

APLIKÁCIA xPC TARGET-u PRI RIADENÍ INVERTOVANÉHO KYVADLA

Ivan Masár, Milan Žalman

Katedra automatizácie a regulácie, Fakulta elektrotechniky a informatiky, STU v Bratislave

Abstrakt

Článok sa venuje návrhu fuzzy riadenia invertovaného kyvadla. Ďalej sa venuje spôsobu využitia programového balíka Matlab/Simulink a jeho rozširujúcich knižníc Fuzzy Logic Toolbox, Real-Time Workshop a xPC Target pri návrhu a testovaní regulátora a jeho implementácii pri riadení v reálnom čase. Porovnané sú dosiahnuté výsledky simulácií a experimentov v reálnom čase.

Kľúčové slová

Invertované kyvadlo, fuzzy regulátor, riadenie v reálnom čase.

1. ÚVOD

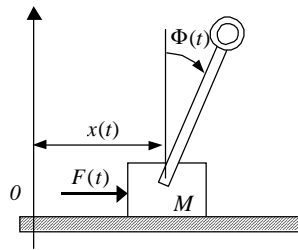
Riadenie invertovaného kyvadla patrí k zaujímavým a často riešeným akademickým problémom. Dôvodom prítlačivosti tohto systému je na jednej strane jednoduchosť jeho matematického modelu a na strane druhej jeho dynamika a samotné správanie sa, ktoré poskytujú možnosti na realizáciu zaujímavých experimentov. Jedná sa totiž o nelineárny systém s dvoma rovnovážnymi stavmi, pričom jeden z nich je stabilný a druhý nestabilný.

Úlohou riadenia je udržať kyvadlo v jeho nestabilnom rovnovážnom stave a to aj v prípade pôsobenia vonkajších porúch, resp. pri zmene želanej polohy vozíka. V opačnom prípade kyvadlo padne do stabilného rovnovážneho stavu. Zložitejšou úlohou je premiestnenie kyvadla z tohto stabilného stavu do hornej polohy. Už z modelu riadeného systému a z popisu cieľov riadenia je zrejmé, že na ich splnenie nebude postačovať jednoduchý lineárny regulátor, ale je potrebné použiť zložitejšie riadenie. Ako typ riadenia, ktoré by bolo schopné dané ciele zabezpečiť, bolo vybrané fuzzy riadenie.

Na simulácie dynamického modelu riadeného systému, ako aj na návrh zvolenej štruktúry fuzzy regulátora, bol použitý programový balík Matlab/Simulink a knižnica Fuzzy Logic Toolbox, čo výrazne skrátilo čas potrebný na vývoj a odladenie navrhnutého riadenia. Keďže naše pracovisko disponuje fyzikálnym modelom invertovaného kyvadla, bolo uvedené riadenie aplikované aj pri jeho riadení v reálnom čase. K tomu bol použitý osobný počítač s prídavnými kartami na spracovanie údajov a knižnice Real-Time Workshop a xPC Target, ktoré umožňujú generovanie aplikácií spúšťateľných v reálnom čase z blokových modelov Simulink-u a užívateľ teda nemusí prácne programovať navrhnuté riadenie v niektorom programovacom jazyku nižšej úrovne. Namerané dáta mohli byť okamžite spracované a vyhodnotené v Matlab-e a využité na úpravy riadiaceho algoritmu.

2. INVERTOVANÉ KYVADLO

Systém invertovaného kyvadla (vid' Obr. 1) pozostáva z vozíka a kyvadla, tvoreného tyčou, ktorého os otáčania je umiestnená na vozíku tak, že kyvadlo sa okolo nej môže voľne otáčať v rozsahu 360°. Vozík je poháňaný jednosmerným motorom, fungujúcim ako generátor momentu.



Obr. 1 Invertované kyvadlo

Stavovými premennými tohoto systému sú poloha vozíka $x(t)$ a jeho rýchlosť $\dot{x}(t)$ a uhol tyče $\Phi(t)$, resp. jej uhlová rýchlosť $\dot{\Phi}(t)$. Vstupom je sila $F(t)$, pôsobiaca na vozík. Označme hmotnosť tyče ako m a vozíka M , l_s nech je vzdialenosť ťažiska tyče od jej osi otáčania, g tiažové zrýchlenie, F_r koeficient viskózneho trenia vozíka, C_r koeficient viskózneho trenia tyče a Θ moment zotrvačnosti tyče vzhľadom na os otáčania. Potom môžeme správanie invertovaného kyvadla opísať nelineárnymi diferenciálnymi rovnicami

$$\Theta\ddot{\Phi}(t) + C\dot{\Phi}(t) - ml_s g \sin \Phi(t) + ml_s \ddot{x}(t) \cos \Phi(t) = 0,$$

$$(M + m)\dot{x}(t) + F_r \dot{x}(t) + m.l_s (\ddot{\Phi}(t) \cos \Phi(t) - \dot{\Phi}(t)^2 \sin \Phi(t)) = F(t),$$

pričom prvá rovnica opisuje správanie tyče a druhá vozíka. Parametre použitého fyzikálneho modelu nvertovaného kyvadla sú uvedené v Tab. 1.

