s)\right] = 0$).

Vylepšení pro intervalové systémy

- Dosud, oblast parametrů stabilizujících regulátorů pouze pro soustavy s PEVNÝMI parametry
- Kombinace předchozí metody s věty o 16 soustavách (*sixteen plant theorem*) vede k použitelnosti také pro INTERVALOVÉ systémy
- Stabilizace intervalové soustavy je založena na stabilizaci všech 16 tzv. Charitonovových soustav současně.

Věta o 16 soustavách

- Regulátor prvního řádu **(?PID?)** robustně stabilizuje intervalovou soustavu:

$$G(s,b,a)=\frac{B(s,b)}{A(s,a)}=\frac{\sum_{i=0}^{m}\left[b_i^-,b_i^+\right]s^i}{s^n+\sum_{i=0}^{n-1}\left[a_i^-,a_i^+\right]s^i};\quad m<n \qquad \frac{\sum_{i=0}^{m}\left[b_i^-,b_i^+\right]s^i}{\sum_{i=0}^{n}\left[a_i^-,a_i^+\right]s^i}$$

tehdy a jen tehdy, pokud stabilizuje jeho 16 Charitonovových soustav:

$$G_{i_1,i_2}(s)=\frac{B_{i_1}(s)}{A_{i_2}(s)}$$,kde $i_1,i_2\in\{1,2,3,4\}$

- Charitonovovy polynomy pro intervalový polynom:

$$B(s,b)=\sum_{i=0}^{m}\left[b_i^-;b_i^+\right]s^i$$

lze sestavit pomocí pravidla:

$$B_1(s)=b_0^-+b_1^-s+b_2^+s^2+b_3^+s^3+\cdots$$
$$B_2(s)=b_0^++b_1^+s+b_2^-s^2+b_3^-s^3+\cdots$$
$$B_3(s)=b_0^++b_1^-s+b_2^-s^2+b_3^+s^3+\cdots$$
$$B_4(s)=b_0^-+b_1^+s+b_2^+s^2+b_3^-s^3+\cdots$$

Finální volba regulátoru

- Okruh ryzích a Hurwitz-stabilních racionálních funkcí (R_{PS})
- Diofantické rovnice
- Youla-Kučerova parametrizace
- Podmínky dělitelnosti
- Vhodná volba ladicího parametru *m*
  - Citlivostní funkce
  - Podmínky robustní stability
  - Nominální ladění (pro systém prvního řádu = PI regulátor)

Určení stabilizujících regulátorů pro laboratorní model (1. krok – aproximace dopravního zpoždění)

$$G(s)=\frac{\left[K^-,K^+\right]}{\left[\left(T^-\right)^2,\left(T^+\right)^2\right]s^2+\left[2T^-,2T^+\right]s+1}e^{-\left[D^-,D^+\right]s}$$

- Aproximace dopravního zpoždění (v čitateli vs. ve jmenovateli)

$$G(s)=\frac{\left[K^-,K^+\right]}{\left[\left(T^-\right)^2D^-,\left(T^+\right)^2D^+\right]s^3+\left[2T^-D^-+\left(T^-\right)^2,2T^+D^++\left(T^+\right)^2\right]s^2+\left[D^-+2T^-,D^++2T^+\right]s+1}$$

$$G(s)=\frac{[0.37,5.186]}{[83.3859,267.4298]s^3+[104.2708,170.9197]s^2+[19.5478,24.3276]s+1}$$

- Obecně: aproximace jsou problematické vzhledem k robustní stabilizaci (původní „reálný“ vs. aproximovaný systém)
- Naproti tomu – systém je konzervativní kvůli překrytí intervalovým systémem

Určení stabilizujících regulátorů pro laboratorní model

$$G(s)=\frac{[0.37,\,5.186]}{[83.3859,\,267.4298]s^3+[104.2708,\,170.9197]s^2+[19.5478,\,24.3276]s+1}$$

- První z 16(8) Charitonovových soustav:

$$G_{1,1}(s)=\frac{B_1(s)}{A_1(s)}=\frac{0.37}{267.4298s^3+170.9197s^2+19.5478s+1}$$

- Parametrizované hodnoty hranice stability v rovině (k_P, k_I):

