

**Vedecká rada Fakulty elektrotechniky a informatiky
Slovenskej technickej univerzity v Bratislave**

Ing Ľudovít Farkas

**PRIAME ADAPTÍVNE RIADENIE SYSTÉMOV SO
VSTUPNÝM DOPRAVNÝM ONESKORENÍM**

Autoreferát dizertačnej práce

na získanie vedecko-akademickej hodnosti
philosophiae doctor

v odbore doktorandského štúdia:
9.2.7 Kybernetika

Bratislava, 2013

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Ústave riadenia a priemyselnej informatiky Fakulty elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Predkladateľ: **Ing. Eudovít Farkas**
Ústav riadenia a priemyselnej informatiky
Fakulta elektrotechniky a informatiky, STU v Bratislave
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: **prof. Ing. Ján Murgaš, PhD.**
Ústav riadenia a priemyselnej informatiky
Fakulta elektrotechniky a informatiky, STU v Bratislave
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: prof. Ing. Mikuláš Alexík, PhD.
Fakulta riadenia a informatiky, ŽU v Žiline
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc.
Fakulta chemickej a potravinárskej technológie, STU v Bratislave
Radlinského 9, 812 37 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný dňa

Obhajoba dizertačnej práce sa koná
pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v odbore doktorandského štúdia,
vymenovanou predsedom spoločnej odborovej komisie dňa, číslo
odboru: 9.2.7, odbor doktorandského štúdia: Kybernetika na Ústave riadenia a
priemyselnej informatiky Fakulty elektrotechniky a informatiky Slovenskej
technickej univerzity v Bratislave, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Predseda spoločnej odborovej komisie:

.....

Ústav riadenia a priemyselnej informatiky STU v Bratislave
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Názov

Priame adaptívne riadenie systémov so vstupným dopravným oneskorením

Anotácia

Dizertačná práca si kladie za cieľ návrh novej verzie priameho adaptívneho riadenia pre systémy so vstupným dopravným oneskorením v stavovej a aj vstupno-výstupnej verzii. Tento cieľ je dôležitý, keďže existuje len pomerne málo prístupov AR s referenčným modelom pre takéto systémy. Práca ponúka dôkladný prehľad existujúcich metód a ukazuje riešenie problematiky návrhom stavového a vstupno-výstupného algoritmu aj s odvodením ich stability. Existujúce a novo-navrhnuté prístupy sú porovnané na rovnakých príkladoch, ktoré ukazujú podobný výkon regulátorov, avšak jednoduchšiu štruktúru novo-navrhnutých regulátorov. Platnosť výsledkov je demonštrovaná aj simuláciami na laboratórnych modeloch RC-člena a servosystému. Laboratórne simulácie ukazujú potrebu robustifikácie zákonov adaptácie voči nemodelovanej dynamike, čo je zároveň motiváciou do ďalšieho výskumu.

Kľúčové slová

Adaptívne riadenie, referenčný model, dopravné oneskorenie, Lyapunovova teória stability

Title

Direct adaptive control of systems with input delays

Abstract

The PhD thesis aims to design a new version of direct adaptive controller for systems with input delays. It presents the state-feedback and also the output-feedback version of the controller. This goal is important because there exist only a few approaches to adaptive control of such systems. The work offers a thorough overview of existing methods and demonstrates the solution to the input-delay issue by designing a state-feedback and an output-feedback adaptive model reference controller with their respective stability proofs. The existing and newly-designed approaches are compared using equal scenarios that show a similar performance of the controllers, but a simpler structure of the newly-designed structures. The validity of the results is demonstrated by means of experiments with laboratory models of an RC-circuit and a servodrive. The laboratory simulations show the need for robustification of the adaptation laws because of unmodelled dynamics, which is a motivation for our future work.

Keywords

Adaptive control, reference model, time delay, Lyapunov theory

Obsah

Úvod	5
Ciele dizertačnej práce.....	5
1 Priame adaptívne riadenie s referenčným modelom	6
2 Systémy s dopravným oneskorením	7
3 Metódy priameho adaptívneho riadenia systémov s dopravným oneskorením .	8
3.1 MRAC pre systémy s dopravným oneskorením využívajúce robustifikáciu	8
3.2 MRAC pre systémy s dopravným oneskorením využívajúce predikciu	9
3.2.1 Štruktúry využívajúce bloky distribuovaných oneskorení.....	9
3.2.2 Štruktúry bez blokov distribuovaných oneskorení.....	9
4 Návrh novej metódy adaptívneho riadenia systémov s dopravnými oneskoreniami	10
4.1 Stavový regulátor pre systém s dopravným oneskorením na vstupe	10
4.2 Stavový regulátor pre systém s dopravným oneskorením na vstupe a v stavoch riadeného systému.....	15
4.3 Riadenie nestabilných sústav pomocou navrhnutého stavového adaptívneho regulátora.....	19
4.4 Vstupno-výstupný regulátor pre systém s dopravným oneskorením na vstupe	22
4.5 Porovnanie fungovania navrhnutých adaptívnych regulátorov s regulátormi uvedenými v literatúre.....	27
4.6 Nasadenie navrhnutého adaptívneho regulátora v sieťovom riadení	31
4.7 Overenie na laboratórnom modeli RC člena	32
4.8 Overenie na laboratórnom modeli servosystému	33
Záver	34
Zoznam publikácií autora	36
Použitá literatúra	38

Úvod

Regulátory s pevnou štruktúrou nie sú vhodné pre nasadenie vo všetkých oblastiach riadenia. Toto platí hlavne, ak sa parametre riadenej sústavy menia vo veľkom rozsahu, alebo sú neznáme. Vtedy nie sú schopné zachovania rovnakej odozvy riadiaceho obvodu vo všetkých pracovných bodoch. Adaptívne riadenie (AR) ako samostatný odbor teórie riadenia preto už niekoľko desaťročí ponúka riešenia pre podobné situácie. Táto práca si taktiež dáva za cieľ prispieť k rozvoju teórie adaptívneho riadenia, menovite priameho adaptívneho riadenia s referenčným modelom.

Dopravné oneskorenie v riadiacom systéme sa často vyskytuje v niektorých typoch technologických procesov a je presne takým javom, ktorý si vyžaduje zvláštnu pozornosť pri návrhu AR s referenčným modelom. S narastajúcim trendom nasadenia sieťových riadiacich systémov sa tento problém prenáša do všetkých riadiacich obvodov. Autori publikácií sa vo všeobecnosti najviac venujú dopravnému oneskoreniu v stavoch riadenej sústavy alebo oneskoreniu v sieti a menej sa venujú dopravnému oneskoreniu na vstupe do riadenej sústavy, ktoré môže dosahovať najdlhších časov. Riadiace štruktúry sa podľa veľkosti oneskorenia delia na štruktúry s robustifikovanými zákonmi adaptácie a na štruktúry využívajúce predikciu.

Keďže táto problematika AR s referenčným modelom je podľa našej mienky jednou z najmenej preskúmaných a pritom pre prax veľmi užitočných, považujeme výskum algoritmov potlačujúcich účinky vstupného dopravného oneskorenia za potrebný a predkladaná práca ponúka riešenie tejto problematiky pre stavovú a aj pre vstupno-výstupnú štruktúru riadiaceho obvodu.

Ciele dizertačnej práce

Cieľom dizertačnej práce je výskum a návrh algoritmov adaptívneho riadenia s referenčným modelom a oneskorením na vstupe riadenej sústavy a v bodoch je stanovený nasledovne:

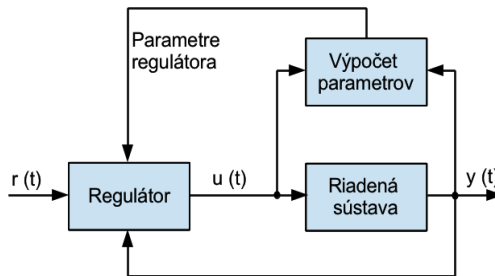
- Analýza súčasného stavu výskumu a vývoja algoritmov AR s referenčným modelom s dopravným oneskorením na vstupe do riadenej sústavy.
- Návrh nového algoritmu stavového AR s referenčným modelom pre systémy so vstupným dopravným oneskorením na báze prediktora, s dôrazom na jednoduchosť riadiacej štruktúry.
- Overenie stability navrhnutého stavového algoritmu.
- Overenie použiteľnosti na riadenie stabilných aj nestabilných sústav.
- Návrh nového algoritmu vstupno-výstupného AR s referenčným modelom pre systémy so vstupným dopravným oneskorením na báze prediktora, s

- dôrazom na jednoduchosť riadiacej štruktúry.
- Overenie stability navrhnutého vstupno-výstupného algoritmu.
- Porovnanie oboch algoritmov s existujúcimi prístupmi z literatúry.
- Simulačné overenie oboch algoritmov a overenie vstupno-výstupnej štruktúry na laboratórnom modeli.

1 Priame adaptívne riadenie s referenčným modelom

Pevne nastavený regulátor nedokáže zabezpečiť akceptovateľné správanie riadiaceho obvodu za každých podmienok, najmä v prípade ak sa parametre riadenej sústavy menia v čase alebo sú neznáme. Práve tieto skutočnosti prispeli k rozvoju adaptívnych riadiacich algoritmov, ktoré obvykle delíme na:

- *nepriame adaptívne riadenie* - priebežná identifikácia parametrov modelu sústavy a následný výpočet zosilnení zákona riadenia.
- *priame adaptívne riadenie* – výpočet zosilnení regulátora je priamy, bez predošlej identifikácie sústavy (obr. 1.1).



Obrázok 1.1: Priame adaptívne riadenie

Výpočet parametrov regulátora pridá dodatočnú dynamiku riadiacemu systému, ktorá je vždy nelineárna a preto komplikuje analýzu riadiaceho systému.

V ďalšom sa budeme venovať priamemu adaptívnemu riadeniu s referenčným modelom (Model Reference Adaptive Control – MRAC), kde sú žiadané vlastnosti uzavretého regulačného obvodu opísané referenčným modelom, pričom samotný výpočet zosilnení regulátora je realizovaný adaptívnym algoritmom.

MRAC riadiace štruktúry delíme na:

- *stavové MRAC* – k dispozícii sú všetky stavy riadenej sústavy
- *vstupno-výstupné MRAC* – k dispozícii sú len vstupno-výstupné

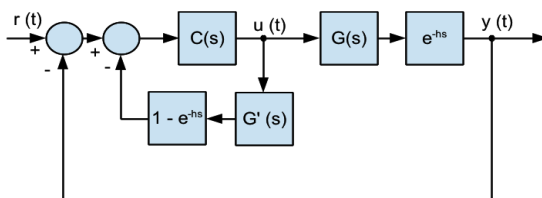
informácie riadenej sústavy

V niektorých prácach je pojem MRAC regulátorov synonymom priameho adaptívneho riadenia. Existujú však aj nepriame adaptívne štruktúry, ktoré využívajú referenčný model [1] a preto považujeme za dôležité zdôrazniť, že všetky MRAC štruktúry v tejto práci sú priame a princíp ich fungovania je vysvetlený napr. v prácach [2, 3, 4].

2 Systémy s dopravným oneskorením

Dopravné oneskorenie (DO) je častým javom vyskytujúcim sa v technologických procesoch, pričom príkladmi takýchto procesov sú čerpadlá, kvapalinové nádrže, niektoré typy chemických procesov alebo aj spaľovacie systémy. Podľa [5, 6] patria takéto systémy do triedy nekonečnorozmerných *funkcionálnych diferenciálnych rovníc* (functional differential equations – FDE). Samotná podtrieda FDE zaoberajúca sa systémami s oneskoreniami sa nazýva aj *diferenciálne rovnice oneskorení* (delay differential equations – DDE) [7]. Prítomnosť dopravného oneskorenia v systéme môže vyvolať nestabilitu riadiaceho obvodu alebo nedostatočný priebeh riadenej veličiny [8, 9, 10, 11].

Snáď najznámejším prístupom k riadeniu systémov s dopravnými oneskoreniami je prístup, ktorý navrhol v päťdesiatych rokoch O. J. Smith [13]. Tento spôsob nesie meno Smithov prediktor a kompenzuje oneskorený výstup riadenej sústavy pomocou zavedenia vnútornej spätnej väzby s modelom riadeného systému, ktorý slúži na predikciu výstupu skutočnej riadenej sústavy, obr. 2.1.



Obrázok 2.1: Princíp zapojenia Smithovho prediktora. $C(s)$ - regulátor; $G(s)$ - riadená sústava, $G'(s)$ - model riadenej sústavy, h – dopravné oneskorenie.

Základný Smithov prediktor bol samozrejme odvtedy rozšírený a modifikovaný napr. v prácach [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20]. Tieto modifikácie rozšírili pôvodnú myšlienku o aj nestabilné riadené systémy, o použitie konečno-časových integrálov alebo o zahrnutie adaptívneho regulátora.

