

POPIS, IDENTIFIKACE SYSTÉMU A NÁVRH REGULÁTORU POMOCÍ MATLABU V APLIKACI FOTBAL ROBOTŮ

Z.Macháček, V. Srovnal

Katedra měřicí a řídicí techniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, VŠB-TU Ostrava

Abstrakt

Příspěvek se zabývá problematikou návrhu regulátoru PID (PSD) pro reálnou aplikaci fotbal robotů s využitím programu MATLAB a SYSTEM IDENTIFICATION TOOLBOXU. Regulovaná soustava použitá pro simulaci a návrh regulátoru se skládá ze dvou kol robota, která jsou poháněna stejnosměrnými motory a pomocí zpětné vazby tvořené kvadraturním dekodérem jsou snímány informace o rychlosti otáčení kol. Cílem regulovaného systému je stabilní pohyb obou kol podle požadovaných rychlostí posílaných bezdrátově z řídicího systému na PC. Realizovaný systém je stabilní i při nerovnostech povrchu, prokluzu kol nebo při zatížení jedné strany robota menším předmětem.

1 Úvod

Článek popisuje návrh a realizaci PID (PSD) regulátoru použitého pro regulaci pohonů aplikace fotbalu robotů. Základem správné regulace pohonů je znalost parametrů a chování motoru. Pro dosažení dostatečné přesnosti a robustnosti je nezbytné systém namodelovat a specifikovat jeho chování a parametry. Při řešení této aplikace se jedná o identifikaci pohonů robota zahrnující fyzikální veličiny podílející se na vlastnostech soustavy a řízení - prokluz kol a váha robota, nerovnosti povrchu. Postup, který byl zvolen pro návrh regulátoru PID (PSD), je uzpůsoben s ohledem na řešení aplikace fotbal robotů:

- Naměření přechodové charakteristiky pohonů v zátěži, tedy při pohybu na ploše.
- Provedení identifikace soustavy, určení operátorového přenosu $G(s)$.
- Sestavení matematického modelu soustavy pohonů robota pomocí Taylorova rozvoje.
- Identifikace a návrh PID regulátoru z naměřené přechodové charakteristiky pohonů.
- Návrh PSD regulátoru z parametrů PID regulátoru a požadovaného průběhu časových charakteristik.
- Implementace a realizace PSD regulace pro pohon robotů.

Pro řešení popisovaného projektu se využil matematický program MATLAB a jeho nástroje SYSTEM IDENTIFICATION TOOLBOX-IDENT, SIMULINK, GUI. Pro řízení pohonů a dalších funkcí robota se používá digitální signálový procesor DSP 56F805 Freescale a vývojové prostředí CodeWarrior.

Navržený PSD regulátor je implementován lichoběžníkovou metodou do kódu v DSP robota v jazyce C. Testováním pohybů robota v reálné aplikaci bylo potvrzeno, že popisovaný postup a návrh je dostatečně robustní, přesný a vyhovuje požadovaným parametrům na změnu rychlosti a dynamiku robota. Experimentálním doladěním konstant při provozu robota se regulátor stal robustním v širokém spektru zrychlení robota (0 – 2 m/s .. rychlost robota). Prokluzu, tedy nekoordinované pohyby, robota jsou řešeny omezením maximální změny rychlosti oproti předchozímu stavu rychlosti robota, což již není dále v tomto příspěvku popsáno.

2 Identifikace a matematický popis soustavy

Pro sestavení matematického modelu a určení parametrů soustavy odpovídající reálné aplikaci pohonů robota je nejprve nutné naměřit dynamickou charakteristiku pohybu kol. Pohony kol jsou tvořeny motory Faulhaber 006SR, které jsou přes silový prvek H-Bridge Freescale 33877 řízeny PWM signálem z digitálního signálového procesoru DSP. Řídicí PWM signál má proměnnou střihu v rozsahu hodnot $u = 0 - 1000$ při frekvenci $f_{PWM} = 30kHz$.