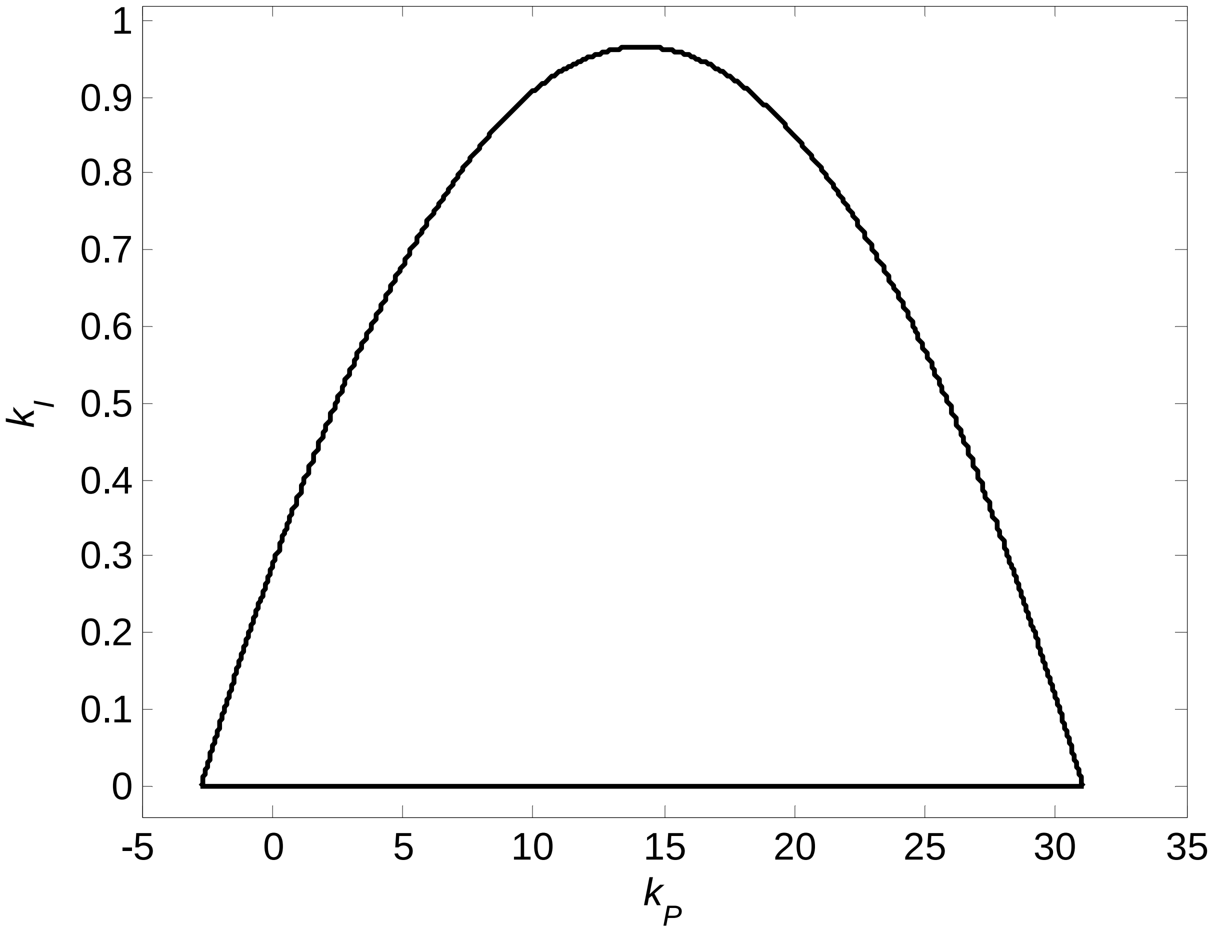
$$k_P=461.9451\omega^2-2.7027$$

$$k_I=-722.7832\omega^4+52.8