

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE  
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Ing. Marián Tárník

# ADAPTÍVNE RIADENIE SYSTÉMOV S DOPRAVNÝM ONESKORENÍM

Autoreferát dizertačnej práce

Na získanie vedecko-akademickej hodnosti  
philosophiae doctor, PhD.

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. Marián Tárník  
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. Dušan Krokavec, CSc.  
Fakulta elektrotechniky a informatiky, TU v Košiciach  
Letná 9/B, 042 00 Košice

Autoreferát bol rozoslaný dňa: .....

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

## **Názov**

Adaptívne riadenie systémov s dopravným oneskorením

## **Anotácia**

Dizertačná práca sa zaoberá adaptívnym riadením systémov s dopravným oneskorením. V rámci analýzy súčasného stavu sú vybrané adaptívne algoritmy prezentované spôsobom, ktorý zároveň vytvára základy a východiská pre vlastný návrh adaptívneho algoritmu. Algoritmy prezentované v literatúre v mnohom nezodpovedajú štandardným postupom priameho adaptívneho riadenia. To je jedným z dôvodov, pre ktoré nie je možné ďalej rozširovať triedu systémov, na ktorú je možné tieto algoritmy aplikovať. V práci sa navrhujú úpravy týchto algoritmov tak, aby zodpovedali postupom štandardného priameho adaptívneho riadenia. Následne je navrhnutý nový algoritmus pre systémy s relatívnym stupňom dva, s možnosťou úpravy pre vyšší relatívny stupeň. Algoritmus využíva len vstupno-výstupné signály riadeného systému bez spätnej väzby od stavových veličín. Navrhnutý algoritmus zachováva jednoduchosť implementácie v porovnaní so zodpovedajúcimi algoritmi uvedenými v literatúre, pričom rozširuje triedu systémov, pre ktoré je možné aplikovať priame adaptívne riadenie systémov s dopravným oneskorením.

## **Title**

Adaptive Control of Time-delay Systems

## **Abstract**

Thesis deals with an adaptive control of the time-delay systems. The selected state of the art algorithms are summarized with regard to the presented control algorithm design. The algorithm base and the starting points are stated. The algorithms reported in the literature does not corresponds with the standard procedures in direct adaptive control. This is the one of the reasons for which the control algorithms can not be extended for the larger class of the controlled systems. The modifications are proposed to overcome this issue. Consequently, the adaptive algorithm for the systems where the relative degree equals two is designed. Since the standard procedure of adaptive control is maintained, it can be also used for the systems with higher relative degree. The algorithm requires only the input-output signals and the state feedback is not considered. The algorithm implementation demands are comparable with the algorithms reported in the literature while the controlled system class is extended.

# 1 Úvod

Časové oneskorenie, alebo dopravné oneskorenie je v istej miere všadeprítomné v riadiacich systémoch. Je spôsobené napríklad výpočtovým časom procesora, oneskorením snímačov, samozrejme dopravným oneskorením na vstupe riadeného systému (dopravníkový pás, prúdenie média a podobne). Príčin je vo všeobecnosti mnoho.

Častokrát je tiež možné systém vyššieho rádu modelovať ako systém nižšieho rádu s dopravným oneskorením. Príkladom môže byť využitie tohto postupu, bližšie opísaného v článkoch autora [A1, A14]. V uvedených článkoch sa modeluje dynamika vplyvu inzulínu na koncentráciu glukózy v krvi ako lineárny systém druhého rádu s relatívnym stupňom dva, pričom na vstupe systému je prítomné dopravné oneskorenie. Samotný systém druhého rádu zodpovedá kinetike idealizovaného inzulín-glukózového systému subjektu, presnejšie kinetike inzulínu a glukózy v krvi (plazme). Celkové dopravné oneskorenie je spôsobené podávaním inzulínu do podkožného tkaniva, teda nie priamo do krvi, a tiež meraním glykémie (koncentrácie glukózy) v podkožnom tkanive (v kapilárnej krvi).