3 Metódy priameho adaptívneho riadenia systémov s dopravným oneskorením

V návrhu priamych adaptívnych regulátorov sa autori uberajú 2 možnými smermi pri vysporiadaní sa s účinkami dopravného oneskorenia na riadiaci systém. Prvým možným riešením je robustifikácia zákonov adaptácie, čo však zabezpečí schopnosť vysporiadať sa len s pomerne malými dopravnými oneskoreniami (rádovo v desatinách sekúnd) a preto je takýto prístup vhodný napríklad pre sieťové riadiace systémy, kde jedným z problémov je práve malé premenlivé dopravné oneskorenie. Návrh takýchto regulátorov je popísaný napr. v prácach [21, 22, 23, 24].

Druhým možným riešením je využitie techník predikcie, ktorými je napr. adaptívna úprava Smithovho prediktora v tzv. „posicast“ regulátoroch [6, 20, 25], ktoré však využívajú konečné časové integrály akčného zásahu (bloky distribuovaných oneskorení – distributed-delay blocks – DD bloky). Prediktorovým metódam bez použitia DD blokov sa venujú autori prác [26, 27, 28], ktorí do zákonov adaptácie zavádzajú rozšírenú odchýlku.

3.1 MRAC pre systémy s dopravným oneskorením využívajúce robustifikáciu

Problematike priameho adaptívneho riadenia systémov s dopravným oneskorením na vstupe sa venovala práca [24], kde autori okrem iného opísali aj spôsob výpočtu hraničného dopravného oneskorenia, pri ktorom je uzavretý obvod ešte stabilný. Opierajú sa o to, že URO v adaptívnom riadení stráca robustnosť tým viac, čím je väčšia hodnota adaptívneho zosilnenia a tým pádom pre danú veľkosť adaptívneho zosilnenia existuje korešpondujúca hodnota dopravného oneskorenia, pre ktoré je URO na hranici stability. V takomto prípade je však dôkaz globálnej stability zložitý a často vedie ku konzervatívnym hodnotám hraničného dopravného oneskorenia.

Metóda výpočtu hraničného dopravného oneskorenia sa nazýva metódou ohraničenej lineárnej analýzy stability (MOLAS) a venujú sa jej aj práce [29, 30]. MOLAS aproximuje adaptívny systém sériou ohraničených lineárnych systémov vnútri časových okien a umožňuje využitie nástrojov lineárnej analýzy pre zistenie lokálnej stability a hraničného dopravného oneskorenia. Medzi metódy, ktoré môžeme využiť na samotné určenie stability, podľa [24] zaraďujeme: Padého aproximáciu, Lyapunov-Krasovského metódu s optimalizáciou sumy štvorcov a metódu miery matice (Matrix-measure method).

Autori práce [24] porovnali niekoľko prístupov adaptívneho riadenia v zmysle hraničného dopravného oneskorenia. Týmito prístupmi bol štandardný MRAC, σ - modifikácia zákona adaptácie a tzv. optimálna modifikácia

riadenia (Optimal Control Modification).

Ďalšími metódami založenými na robustifikácii sú prístupy použité na stabilizovanie URO v sieťovom riadení. Tejto problematike sa venovali autori práce [23], kde okrem premenlivého dopravného oneskorenia berú do úvahy aj možnosť výpadku dátových balíkov. Jedným z možných riešení je nájdenie horného ohraničenia periódy vzorkovania. Ďalšou úpravou algoritmu MRAC je modifikácia popísaná v práci [36], kde sa autori tiež venovali problematike dopravného oneskorenia v SRS a výpadku dátových balíkov.

3.2 MRAC pre systémy s dopravným oneskorením využívajúce predikciu

3.2.1 Štruktúry využívajúce bloky distribuovaných oneskorení

Adaptívna štruktúra MRAC využívajúca Smithov prediktor bola predstavená v práci [25], kde použitý zákon adaptácie je podobný zákonu adaptácie v štruktúre bez oneskorenia a stabilita je overená pomocou Lyapunov-Krasovského funkcionálu.

V práci [20] bol predstavený tzv. posicast (positive forecast – pozitívny odhad) regulátor založený na princípe Smithovho prediktora. Rozdiel medzi uvedenými metódami je v tom, že metóda z práce [25] predikuje stavy riadenej sústavy a druhá spomenutá metóda predikuje zákon riadenia.

3.2.2 Štruktúry bez blokov distribuovaných oneskorení

Autori prác [26, 38] tvrdia, že nasadenie regulátorov s DD blokmi je komplikované z dôvodu konečných časových integrálov riadiaceho signálu, čo znamená potrebu pamäte pre históriu akčného zásahu a výpočet integrálu v každej vzorke. Vyvinuli preto iný spôsob úpravy algoritmu MRAC, založený na predikcii, v ktorom nie je potrebný výpočet integrálu v jednotlivých vzorkách. Jeho prvá verzia bola publikovaná v [38] a neskôr rozšírená verzia v [26]. Hlavnou myšlienkou je predikcia referenčnej trajektórie a formulácia doplnenej odchýlky.

Práca [27] predstavuje adaptívny MRAC regulátor pre nelineárne systémy s neurčitosťami, dopravným oneskorením na vstupe a rovnako aj v stavoch systému. Tiež sa spolieha na prístup bez blokov distribuovaných oneskorení, t.j. bez výpočtu integrálu v každej vzorke. Štruktúra riadenia sa opiera o 2 prídavné filtre, z ktorých jeden plní úlohu Smithovho prediktora eliminujúceho účinky dopravného oneskorenia a druhý zvyšuje robustnosť sústavy voči účinkom neurčitostí,

nelineárnych perturbácií a externých porúch.

Predošlé 2 uvedené návrhy adaptívnych riadiacich štruktúr bez DD blokov boli regulátory so stavovou spätnou väzbou. Na riadenie sústav, ktorých kompletnú stavovú informáciu nevieme zmerať by sa nedali použiť. Pre prípad dopravného oneskorenia na vstupe riadenej sústavy je nám z literatúry známa len práca [28], ktorá sa venuje návrhu vstupno-výstupného adaptívneho regulátora na báze predikcie a doplnenej odchýlky.

4 Návrh novej metódy adaptívneho riadenia systémov s dopravnými oneskoreniami

Naším ďalším krokom je návrh novej metódy priameho adaptívneho riadenia systémov s dopravnými oneskoreniami, ktorá je založená na predikcii stavov riadeného systému.

Výhodou predkladaného prístupu je jeho jednoduchosť a to, že pri použití v prostredí sieťového riadenia nie je potrebné, aby regulátor poznal hodnotu dopravného oneskorenia, ktoré sa tým pádom môže aj meniť.

4.1 Stavový regulátor pre systém s dopravným oneskorením na vstupe

V tejto kapitole budeme pre jednoznačnosť uvažovať riadený systém s dopravným oneskorením iba na vstupe vo forme:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}u(t-h) \quad (4.1)$$

kde $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ je vektor stavov systému a $u(t) \in \mathbb{R}$ je akčný zásah. Konštantné matice $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ a $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^n$ obsahujú neznáme prvky. V prípade použitia regulátora v sieťovom prostredí vieme statické dopravné oneskorenie na vstupe $h \in \mathbb{R}^+$ nepriamo merať. Toto meranie je vykonateľné poslaním akčného zásahu cez celú sieť späť do regulátora a vyhodnotením oneskorenia.

Ďalej platia nasledujúce predpoklady:

Predpoklad 4.1

Existuje taký konštantný vektor $\mathbf{k}^* \in \mathbb{R}^n$ a konštantný skalár $k_r^* \in \mathbb{R}$, aby boli dodržané nasledovné podmienky:

$$\mathbf{A} - \mathbf{b}\mathbf{k}^{*T} = \mathbf{A}_m, \quad \mathbf{b}k_r^* = \mathbf{b}_m \quad (4.2)$$

kde $A_m \in \mathbb{R}^{n \times n}$ a $b_m \in \mathbb{R}^n$ sú známe konštantné matice, ktoré tvoria stabilný referenčný model vo forme:

$$\dot{\mathbf{x}}_m(t) = A_m \mathbf{x}_m(t) + b_m r(t) \quad (4.3)$$

kde $\mathbf{x}_m(t) \in \mathbb{R}^n$ je stavový vektor referenčného modelu a $r(t) \in \mathbb{R}$ je ohraničený referenčný vstupný signál.

Predpoklad 4.2

Vektor \mathbf{b} sa dá zapísať vo forme $\mathbf{b} = \text{sgn}(b_0)|b_0|\mathbf{q}$, kde $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^n$, $\mathbf{q}^T = [0 \dots 0 \ 1]$ a znamienko konštanty b_0 je známe.

Predpoklad 4.3

Riadená sústava je stabilná.

Cieľom navrhovaného adaptívneho regulátora je dosiahnutie sledovania stavov modelu (avšak nie dokonalého sledovania) s dostatočne malou asymptotickou odchýlkou sledovania, pričom všetky signály uzavretého riadiaceho obvodu sú ohraničené. Odchýlka sledovania je definovaná:

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{x}(t) - \mathbf{x}_m(t) \quad (4.4)$$

Zákon riadenia

Akčný zásah $u(t)$ navrhujeme v nasledovnom tvare:

$$u(t) = -\mathbf{k}^T(t)(\mathbf{x}(t) + \mathbf{x}_a(t)) + k_r(t)r(t) \quad (4.5)$$

$$u(t) = u_s(t) - \mathbf{k}^T(t)\mathbf{x}_a(t) \quad (4.6)$$

kde $u_s(t)$ je tvar akčného zásahu známy zo štandardného stavového algoritmu MRAC vo forme $u_s(t) = -\mathbf{k}^T(t)\mathbf{x}(t) + k_r(t)r(t)$, kde $\mathbf{k}(t) \in \mathbb{R}^n$, $k_r(t) \in \mathbb{R}$ sú adaptované časovo premenlivé parametre riadiaceho zákona. $\mathbf{x}_a(t)$ je stavový vektor doplnkového filtra s úlohou Smithovho prediktora. Doplnkový filter nadobúda tvar:

$$\dot{\mathbf{x}}_a(t) = A_m \mathbf{x}_a(t) + b_m \rho(t)(u_s(t) - u(t-h)) \quad (4.7)$$

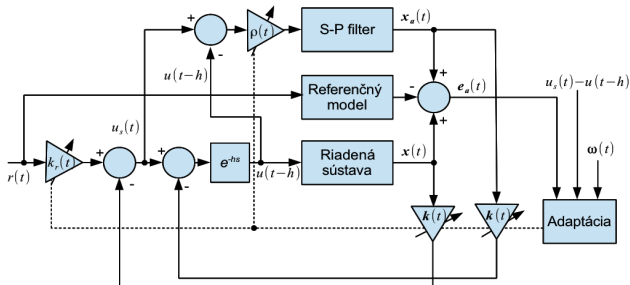
kde $\rho(t) \in \mathbb{R}$ je ďalší adaptovaný časovo premenlivý parameter.

Parametre regulátora sú adaptované podľa nasledujúcich zákonov adaptácie:

$$\dot{\Theta}(t) = -\text{sgn}(b_0)\Gamma(\mathbf{q}^T \mathbf{P} \mathbf{e}_a(t))\omega(t) \quad (4.8)$$

$$\dot{\rho}(t) = -\gamma(\mathbf{b}_m^T \mathbf{P} \mathbf{e}_a(t))(u_s(t) - u(t-h)) \quad (4.9)$$

kde matica $\Gamma \in \mathbb{R}^{(n+1) \times (n+1)}$, $\Gamma = \Gamma^T > 0$ a skalár $\gamma > 0$ sú návrhovými parametrami. Vo vzťahu (4.8) sme zaviedli signálny vektor $\omega^T(t) = [x^T(t) \ r(t)]$ a vektor adaptovaných parametrov $\Theta^T(t) = [-k^T(t) \ k_r(t)]$. Matica P a signál $e_a(t)$ budú definované neskôr. Schéma uzavretého riadiaceho obvodu je na obr. 4.1.



Obrázok 4.1: Schéma uzavretého riadiaceho obvodu so stavovým adaptívnym regulátorom.

Veta 4.1:

Je daný uzavretý riadiaci obvod pozostávajúci z riadeného systému (4.1) spĺňajúceho predpoklad 4.3, regulátora (4.5), referenčného modelu (4.3), prídavného filtra (4.7) a zákonov adaptácie (4.8) a (4.9). Potom všetky signály riadiaceho obvodu sú ohraničené, rovnako aj odchýlka $e(t)$ je ohraničená a rozšírená odchýlka $e_a(t)$ sa blíži k nule pre čas t idúci do nekonečna.

Dôkaz vety 4.1:

Dynamika adaptácie

Vyššie sme uviedli, že vo výpočte adaptovaných parametrov regulátora je použitý signál $e_a(t)$. Tento signál je tzv. rozšírená odchýlka a vzniká v dôsledku použitia filtra plniaceho úlohu Smithovho prediktora v riadiacom obvode. Je to transformácia signálu $e(t)$ nasledovným spôsobom:

$$e_a(t) = e(t) + x_a(t) \quad (4.10)$$

To nám umožnilo rozdeliť dynamiku adaptácie na 2 združené rovnice:

$$\dot{e}_a(t) = A_m e_a(t) + b \tilde{\Theta}^T(t) \omega(t) + b_m \tilde{\rho}(t) (u_s(t) - u(t-h)) \quad (4.11)$$

$$\dot{x}_a(t) = A_m x_a(t) + b_m \rho(t) (u_s(t) - u(t-h)) \quad (4.12)$$

Z rovníc (4.11) a (4.12) vyplýva, že cieľ riadiaceho algoritmu je splnený vtedy, ak je vektor rozšírenej odchýlky $e_a(t)$ asymptoticky stabilný a všetky

signály uzavretého obvodu, vrátane $\mathbf{x}_a(t)$ sú ohraničené.