319\omega^2$$

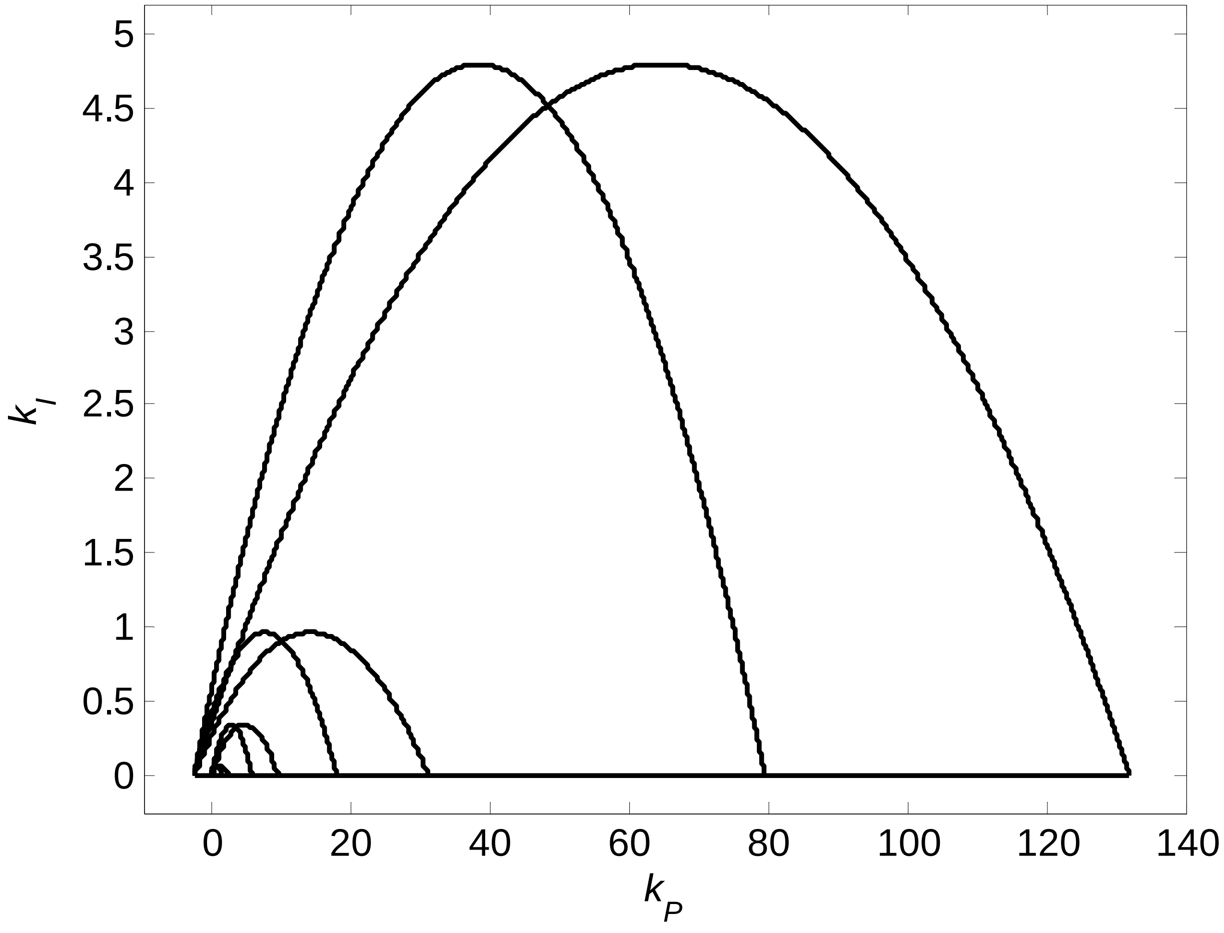
- Vhodný interval frekvence pro vykreslení:

$$\omega\in(0;\,0.2704)$$

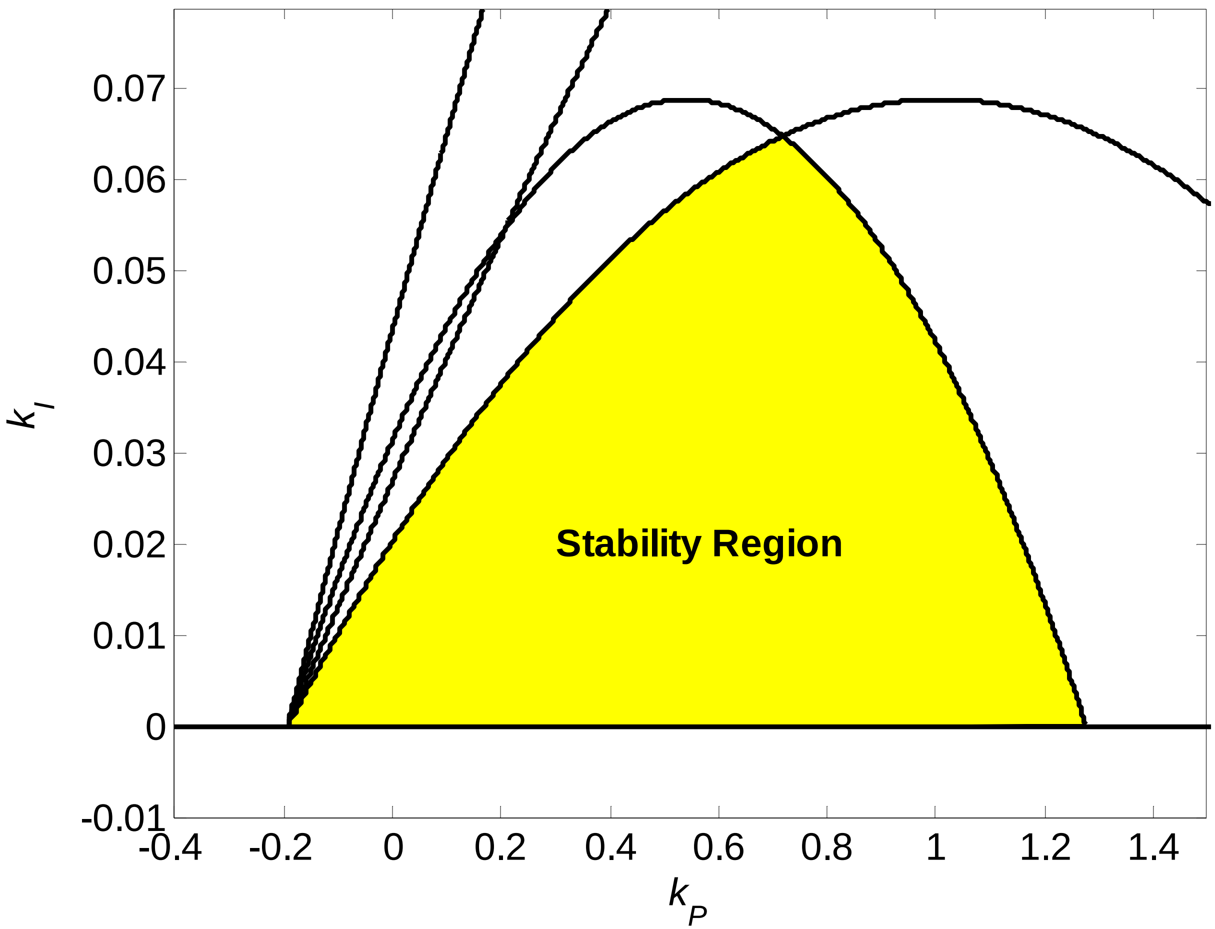
Grafická reprezentace



Vykreslení křivek pro všech 16(8) Charitonovových soustav



Vykreslení křivek pro všech 16(8) Charitonovových soustav (zoom)



Volba vhodného regulátoru z dané množiny?

- Systém 3. řádu:

$$G(s)=\frac{\left[K^-,K^+\right]}{\left[\left(T^-\right)^2D^-,\left(T^+\right)^2D^+\right]s^3+\left[2T^-D^-+\left(T^-\right)^2,2T^+D^++\left(T^+\right)^2\right]s^2+\left[D^-+2T^-,D^++2T^+\right]s+1}$$

- Aproximace systémem 1. řádu:

$$G(s)=\frac{\left[K^-,K^+\right]}{\left[D^-+2T^-,D^++2T^+\right]s+1}=\frac{[0.37,5.186]}{[19.5478,24.3276]s+1}$$