Príklady systémov s dopravným (časovým) oneskorením je možné nájsť v širokom rozsahu aplikácií. Príkladom sú chemické, biologické či fyziologické systémy a samozrejme aj mechanické či elektrotechnické systémy (viď [4, 11]). Detailný prehľadový článok je napríklad [37].

Sieťové riadiace systémy zaznamenali v poslednom období veľký rozmach. Je možné povedať, že všetky moderné riadiace systémy už obsahujú vo väčšej či menšej miere prvky sieťových technológií a teda vo všeobecnosti ide o sieťové riadiace systémy.

V sieťovom riadiacom systéme je dátová sieť súčasťou regulačnej slučky. Prenos informácie od regulátora k akčnému členu, teda prenos akčného zásahu je sprostredkovaný dátovou sieťou. Rovnako prenos informácie zo snímača k regulátoru alebo k riadiacemu systému prebieha prostredníctvom dátovej siete. Dátová sieť je teda jedným z hlavných prvkov aj jednoduchého regulačného obvodu [43]. Tento prvok regulačného obvodu však nevyhnutne vnáša často nezanedbateľné dopravné oneskorenie. Dopravné oneskorenie je jedným z hlavných problémov pri syntéze riadiaceho systému, ktorého prvkom je komunikačná sieť, teda sieťového riadiaceho systému.

V tejto práci sa pod pojmom sieťové riadenie rozumie najmä taký riadiaci systém, ktorý je v rámci zodpovedajúcich predpokladov schopný riadiť systém s dopravným oneskorením. Výsledky práce je možné uplatniť aj v riadiacich obvodoch, kde jedným z hlavných prvkov je aj dátová komunikačná sieť.

Špecifickou oblasťou, kde sa uplatňuje komunikačná sieť, možno nazvať decentralizované (adaptívne) riadenie. Využitiu vzájomnej komunikácie podsystémov v decentralizovanom riadení je venovaná predchádzajúca práca autora [A9]. Aj v tejto oblasti je možné priamo uplatniť adaptívne riadenie systémov s dopravným oneskorením. Samozrejmosťou je využitie v samostatnom podsystéme. Algoritmus nájde uplatnenie aj pri decentralizovanom riadení s využitím komunikácie, pričom práve komunikácia vnáša do riadiacej slučky dopravné oneskorenie. Je potrebné poznamenať,

že v takomto prípade ide najmä o algoritmy využívajúce spätnú väzbu od výstupnej veličiny. Stavová spätná väzba je skôr zriedkavá. Ďalej je potrebné aby bol algoritmus jednoduchý z pohľadu implementácie, pretože samotný decentralizovaný algoritmus je často značne zložitý.

Adaptívne algoritmy, ktoré sú vhodné pre riadenie systémov s dopravným oneskorením a sú aspoň z časti založené na princípoch priameho adaptívneho riadenia s referenčným modelom, sa často v mnohom odkláňajú od základných princípov štandardného priameho adaptívneho riadenia. V tejto triede algoritmov je preto vidieť priestor pre ďalší výskum, ktorého cieľom je v maximálnej možnej miere uplatniť dobre známe postupy štandardného adaptívneho riadenia. Očakávaným je potom prínos najmä z pohľadu jednoduchosti implementácie takéhoto algoritmu.

## 1.1 Ciele dizertačnej práce

Ciele dizertačnej práce je možné zhrnúť nasledovne:

- Analýza súčasného stavu, špecifikácia triedy algoritmov a prehľad vybraných algoritmov v oblasti adaptívneho riadenia systémov s dopravným oneskorením na vstupe založených na princípoch MRAC.
- Rozbor princípov potrebných pre ďalší výskum v špecifikovanej oblasti adaptívneho riadenia. Sumarizácia týchto princípov a stanovenie základných predpokladov nevyhnutných pre návrh riadiaceho algoritmu.
- Návrh adaptívneho riadenia pre systém s dopravným oneskorením na vstupe s využitím len vstupno výstupných signálov riadeného systému (bez stavovej spätnej väzby), ktorý umožní riadenie rovnakej triedy systémov ako štandardné MRAC, t.j. aj systémov s relatívnym stupňom dva a viac.