Tab. 1 Paramete invertovaného kyvadla

Parameter	Value	Units
M	24.2	Kg
m	0.241	Kg
l_s	0.147	m
Θ	$7.4 \cdot 10^{-3}$	Kgm^2
F_r	35.5	Kgs^{-1}
C_r	$5.67 \cdot 10^{-4}$	$Kgm^2 s^{-1}$
g	9.806	$Kgms^{-2}$

3. CIELE RIADENIA

Pri návrhu fuzzy regulátora invertovaného kyvadla sme vychádzali z požiadaviek, ktoré mal zvolený typ riadenia zabezpečiť. Tieto požiadavky boli:

- Stabilizácia kyvadla v jeho hornej nestabilnej rovnovážnej polohe (aj pri pôsobení vonkajších porúch na kyvadlo).
- Premiestnenie kyvadla z dolnej rovnovážnej polohy do hornej nestabilnej rovnovážnej polohy.
- Zaujatie želanej polohy vozíka s udržaním kyvadla v nestabilnej polohe.

Po skúsenostiach s riadením kyvadla v reálnom čase sa k uvedeným požiadavkám pridali ešte ďalšie, ktoré nesúviseli priamo s kvalitou riadenia, ale skôr so zabezpečením bezpečného správania sa riadeného systému pri pôsobení väčších vonkajších porúch, resp. pri premiestňovaní kyvadla do nestabilnej rovnovážnej polohy z neštandardných počiatkových podmienok. Uvedené situácie bolo potrebné riešiť vzhľadom k obmedzenej maximálnej dráhe, po ktorej sa vozík mohol pohybovať.

Je zrejmé, že na zabezpečenie každého z týchto cieľov riadenia je nutné použiť inú štruktúru regulátora. Na základe pracovného bodu systému je potom potrebné vybrať príslušný riadiaci algoritmus. Pri klasickom prepínaní medzi výstupmi rôznych regulátorov však dochádza k nespojitostiam akčnej veličiny. Preto sme sa rozhodli použiť ako regulátor invertovaného kyvadla fuzzy regulátor Sugenovho typu, ktorého rozhodovacie pravidlá sú v tvare

$$r_i : \text{ak } x \text{ je } A_i, \dots, \text{ a } y \text{ je } B_i \text{ potom } z \text{ je } f_i(x, \dots, y),$$

pričom $f_i(x, \dots, y)$ môže byť ľubovoľnou funkciou vstupných premenných. Keď táto funkcia reprezentuje jeden regulátor, môže jedno fuzzy rozhodovacie pravidlo vybrať na základe stavu systému príslušný regulátor. Vzájomné prelínanie sa fuzzy množín a súčasná aktivácia viacerých rozhodovacích pravidiel v kombinácii s vhodnou defuzzifikačnou metódou spôsobia, že prepínanie rôznych typov riadiacich algoritmov nebude skokové, ale spojité, resp. parametre regulátorov sa môžu takýmto spôsobom plynule meniť podľa pracovného bodu, v ktorom sa riadený systém nachádza.

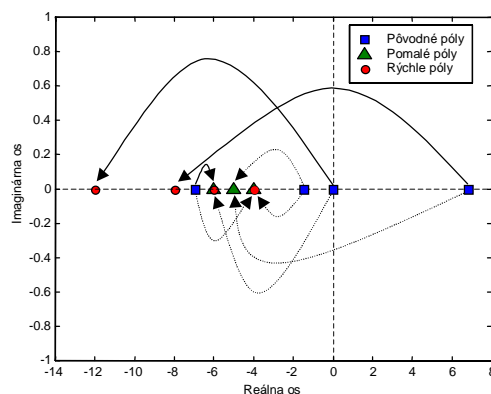
4. STABILIZÁCIA KYVADLA V NESTABILNEJ ROVNOVÁŽNEJ POLOHE

Na stabilizáciu invertovaného kyvadla v jeho nestabilnej rovnovážnej polohe sa ako vhodný typ riadenia ukázal stavový regulátor, navrhnutý metódou rozmiestňovania pólov. Jej princíp spočíva v zavedení takej spätnej väzby od stavových premenných, ktorá zabezpečí, že uzavretý regulačný obvod bude mať želané póly – korene charakteristickej rovnice. Keďže správanie sa systému je dané hodnotami jeho pólov, je možné ich voľbou vnútiť regulačnému obvodu potrebnú dynamiku a tak stabilizovať nestabilný systém invertovaného kyvadla. Lineárny stavový regulátor však dokáže stabilizovať riadený systém iba v okolí pracovného bodu, pre ktorý bol navrhnutý a za predpokladu, že veľkosť akčného zásahu nie je obmedzená. Na zlepšenie kvality regulácie kyvadla v jeho hornej polohe preto bolo uvedenou metódou navrhnutých niekoľko stavových regulátorov pre rôzne uhly kyvadla a rôzne hodnoty pólov uzavretého regulačného obvodu. Pracovné body boli zvolené dva a to