- Nominální systém:

$$G_N(s)=\frac{2.778}{21.9377s+1}=\frac{0.1266}{s+0.04558}$$

$$k_P=\frac{2m-a_0}{b_0};\quad k_I=\frac{m^2}{b_0}$$

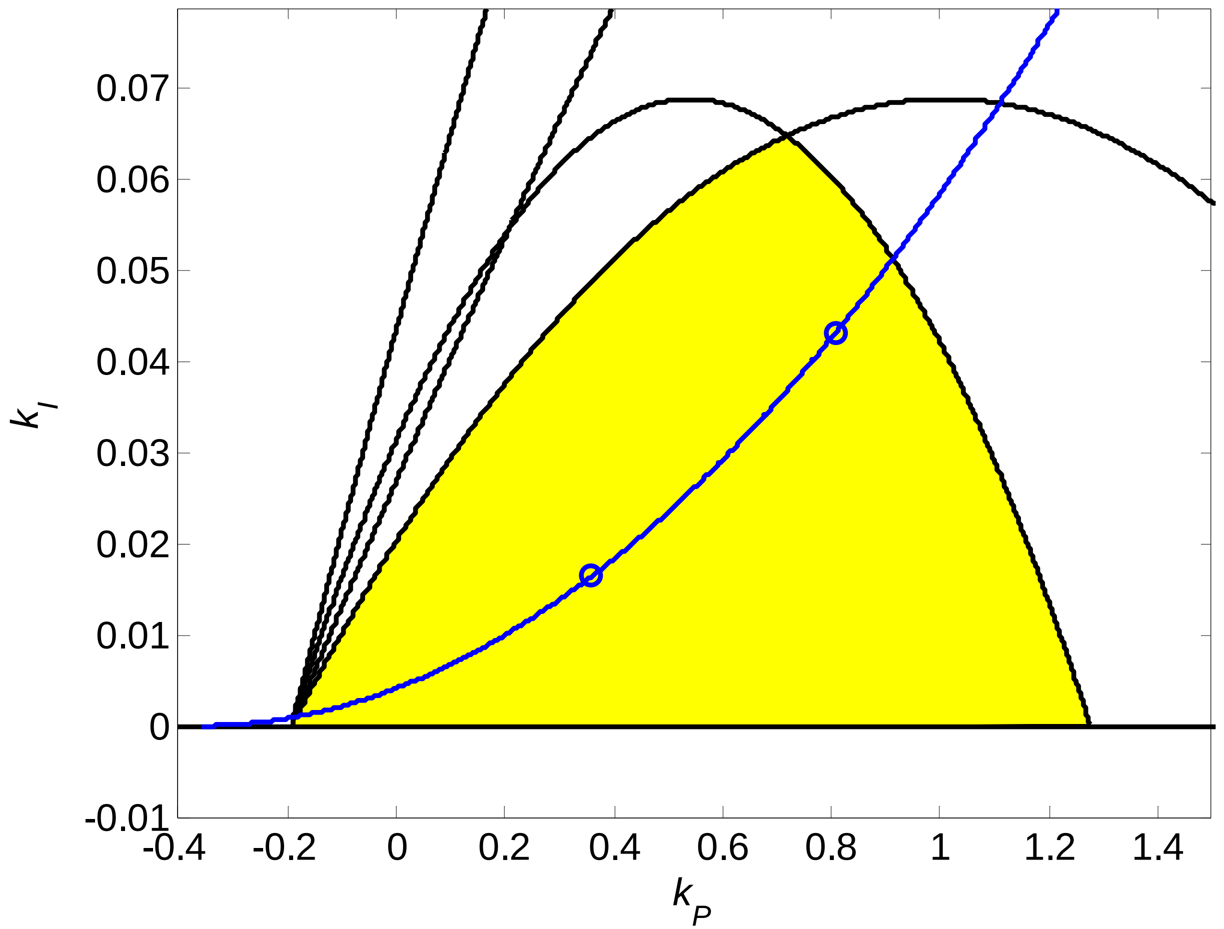
- Regulátory:

$$0\%\Rightarrow m=0.04558\Rightarrow C(s)=\frac{0.36s+0.0164}{s}$$

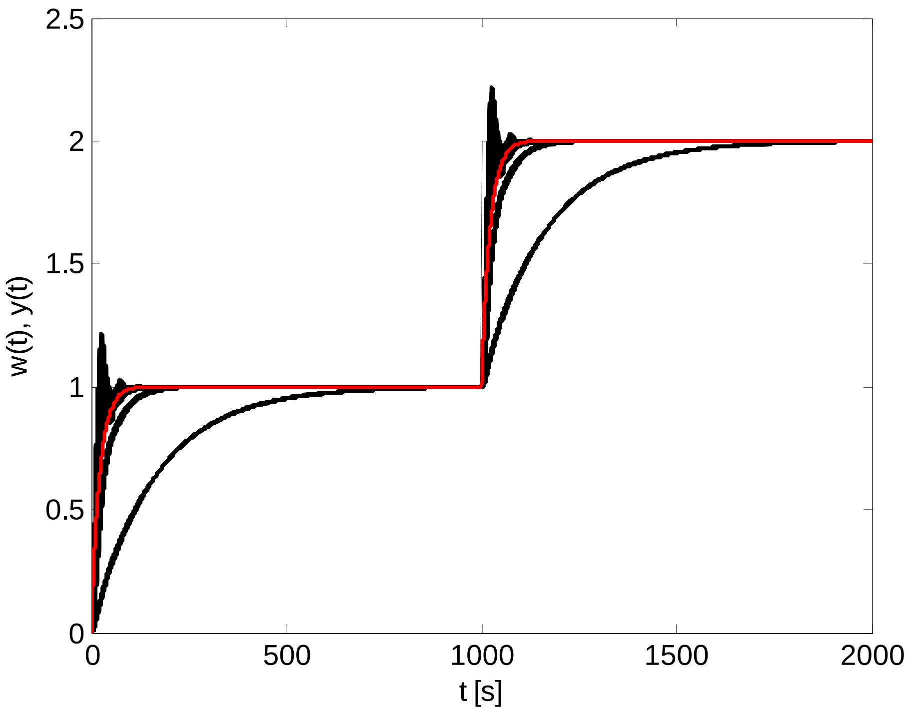
$$1\%\Rightarrow m=0.07384\Rightarrow C(s)=\frac{0.8065s+0.0431}{s}$$

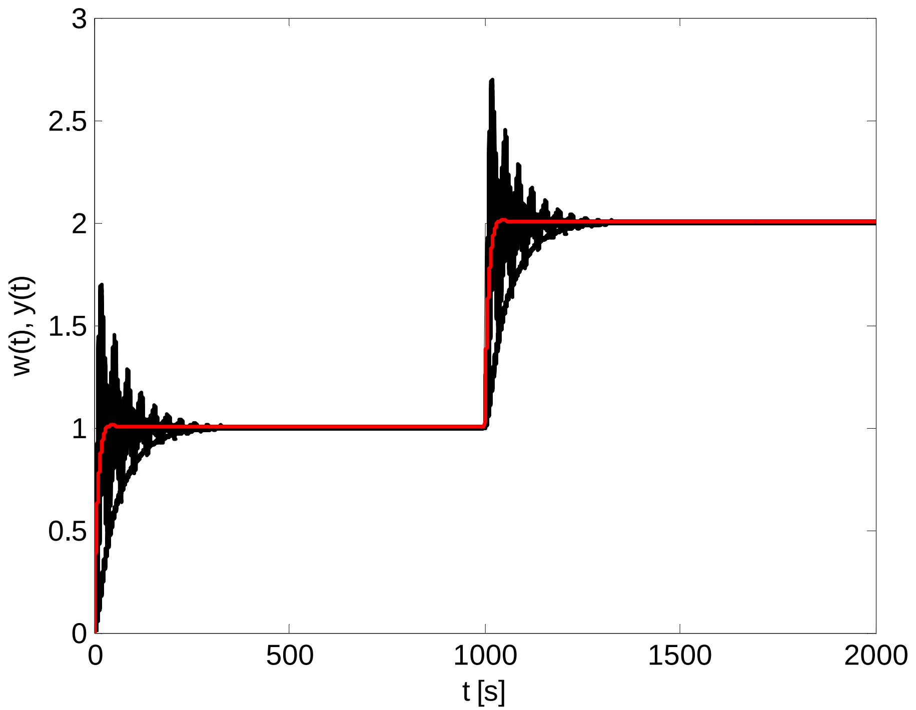
Překmit [%]	*Násobek* a_0
0	1.00
1	1.62
2	1.87
3	2.14
4	2.44
5	2.80
6	3.25
7	3.81
8	4.58
9	5.67
10	7.38

Umístění regulátorů v rovině (k_P, k_I)