Dôkaz stability

Pre dokázanie stability navrhovaného adaptívneho riadiaceho algoritmu sme použili nasledujúcu Lyapunovovu funkciu:

$$\begin{aligned} V &= V_1 + V_2 + V_3 \\ V_1 &= \mathbf{e}_a^T(t) \mathbf{P} \mathbf{e}_a(t) \\ V_2 &= |b_0| \tilde{\Theta}^T(t) \Gamma^{-1} \tilde{\Theta}(t) \\ V_3 &= \gamma^{-1} \tilde{\rho}^2(t) \end{aligned} \quad (4.13)$$

kde matica $\mathbf{P} = \mathbf{P}^T > 0$ je riešením Lyapunovovej rovnice $\mathbf{A}_m^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}_m = -\mathbf{Q}$, kde $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}^T > 0$.

Príklad 4.1 - overenie riešenia

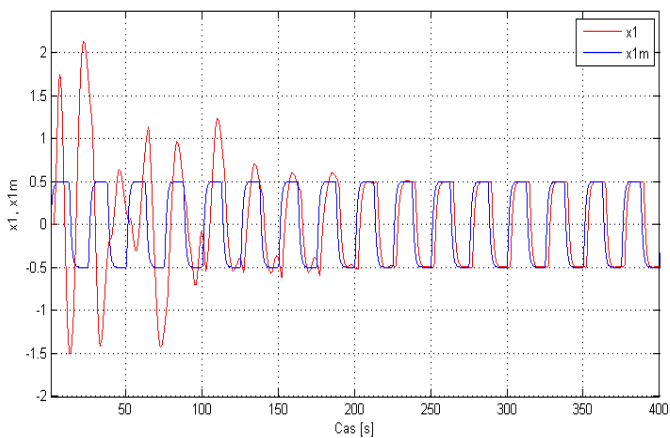
Navrhnutý adaptívny algoritmus sme overili na nasledujúcom simulačnom príklade. Riadeným systémom je stabilná sústava

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.2 & -0.3 \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t-h) \\ \mathbf{x}(0) &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.14)$$

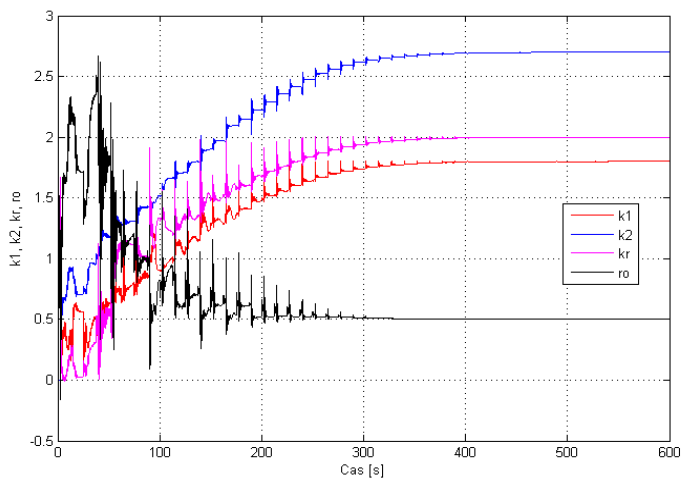
s dopravným oneskorením $h = 2.1 \text{ s}$. Referenčným modelom je systém

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_m(t) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2 & -3 \end{bmatrix} \mathbf{x}_m(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \end{bmatrix} r(t) \\ \mathbf{x}_m(0) &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.15)$$

Zákony adaptácie použité v regulátore sú (4.8) a (4.9) a akčný zásah je v tvare (4.5). V simulácii boli nastavené nasledujúce hodnoty parametrov: $\Gamma = 200 \mathbf{I}$, kde $\mathbf{I} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ a $\gamma = 500$. Výsledky simulácie sú na obr. 4.2 a 4.3.



Obrázok 4.2: Porovnanie stavu riadeného procesu x_1 so stavom referenčného modelu x_{1m}



Obrázok 4.3: Priebeh adaptovaných parametrov v čase.

4.2 Stavový regulátor pre systém s dopravným oneskorením na vstupe a v stavoch riadeného systému

V predošlej kapitole sme pre názornosť odvodili prípad stavového adaptívneho regulátora pre systém s oneskoreniami na vstupe riadenej sústavy. V tejto kapitole rozšírime vyššie navrhnutý regulátor o možnosť regulácie sústav, ktoré majú okrem dopravného oneskorenia na vstupe aj oneskorenia v stavoch systému.

Riadená sústava je v tomto prípade zadaná:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{A}_\tau \mathbf{x}(t - \tau) + \mathbf{b}u(t - h) \quad (4.16)$$

kde $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ je vektor stavov systému a $u(t) \in \mathbb{R}$ je akčný zásah. Konštantné matice $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\mathbf{A}_\tau \in \mathbb{R}^{n \times n}$ a $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^n$ obsahujú neznáme prvky. V prípade použitia regulátora v sieťovom prostredí vieme statické dopravné oneskorenie na vstupe $h \in \mathbb{R}^+$ nepriamo merať rovnako ako v predošlej kapitole, avšak dopravné oneskorenie v stavoch systému musí byť známe.

Ďalej platia nasledujúce predpoklady:

Predpoklad 4.4

Existujú také konštantné vektory $\mathbf{k}^* \in \mathbb{R}^n$, $\mathbf{k}_\tau^* \in \mathbb{R}^n$ a konštantný skalár $k_r^* \in \mathbb{R}$, aby boli dodržané nasledovné podmienky:

$$\mathbf{A} - \mathbf{b} \mathbf{k}^{*T} = \mathbf{A}_m, \quad \mathbf{b} \mathbf{k}_\tau^{*T} = \mathbf{A}_\tau, \quad \mathbf{b} k_r^* = \mathbf{b}_m \quad (4.17)$$

kde $\mathbf{A}_m \in \mathbb{R}^{n \times n}$ a $\mathbf{b}_m \in \mathbb{R}^n$ sú známe konštantné matice, ktoré tvoria stabilný referenčný model vo forme:

$$\dot{\mathbf{x}}_m(t) = \mathbf{A}_m \mathbf{x}_m(t) + \mathbf{b}_m r(t) \quad (4.18)$$

kde $\mathbf{x}_m(t) \in \mathbb{R}^n$ je stavový vektor referenčného modelu a $r(t) \in \mathbb{R}$ je ohraničený referenčný vstupný signál.

Predpoklad 4.5

Vektor \mathbf{b} sa dá zapísať vo forme $\mathbf{b} = \text{sgn}(b_0) |b_0| \mathbf{q}$, kde $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^n$, $\mathbf{q}^T = [0 \dots 0 \ 1]$ a znamienko konštanty b_0 je známe.

Predpoklad 4.6

Riadená sústava je stabilná.

Zákon riadenia

Akčný zásah $u(t)$ sme navrhli v nasledovnom tvare:

$$u(t) = -\mathbf{k}^T(t)(\mathbf{x}(t) + \mathbf{x}_a(t)) - \mathbf{k}_\tau^T(t)(\mathbf{x}(t-\tau) + \mathbf{x}_a(t-\tau)) + k_r(t)r(t) \quad (4.19)$$

$$u(t) = u_s(t) - \mathbf{k}^T(t)\mathbf{x}_a(t) - \mathbf{k}_\tau^T(t)\mathbf{x}_a(t-\tau) \quad (4.20)$$

kde $u_s(t)$ je tvar akčného zásahu vo forme $u_s(t) = -\mathbf{k}^T(t)\mathbf{x}(t) - \mathbf{k}_\tau^T(t)\mathbf{x}(t-\tau) + k_r(t)r(t)$, kde $\mathbf{k}(t) \in \mathbb{R}^n$, $\mathbf{k}_\tau(t) \in \mathbb{R}^n$, $k_r(t) \in \mathbb{R}$ sú adaptované časovo premenlivé parametre riadiaceho zákona. $\mathbf{x}_a(t)$ je stavový vektor doplnkového filtra s úlohou Smithovho prediktora. Doplnkový filter nadobúda tvar:

$$\dot{\mathbf{x}}_a(t) = \mathbf{A}_m \mathbf{x}_a(t) + \mathbf{b}_m \rho(t)(u_s(t) - u(t-h)) \quad (4.21)$$

kde $\rho(t) \in \mathbb{R}$ je ďalší adaptovaný časovo premenlivý parameter.

Parametre regulátora sú adaptované podľa nasledujúcich zákonov adaptácie:

$$\dot{\Theta}(t) = -\text{sgn}(b_0)\mathbf{\Gamma}(\mathbf{q}^T \mathbf{P} \mathbf{e}_a(t))\boldsymbol{\omega}(t) \quad (4.22)$$

$$\dot{\rho}(t) = -\gamma(\mathbf{b}_m^T \mathbf{P} \mathbf{e}_a(t))(u_s(t) - u(t-h)) \quad (4.23)$$

kde matica $\mathbf{\Gamma} \in \mathbb{R}^{2n+1 \times 2n+1}$, $\mathbf{\Gamma} = \mathbf{\Gamma}^T > 0$ a skalár $\gamma > 0$ sú návrhovými parametrami. Vo vzťahu (4.22) sme zaviedli signálny vektor $\boldsymbol{\omega}^T(t) = [\mathbf{x}^T(t) \ \mathbf{x}^T(t-\tau) \ r(t)]$ a vektor adaptovaných parametrov $\Theta^T(t) = [-\mathbf{k}^T(t) \ -\mathbf{k}_\tau^T(t) \ k_r(t)]$. Matica \mathbf{P} a signál $\mathbf{e}_a(t)$ budú definované neskôr.

Veta 4.2:

Je daný uzavretý riadiaci obvod pozostávajúci z riadeného systému (4.16) s oneskorením na vstupe a v stavoch systému, spĺňajúceho predpoklad 4.6, regulátora (4.19), referenčného modelu (4.18), prídavného filtra (4.21) a zákonov adaptácie (4.22) a (4.23). Potom všetky signály riadiaceho obvodu sú ohraničené, rovnako aj odchýlka $\mathbf{e}(t)$ je ohraničená a rozšírená odchýlka $\mathbf{e}_a(t)$ sa blíži k nule pre čas t idúci do nekonečna.

Dôkaz vety 4.2:

Dynamika adaptácie

Rovnako, ako v predošlom prípade, aj teraz sme vyjadrili rozšírenú odchýlku

$$\mathbf{e}_a(t) = \mathbf{e}(t) + \mathbf{x}_a(t) \quad (4.24)$$

To nám umožnilo rozdeliť dynamiku adaptácie na 2 združené rovnice:

$$\dot{\mathbf{e}}_a(t) = \mathbf{A}_m \mathbf{e}_a(t) + \mathbf{b} \tilde{\Theta}^T(t) \boldsymbol{\omega}(t) + \mathbf{b}_m \tilde{\rho}(t) (u_s(t) - u(t-h)) \quad (4.25)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_a(t) = \mathbf{A}_m \mathbf{x}_a(t) + \mathbf{b}_m \rho(t) (u_s(t) - u(t-h)) \quad (4.26)$$

Dôkaz stability

Pre dokázanie stability sme použili Lyapunov-Krasovského funkcionál vo forme:

$$\begin{aligned} V &= V_1 + V_2 + V_3 \\ V_1 &= \mathbf{e}_a^T(t) \mathbf{P} \mathbf{e}_a(t) + \int_{t-\tau}^t \mathbf{e}_a^T(s) \mathbf{Q}_e \mathbf{e}_a(s) ds \\ V_2 &= |b_0| \tilde{\Theta}^T(t) \mathbf{\Gamma}^{-1} \tilde{\Theta}(t) \\ V_3 &= \gamma^{-1} \rho^2(t) \end{aligned} \quad (4.27)$$

kde matica $\mathbf{P} = \mathbf{P}^T > 0$ spĺňa rovnicu $\mathbf{A}_m^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}_m + \mathbf{Q} + \mathbf{Q}_e = 0$, kde $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}^T > 0$, $\mathbf{Q}_e = \mathbf{Q}_e^T > 0$.