Při zatížení kol je rychlost pohybu robota omezena na maximální hodnotu $v = 2000mm \cdot s^{-1}$. Přepočet na frekvenci otáčení kola lze získat pomocí následujícího vzorce, kde lze dosáhnout maximální rychlosti otáček $f_{max} = 7114[ot \cdot min^{-1}]$:

$$f = \frac{v \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot 9,182 [ot \cdot min^{-1}] \quad (1)$$

60 ... přepočet ze sekund na minuty

9,182 ... poměr převodu zubů $\frac{\text{počet zubů na kole}}{\text{počet zubů na pohonu}} = \frac{101}{11} = 9,182$

r ... poloměr kola v našem případě je 25 mm

Nezbytná zpětná vazba informující o rychlosti otáčení kola je tvořena kvadraturním dekodérem umístěným na motoru pohonu kola. Výpočet impulsů vyhodnocovaných kvadraturním dekodérem při otáčení kola za minutu je dán vztahem:

$$RPM_{impuls} = \frac{f}{60 \cdot 1000} \cdot 2048 \cdot 1,5 [ot \cdot ms^{-1}] \quad (2)$$

$$RPM_{impuls-max} = 365 [ot \cdot ms^{-1}]$$

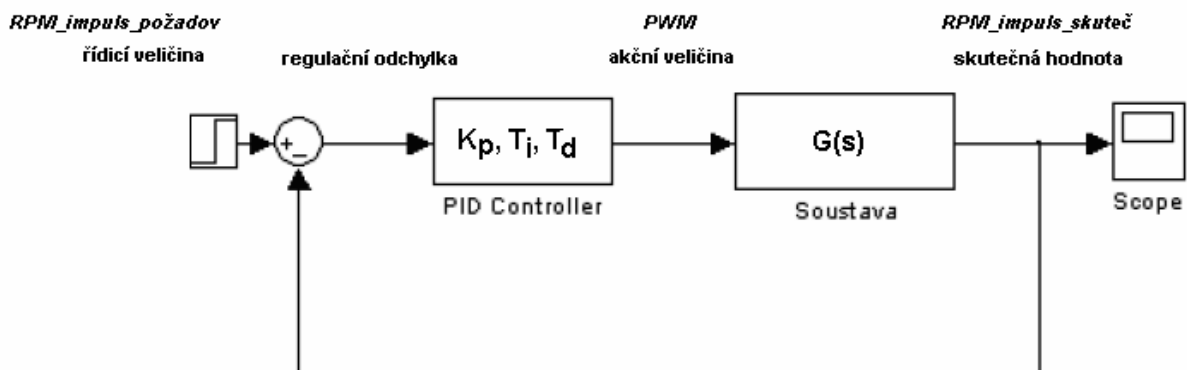
60 ... přepočet z minut na sekundy

1000 ... přepočet ze sekund na milisekundy

2048 ... počet vzorků (impulsů) pro jednu otáčku – převodník 512bodů x 4 impulsy na jeden bod

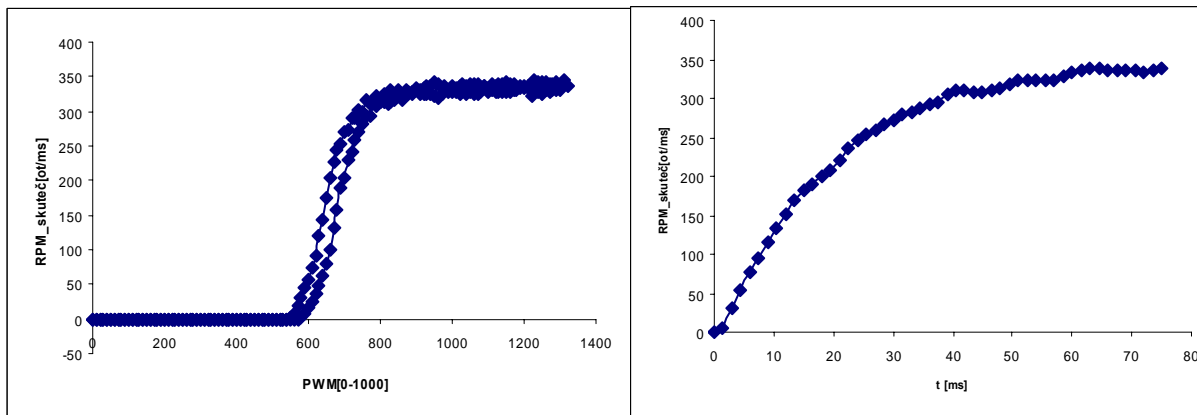
1,5 – je v milisekundách – perioda přerušování regulace motoru (frekvence snímání a regulace)

Tedy požadovaná veličina $RPM_{impuls-požadov}$ (počet impulsů otáčení kola), kterou zasílá řídicí systém robotovi je přivedena do sumátoru. V sumátoru je od požadované hodnoty odečtena skutečná hodnota naměřená na výstupu soustavy (na motoru kvadraturním dekodérem) $RPM_{impuls-skuteč}$ (počet impulsů otáčení kola). Výsledná hodnota ze sumátoru (regulační odchylka) je přivedena do regulátoru PSD. Z regulátoru vstupuje do soustavy řídicí veličina ve tvaru PWM signálu, ovlivňujícího H-Bridge společně s motory pohonu viz. Obr.1 [1].