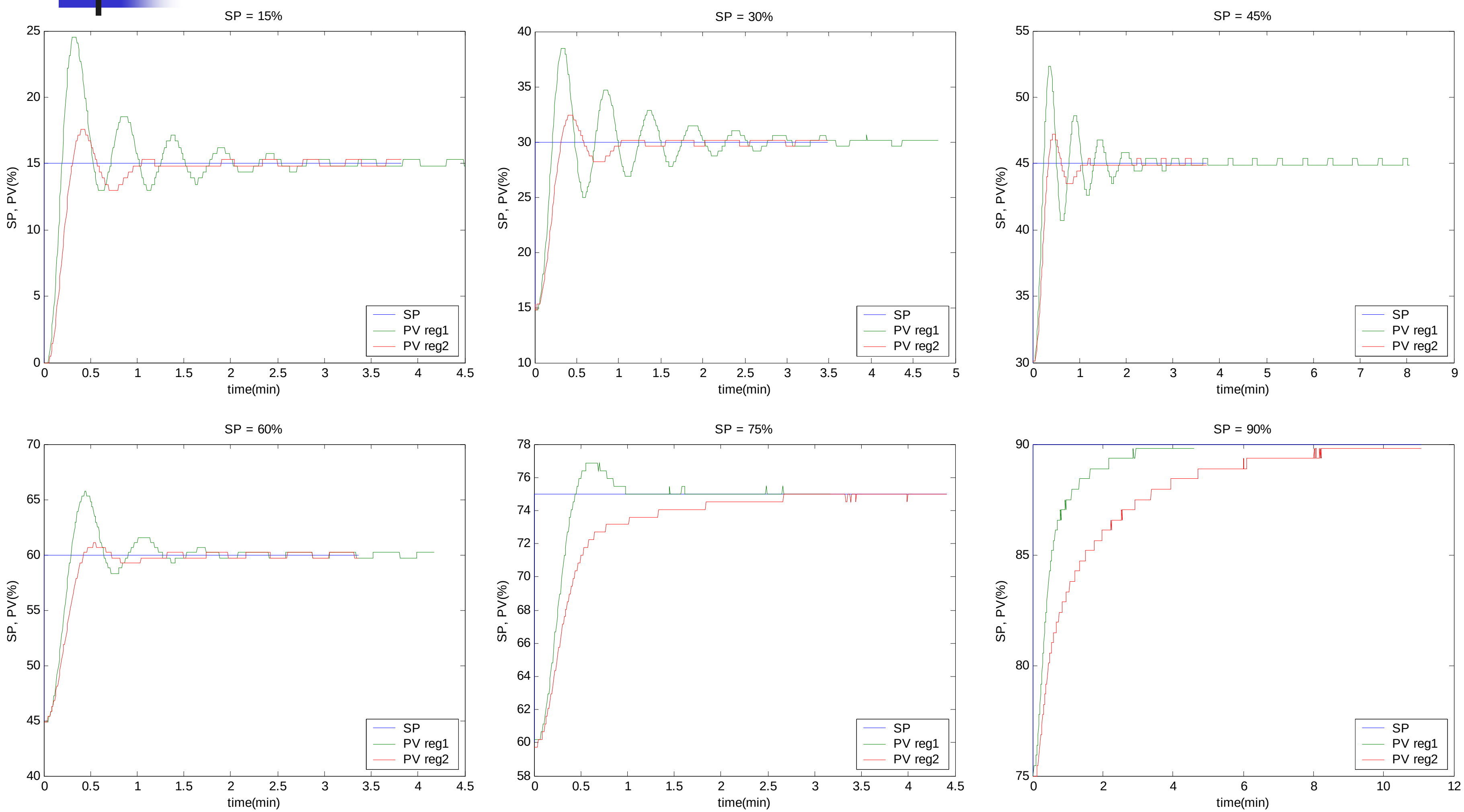


Zpětnovazební robustní stabilita pro systém 2. řádu s dopravním zpožděním – Simulace pro (4+1)^4 = 625 systémů