Príklad 4.2 - overenie riešenia

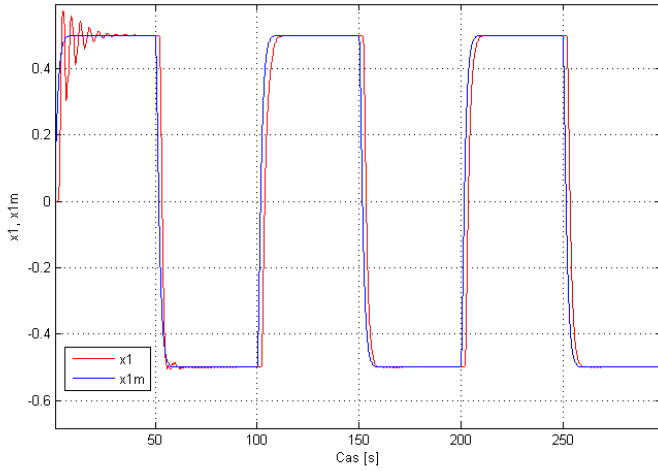
Navrhnutý adaptívny algoritmus sme overili na nasledujúcom simulačnom príklade, ktorého zadanie je uvedené aj v [27]. Riadeným systémom je stabilná sústava

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2 & -1 \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.3 & 0.15 \end{bmatrix} \mathbf{x}(t-\tau) + \begin{bmatrix} 0 \\ 3 \end{bmatrix} u(t-h) \\ \mathbf{x}(0) &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.28)$$

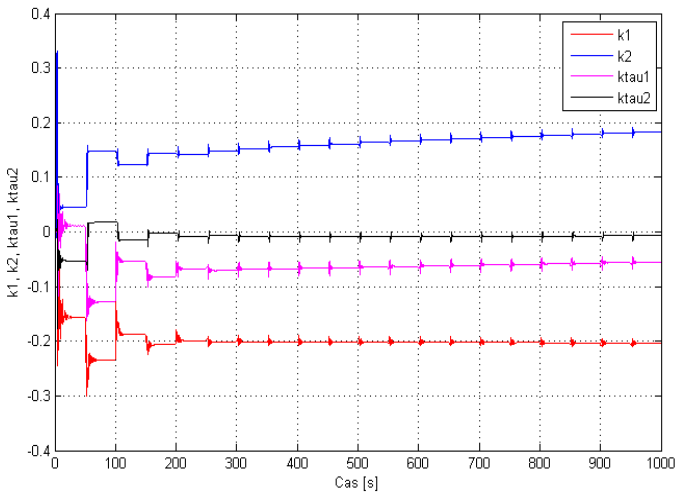
s dopravným oneskorením $h=2s$ a oneskorením v stavoch $\tau=1s$. Referenčným modelom je systém

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_m(t) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix} \mathbf{x}_m(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r(t) \\ \mathbf{x}_m(0) &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.29)$$

Zákony adaptácie použité v regulátore sú (4.22) a (4.23) a akčný zásah je v tvare (4.19). V simulácii boli nastavené nasledujúce hodnoty parametrov: $\mathbf{\Gamma} = 10 \mathbf{I}$, kde $\mathbf{I} \in \mathbb{R}^{5 \times 5}$ a $\gamma = 100$. Výsledky simulácie sú na obr. 4.4 a 4.5.



Obrázok 4.4: Porovnanie stavu riad. procesu x_1 so stavom ref. modelu x_{1m}



Obrázok 4.5: Priebeh adaptovaných parametrov k_1 , k_2 , $k_{\tau 1}$, $k_{\tau 2}$ v čase.

4.3 Riadenie nestabilných sústav pomocou navrhnutého stavového adaptívneho regulátora

V tejto kapitole si ukážeme, akým spôsobom je možné docieľiť, aby navrhnutý stavový adaptívny regulátor dokázal riadiť aj nestabilné sústavy. Ako sme už spomínali, najväčší problém spôsobuje predikcia stavov nestabilnej sústavy. Pre vyriešenie tohto problému použijeme spôsob, ktorý načrtli autori v [26] a nazýva sa bezpamäťová stabilizujúca spätná väzba (Memoryless stabilizing feedback). Jej hlavné myšlienky sú popísané aj v [5, 39].

Riadenou sústavou je sústava s oneskorením iba na vstupe, rovnako ako v kapitole 4.1

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}u(t-h) \quad (4.30)$$

kde $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ je vektor stavov systému a $u(t) \in \mathbb{R}$ je akčný zásah. Konštantné matice $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ a $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^n$ obsahujú neznáme prvky. Oneskorenie na vstupe $h \in \mathbb{R}^+$ vieme nepriamo merať. Pri tejto sústave však neplatí predpoklad 4.3, pretože je nestabilná.

Ak je neurčitý systém (4.30) robustne stabilizovateľný, t.j. ak preňho existuje konštantné stabilizujúce zesilnenie $\boldsymbol{\theta}^\#$, potom je zmenený nasledovne

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) - \mathbf{b}\boldsymbol{\theta}^\# \mathbf{x}(t-h) + \mathbf{b}u(t-h) \quad (4.31)$$

Koeficient $\mathbf{b}\boldsymbol{\theta}^\#$ násobiaci oneskorené stavy systému je prirodzene faktorizovaný vektorom \mathbf{b} . Tento súčin je podporený nasledujúcim predpokladom.

Predpoklad 4.7

Existujú také konštantné vektory $\mathbf{k}^* \in \mathbb{R}^n$, $\mathbf{k}_h^* \in \mathbb{R}^n$ a konštantný skalár $k_r^* \in \mathbb{R}$, aby boli dodržané nasledovné podmienky:

$$\mathbf{A} - \mathbf{b}\mathbf{k}^{*T} = \mathbf{A}_m, \quad \mathbf{b}\mathbf{k}_h^{*T} = -\mathbf{b}\boldsymbol{\theta}^\#, \quad \mathbf{b}k_r^* = \mathbf{b}_m \quad (4.32)$$

kde $\mathbf{A}_m \in \mathbb{R}^{n \times n}$ a $\mathbf{b}_m \in \mathbb{R}^n$ sú známe konštantné matice, ktoré tvoria stabilný referenčný model vo forme:

$$\dot{\mathbf{x}}_m(t) = \mathbf{A}_m \mathbf{x}_m(t) + \mathbf{b}_m r(t) \quad (4.33)$$

kde $\mathbf{x}_m(t) \in \mathbb{R}^n$ je stavový vektor referenčného modelu a $r(t) \in \mathbb{R}$ je ohraničený referenčný vstupný signál.

Predpoklad 4.8

Vektor \mathbf{b} sa dá zapísať vo forme $\mathbf{b} = \text{sgn}(b_0)|b_0|\mathbf{q}$, kde $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^n$, $\mathbf{q}^T = [0 \dots 0 \ 1]$ a znamienko konštanty b_0 je známe.

Z doteraz uvedeného vyplýva, že cieľ riadenia je totožný cieľu riadenia v kap. 4.1 a 4.2. Zákon riadenia má tvar podobný vzťahom 4.5 a 4.19

$$u(t) = -\mathbf{k}^T(t)(\mathbf{x}(t) + \mathbf{x}_a(t)) - \mathbf{k}_h^T(t)(\mathbf{x}(t-h) + \mathbf{x}_a(t-\tau)) + k_r(t)r(t) \quad (4.34)$$

$$u(t) = u_s(t) - \mathbf{k}^T(t)\mathbf{x}_a(t) - \mathbf{k}_h^T(t)\mathbf{x}_a(t-h) \quad (4.35)$$

kde pre adaptovaný parameter pre oneskorené stavy sme použili označenie $\mathbf{k}_h(t)$. Rovnako aj doplnkový filter bol známeho tvaru 4.21.

Parametre regulátora sú adaptované podľa nasledujúcich zákonov adaptácie:

$$\dot{\Theta}(t) = -\text{sgn}(b_0)\Gamma(\mathbf{q}^T \mathbf{P} \mathbf{e}_a(t))\omega(t) \quad (4.36)$$

$$\dot{\rho}(t) = -\gamma(\mathbf{b}_m^T \mathbf{P} \mathbf{e}_a(t))(u_s(t) - u(t-h)) \quad (4.37)$$

kde matica $\Gamma \in \mathbb{R}^{2n+1 \times 2n+1}$, $\Gamma = \Gamma^T > 0$ a skalár $\gamma > 0$ sú návrhovými parametrami. Zmena oproti predchádzajúcej verzii regulátora je vo vektore signálov, ktorý tentoraz nadobúda tvar $\omega^T(t) = [\mathbf{x}^T(t) \ \mathbf{x}^T(t-h) \ r(t)]$ a vektor adaptovaných parametrov nadobúda tvar $\Theta^T(t) = [-\mathbf{k}^T(t) \ -\mathbf{k}_h^T(t) \ k_r(t)]$. Matica \mathbf{P} a signál $\mathbf{e}_a(t)$ boli definované v predošlej kapitole.

Veta 4.3:

Je daný uzavretý riadiaci obvod pozostávajúci z nestabilného riadeného systému (4.30), robustne stabilizovaného pomocou tzv. bezpamäťovej spätnej väzby s oneskorením na vstupe, regulátora (4.34), referenčného modelu (4.33), prídavného filtra (4.21) a zákonov adaptácie (4.36) a (4.37). Potom všetky signály riadiaceho obvodu sú ohraničené, rovnako aj odchýlka $\mathbf{e}(t)$ je ohraničená a rozšírená odchýlka $\mathbf{e}_a(t)$ sa blíži k nule pre čas t idúci do nekonečna.

Dôkaz vety 4.3:

Dôkaz vety 4.3 je prakticky totožný s dôkazom vety 4.2.

Príklad 4.3 - overenie riešenia

Navrhnutý adaptívny algoritmus sme overili na nasledujúcom simulačnom príklade. Riadeným systémom je nestabilná sústava

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.2 & 0.3 \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t-h) \\ \mathbf{x}(0) &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.38)$$

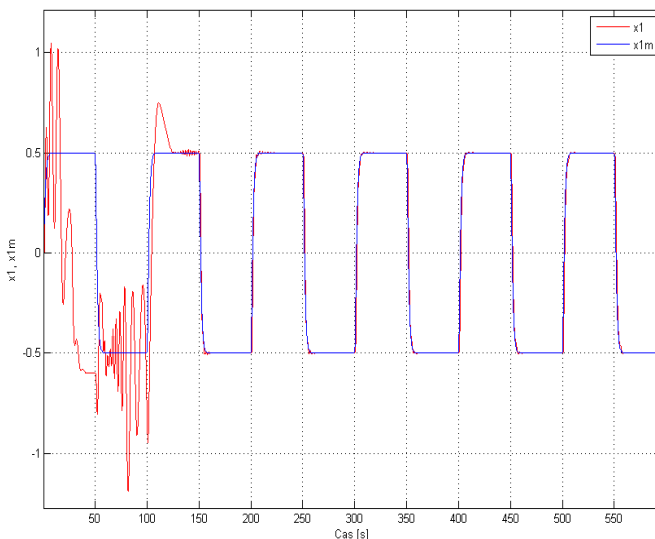
s dopravným oneskorením $h=0.7\text{ s}$. Uvedený riadený systém je možné robustne stabilizovať pomocou zosilnenia $\theta^\#=[0.01\ 0.9]$. Následne ho môžeme zapísať v nasledujúcom tvare

$$\dot{\mathbf{x}}(t)=\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2 & -1 \end{bmatrix}\mathbf{x}(t)-\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.01 & 0.9 \end{bmatrix}\mathbf{x}(t-h)+\begin{bmatrix} 0 \\ 3 \end{bmatrix}u(t-h) \quad (4.39)$$

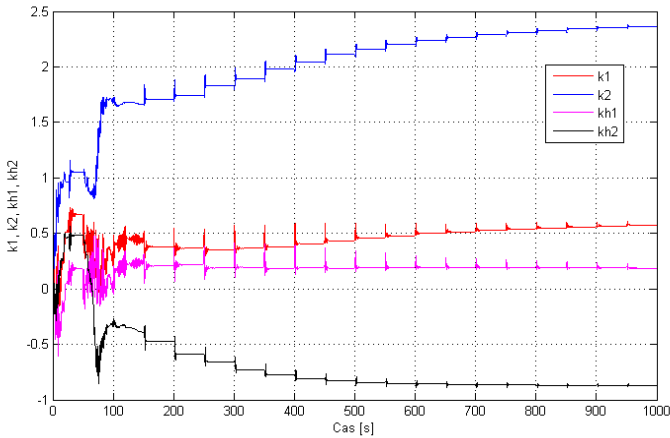
Referenčným modelom je systém

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_m(t) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix} \mathbf{x}_m(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r(t) \\ \mathbf{x}_m(0) &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.40)$$

Zákony adaptácie použité v regulátore sú (4.36) a (4.37) a akčný zásah je v tvare (4.34). V simulácii boli nastavené nasledujúce hodnoty parametrov: $\Gamma=50\mathbf{I}$, kde $\mathbf{I}\in\mathbb{R}^{5\times 5}$ a $\gamma=100$. Výsledky simulácie sú na obr. 4.6 a 4.7.



Obrázok 4.6: Porovnanie stavu riad. procesu x_1 so stavom ref. modelu x_{1m}



Obrázok 4.7: Priebeh adaptovaných parametrov k_1 , k_2 , k_{h1} , k_{h2} v čase.

4.4 Vstupno-výstupný regulátor pre systém s dopravným oneskorením na vstupe

Nami navrhnutý stavový regulátor je skonštruovaný bez použitia blokov distribuovaných oneskorení a v tejto kapitole si ukážeme návrh vstupno-výstupného adaptívneho regulátora založeného na návrhu stavového regulátora.