## 2 Výsledky práce

### 2.1 Prehľad vybraných algoritmov

Prehľad vybraných algoritmov je zameraný najmä na vysvetlenie základných princípov adaptívnych algoritmov pre systémy s dopravným oneskorením, ktoré sú uvedené v aktuálnej literatúre. Tieto algoritmy tvoria východiská pre vlastný návrh adaptívneho algoritmu v tejto práci. Preto sú v ich prehľade vyzdvihnuté najmä tie vlastnosti, ktoré sú podstatné v porovnaní so zvyškom práce.

Prehľad slúži aj pre odôvodnenie predpokladu, ktorý okrem iného definuje triedu uvedených adaptívnych algoritmov, a to predpokladu, že dopravné oneskorenie je pre riadiaci systém známe. Ostatné parametre riadeného systému sú neznáme v rovnakom zmysle ako v štandardnom adaptívnom riadení.

Uvedené algoritmy sa však v značnej miere odkláňajú od štandardných postupov priameho adaptívneho riadenia, čím sa vytvára priestor pre ďalší výskum v tejto triede algoritmov.

## 2.2 Smithov prediktor v adaptívnom riadení

Jedna kapitola práce je venovaná vymedzeniu využitia Smithovho prediktora s pohľadu klasického adaptívneho riadenia. Kapitola je rozdelená na dve časti. Prvá pre klasický Smithov prediktor bez uvažovania adaptácie riadiaceho systému. V druhej časti najmä existencia a riešiteľnosť podmienok zhody umožňuje doplniť riadiaci systém prvkami, ktoré zabezpečujú priamu adaptáciu jeho parametrov.

Pre zákon riadenia založený na metóde rozmiestňovania pólov je priamo aplikovaný princíp Smithovho prediktora. Dôležitým výsledkom je formulácia podmienok zhody, zrejme rozšíriteľná aj pre systémy vyššieho rádu. Ďalej sa ukázalo, že pri použití Smithovho prediktora sa cieľ riadenia vzťahuje na systém, ktorého výstupom je signál  $x(t) + x_a(t)$ , teda súčet výstupu riadeného systému a Smithovho prediktora. Tento fakt je v zápätí využitý v prípade, keď zákon riadenia je založený na riadení s referenčným modelom. Ďalej sa zdôvodňuje potreba poznať dopravné oneskorenie, pričom ostatné parametre riadeného systému nemusia byť známe. Výsledkom je parametrizácia Smithovho prediktora parametrami referenčného modelu taká, že zákon riadenia má štandardný tvar, ako v prípade bez Smithovho prediktora a tento má vplyv len na prídavnú (adaptačnú) odchýlku.

## 2.3 Zákon riadenia so stavovou spätnou väzbou

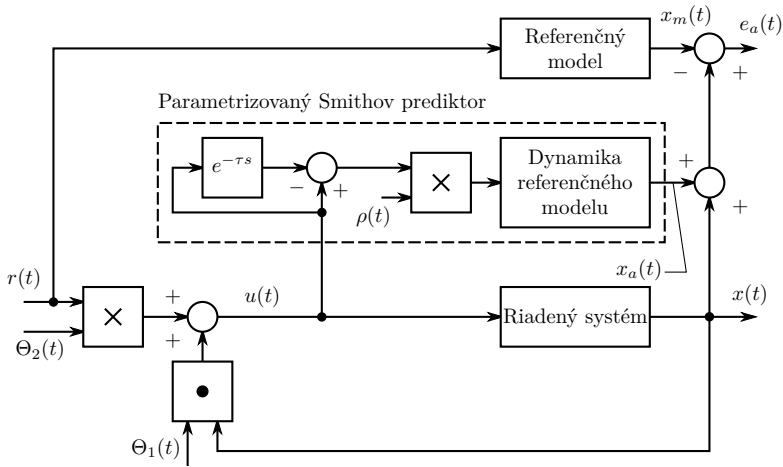
Uvažuje sa riadený systém s vhodnou štruktúrou a merateľným stavovým vektorom. Pre tento systém je, s využitím výsledkov predchádzajúcich častí práce, navrhnutý adaptívny riadiaci systém.