$$P_1 = [x, \Phi, \dot{x}, \dot{\Phi}]^T = [0 \text{ m}, 0 \text{ rad}, 0 \text{ ms}^{-1}, 0 \text{ rads}^{-1}]^T,$$

$$P_2 = [x, \Phi, \dot{x}, \dot{\Phi}]^T = [0 \text{ m}, 0.17 \text{ rad}, 0 \text{ ms}^{-1}, 0 \text{ rads}^{-1}]^T.$$

Rozdielna dynamika uzavretého regulačného obvodu, ktorú mali stavové regulátory zabezpečovať, bola zvolená z dôvodu obmedzenia akčnej veličiny. Ak totiž majú byť stavové veličiny kyvadla riadené presnejšie a regulačný obvod má rýchlejšie reagovať na poruchy, je potrebné posúvať póly uzavretého obvodu v komplexnej rovine viac doľava. V takom prípade však narastajú hodnoty akčného zásahu. Môže sa teda stať, že pri vzniku väčšej poruchy v regulačnom obvode alebo pri veľkej skokovej zmene želanej polohy vozíka a súčasnom obmedzení akčného zásahu dôjde k rozstabilizovaniu riadeného systému. Ak však stavový regulátor zabezpečuje pomalšiu dynamiku regulačného obvodu, kvalita regulácie je nižšia a systém reaguje pomalšie, „lenivejšie“ na poruchy. Preto boli navrhnuté stavové regulátory s rôznymi, tzv. „rýchlymi“ a „pomalými“ pólmi. Stavové regulátory s rýchlymi pólmi sa uplatnia pri riadení kyvadla v blízkosti želaných hodnôt stavov, t.j. pre malé odchýlky tyče z nestabilnej rovnovážnej polohy a malé odchýlky polohy vozíka od želanej hodnoty. Naopak, stavový regulátor s pomalými pólmi riadi kyvadlo pri väčších odchýlkach stavových veličín od želaných hodnôt. Príklad voľby rýchlych a pomalých pólov pre linearizovaný model kyvadla v pracovnom bode P_1 je znázornený na Obr. 2 a hodnoty pólov riadeného systému a uzavretého regulačného obvodu sú uvedené v Tab. 2.



Obr. 2 Príklad voľby pólov uzavretého regulačného obvodu

Tab. 2 Póly otvoreného a uzavretého regulačného obvodu

Póly	
Pôvodné, pracovný bod P_1	$[0, 6.83, -6.92, -1.46]$
Pôvodné, pracovný bod P_2	$[0, 6.78, -6.87, -1.46]$
Rýchle	$[-12, -8, -6, -5]$
Pomalé	$[-6, -5, -4, -4]$

5. ROZKÝVANIE KYVADLA

Pri návrhu algoritmu rozkývania kyvadla zo stabilnej do nestabilnej rovnovážnej polohy sa vychádza z predpokladu, že pri tomto premiestnení kyvadla je potrebné dodať systému určitú energiu. Celková energia kyvadla je súčtom jeho kinetickej a potenciálnej energie

$$E = E_K + E_P = \frac{1}{2} \Theta \dot{\Phi}^2(t) + mgl_s (\cos \Phi(t) + 1).$$

Jednou z možností zvyšovania energie kyvadla je postupné zväčšovanie jeho kinetickej energie pri prechode dolnou rovnovážnou polohou. V týchto okamihoch je nutné vhodným pohybom vozíka zväčšovať kmity kyvadla, až kým sa nedostane do hornej polohy, kde bude zachytené stavovým regulátorom. Vozík treba riadiť tak, aby sa pri prechode tyče dolnou polohou pohyboval proti smeru pohybu kyvadla, čím sa zvýši jeho uhlová rýchlosť a teda aj jeho kinetická energia. Keď kyvadlo zastavuje na vrchole kmitu, je treba vozík zastaviť, inak by sa kyvadlo naopak spomalilo. Keďže sa dá presne stanoviť uhlová rýchlosť tyče, ktorá je pri prechode dolnou polohou potrebná na vyšvihnutie kyvadla do hornej ako

$$\dot{\Phi} = 2 \sqrt{\frac{mgl_s}{\Theta}},$$

je možné použiť P regulátor na jej reguláciu pri prechode tyče dolnou polohou, v prípade, že uhlová rýchlosť sa blíži k tejto hraničnej hodnote.