Majme riadený systém

$$y(s) = W(s) e^{-hs} u(s) = k_p \frac{Z_p(s)}{R_p(s)} e^{-hs} u(s) \quad (4.41)$$

ktorého ekvivalentná stavová reprezentácia je

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A} \mathbf{x}(t) + \mathbf{b} u(t-h) \\ y(t) &= \mathbf{c}^T \mathbf{x}(t) \end{aligned} \quad (4.42)$$

kde $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ je vektor stavov systému, $y(t), u(t) \in \mathbb{R}$ a $h \in \mathbb{R}^+$ je statické dopravné oneskorenie.

Predpoklad 4.9

$Z_p(s)$ je monický Hurwitzov polynóm stupňa m_p , $R_p(s)$ je monický Hurwitzov polynóm stupňa n_p , pričom horná hranica jeho stupňa n je známa, relatívny stupeň prenosu $W(s)$ je $n^* = n_p - m_p = 1$, znamienko vysokofrekvenčného zosilnenia k_p je známe.

Predpoklad 4.10

Riadený systém je stabilný

Ďalej zavedieme stabilné pomocné filtre známe zo vstupno-výstupného MRAC riadenia, vo forme

$$\dot{\mathbf{v}}_1(t) = \mathbf{A} \mathbf{v}_1(t) + \mathbf{q} u(t-h) \quad (4.43)$$

$$\dot{\mathbf{v}}_2(t) = \mathbf{A} \mathbf{v}_2(t) + \mathbf{q} y(t) \quad (4.44)$$

kde $\mathbf{v}_1(t) \in \mathbb{R}^{n-1}$, $\mathbf{v}_2(t) \in \mathbb{R}^{n-1}$ sú stavy filtrov, $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^{n-1 \times 1}$, $\mathbf{q}^T = [0 \dots 0 \ 1]$ a $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n-1 \times n-1}$ je ľubovoľná stabilná matica.

Definujeme maticu $\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{c}^T & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix}$, kde $\mathbf{I} \in \mathbb{R}^{n-1 \times n-1}$ je jednotková matica.

Matice $\mathbf{A}_c \in \mathbb{R}^{3n-2 \times 3n-2}$ a $\mathbf{B}_c \in \mathbb{R}^{3n-2}$ sú matice neminimálnej stavovej realizácie referenčného modelu vo forme

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}_m(t) &= \mathbf{A}_c \mathbf{X}_m(t) + \mathbf{B}_c r(t) \\ y_m(t) &= \mathbf{C}_c^T \mathbf{X}_m(t) \end{aligned} \quad (4.45)$$

kde $\mathbf{X}_m(t) \in \mathbb{R}^{3n-2}$ je neminimálny stavový vektor a $y_m \in \mathbb{R}$ je výstup referenčného modelu. Prenosová funkcia referenčného modelu nadobúda tvar

$$y_m(s) = W_m(s) r(s) = k_m \frac{Z_m(s)}{R_m(s)} r(s) \quad (4.46)$$

Predpoklad 4.11

$Z_m(s)$ je monický Hurwitzov polynóm stupňa m_m , $R_m(s)$ je monický Hurwitzov polynóm stupňa n_m , relatívny stupeň prenosu $W_m(s)$ je $n_m^* = n_m - m_m = n^*$. $W_m(s)$ je striktno pozitívne reálne (SPR) prenosová funkcia.

Zákon riadenia

Akčný zásah $u(t)$ navrhujeme v nasledovnom tvare:

$$u(t) = \Theta_c^T(t) \mathbf{D}(\mathbf{X}(t) + \mathbf{X}_a(t)) + \Theta_4(t) r(t) \quad (4.47)$$

$$u(t) = u_{so}(t) + \Theta_c^T(t) \mathbf{D} \mathbf{X}_a(t) \quad (4.48)$$

kde $u_{so}(t)$ je tvar akčného zásahu známy zo štandardného vstupno-výstupného algoritmu MRAC vo forme $u_{so}(t) = \Theta_1^T(t) \mathbf{v}_1(t) + \Theta_2^T(t) \mathbf{v}_2(t) + \Theta_3(t) y(t) + \Theta_4(t) r(t)$, kde $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Theta_4$ sú adaptované časovo premenlivé parametre riadiaceho zákona, z ktorých prvé 3 sú obsiahnuté v $\Theta_c^T = [\Theta_3 \ \Theta_1^T \ \Theta_2^T]$. $\mathbf{X}_a(t)$ je stavový vektor doplnkového filtra s úlohou Smithovho prediktora. Doplnkový filter nadobúda tvar:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}_a(t) &= \mathbf{A}_c \mathbf{X}_a(t) + \bar{\mathbf{B}}_c \rho(t) (u_{so}(t) - u(t-h)) \\ y_a &= \mathbf{C}_c^T \mathbf{X}_a(t) \end{aligned} \quad (4.49)$$

kde $\rho(t) \in \mathbb{R}$ je časovo premenlivý adaptovaný parameter a $y_a(t)$ je výstup systému s rovnakou dynamikou, ako dynamika referenčného modelu, avšak rozdielnym vstupom. Prvky vektora $\mathbf{X}_a(t)$ sú $\mathbf{X}_a^T(t) = [x_a^T(t) \ \mathbf{v}_{1a}^T(t) \ \mathbf{v}_{2a}^T(t)]$, kde $\mathbf{v}_{1a}(t) \in \mathbb{R}^{n-1}$, $\mathbf{v}_{2a}(t) \in \mathbb{R}^{n-1}$ sú vektory stavov doplnkových pomocných filtrov vo forme

$$\dot{\mathbf{v}}_{1a}(t) = \mathbf{\Lambda} \mathbf{v}_{1a}(t) + \mathbf{q} (u(t) - u(t-h)) \quad (4.50)$$

$$\dot{\mathbf{v}}_{2a}(t) = \mathbf{\Lambda} \mathbf{v}_{2a}(t) + \mathbf{q} y_a(t) \quad (4.51)$$

Parametre regulátora sú adaptované podľa nasledujúcich zákonov adaptácie:

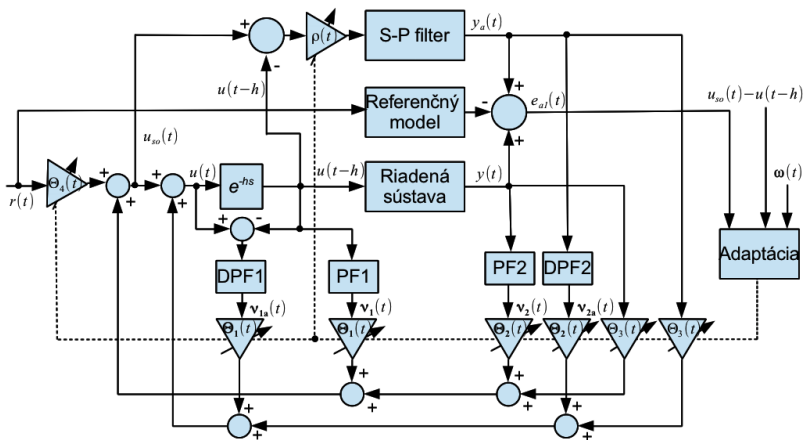
$$\dot{\Theta}(t) = -\text{sgn}(\Theta_4^*) e_{al}(t) \mathbf{\Gamma} \boldsymbol{\omega}(t) \quad (4.52)$$

$$\dot{\rho}(t) = -\gamma e_{al}(t) (u_{so}(t) - u(t-h)) \quad (4.53)$$

kde matica $\mathbf{\Gamma} \in \mathbb{R}^{2n \times 2n}$, $\mathbf{\Gamma} = \mathbf{\Gamma}^T > 0$ a skalár $\gamma > 0$ sú návrhovými parametrami. Vo vzťahu (4.52) sme zaviedli signálny vektor $\boldsymbol{\omega}^T(t) = [\mathbf{X}^T(t) \ \mathbf{D}^T r(t)]$ a vektor adaptovaných parametrov $\Theta^T(t) = [\Theta_c^T(t) \ \Theta_4(t)]$. Signál $e_{al}(t)$ bude definovaný neskôr. Schéma uzavretého riadiaceho obvodu je na obr. 4.8.

Veta 4.4:

Je daný uzavretý riadiaci obvod pozostávajúci z riadeného systému (4.41) spĺňajúceho predpoklady (4.9), (4.10), regulátora (4.47), referenčného modelu (4.46) spĺňajúceho predpoklad (4.11), prídavných filtrov (4.43), (4.44), (4.49), (4.50), (4.51) a zákonov adaptácie (4.52) a (4.53). Potom všetky signály riadiaceho obvodu sú ohraničené, rovnako aj odchýlka sledovania $e_1(t)$ je ohraničená a rozšírená odchýlka $e_{al}(t)$ sa blíži k nule pre čas t idúci do nekonečna.



Obrázok 4.8: Schéma uzavretého riadiaceho obvodu so vstupno-výstupným adaptívnym regulátorom.

Dôkaz vety 4.4:

Rovnica odchýlky

Po vzore stavovej verzie adaptívneho regulátora z predošlých kapitol zavedieme transformáciu

$$\mathbf{e}_a(t) = \mathbf{e}(t) + \mathbf{X}_a(t) \quad (4.54)$$

z ktorej vyplýva $e_{a1}(t) = \mathbf{C}_c^T \mathbf{e}_a(t) = e_1(t) + y_a(t)$ a ďalej sa dá povedať, že odchýlku adaptácie je možné rozdeliť na nasledujúce združené rovnice:

$$\dot{\mathbf{e}}_a(t) = \mathbf{A}_c \mathbf{e}_a(t) + \mathbf{B}_c \tilde{\Theta}^T(t) \boldsymbol{\omega}(t) + \bar{\mathbf{B}}_c \tilde{\rho}(t) (u_{so}(t) - u(t-h)) \quad (4.55)$$

$$\begin{aligned} e_{a1}(t) &= \mathbf{C}_c^T \mathbf{e}_a(t) \\ \dot{\mathbf{X}}_a(t) &= \mathbf{A}_c \mathbf{X}_a(t) + \bar{\mathbf{B}}_c \rho(t) (u_{so}(t) - u(t-h)) \\ y_a(t) &= \mathbf{C}_c^T \mathbf{X}_a(t) \end{aligned} \quad (4.56)$$

Dôkaz stability

Pre dokázanie stability navrhovaného adaptívneho riadiaceho algoritmu sme použili nasledujúcu Lyapunovovu funkciu:

$$\begin{aligned} V &= V_1 + V_2 + V_3 \\ V_1 &= \mathbf{e}_a^T(t) \mathbf{P} \mathbf{e}_a(t) \\ V_2 &= |\Theta_1^*(t) \tilde{\Theta}^T(t) \Gamma^{-1} \tilde{\Theta}(t)| \\ V_3 &= \gamma^{-1} \tilde{\rho}^2(t) \end{aligned} \quad (4.57)$$

kde matica $\mathbf{P} = \mathbf{P}^T > 0$ spĺňa algebraickú rovnicu vyplývajúcu z MKY lemy.

Príklad 4.4 - overenie riešenia

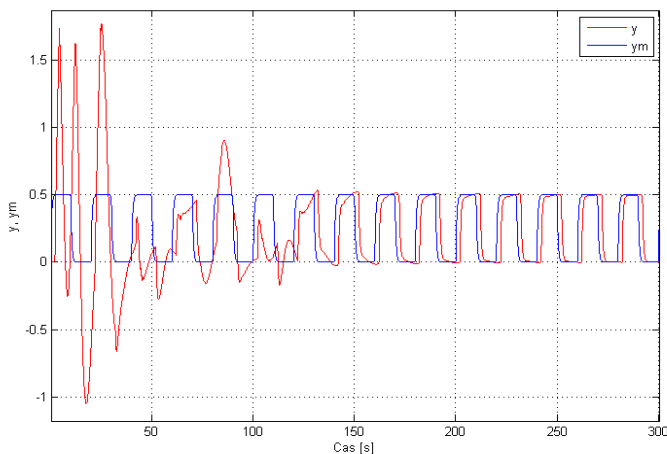
Navrhnutý adaptívny algoritmus sme overili na nasledujúcom simulačnom príklade. Riadeným systémom je stabilná sústava daná prenosovou funkciou

$$y(s) = \frac{s+0.15}{s^2+0.3s+0.2} e^{-hs} u(s) \quad (4.58)$$

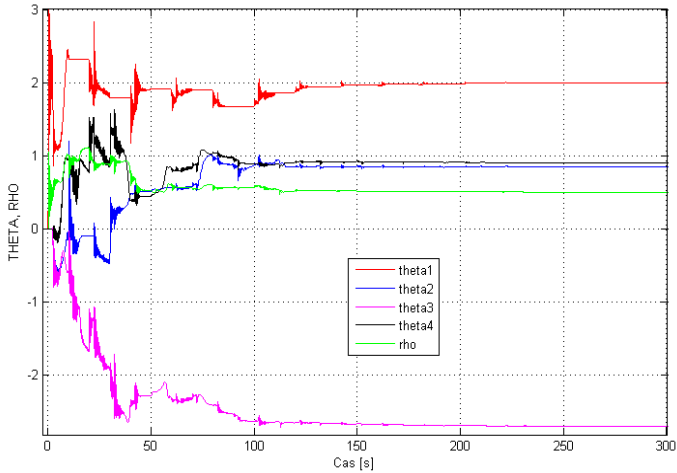
s dopravným oneskorením $h = 2.1$ s. Referenčný model sme vybrali vo forme

$$y_m(s) = \frac{2s+2}{s^2+3s+2} r(s) \quad (4.59)$$

Návrhové parametre v zákonoch adaptácie (4.52) a (4.53) sme vybrali $\mathbf{\Gamma} = 500 \mathbf{I}$, kde $\mathbf{I} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ je jednotkovou maticou a $\gamma = 100$. Počiatočné hodnoty adaptovaných parametrov sú nastavené na 0. Výsledky simulácie sú na obr. 4.9 a 4.10.