Návrh zákonov adaptácie parametrov zákona riadenia je doplnený dôkazom stability uvažovaného systému. Na základe týchto výsledkov je potom vyvedená stabilita celého uzavretého riadiaceho systému.

Ilustračný príklad prezentuje základné vlastnosti navrhnutého riadiaceho systému. Navyše slúži pre ilustráciu najdôležitejšieho rozdielu prezentovaného riadiaceho systému oproti klasickému použitiu Smithovho prediktora: Pretože sa uvažuje adaptívne riadenie, model riadeného systému je z časti neznámy. Pôvodný princíp Smithovho prediktora preto nie je možné využiť. Nie je možné, aby regulátor dostal neoneskorenú spätnú väzbu. Tú mu za klasických okolností zabezpečí presný model systému a ten je pre adaptívne riadenie neznámy. Náhradou je princíp, pri ktorom je parametrizovaný Smithov prediktor použitý len pre zabezpečenie stability procesu adaptácie. Neposkytuje priamo spätnú väzbu pre zákon riadenia. Cieľ riadenia je podľa toho modifikovaný. Zákon riadenia za každých okolností generuje ohraničený akčný zásah. Zosilnenia zákona riadenia sú adaptívne nastavené len na veľkosť, ktorá vzhľadom na dopravné oneskorenie umožňuje stabilný uzavretý regulačný obvod.

Navrhnutý adaptívny riadiaci systém je možné zhrnúť nasledovne. Riadeným systémom sa uvažuje SISO (Single-Input, Single-Output) systém v tvare

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + bu(t - \tau) \quad (1)$$



Obr. 1: Bloková schéma uzavretého riadiaceho systému — zákon riadenia so stavovou spätnou väzbou

kde  $x(t) \in \mathbb{R}^n$  je vektor stavových veličín,  $u(t) \in \mathbb{R}$  je vstupná veličina systému (akčný zásah). Dopravné oneskorenie  $\tau \in \mathbb{R}^+$  je známim parametrom riadeného systému. Matice  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $b \in \mathbb{R}^n$  sú vo všeobecnosti neznáme.

Cieľ riadenia sa vzťahuje na priebeh signálu  $x(t) + x_a(t)$ , pričom prídavný vektor signálov  $x_a(t)$  má rovnaký rozmer ako stavový vektor  $x(t)$  a je definovaný nižšie. Cieľom riadenia nech je aby sa časový priebeh signálu  $x(t) + x_a(t)$  zhodoval s priebehom stavového vektora referenčného modelu, ktorý je daný v tvare

$$\dot{x}_m(t) = A_m x_m(t) + b_m r(t) \quad (2)$$

kde  $x_m(t) \in \mathbb{R}^n$  je vektor stavových veličín referenčného modelu a  $r(t) \in \mathbb{R}$  je všeobecný vhodný referenčný signál. Parametre referenčného modelu, matice  $A_m \in \mathbb{R}^{n \times n}$  a vektor  $b_m \in \mathbb{R}^n$  sú známe.

Uvažuje sa zákon riadenia v tvare

$$u(t) = \Theta_1^\top(t)x(t) + \Theta_2(t)r(t) \quad (3)$$

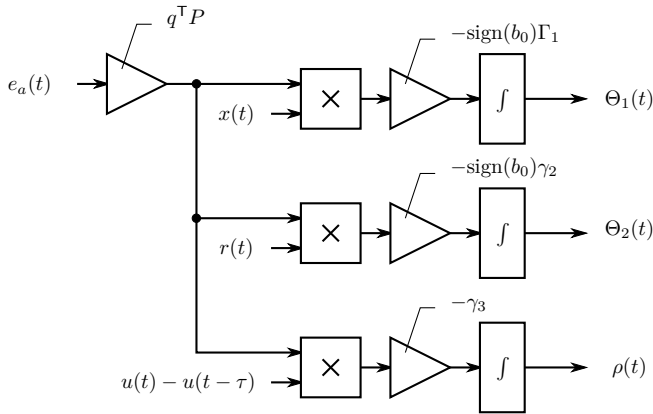
kde  $\Theta_1(t) \in \mathbb{R}^n$  a  $\Theta_2(t) \in \mathbb{R}$  sú adaptované parametre zákona riadenia. Inými slovami sú to odhady ideálnych parametrov  $\Theta_1^*$  a  $\Theta_2^*$  v každom čase  $t$ , ktoré sú dané podmienkami zhody

$$A - b\Theta_1^{*\top} = A_m \quad b\Theta_2^* = b_m \quad \text{a} \quad \rho^* = \Theta_2^{*-1} \quad (4)$$