Obrázek 1: Blokové schéma regulace soustavy (pohonů robota)

V následujícím grafu je znázorněna závislost mezi hodnotami RPM a PWM , což je velmi důležité pro celkovou regulaci soustavy. Z této závislosti vyplývá, že do počáteční hodnoty $PWM = 650$ je pohon robota v klidové pozici. Od počáteční hodnoty až do $PWM = 800$ je závislost lineární, poté se snižuje citlivost zvyšování otáček na zvyšujícím se PWM. Ve vedlejším grafu je zobrazena dynamická charakteristika soustavy v otevřené smyčce při vstupní signálu ve tvaru jednotkového skoku (přechodová charakteristika).



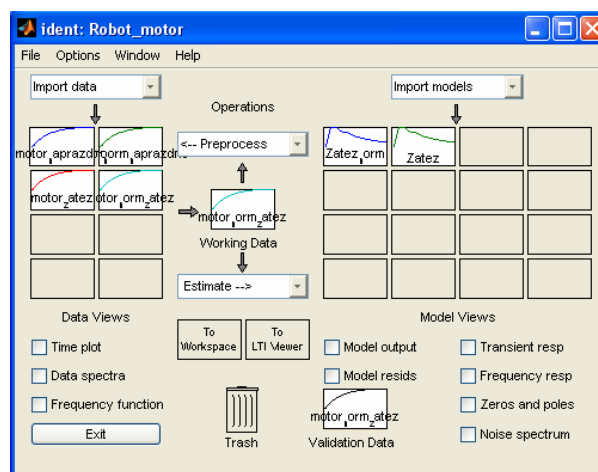
Obrázek 2: Grafy závislosti RPM,PWM, přechodová charakter. soustavy (pohonů robota)

Pro identifikaci a matematický popis soustavy (pohonu robotů) se využilo naměřených dynamických charakteristik (přechodová charakteristika) a výše popsaných parametrů systému. Cílem identifikace systému je determinování dobrého modelu daného systému z naměřených dat. Tento matematický model lze použít pro simulaci pohonů robota, návrh regulátoru, zkoumání a zdokonalování řízení pohybů robota. Po naměření několika přechodových charakteristik byl sestaven matematický model soustavy pohonů robota. K tomuto účelu se využilo SYSTEM IDENTIFICATION TOOLBOX-IDENT viz. Obr.3. Matematický popis odhadu soustavy byl vygenerován ve tvaru přenosu soustavy $G(s)$ a dvou Taylorových rozvoji $y_{1_do\ inflex}(t)$, $y_{2_od\ inflex}(t)$, které z části ohraničené inflexním bodem odpovídají naměřené přechodové charakteristice [5].

$$G(s) = \frac{k}{(1 + T_{p1} \cdot s)(1 + T_{p2} \cdot s)} = \frac{1,0176}{(1 + 0,018558 \cdot s)(1 + 0,001 \cdot s)} \quad (3)$$

$$y_{1_do\ inflex}(t) = \frac{0,00297 \cdot x^3(t) + 0,35568 \cdot x^2(t) + 1,90251 \cdot x(t) - 85,72311}{26,86937}$$

$$y_{2_od\ inflex}(t) = \frac{[-0,00000117798 \cdot x^4(t) + 0,0016353 \cdot x^3(t) - 0,8553 \cdot x^2(t) + 208,34445 \cdot x(t) - 1117,5876] + 9650}{26,86937} \quad (4)$$



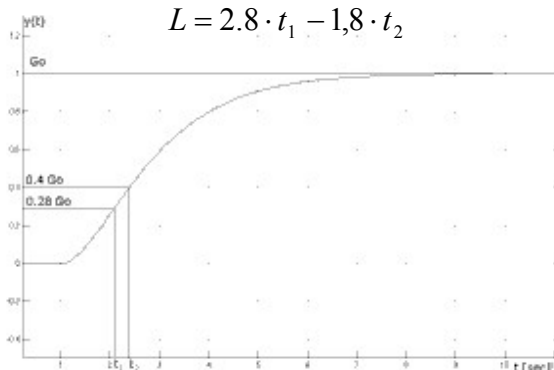
Obrázek 3: SYSTEM IDENTIFICATION TOOLBOX-IDENT