Obrázok 4.9: Porovnanie výstupu riadeného procesu s výstupom ref. modelu.



Obrázok 4.10: Priebeh adaptovaných parametrov regulátora v čase.

4.5 Porovnanie fungovania navrhnutých adaptívnych regulátorov s regulátormi uvedenými v literatúre

Nami navrhnutý stavový regulátor z kap. 4.2 (*regulátor_1*) sme porovnali s regulátorom uvedeným v [26] (*regulátor_2*). Porovnanie sme vykonali so systémom a referenčným modelom taktiež uvedeným v [26]. Hodnotili sme schopnosť regulátora vysporiadať sa so zmenou dopravného oneskorenia na vstupe systému z pôvodnej hodnoty na novú hodnotu.

Príklad 4.5

Fungovanie oboch regulátorov sme overili na nasledovnom simulačnom príklade, kde riadeným systémom je stabilná sústava s oneskorením na vstupe a v stavoch systému

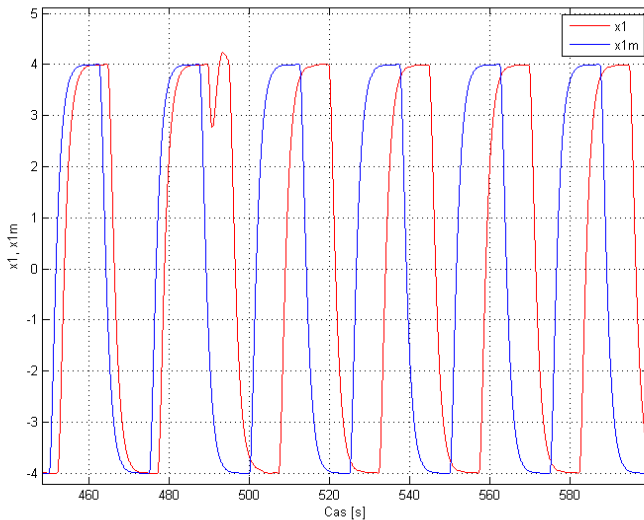
$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2 & -1 \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.3 & 0.15 \end{bmatrix} \mathbf{x}(t-\tau) + \begin{bmatrix} 0 \\ 3 \end{bmatrix} u(t-h) \\ \mathbf{x}(0) &= \begin{bmatrix} 5 \\ -1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.60)$$

s počiatočným dopravným oneskorením $h=2.1\text{ s}$, ktoré sa v čase $t=490\text{ s}$ zmenilo na $h=7.3\text{ s}$ a statickým oneskorením v stavoch $\tau=1\text{ s}$. Statické dopravné oneskorenie v stavoch riadeného systému je pre regulátor známe. Referenčným modelom je systém

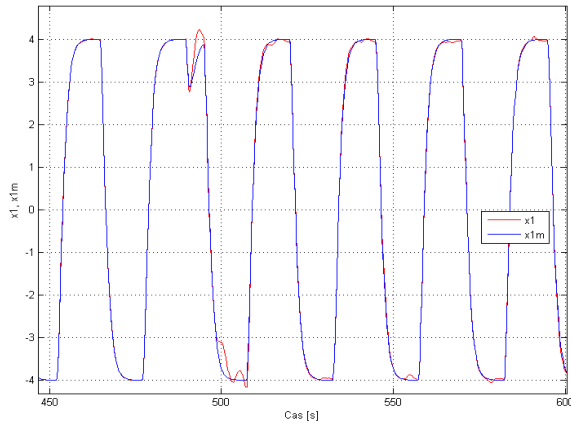
$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_m(t) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix} \mathbf{x}_m(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ -2 \end{bmatrix} r(t) \\ \mathbf{x}_m(0) &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.61)$$

Zákony adaptácie použité v *regulátore_1* sú (4.22), (4.23) a akčný zásah je v tvare (4.19). V simulácii boli preň nastavené nasledujúce hodnoty parametrov:

$\Gamma=0.7I$, kde $I \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$, $\gamma=70$ a $P = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$. Pre *regulátor_2* nastavené hodnoty parametrov: $\Gamma=1I$, kde $I \in \mathbb{R}^{5 \times 5}$, $\gamma=1$, $v_1=0.5$, $v_2=0.5$, $P = \begin{bmatrix} 0.15 & 0.05 \\ 0.05 & 0.05 \end{bmatrix}$. Výsledky simulácií sú na obr. 4.11 a 4.12.



Obrázok 4.11: Porovnanie stavu riadeného procesu x_1 so stavom referenčného modelu x_{1m} - regulátor_1



Obrázok 4.12: Porovnanie stavu riadeného procesu x_1 so stavom referenčného modelu x_{1m} - regulátor_2

Porovnali sme aj nami navrhnutý vstupno-výstupný adaptívny regulátor z kap. 4.4 (*regulátor_3*) so vstupno-výstupným regulátorom uvedeným v [28] (*regulátor_4*).

Príklad 4.6

Fungovanie oboch regulátorov sme overili na nasledovnom simulačnom príklade, kde riadeným systémom je stabilná sústava s oneskorením na vstupe

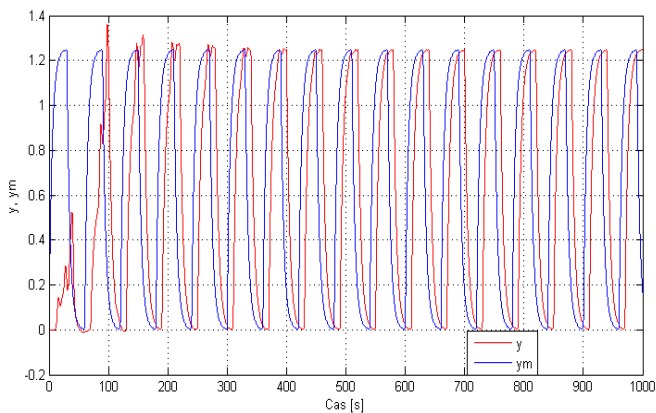
$$y(s) = \frac{-3(s^2 + 3.5s + 3)}{s^3 + 4.5s^2 + 5s + 1.5} e^{-hs} u(s) \quad (4.62)$$

s dopravným oneskorením $h = 10$ s. Referenčný model je zadaný vo forme

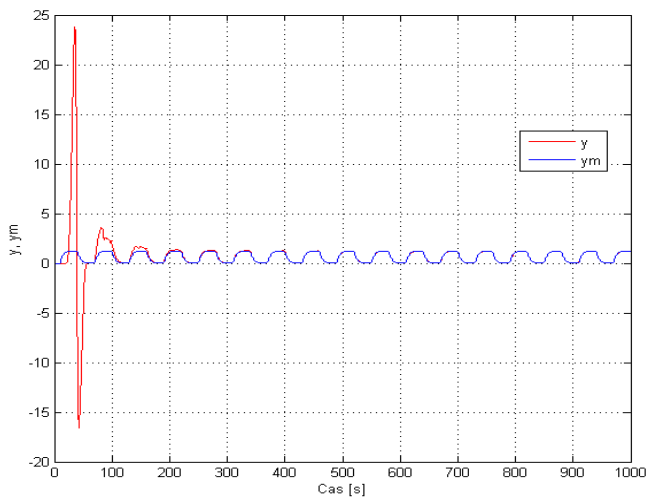
$$y_m(s) = \frac{0.5}{s + 0.2} r(s) \quad (4.63)$$

Návrhové parametre v zákonoch adaptácie *regulátora_3* (4.52) a (4.53) sme vybrali $\Gamma = 0.1I$, kde $I \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ je jednotkovou maticou a $\gamma = 2000$. Počiatočné hodnoty adaptovaných parametrov sú nastavené na 0.

Návrhové parametre zákonov adaptácie *regulátora_4* boli nastavené na $\tilde{\Phi} = 0.1I$, kde $I \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ je jednotkovou maticou a $\Phi_\psi = 0.01$. Výsledky simulácií sú na obr. 4.13 a 4.14.



Obrázok 4.13: Porovnanie výstupu riadeného procesu s výstupom ref. modelu - regulátor_3



Obrázok 4.14: Porovnanie výstupu riadeného procesu s výstupom ref. modelu - regulátor_4

4.6 Nasadenie navrhnutého adaptívneho regulátora v sieťovom riadení.

V predošlých kapitolách sme sa venovali návrhu a overeniu fungovania nového adaptívneho regulátora založeného na princípe Smithovho prediktora. Overili sme, že dokáže spoľahlivo fungovať v prostredí so statickým dopravným oneskorením a rovnako aj v prostredí, kde sa dopravné oneskorenie skokovo mení po dlhom časovom intervale.

V tejto kapitole si experimentálne overíme možnosť nasadenia navrhnutého adaptívneho regulátora aj v prostredí sieťového riadenia s premenlivým dopravným oneskorením, ktoré sa môže rýchlo meniť v okolí ustáleného bodu. Teória okolo sieťového riadenia bola spracovaná napr v prácach [40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49].

Príklad 4.7

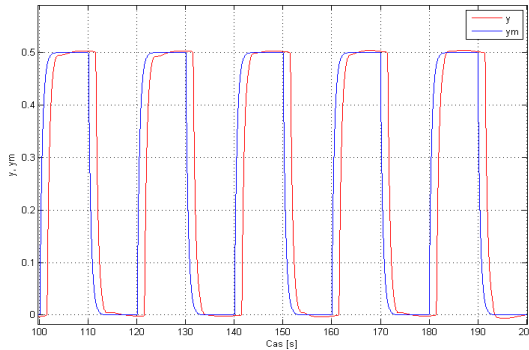
Navrhnutý adaptívny algoritmus sme overili na nasledujúcom simulačnom príklade. Riadeným systémom je stabilná sústava daná prenosovou funkciou

$$y(s) = \frac{s+0.15}{s^3+0.3s+0.2} e^{-hs} u(s) \quad (4.64)$$

s premenlivým dopravným oneskorením, ktoré sme nastavili tak, aby sa menilo náhodne okolo strednej hodnoty $h = 1.5$ s, pričom na dosiahnutie premenlivosti sme použili blok *Random number* v Simulinku. Uvedený blok bol nastavený na strednú hodnotu 1.5 s a varianciu 0.00001 . K výsledkom simulácie prikladáme aj priebeh zmeny dopravného oneskorenia v čase, pričom nami namodelovaná zmena je extrémnym príkladom zmeny dopravného oneskorenia, keďže všetky priemyselné zbernice sú špecifikované tak, že ak dôjde k oneskoreniu prenosu dát, toto oneskorenie nie je väčšie ako jednotky mikrosekúnd. Referenčný model sme vybrali vo forme

$$y_m(s) = \frac{2s+2}{s^2+3s+2} r(s) \quad (4.65)$$

Návrhové parametre v zákonoch adaptácie (4.52) a (4.53) sme nastavili na $\Gamma = 1 I$, kde $I \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ je jednotkovou maticou a $\gamma = 10$. Počiatočné hodnoty adaptovaných parametrov boli nastavené na $\Theta_0 = [2, 0.85, -2.71, 0.91]$ a $\rho_0 = 0.5$. Regulátor a riadenú sústavu sme v Simulinku prepojili pomocou blokov z rozšírenia TrueTime, ktorými sme simulovali prevádzku na reálnej priemyselnej zbernici. Typ zbernice sme nastavili na *ethernet* s prenosovou rýchlosťou 1000000 b/s, veľkosťou rámca 128 bitov a pravdepodobnosťou výpadku dát 10% . Výsledok simulácie je na obr. 4.15.



Obrázok 4.15: Porovnanie výstupu riad. procesu s výstupom ref. modelu.