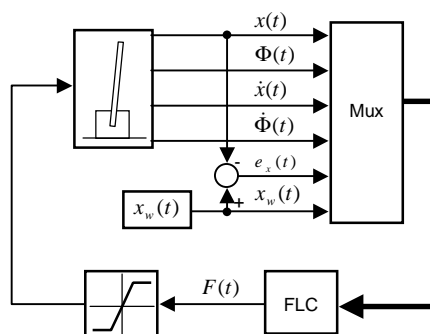
6. BEZPEČNOSTNÉ RIADENIE

Jedným z cieľov riadenia bolo, okrem požiadaviek na riadenie samotného kyvadla, aj zabezpečenie určitej ochrany riadeného objektu pred kolíziami, spôsobenými jeho rozstabilizovaním pôsobením vonkajších porúch, resp. pri riadení systému v okolí jeho ohraničení (myslí sa tým obmedzenie dráhy a rýchlosti vozíka). Preto boli fuzzy rozhodovacie pravidlá fuzzy regulátora formulované tak, aby na základe aktuálneho stavu systému buď vybrali vhodný riadiaci algoritmus (teda stabilizácia kyvadla v jeho nestabilnom

rovnovážnom stave alebo rozkývavanie kyvadla), alebo zabezpečili stabilizáciu riadeného objektu v definovanom pracovnom rozsahu. Tá je realizovaná pomocou jednoduchých P regulátorov rýchlosti vozíka. V prípade prekročenia medzných hodnôt stavových veličín vozíka sa teda aktivujú také fuzzy rozhodovacie pravidlá, ktorých výstupom je akčný zásah niektorého z týchto P regulátorov, ktoré znížia rýchlosť vozíka na povolenú hodnotu, alebo ho úplne zastavia.

7. PARAMETRE FUZZY REGULÁTORA

Základná bloková schéma regulačného obvodu invertovaného kyvadla s fuzzy regulátorom je zobrazená na Obr. 3. Vstupnými premennými do fuzzy regulátora sú stavové veličiny systému invertovaného kyvadla ($x, \Phi, \dot{x}, \dot{\Phi}$), želaná hodnota polohy vozíka $x_w(t)$ a jej odchýlka $e_x(t)$. Výstupnou premennou je sila $F(t)$ pôsobiaca na vozík.



Obr. 3 Štruktúra fuzzy regulátora invertovaného kyvadla

Univerzá vstupných premenných sú pokryté trojuholníkovými alebo lichobežníkovými funkciami príslušnosti. Výstupnou funkciou vo fuzzy regulátore so Sugenovým typom inferenčného mechanizmu môže byť ľubovoľná funkcia vstupných premenných, v našom prípade ako výstupy boli použité dva typ lineárnych regulátorov a niekoľko konštantných funkcií (použitých v rozhodovacích pravidlách pri rozhúpaní kyvadla). Použité lineárne regulátory boli:

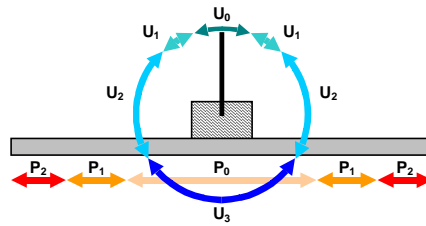
- Stavový regulátor na stabilizáciu kyvadla v nestabilnom rovnovážnom stave.
- P regulátor rýchlosti vozíka, použitý v bezpečnostnom riadení.
- P regulátor uhlovej rýchlosti tyče pri jej rozhúpaní z dolnej do hornej rovnovážnej polohy.

Ako defuzzifikačná metóda na výpočet ostrej hodnoty akčného zásahu bola použitá metóda ťažiska singletonov.

Fuzzy rozhodovacie pravidlá (bolo ich použitých 135), je možné rozdeliť do dvoch skupín:

- Pravidlá určené na stabilizáciu kyvadla v nestabilnom rovnovážnom stave.
- Pravidlá určené na premiestnenie kyvadla z dolnej do hornej rovnovážnej polohy.

Dominantnými vstupnými premennými, podľa ktorých sa vyberá vhodný typ riadiaceho algoritmu kyvadla, sú poloha vozíka a uhol kyvadla. Lingvistické hodnoty týchto premenných definujú niekoľko oblastí, charakterizovaných určitými skupinami rozhodovacích pravidiel. Toto rozdelenie na oblasti podľa hodnôt spomínaných premenných je znázornené na Obr. 4.