3 Identifikace a návrh PID regulátoru

Regulace pohonů reprezentovaných matematickým popisem identifikované soustavy je důležitým prvkem přesného a dynamicky rychlého pohybu robota. Realizovaný regulátor je dostatečně robustní a regulovaný systém je i při značném zatížení stabilní (při vyšším zatížení dochází ke změně přenosu soustavy). Identifikace PID regulátoru byla provedena pomocí Broidovy metody z naměřené přechodové charakteristiky. Návrh PID regulátoru, tedy parametry regulátoru, byly nastaveny pomocí několika metod návrhu a doladěny podle požadavků na chování modelu soustavy v MATLABU.

Vybranou identifikací Broidova modelu jsou parametry časových konstant regulátoru vypočteny porovnáním vstupního signálu a výstupního signálu. Broidův model odpovídá systémům se statickou přechodovou charakteristikou. Pomocí sledování inflexního bodu a aproximace výpočtu jsou zjištěny parametry modelu z charakteristických časových konstant t_1 a t_2 , pro které odezva systému odpovídá 28 % a 40 % konečné ustálené hodnoty G_0 . Z časových konstant T, L lze vypočítat další parametry systému pro jeho identifikaci [1].

$$\begin{aligned} T &= 5,5 \cdot (t_2 - t_1) \\ L &= 2,8 \cdot t_1 - 1,8 \cdot t_2 \end{aligned} \quad (5)$$



Obrázek 4. Přechodová odezva systému na jednotkový skok a vyznačení parametrů k identifikaci

Návrh regulátoru, kdy se určují jeho parametry K_p, T_i, T_d byl proveden následujícími popsány metodami, které se odlišují kritérii např. úroveň rušení signálu, robustnost (neurčitost modelu), útlum šumem v měřeném signálu. Navržené PID regulátory byly testovány pomocí vytvořeného programu (viz následující kapitola). Mezi testované návrhy PID regulátorů pro regulaci pohonu motorů robota patří tyto metody:

- **Ziegler-Nichols v časové oblasti** - parametry pro určení regulátoru lze vypočítat vzorci:

K_p	T_i	T_d
$1.2 / a$	$2 L$	$L / 2$

- **Chien-Hrones-Reswick** - parametry regulátoru jsou navrženy i pro menší změny přenosu:

0 %			20 %		
K_p	T_i	T_d	K_p	T_i	T_d
$0.95 / a$	$2.4 L$	$0.42 L$	$1.2 / a$	$2 L$	$0.42 L$

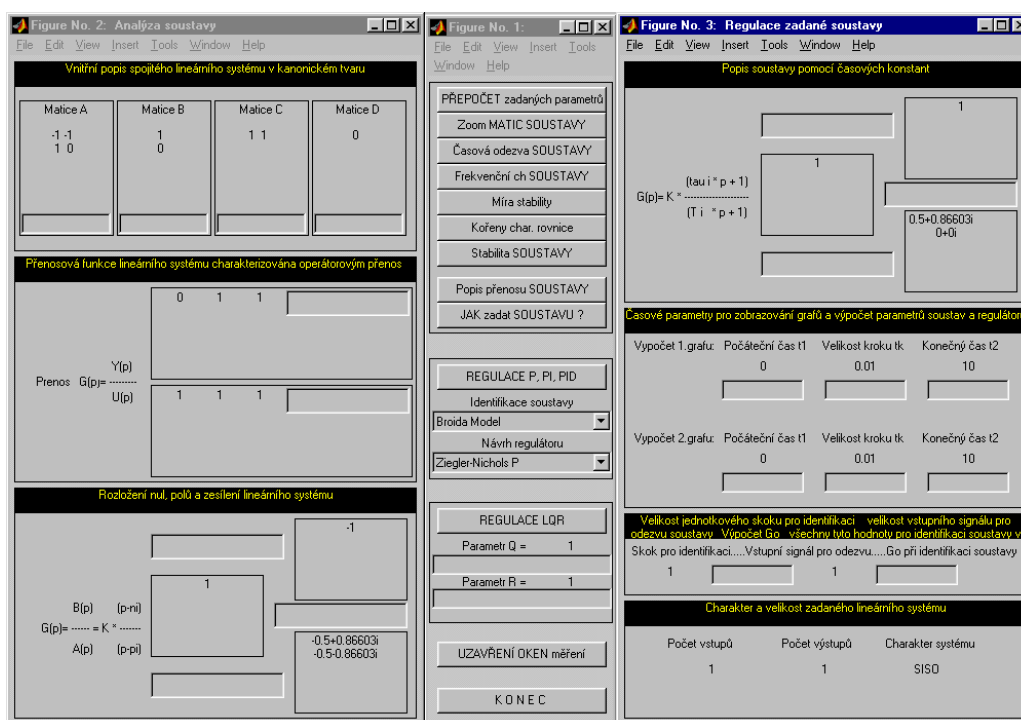
- **Cohen Coon** - zanedbání menší změny přenosu a rušení. Charakteristické funkce systému lze získat vztahy: $a = G_0 L / T$, $\tau = L / (L + T)$. Parametry regulátoru lze vypočítat ze vztahů:

K_p	T_i	T_d
$\frac{1.35}{a} \left(1 + \frac{0.18 \tau}{1 - \tau} \right)$	$\frac{2.5 - 2 \tau}{1 - 0.39 \tau} \cdot L$	$\frac{0.37 - 0.37 \tau}{1 - 0.81 \tau} \cdot L$

- **Halman** - metoda určena pro systém se zpožděním a parametry se vypočítají: $K_p = 2(T_1 + T_2) / 3G_0L$, $T_i = T_1 + T_2$, $T_d = T_1 T_2 / (T_1 + T_2)$

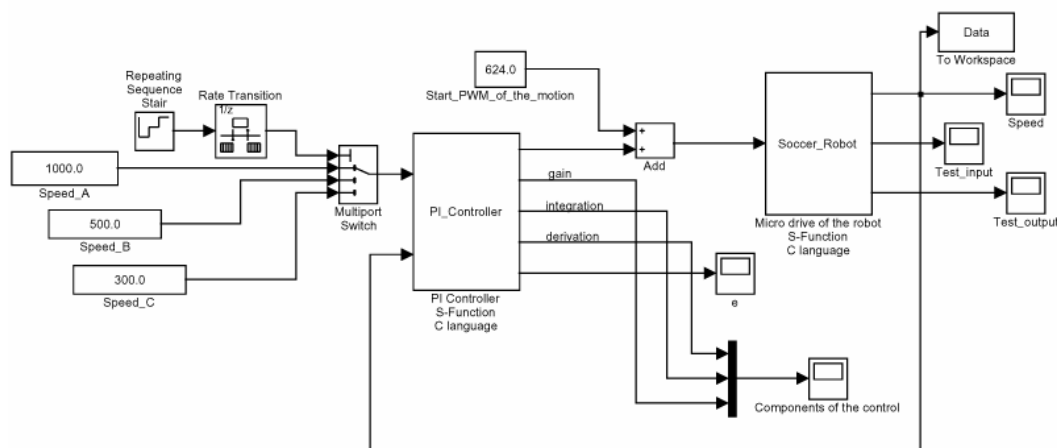
4 Aplikace soustavy a návrhu PID regulátoru v Matlabu

Pro identifikaci a návrh PID regulátoru byl vytvořen vlastní program viz obr.5 v MATLABU, který umožňuje pomocí uživatelského rozhraní GUI provést výpočet parametrů regulátoru. Program je založen na intuitivním ovládní pomocí ovládacího menu a jednotlivých funkčních oken. V nynějším rozpracování aplikace je uživatel provést výpočty pro soustavu se spojitým signálem v čase. V aplikaci jsou využity příkazy z Toolboxu pro regulaci a řízení systémů a také Toolbox pro práci s maticemi. Vytvořeným programem je možné převádět jednotlivé maticové tvary zápisu přenosu soustav. Je možné s jakýmkoliv standardním zápisem dané soustavy pro tento systém zobrazit jeho charakteristické hodnoty a parametry, a také je možné zobrazit jednotlivé přenosy systému. Dále lze v této aplikaci také provést optimalizaci metodou LQR Lineární kvadratickou regulací systému s proměnnými parametry. Aplikace obsahuje také, dle daných metod, identifikaci a návrh zadaného systému pro PID regulaci, a poté simulaci PID regulace regulovaného systému.