4.7 Overenie na laboratórnom modeli RC člena.

Navrhnutý vstupno-výstupný algoritmus sme otestovali na laboratórnom modeli RC člena. Použitý model je plošný spoj pozostávajúci rezistora, kondenzátora a svorkovnice. Parametre použitých súčiastok sú nasledovné:

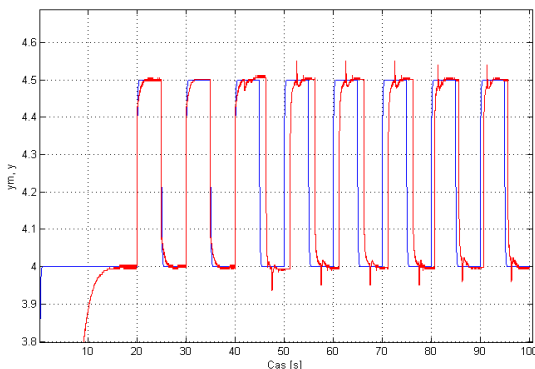
$R = 1.2 M \Omega$, $C = 1 nF$, tzn. riadený systém je prvého rádu a jeho prenosová funkcia je

$$y_m(s) = \frac{1}{RCs+1} u(s) = \frac{1}{0.0012s+1} u(s) \quad (4.66)$$

Referenčný model sme vybrali vo forme

$$y_m(s) = \frac{10}{s+10} r(s) \quad (4.67)$$

Aj v tomto prípade sme riadili systém, v ktorom sme dopravné oneskorenie menili. Z počiatočného oneskorenia $h=0s$ sa v čase $t=42s$ zmenilo na $h=1.3s$ a v čase $t=78s$ sa zmenilo na $h=0.7s$. Návrhové parametre v zákonoch adaptácie sme nastavili $\Gamma=0.01 I$, kde $I \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ je jednotkovou maticou a $\gamma=120$. Počiatočné hodnoty adaptovaných parametrov boli nastavené na $\Theta_0=[0, 0, 0, 0]$ a $\rho_0=0$. Riadiaci algoritmus sme zostavili v Simulinku, pričom na spojenie s riadeným systémom sme použili meraciu kartu Advantech PCI-1711 a rozšírenie Matlabu - Real-time workshop. Akčným zásahom bolo napätie vo voltoch a z riadeného obvodu sme merali taktiež napätie vo voltoch. Výsledok riadenia je na obr. 4.16.



Obrázok 4.16: Porovnanie výstupu riad. procesu s výstupom ref. modelu.

4.8 Overenie na laboratórnom modeli servosystému

Ďalšou riadenou sústavou, pomocou ktorej sme otestovali navrhnutý vstupno-výstupný adaptívny algoritmus bol laboratórny model servosystému. Použitý servosystém je laboratórnym modulárnym servosystémom a pozostáva z jednosmerného motora s tachogenerátorom, zotrvačníka (kovový valec), inkrementálneho snímača polohy, magnetickej brzdy, nelinearity a modulu prevodovky s výstupným diskom. Pre naše potreby bol systém zložený z motora, zotrvačníka, snímača polohy a prevodovky. Dokumentácia k uvedenému servosystému je [50].

Kotvové napätie JM je riadené pomocou impulzne modulovaného signálu $v(t)$, ktorý je zo schémy v Simulinku budený bezrozmerným riadiacim signálom $u(t) = v(t)/v_{max}$. Pre riadiacu premennú platí $|u(t)| \leq 1$ a $v_{max} = 12 V$.

Na servosystéme sa realizujú merania uhla v *rad* a uhlovej rýchlosti v *rad/s*. Riadenou veličinou v našom prípade bola uhlová rýchlosť.

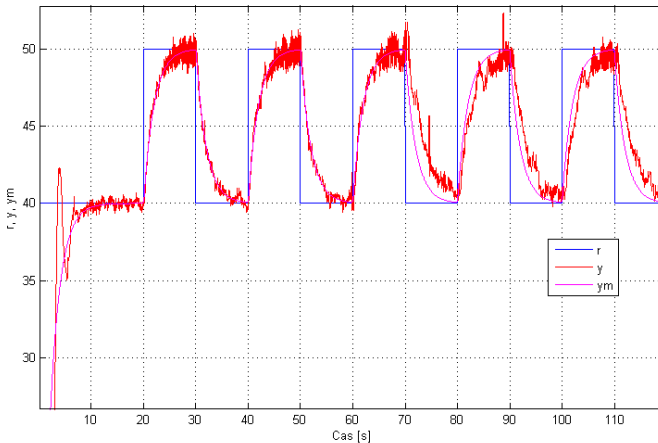
Pre riadenie uhlovej rýchlosti sme zvolili referenčný model v tvare:

$$y_m(s) = \frac{0.5}{s+0.5} r(s) \quad (4.68)$$

Dopravné oneskorenie riadeného systému sme z počiatočného oneskorenia $h=0s$ v čase $t=65s$ zmenili na $h=0.5s$. Návrhové parametre v zákonoch adaptácie (4.52) a (4.53) sme nastavili

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0.000001 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.001 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.00001 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.00001 \end{bmatrix} \quad \text{a} \quad \gamma = 80000 \quad \text{. Počiatkové}$$

hodnoty adaptovaných parametrov boli nastavené na $\Theta_0 = [0, 0, 0, 0]$ a $\rho_0 = 0$. Akčným zásahom bola bezrozmerná veličina $u(t)$ a z riadeného obvodu sme merali uhlovú rýchlosť v *rad/s*. Výsledok riadenia je na obr. 4.17.



Obrázok 4.17: Porovnanie výstupu riadeného procesu s výstupom referenčného modelu a referenčným signálom.

Záver

Predložená dizertačná práca sa venuje problematike AR s referenčným modelom pre systémy so vstupným dopravným oneskorením. Teoretická časť práce je venovaná popisu princípov priameho AR s referenčným modelom, ďalej pojednáva o dopravnom oneskorení v riadení.

V literatúre sú adaptívne regulátory pre systémy so vstupným dopravným oneskorením vo všeobecnosti rozdelené na systémy využívajúce robustifikáciu zákonov adaptácie a systémy využívajúce predikciu zákona riadenia alebo stavov sústavy. Systémy využívajúce predikciu sme rozdelili na metódy s využitím DD blokov a metódy bez DD blokov.

Výskumná časť práce dôkladne popisuje návrh novej metódy AR s

referenčným modelom pre riadenie sústav s oneskorením na vstupe. Pri návrhu sme sa priklonili k myšlienke prístupu bez použitia DD blokov, čo zjednodušuje nasadenie štruktúry do praxe. Navrhli sme stavový a rovnako aj vstupno-výstupný regulátor. Obe verzie na potlačenie účinkov dopravného oneskorenia používajú doplnkový adaptívny filter s úlohou Smithovho prediktora. V samotnom návrhu našich adaptívnych metód sme uviedli aj to, že sú navrhnuté tak, aby v nasadení v sieťovom prostredí regulátor nepotreboval poznať veľkosť dopravného oneskorenia, pretože poslaním akčného zásahu cez sieť je možné toto oneskorenie nepriamo zmerať. Vstupno-výstupná verzia je zároveň jednou z veľmi mála vstupno-výstupných MRAC regulátorov pre systémy so vstupným dopravným oneskorením. Výsledky simulácií ukazujú, že pri oboch verziách adaptívneho regulátora je uzatvorený obvod stabilný pri oneskorení rádo vo jednotkách sekúnd.

Nový vstupno-výstupný regulátor sme experimentálne overili v simulovanom sieťovom prostredí s dopravným oneskorením meniacim sa okolo pevnej strednej hodnoty. Jeho nasadenie sme vyskúšali aj pri riadení laboratórnych modelov RC člena a servosystému. Vo všetkých spomínaných prípadoch sa dobre vysporiadal s dopravným oneskorením v systéme. Z priebehov však vidíme veľký šum, ktorý meracia sústava vnáša do regulácie. Našou motiváciou do budúceho výskumu je preto robustifikácia zákonov adaptácie pomocou uvedených robustifikačných metód, čím by sa podarilo zamedziť vplyvu nemodelovanej dynamiky a oscilácie dopravného oneskorenia okolo strednej hodnoty. Tieto zmeny sú možné práve kvôli pomerne jednoduchšej štruktúre navrhnutých adaptívnych algoritmov.

Najvýznamnejšie prínosy predloženej dizertačnej práce sa dajú zhrnúť v nasledujúcich bodoch:

- zhrnutie základnej teórie priameho adaptívneho riadenia s referenčným modelom,
- aktuálny prehľad metód priameho adaptívneho riadenia systémov so vstupným dopravným oneskorením,
- návrh novej stavovej štruktúry priameho adaptívneho regulátora pre systémy so vstupným dopravným oneskorením,
- analýza stability pre novo-navrhnutú stavovú štruktúru,
- rozšírenie odvodenia pre systémy s dopravným oneskorením v stavoch a pre nestabilné riadené systémy,
- návrh novej vstupno-výstupnej štruktúry priameho adaptívneho regulátora pre systémy so vstupným dopravným oneskorením,
- analýza stability pre novo-navrhnutú vstupno-výstupnú štruktúru,
- porovnanie existujúceho stavového regulátora a existujúceho vstupno-výstupného regulátora s novo-navrhnutými regulátormi,
- experimentálne simulačné overenie v sieťovom prostredí s premenlivým dopravným oneskorením,
- implementácia pre riadenie laboratórnych modelov v reálnom čase v programovom prostredí Matlab/Simulink.

Zoznam publikácií autora

- Fodrek, P., Farkas, L., Blaho, M., Foltin, M., Hnát, J., Murgaš, T.: „Real-Time Scheduling Using GPUs-Advanced and More Accurate Proof of Feasibility“, In: *Journal of Communication and Computer*, ISSN 1548-7709, Vol. 9, No. 8, pp. 863-871, 2012.
- Farkas, L., Blaho, M., Foltin, M.: „Bezdrôtové siete v priemysle“, In: *EE časopis pre elektrotechniku a energetiku*, ISSN 1335-2547, Roč. 14, mimoriadne číslo, pp. 160-164, 2008.
- Murgaš, T., Fodrek, P., Farkas, L.: „Priemyselné zbernice s pripojením na ethernet“, In: *EE časopis pre elektrotechniku a energetiku*, ISSN 1335-2547, Roč. 13, mimoriadne číslo, pp. 323-326, 2007.
- Poliačik, M., Murgaš, J., Farkas, L., Blaho, M.: „A Robust MRAC with Decomposed Adaptation Error in the Presence of Uncertainties“, In: *Selected Topics in Modelling and Control*, Vol. 7, Bratislava, Slovak University of Technology, pp. 73-78, 2011.
- Blaho, M., Farkas, L.: „Modeling and Control of DEDS Using Stateflow“, In: *Technical Computing Prague 2007 : 15th Annual Conference Proceedings*, Prague, Czech Republic, 14.11.2007, Humusoft s.r.o, 2007.
- Chvostek, T., Foltin, M., Murgaš, T., Fodrek, P., Mrosko, M., Farkas, L.: „The OPC Communication Used in Adaptive Control“, In: *Process Control 2006 : 7th International Scientific-Technical Conference*. Kouty nad Desnou, Czech Republic, 13.-16.6.2006, University of Pardubice, 2006.
- Farkas, L., Blaho, M., Hnát, J.: „Industrial Communication between Matlab and the Ethercat Fieldbus“, In: *Technical Computing Prague 2008 : 16th Annual Conference Proceedings*, Prague, Czech Republic, 11.11.2008, Humusoft s.r.o, 2008.
- Farkas, L., Janiček, L., Murgaš, J., Hnát, J.: „Interconnecting Matlab with TwinCAT“, In: *PEIT '011. New Paradigms in Electronics & Information Technologies : 1st International Conference*, Alexandria, Egypt, October 9-12, 2011.
- Farkas, L., Murgaš, J., Hnát, J.: „Performance Analysis of Adaptive Control Structures in NCS Using Truetime“, In: *Process Control 2010 : 9th International Conference*, Kouty nad Desnou, Czech Republic, 7.-10. 6. 2010, University of Pardubice, 2010.
- Farkas, L., Hnát, J.: “Simulation of Networked Control Systems Using Truetime“, In: *Technical Computing Prague 2009 : 17th Annual Conference Proceedings*, Prague, Czech Republic, 19.11.2009, Humusoft Ltd., 2009.
- Fodrek, P., Farkas, L., Murgaš, T.: “Realtime Scheduling Using GPUs - Proof of Feasibility”, In: *Recent Researches in Circuits, Systems, Communications*