Obr. 4 Pracovné oblasti invertovaného kyvadla

Vozík v oblasti P_0 a kyvadlo v oblasti U_0

Ak sa riadený systém nachádza v stave definovanom týmito oblasťami, použije sa na riadenie kyvadla niektorý zo stavových regulátorov, ktorého parametre sa budú spojito meniť v závislosti od uhla tyče a vzdialenosti vozíka od želanej polohy. Ak je však uhlová rýchlosť kyvadla v dôsledku pôsobenia vonkajšej poruchy alebo po predchádzajúcom rozkývaní príliš vysoká, nechá sa kyvadlo voľne padnúť do stabilnej rovnovážnej polohy.

Vozík v oblasti P_1

V tomto prípade sa vozík nachádza v okrajových, aj keď ešte nie nedovolených oblastiach dráhy. Vhodný algoritmus na riadenie vozíka podľa polohy kyvadla sa vyberá len vtedy, keď akčný zásah tohto algoritmu vedie k pohybu vozíka smerom k oblasti P_0 , v opačnom prípade je zastavený lineárnym P regulátorom rýchlosti.

Vozík v oblasti P_2

Ak sa vozík napriek ochrane použitej v oblastiach P_1 nachádza až v tejto polohe, teda v zakázanej oblasti, je zastavený regulátorom rýchlosti a nie je už možné ho riadením priviesť späť do dovolených oblastí, ale je nutné ukončiť experiment.

Kyvadlo v oblasti U_3

Ak sa kyvadlo nachádza v tejto oblasti, teda v blízkosti stabilného rovnovážneho stavu, je cieľom riadenia zvýšiť vhodným pohybom vozíka jeho uhlovú rýchlosť pri prechode dolnou úvratou a tým zväčšiť amplitúdu jeho kmitov. Veľkosť sily, pôsobiacej pritom na vozík, je závislá od uhlovej rýchlosti tyče.

Kyvadlo v oblasti U_2

V tejto oblasti, na rozdiel od U_3 , dochádza naopak k zastavovaniu kyvadla na vrchole kmitov, ktoré sú však ešte príliš malé na to, aby v nich bolo možné kyvadlo zachytiť stabilizujúcim regulátorom. Preto je tu akčný zásah nulový, keďže už ním nie je možné zvýšiť uhlovú rýchlosť kyvadla.

Kyvadlo v oblasti U_1

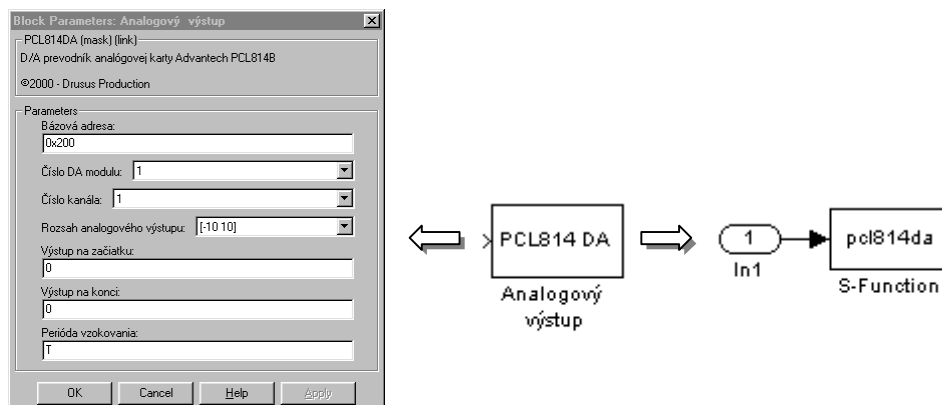
Táto časť tvorí rozhranie medzi oblasťou, v ktorej sa používa algoritmus určený na rozkývanie kyvadla a oblasťou, v ktorej je kyvadlo stabilizované stavovým regulátorom. Je teda určená už len na malú korekciu uhlovej rýchlosti tyče.

8. IMPLEMENTÁCIA NAVRHNUTÉHO RIADENIA POMOCOU xPC TARGET-u

Ako už bolo spomenuté, celý vývoj fuzzy regulátora invertovaného kyvadla prebiehal v programovom prostredí Matlab/Simulink, s využitím prídavnej knižnice Fuzzy Logic Toolbox. Ďalšie výrazné zníženie času, potrebného na odladenie riadiaceho algoritmu, umožnilo použitie knižníc Real-Time Workshop a xPC Target na implementáciu navrhnutého riadenia pri riadení v reálnom čase. V opačnom prípade by len naprogramovanie riadiaceho programu, vrátane štruktúry fuzzy regulátora, trvalo dlhšie ako celý vývoj a odskúšanie