Ďalej sa uvažuje Smithov prediktor s časovo premenlivým  $\rho(t) \in \mathbb{R}$  v tvare

$$\dot{x}_a(t) = A_m x_a(t) + b_m \rho(t) (u(t) - u(t - \tau)) \quad (5)$$

Pre adaptáciu parametrov riadiaceho systému sa používajú zákony adaptá-



Obr. 2: Bloková schéma zákonov adaptácie riadiaceho systému pre zákon riadenia so stavovou spätnou väzbou

cie v tvare

$$\dot{\Theta}_1(t) = -\text{sign}(b_0)\Gamma_1 (e_a^T(t)Pq) x(t) \quad (6a)$$

$$\dot{\Theta}_2(t) = -\text{sign}(b_0)\gamma_2 (e_a^T(t)Pq) r(t) \quad (6b)$$

$$\dot{\rho}(t) = -\gamma_3 (e_a^T(t)Pq) (u(t) - u(t - \tau)) \quad (6c)$$

kde adaptačná odchýlka  $e_a(t) = x(t) + x_a(t) - x_m(t)$  a ďalej  $\Gamma_1 \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $\Gamma_1 = \Gamma_1^T > 0$ ,  $\gamma_2 \in \mathbb{R}$ ,  $\gamma_2 > 0$  a  $\gamma_3 \in \mathbb{R}$ ,  $\gamma_3 > 0$  sú voliteľné parametre zákonov adaptácie, pomocou ktorých je možné nastaviť rýchlosť adaptácie. Matica  $P \in \mathbb{R}^{n \times n}$  spĺňa Lyapunovovu rovnicu

$$A_m^T P + P A_m = -Q \quad (7)$$

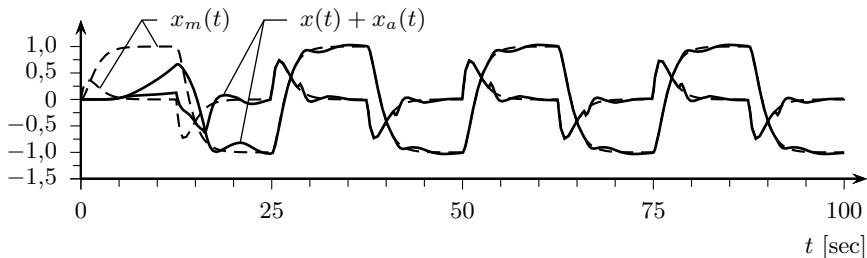
kde  $A_m$  je matica stabilného systému (referenčného modelu) a matica  $Q = Q^T > 0$  je ľubovoľná symetrická kladne definitná matica rovnakého rozmeru ako  $A_m$ .

Bloková schéma adaptívneho riadiaceho systému je na Obr. 1, pričom zákony adaptácie sú schematicky znázornené na Obr. 2. Pre ilustráciu uvedeného algoritmu uvádzame výsledky simulačného experimentu, bez úplných podrobností, na Obr. 3