- & Computers : *ECS'11: 2nd European Conference of Systems; ECCTD '11: 2nd European Conference of Circuits Technology and Devices; ECCOM'11: 2nd European Conference of Communications; ECCS'11: 2nd European Conference of Computer Science*; Puerto De La Cruz, Tenerife, Spain, 10 - 12 December 2011, WSEAS Press, pp. 285-289, 2011.
- Fodrek, P., Foltin, M., Blaho, M., Farkas, L., Poliačik, M.: "RTAI in CAN Bus Based Network Control of CNC for Plasma Cutting", In: *Eleventh Real-Time Linux Workshop*, Dresden, Germany, 28.-30.9.2009, pp. 79-88, 2009.
- Murgaš, T., Fodrek, P., Farkas, L.: "Networked Control System Using Linux Real Time Application Interface", In: *Recent Researches in Engineering and Automatic Control : ECC'11: 2nd European Conference of Control, ECME'11: 2nd European Conference of Mechanical Engineering, ECCIE '11: 2nd European Conference of Civil Engineering, ECCE'11: 2nd European Conference of Chemical Engineering*, Puerto De La Cruz, Tenerife, Spain, 10.-12. December 2011, WSEAS Press, pp. 53-58, 2011.
- Murgaš, T., Fodrek, P., Farkas, L.: "Using Open Source Technology in Building of Control Systems", In: *Latest Trends in Information Technology : Proc. of the 1st WSEAS International Conference on Information Technology and Computer Networks (ITCN'12); Proc. of the 1st WSEAS International Conference on Cloud Computing (CLC'12); Proc. of the 1st WSEAS International Conference on Programming Languages and Compilers (PRLC'12)*, Vienna, Austria, 10-12 November 2012, WSEAS Press, pp. 55-60, 2012.
- Poliačik, M., Murgaš, J., Farkas, L., Blaho, M.: "A Robust MRAC Modification and Performance Improvement in the Presence of Uncertainties", In: *ALCOSP 2010 and PSYCO 2010. IFAC Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing and IFAC Workshop on Periodic Control Systems*, Antalya, Turkey, 26.-28.8.2010, IFAC, 2010.
- Blaho, M., Foltin, M., Murgaš, J., Farkas, L.: "Advantages of Type-2 Fuzzy Logic in Networked Control Systems", In: *Technical Computing Bratislava 2010 : 18th Annual Conference Proceedings*, Bratislava, Slovak Republic, 20.10.2010, RT Systems, 2010.
- Blaho, M., Farkas, L., Chvostek, T., Poliačik, M.: "Reducing Influence of Time Delay in NCS with MRAC Controller", In: *Process Control 2007 : 16th International Conference*, Štrbské Pleso, Slovak Republic, 11.-14.6.2007, STU v Bratislave ChtF, 2007.
- Farkas, L., Murgaš, J.: "Algoritmy adaptívneho riadenia v sieťových riadiacich systémoch", In: *EE časopis pre elektrotechniku a energetiku*, Roč. 17, mimoriadne číslo, ELOSYS, Trenčín, 11.-14.10.2011, pp. 199-203, 2011.
- Farkas, L., Hnát, J.: "Technické prostriedky pre pohybovú rehabilitáciu pacientov s diabetom a pohybovými obmedzeniami", In: *ELOSYS*.

Elektrotechnika, informatika a telekomunikácie 2012, Trenčín, 9.-12.10.2012, FEI STU, pp. 136-140, 2012.

Murgaš, J., Murgaš, T., Fodrek, P., Farkas, L., Blaho, M., Poliačik, M.: "A Networked Control system for Industrial Applications", In: *Preprints of IFAC Workshop on Programmable Devices and Embedded Systems PDES 2009*, Rožnov p. Radhoštem, Czech Republic, 10.-12.2.2009, Fakulta elektrotechniky a informatiky, VŠB - Technical University of Ostrava, pp. 236-239, 2009.

Murgaš, J., Ernek, M., Farkas, L., Hnát, J., Murgaš, T.: "Lekárska kybernetika v službách zvyšovania kvality života", In: *Transfer*, Roč. 4, č. 3, pp. 14-15, 2012.

Použitá literatúra

- [1] - Butler, H.: *Model Reference adaptive control, From Theory to Practice*, Prentice Hall, 1992.
- [2] - Åström, K. J., Wittenmark, B.: *Adaptive Control*, second edition, Addison Wesley, 1995.
- [3] - Ioannou, P. A., Sun, J.: *Robust Adaptive Control*, Prentice Hall, 1996.
- [4] - Poliačik, M.: *Dizertačná práca – Priame adaptívne riadenie systémov s neurčitostami*, STU FEI Bratislava, 2011.
- [5] - Richard, J.-P.: "Time-delay systems: an overview of some recent advances and open problems", In: *Automatica*, 39, pp. 1167-1694, 2003.
- [6] - Evesque, S., Annaswamy, A. M., Niculescu, S., Dowling, A. P.: "Adaptive control of a class of time-delay systems", In: *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the ASME*, 125(2), pp. 186–193, 2003.
- [7] - Yi, S., Nelson, P. W., Ulsoy, G. A.: *Time-Delay Systems, Analysis and Control Using the Lambert W Function*, World Scientific Publishing, 2010.
- [8] - Yildiz, Y.: *Adaptive Control of Time Delay Systems and Applications to Automotive Control Problems*, Ph.D thesis, Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering, 2009.
- [9] - Abdallah, G., Dorato, P., Benitez-Read, J., & Byrne, R.: "Delayed positive feedback can stabilize oscillatory systems", In: *ACC'93 (American control conference) San Francisco*, pp. 3106–3107, 1993.
- [10] - Jalili, N., & Olgac, N.: "Optimum delayed feedback vibration absorber for MDOF mechanical structure", In: *37th IEEE CDC'98 (Conference on decision and control)*, Tampa, FL, December 1998, pp. 4734–4739, 1998.
- [11] - Watanabe, K., Nobuyama, E., & Kojima, K.: "Recent advances in control of time-delay systems a tutorial review", In: *35th IEEE CDC'96*

- (*Conference on decision and control*), Kobe, Japan, December 1996, pp. 2083–2089, 1996.
- [12] - Kolmanovskii, V. B., & Myshkis, A.: “Applied theory of functional differential equations”, In: *Mathematics and Applications*, Vol. 85, Dordrecht: KluwerAcademy, 1992.
- [13] - Smith, O. J.: “A controller to overcome dead time”, In: *ISA Journal*, 6, 1959.
- [14] - Åström, K. J., Hang C. C., Lim B. C.: “A new Smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead-time”, In: *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 39, pp. 343-345, 1994.
- [15] - De Paor, M.: “A modified Smith predictor and controller for unstable processes with time delay”, *Int. J. Control*, 58, pp. 1025-1036, 1985.
- [16] - Liu, T., Cai, Y. Z., Gu, D. Y., Zhang, W. D.: “New modified Smith predictor scheme for integrating and unstable processes with time delay”, In: *IEE Proc. Control Theory Appl.*, 152, pp. 238-246, 2005.
- [17] - Manitius, A. Z., Olbrot, A. W.: “Finite spectrum assignment problem for systems with delays”, In: *IEEE Transactions on Automatic Control*, AC-24 no. 4, 1979.
- [18] - Ichikawa, K.: “Frequency-domain pole assignment and exact model-matching for delay systems”, In: *Int. J. Control*, 41, pp. 1015–1024, 1985.
- [19] - Ortega, R., Lozano, R.: “Globally stable adaptive controller for systems with delay”, In: *International Journal of Control*, Vol. 47, No. 1, pp. 17-23, 1988.
- [20] - Yildiz, Y., Annaswamy, A., Kolmanovsky, I. V., Yanakiev, D.: “Adaptive posicast controller for time-delay systems with relative degree $n^* \leq 2$ ”, In: *Automatica*, 46, pp. 279–289, 2010.
- [21] - Tahoun, A. H., Fang, H.-J.: “A Novel Approach to Adaptive Control of Networked Systems”, In: *Ubiquitous Computing and Communication Journal*, vol. 2 no. 4., 2007.
- [22] - Tahoun, A. H., Fang, H.-J.: “Adaptive Control of Networked Systems in the Presence of Bounded Disturbances”, In: *Journal of Computer Science*, vol. 3 no. 9., pp. 693-699, 2007.
- [23] - Tahoun, A. H., Fang, H.-J.: “Adaptive Stabilization of Networked Control Systems with Delays and Packet Losses”, In: *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*, Okayama, Japan, March 26-29, 2009.
- [24] - Nguyen, N., Summers, E.: “On Time Delay Margin Estimation for Adaptive Control and Optimal Control Modification”, In: *AIAA Guidance Navigation and Control Conference*, Portland, OR, 2011.
- [25] - Niculescu, S. I., Annaswamy, A.: “An Adaptive Smith-Controller for Time-Delay Systems with Relative Degree $n^* \leq 2$ ”, In: *Systems and Control*

- Letters, 49, pp. 347-358, 2003.
- [26] - Mirkin, B., Mirkin, E. L., Gutman P.-O.: “State-feedback adaptive tracking of linear systems with input and state delays”, In: *Int. J. Adapt. Control Signal Process*, 23, pp. 567–580, 2009.
 - [27] - Mirkin, B., Gutman, P.-O.: “Adaptive following of perturbed plants with input and state delays”, In: *Proceedings of 9th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA)*, Santiago, Chile, December 19-21, 2011.
 - [28] - Mirkin, E. L., Sharshenaliev, Zh.Sh.: ”Model reference adaptive control design for plants with input delays”, In: *Automation and Remote Control*, 71, pp. 2405–2416, 2010.
 - [29] - Nguyen, N., Bakhtiari-Nejad, M., Huang, Y.: ”Hybrid Adaptive Flight Control with Bounded Linear Stability Analysis”, In: *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, August 2007.
 - [30] - Nguyen, N. T., Boskovic, J. D.: “Bounded Linear Stability Margin Analysis of Nonlinear Hybrid Adaptive Control”, *American Control Conference*, June 2008.
 - [31] - Ioannou, P., Kokotovic, P.: “Instability Analysis and Improvement of Robustness of Adaptive Control”, In: *Automatica*, Vol. 20, No. 5, pp. 583-594, 1984.
 - [32] - Narendra, K. S., Valavani, L. S.: “Stable adaptive controller design – Direct control”, In: *IEEE Trans. Aut. Control*, Vol. 23, Issue 4, pp. 570-583, 1978.
 - [33] - Nguyen, N., Krishnakumar, K., Boskovic, J.: ”An Optimal Control Modification to Model-Reference Adaptive Control for Fast Adaptation”, In: *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, Honolulu, Hawaii, 18 – 21 August 2008.
 - [34] - Nguyen, N.: “Asymptotic Linearity of Optimal Control Modification Adaptive Law with Analytical Stability Margins”, In: *AIAA Infotech@Aerospace Conference*, AIAA-2010-3301, April 2010.
 - [35] - Nguyen, N.: “Verifiable Adaptive Control with Analytical Stability Margins by Optimal Control Modification”, In: *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, AIAA-2010-7770, August 2010.
 - [36] - Tahoun, A. H.: “Output-Feedback MRAC of Networked Systems With Network-Induced Delays and Packet Dropout,” In: *International Conference on Computer Engineering & Systems (ICCES)*, 2011.
 - [37] - Narendra, K. S., Annaswamy, A. M.: *Stable adaptive systems*, Dover Publications, New York, 2005.
 - [38] - Mirkin, B., Mirkin, E. L., Gutman, P.-O.: “Model reference adaptive control of nonlinear plant with dead time”, In: *Proceedings of the 47th IEEE Conference on Decision and Control*, Cancun, Mexico, Dec. 9-11,

2008.

- [39] - Mirkin, L., Palmor, Z.J.: “Control issues in systems with loop delays”, In: *Handbook of Networked and Embedded Control Systems*, Hristu-Varsakelis, D., Levine, W. S. (editors), Birkhäuser: Basel, pp. 627–648, 2005.
- [40] - CASE Western Reserve University, Networked Control Systems Repository, *NCS Basics* [online], dostupné na Internetu: <http://filer.case.edu/org/ncs/basics.htm>, citované 13.02.2013.
- [41] - Tian, Y. Ch., Yu Z. G., Fidge, C. J.: “Multifractal nature of network induced time delay in networked control systems”, In: *Physics Letters. Section A: General, Atomic and Solid State Physics*, 361(1-2), pp. 103-107, 2007.
- [42] - Wang, S., Hua, Ch., Guan, X.: “State Feedback Controller Design of Networked Control Systems with Time Delay in the Plant”, In: *Proceedings of the 25th Chinese Control Conference*, pp. 2098 – 2102, 2006.
- [43] - Cervin, A., et. al.: How Does Control Timing Affect Performance? Analysis and Simulation of Timing Using Jitterbug and TrueTime, *IEEE Control Systems Magazine*, 23:3, pp. 16-30, 2003.
- [44] - Nilsson, J.: *Real-Time Control Systems with Delays*, Ph.D thesis, Dept. Automatic Control. Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 1998.
- [45] - Raju, B.: *Time Delay Compensation Schemes with Application to Networked Control System*, MTech thesis, Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology, Rourkella, 2009.
- [46] - Wittenmark, B., Nilsson, J., Torngrén, M.: “Timing problems in real-time control systems”, In: *Proceedings of the American Control Conference*, vol. 3, pp. 2000 – 2004, 1995.
- [47] - Zhang, B. W., Branicky, M. S., Phillips, S. M.: “Stability of networked control systems”, In: *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 21, pp. 84–99, February 2001.
- [48] - Cervin, A., Ohlin, M., Henriksson, D.: *Simulation of Networked Control Systems Using TrueTime* [online], dostupné na Internetu: <http://www.control.lth.se/documents/2007/cer+07ncs.pdf>, citované 13.2.2013.
- [49] - Andersson, M., et. al.: “Simulation of Wireless Networked Control Systems”, In: *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference*, Seville, Spain, pp. 476 – 481, 2005.
- [50] - INTECO, Ltd.: *Modular Servo System – User manual* [online], dostupné na Internetu: <http://www.inteco.com.pl/>.