navrhnutého riadenia s použitím uvedených prostriedkov. Real-Time Workshop a jeho nadstavba xPC Target totiž umožňujú generovanie aplikácii, bežiacich v reálnom čase, priamo z blokovej schémy Simulink-u. Navyše užívateľovi poskytujú dostatok možností na prispôbenie generovaného kódu a následne výslednej aplikácie jeho potrebám, čím je možné vytvoriť program spúšťateľný aj na neštandardnej cieľovej platforme (napr. DSP procesor) alebo v blokovej schéme využívať bloky, reprezentujúce rôzne hárdverové zariadenia (napr. analógové/digitálne vstupno/výstupné karty), ak ich podpora ešte nie je v týchto knižniciach zahrnutá. Pri použití knižnice xPC Target je práca s real-time aplikáciami ešte pohodlnejšia ako pri použití Real-Time Workshop-u, keďže tie sú spúšťané na samostatnom riadiacom osobnom počítači s vlastným real-time operačným systémom xPC real-time kernel, ktorý umožňuje zobrazovať všetky dôležité údaje o práve bežiacej simulácii a rôzne simulačné dáta. Použitím vlastného operačného systému na xPC Target-e je zároveň možné realizovať ho aj ako menej výkonný PC. Prostredníctvom vývojového počítača je možné meniť parametre jednotlivých blokov modelu počas behu aplikácie v reálnom čase, ktoré sa následne prenášajú aj na riadiaci počítač, resp. je tu tiež možné vykresliť odsimulované priebehy.

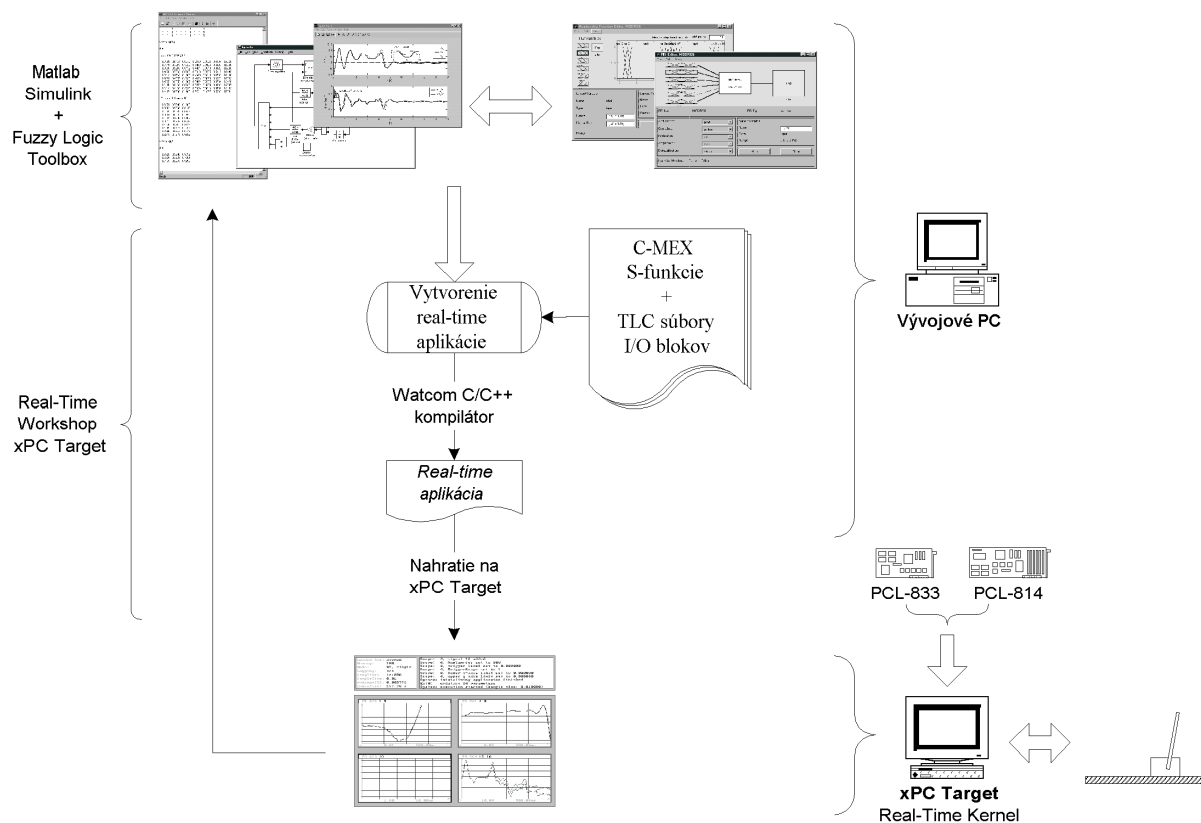
Pri riadení invertovaného kyvadla sme na styk riadiaceho počítača s riadeným systémom použili analógovú kartu Advantech PCL-814B doplnenú o modul DA prevodníkov PCL-814-DA-1 a kartu na vyhodnotenie signálov z IRC snímačov PCL-833 rovnakej firmy. Keďže pre tieto karty nie sú vytvorené bloky, reprezentujúce ich vstupy a výstupy, museli byť napísané ako S-funkcie v jazyku C a pri generovaní zdrojového C kódu z blokovej schémy Simulink-u boli vložené do výsledného kódu pomocou vytvorených TLC súborov. Príklad realizácie bloku analógového výstupu karty PCL-814 je zobrazený na Obr. 5.