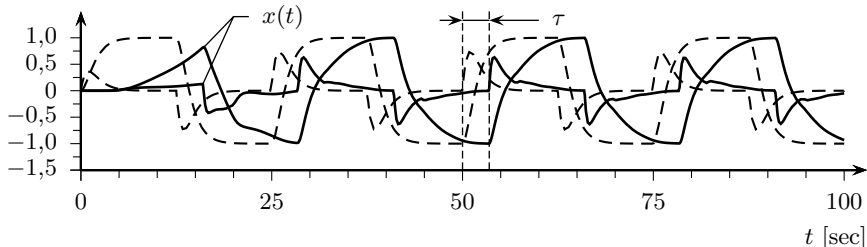
## 2.4 Vstupno-výstupný zákon riadenia

Na základe zákona riadenia s redukovaným pozorovateľom je sa vysvetľuje vzťah medzi základným návrhom riadiaceho systému, ktorý využíva stavovú spätnú väzbu, a jeho úpravou na vstupno-výstupnú verziu, pričom sa uvažuje dostupnosť len vstupnej a výstupnej veličiny riadeného systému. Zavedenie doplneného riadeného systému umožní sformulovať úlohu podobným spôsobom ako v základnom návrhu.

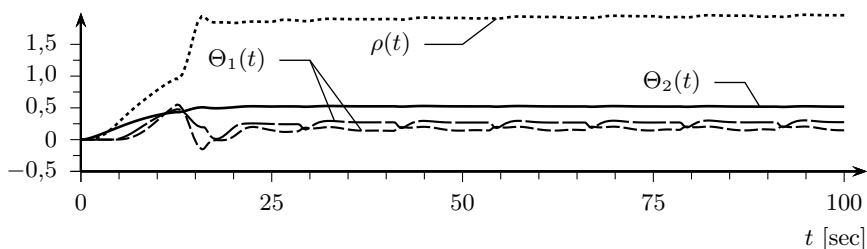




(a) Priebehy signálu  $x(t) + x_a(t)$  v porovnaní s výstupom referenčného modelu  $x_m(t)$  (prerušovaná čiara zodpovedá signálu  $x_m(t)$ ).



(b) Priebehy uvažovaného výstupu riadeného systému  $x(t)$  v porovnaní s výstupom referenčného modelu  $x_m(t)$  (prerušovaná čiara zodpovedá signálu  $x_m(t)$ ).



(c) Priebehy adaptovaných parametrov riadiaceho systému.

Obr. 3: Výsledky ilustračného príkladu pre dopravné oneskorenie riadeného systému  $\tau = 3,5$  sekundy.

Základom pre návrh zákonov adaptácie je stanovenie rovnice opisujúcej dynamiku adaptačnej odchýlky. V prípade keď relatívny stupeň riadeného systému  $n^* = 1$  to potom priamo vedie k formulovaniu kandidáta na Lyapunovovu funkciu a k návrhu zákonov adaptácie. Pre prípad  $n^* = 2$  sú najprv prezentované úpravy rovnice adaptačnej odchýlky, ktoré vedú k prispôbeniu metódy doplnenej odchýlky pre uvažovaný prípad. V závere práce je krátka úvaha o využití navrhnutého algoritmu v prípade s relatívny stupňom  $n^* \geq 3$ .

V nasledujúcom je stručne opísaný algoritmus pre prípad  $n^* = 2$ . Riadeným systémom sa uvažuje stabilný SISO systém daný v tvare

prenosovej funkcie

$$y(s) = W(s)e^{-\tau s}u(s) \quad (8)$$

kde  $y(s)$  je obraz výstupnej veličiny a  $u(s)$  je obraz vstupnej veličiny. Prenosová funkcia  $W(s)$  sa predpokladá v tvare  $W(s) = k_p \frac{Z_p(s)}{R_p(s)}$  kde  $Z_p(s)$  je monický, hurwitzov polynóm stupňa  $m$ ,  $R_p(s)$  je monický hurwitzov polynóm stupňa  $m$  a  $k_p$  je takzvané vysokofrekvenčné zosilnenie riadeného systému. Relatívny stupeň riadeného systému je  $n^* = n - m$ . Dopravné oneskorenie  $\tau$  sa predpokladá známe a konštantné. Koefficienty polynómov  $Z_p(s)$ ,  $R_p(s)$  a hodnota vysokofrekvenčného zosilnenia  $k_p$  sú neznáme, pričom znamienko zosilnenia  $k_p$  je známe.