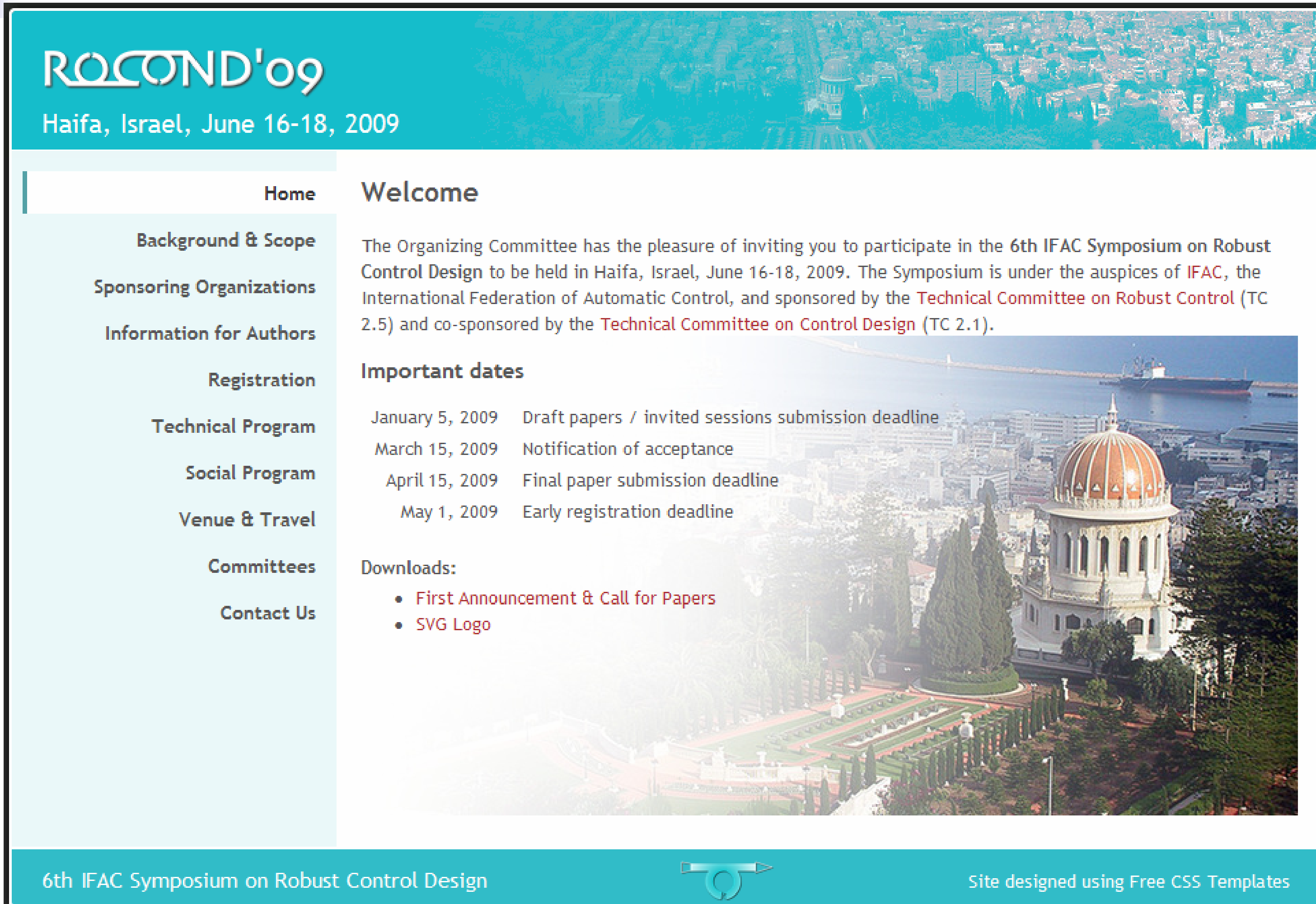
Reálné řízení laboratorního modelu pomocí PLC



Závěr

- Velmi jednoduché robustní algoritmy řízení aplikované na reálném laboratorním modelu pomocí PLC Simatic S7-300
- Porovnání výsledků s dříve použitými regulátory (vizuálně)
- Problémy:
  - Aproximace DZ vs. robustní stabilizace Tanovou metodou
  - Perspektivně – platnost věty o 16 soustavách pro PID?

Plánovaný konferenční příspěvek http://www.technion.ac.il/~rocond09



Děkuji za pozornost