Obr. 5 Realizácia vstupných/výstupných blokov

Na vytvorenie aplikácie zo zdrojového C kódu bol použitý prekladač Wactom C/C++ 11. Ako riadiaci počítač xPC Target bol použitý PC 486DX, 33MHz, 4MB RAM. Na takejto zostave bolo pri realizácii navrhnutého riadenia možné dosiahnuť minimálnu periódu vzorkovania 10 ms.

Prepojenie jednotlivých častí programového balíka Matlab/Simulink a ich použitie počas procesu vývoja, testovania a implementácie navrhnutého riadenia je zobrazené na Obr. 6.

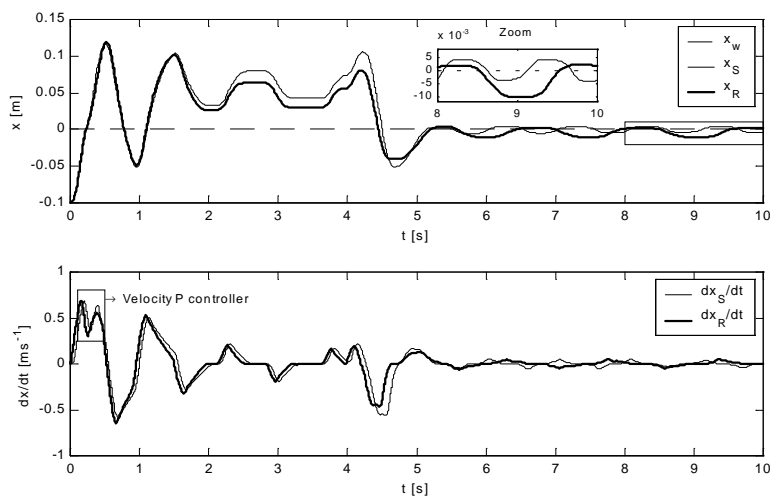


Obr. 6 Proces návrhu a testovania riadiaceho algoritmu s použitými programovými a hardverovými prostriedkami

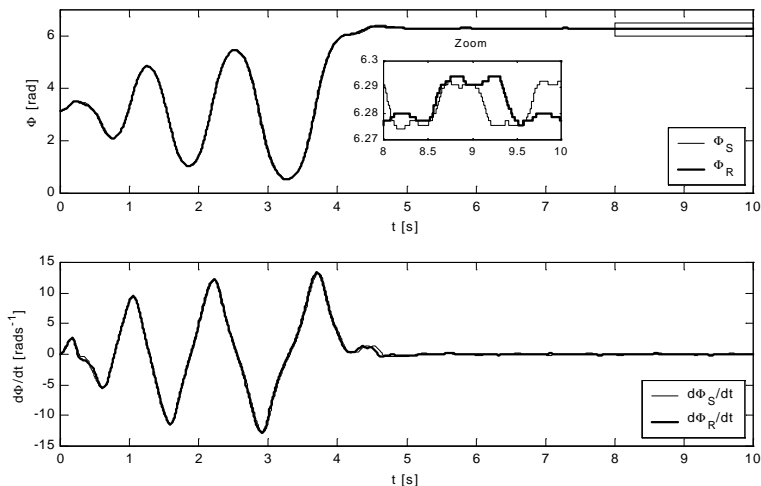
9. POROVNANIE VÝSLEDKOV SIMULÁCIÍ A EXPERIMENTOV

Porovnanie výsledkov simulácií a experimentov je urobené pre rozkývanie kyvadla z dolnej rovnovážnej polohy do hornej a jeho následného zachytenia v nej. Počiatočná poloha vozíka bola v tomto prípade zvolená ako $x(0) = -0.1 \text{ m}$ a želaná hodnota, ktorú mal vozík po stabilizácii kyvadla zaujať, bola $x_w = 0 \text{ m}$. Priebehy stavových veličín invertovaného kyvadla a akčného zásahu získané simuláciou, resp. pri riadení v reálnom čase, sú zobrazené na Obr. 7, Obr. 8 a Obr. 9.