Obrázek 5. Aplikace pro identifikaci a návrh PID regulátoru

Srovnáním výsledků z návrhů pomocí jednotlivých popsaných metod byly vybrány parametry K_p , T_b , T_d regulátoru PID, který nejvíce vyhovoval požadavkům regulovaného systému. V MATLAB SIMULINKU byla provedena kontrola regulovaného systému viz Obr.6 [4].



Obrázek 6. Blokové schéma regulovaného systému (pohon motorů robota)

5 Realizace aplikace PSD regulátoru robota

Vybrané navržené parametry K_p , T_i , T_d regulátoru PID byly převedeny ze spojitě časové oblasti řešení soustavy a regulátoru do diskrétní časové oblasti PSD regulátoru podle níže uvedených převodních vztahů **lichoběžníkovou metodou**. Po úpravě matematického vztahu výpočtu akční veličiny PWM regulátoru byla provedena implementace do digitálního signálového procesoru robota. Testování realizace pohonů robota a několik úspěšných reprezentací našeho týmu na světových utkáních FIRA potvrdily korektnost našich výpočtů provedených v MATLABU [3].

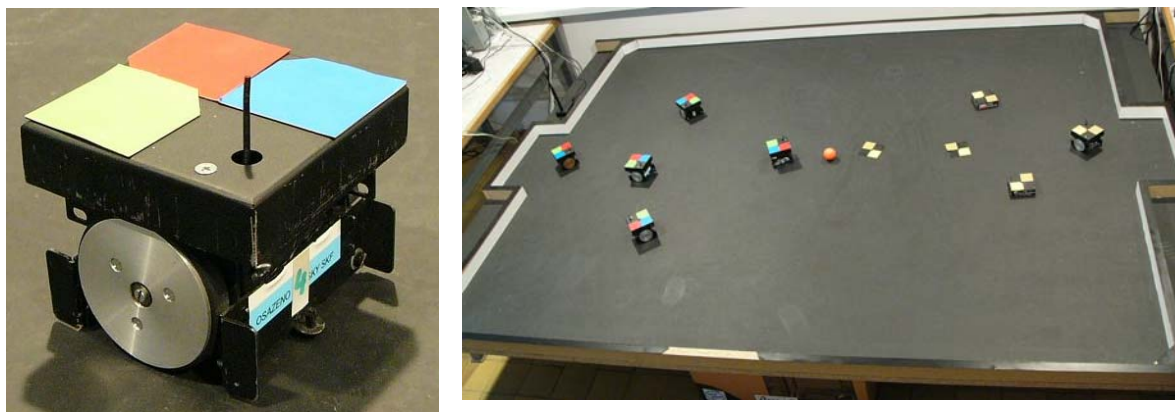
$$PWM[n] = K_p \left\{ e[n] + \frac{T_{vzorkovací}}{T_i} \left(\frac{e[0] + e[n]}{2} + \sum_{k=1}^{n-1} e[k] \right) + \frac{T_d}{T_{vzorkovací}} (e[n] + e[n-1]) \right\} \quad (6)$$

Navržené parametry regulátoru byly nastaveny na následující hodnoty:

$$K_p = 1,5$$

$$T_i = 0,00002815$$

$$T_d = 0,0007$$



Obrázek 6. Aplikace pohonů robota pro soutěže FIRA – fotbal robotů

Reference

- [1] V. BROIDA. *Extrapolation des réponses indicielles apériodiques*. Automatisme, vol. XVI, 1969.
- [2] W. KESTER. *Mixed signal and DSP design techniques*. Analog Devices, Inc. ISBN 0-916550-23-0, 2000.
- [3] B. SHAHIAN. *Control System Design Using Matlab*, Prentice Hall, New Jersey 1993, ISBN 0-13-174061-X, 1993.
- [4] A. O'DWYER. *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules*, Imperial College Press, Singapore, ISBN 1-86094-342-X, 2003.
- [5] Matlab - user documentation. <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/techdoc/matlab.shtml>

Práce na projektu a příspěvek jsou podporovány grantem AV 1ET101940418 – “Strategic system control with multi-agents“.

Z. Macháček
zdenek.machacek@vsb.cz

V. Srovnal
vilem.srovnal1@vsb.cz

Department of Measurement and Control, VSB-TUO, 17. listopadu 15, Ostrava, Czech Republic