Cieľom riadenia nech je aby sa časový priebeh signálu  $y(t) + y_a(t)$  zhodoval s priebehom výstupnej veličiny referenčného modelu, ktorý je daný vo forme prenosovej funkcie

$$\frac{y_m(s)}{r(s)} = W_m(s) = k_m \frac{Z_m(s)}{R_m(s)} \quad (9)$$

kde  $y_m(s)$  je výstupná veličina referenčného modelu a  $W_m(s)$  je prenosová funkcia referenčného modelu, pričom  $k_m$  je vysokofrekvenčné zosilnenie referenčného modelu, polynóm  $Z_m(s)$  je monický Hurwitzov polynóm stupňa  $m_m$ , polynóm  $R_m(s)$  monický Hurwitzov polynóm stupňa  $n_m$ , pričom relatívny stupeň  $n_m^* = n_m - m_m = n^*$ .

Uvažuje sa zákon riadenia  $u(t) = \Theta^T(t)\omega(t)$ , kde signálny vektor možno vyjadriť v tvare  $\omega^T(t) = [\nu_1^T(t) \quad \nu_2^T(t) \quad y(t) \quad r(t)]$  pričom tzv. pomocné filtre sú v tvare

$$\dot{\nu}_1(t) = \Lambda\nu_1(t) + qu(t - \tau) \quad (10a)$$

$$\dot{\nu}_2(t) = \Lambda\nu_2(t) + qc^T x(t) \quad (10b)$$

kde  $c^T x(t) = y(t)$ , a ďalej  $\nu_1(t) \in \mathbb{R}^{n-1}$ ,  $\nu_2(t) \in \mathbb{R}^{n-1}$ ,  $q \in \mathbb{R}^{n-1}$  pričom  $q^T = [0 \quad \dots \quad 0 \quad 1]$  a  $\Lambda \in \mathbb{R}^{(n-1) \times (n-1)}$  je ľubovoľná stabilná matica.

Parametrizovaný Smithov prediktor je možné realizovať s využitím známej dynamiky referenčného modelu, teda známej prenosovej funkcie referenčného modelu v tvare

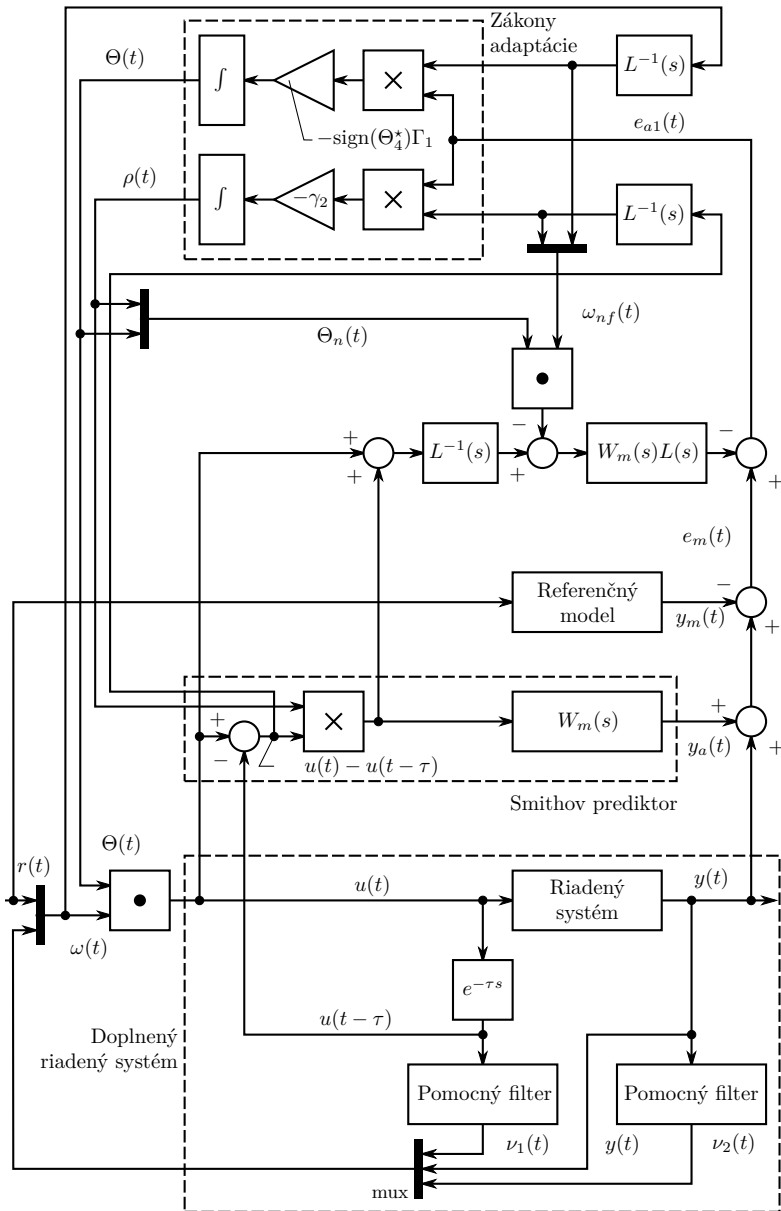
$$y_a(t) = [W_m(s)]\rho(t)(u(t) - u(t - \tau)) \quad (11)$$