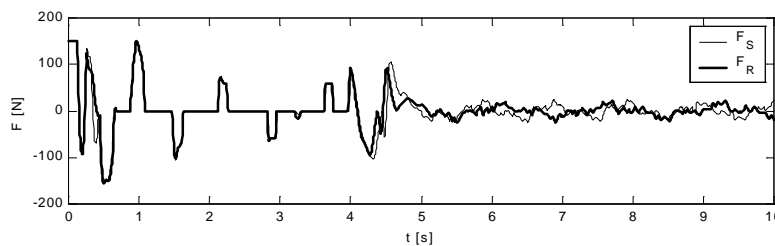
Pozn. V grafoch sú indexom S označené odsimulované a indexom R namerané priebehy.



Obr. 7 Porovnanie priebehov polohy a rýchlosti vozíka



Obr. 8 Porovnanie priebehov uhla a uhlovej rýchlosti kyvadla



Obr. 9 Porovnanie priebehov akčného zásahu

Z uvedených priebehov je zrejماً značná zhoda simulovaného modelu s reálnym zariadením. Menšie odchýlky medzi odsimulovanými a nameranými priebehmi sú spôsobené nepresnosťou identifikovaného modelu. Z priebehu polohy vozíka (Obr. 7) je vidieť, že vplyvom trení (predovšetkým suchého trenia) sa poloha vozíka neustáli na želannej hodnote, ale bude okolo nej oscilovať. V tomto prípade sa veľkosť kmitov pohybuje v rozsahu $-5 \cdot 10^{-3} \div 10^{-2} \text{ m}$. Kyvadlo bude tiež kmitať okolo nestabilného rovnovážneho stavu v rozsahu $\pm 0.012 \text{ rad}$, t. j. $\pm 0.7^\circ$ (viď Obr. 8). Z detailu priebehu uhla tyče je vidieť, že kvantovanie signálu inkrementálnym snímačom nie je dostatočne malé ($2\pi \text{ rad} / 4096 = 0.00153 \text{ rad}$, t. j. 0.088°), čo sa prejaví predovšetkým pri riadení kyvadla v nestabilnom rovnovážnom stave, keď výchylka kyvadla zodpovedá zhruba ± 8 impulzom.

Pri priebehu rýchlosti vozíka, zobrazenej na Obr. 7, stojí za pozornosť vyznačená časť, kde je vidieť použitie fuzzy pravidiel, ktoré pri rýchlosti vozíka, presahujúcej povolené hodnoty, aktivujú P regulátor rýchlosti, ktorý ju má za úlohu znížiť na povolenú hranicu. Tento zásah P regulátora je zreteľný aj z priebehu akčného zásahu (Obr. 9) v zodpovedajúcom čase.

10. ZÁVER

Cieľom článku bolo stručne predstaviť riešenie návrhu riadenia invertovaného kyvadla pomocou fuzzy regulátora s využitím programového prostriedku Matlab/Simulink a prídavných knižníc na vývoj fuzzy regulátora, resp. implementáciu riadiaceho algoritmu pri riadení v reálnom čase. Simulačné a experimentálne výsledky potvrdili správnosť funkcie navrhnutého riadenia, ktoré dokázalo rozkývať kyvadlo zo stabilného do nestabilného rovnovážneho stavu a následne ho v ňom stabilizovať, pričom vozík dokázal zaujať želanú

polohu. Menšie odchýlky medzi simulačným modelom a nameranými dátami sú spôsobené nepresnosťami identifikovaného fyzikálneho modelu kyvadla.

Použitie programového prostriedku Matlab/Simulink umožnilo výrazne znížiť čas potrebný na návrh, modelovanie a v spojení s Real-Time Workshop-om a xPC Target-om aj realizáciu navrhnutého riadenia. Tento fakt sa snažíme využiť aj pri pedagogickom procese tak, aby študenti mohli získať čo najviac skúseností z oblasti merania a spracovania dát a riadenia rôznych fyzikálnych modelov alebo reálnych zariadení v reálnom čase, keďže použitím spomínaných prostriedkov môžu viac času venovať návrhu vlastných riadiacich algoritmov ako ich samotnej implementácii.

11. LITERATÚRA

- [1] Driankov, D., Hellendoorn, H., Reinfrank, M.: An Introduction to Fuzzy Control. *Springer-Verlag, Berlin, 1993.*
- [2] xPC Target, User's Guide. *The MathWorks, Inc., 1999.*
- [3] Real-Time Workshop, User's Guide. *The MathWorks, Inc., 1999.*
- [4] Isermann, R.I.: Digital Control Systems. *Springer-Verlag, Berlin, 1989.*
- [5] Lee, C.C.: Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller-Part I, II. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 20, No. 2, 1990, str. 404-418 a Vol. 20, No. 2, 1990, str. 419-435.*

Kontakt:

Ing. Ivan Masár, Katedra automatizácie a regulácie, Fakulta elektrotechniky a informatiky
STU, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava, e-mail: masar@nov1.kar.elf.stuba.sk