Posledným podsystemom sú samotné zákony adaptácie, ktorých realizácia vyplýva priamo z ich definície

$$\dot{\Theta}(t) = -\text{sign}(\Theta_4^*)\Gamma_1 e_{a1}(t)\omega_f(t) \quad (12a)$$

$$\dot{\rho}(t) = -\gamma_2 e_{a1}(t)u_{\tau f}(t) \quad (12b)$$

kde znamienko parametra  $\Theta_4^*$  je známe a rýchlosť adaptácie je daná voliteľnými parametrami  $\Gamma_1$  a  $\gamma_2$ , ďalej vektor signálov  $\omega_f(t) = [(s + \varrho)^{-1}] \omega(t)$  a signál  $u_{\tau f}(t) = [(s + \varrho)^{-1}](u(t) - u(t - \tau))$ , kde  $L(s) = (s + \varrho)$  pričom  $\varrho$  sa volí tak, že prenosová funkcia  $W_m(s)L(s)$  je striktnie pozitívne reálna.



Obr. 4: Celková schéma adaptívneho riadiaceho systému pre riadený systém s relatívnym stupňom  $n^* = 2$ .

Adaptačnú odchýlku možno vyjadriť v tvare

$$e_{a1}(t) = e_m(t) - [W_m(s)L(s)] \left( [L^{-1}(s)] u_n(t) - \Theta_n^T(t) \omega_{nf}(t) \right) \quad (13)$$

kde  $e_m(t) = y(t) + y_a(t) - y_m(t)$ . Rovnica (13) umožňuje ľahko získať signál adaptačnej odchýlky využívaný v zákonoch adaptácie. Tým sa implementácia navrhnutého adaptívneho riadiaceho systému v značnej miere zjednodušuje. Schéma adaptívneho riadiaceho systému je na Obr. 4.

## 2.5 Aplikácie

### Riadenie laboratórneho procesu

Algoritmus opísaný v predchádzajúcej časti bol implementovaný pre riadenie laboratórneho procesu. Ide o proces využívaný najmä pri výučbe odborných predmetov pokročilej teórie automatického riadenia [21], [A3].

Do riadeného laboratórneho procesu bolo umelo (softvérovo) pridané dopravné oneskorenie s hodnotou  $\tau = 0,5$  sekundy. Všetky veličiny procesu sa merajú vo voltoch [V]. Modelom systému môže byť prenosová funkcia 2. rádu s relatívnym stupňom  $n^* = 2$  [A3]. Pracovný bod je v tomto prípade daný hodnotou vstupnej veličiny  $u = 4$  [V], čomu zodpovedá hodnota výstupnej veličiny  $y = 4,136$  [V].

V okolí tohto pracovného bodu sa uvažuje referenčný signál  $r(t) = 0,75 \sin(2\pi f_r t)$ , kde  $f_r = 1/30$  [sec<sup>-1</sup>]. Referenčný model sa uvažuje v tvare

$$\frac{y_m(s)}{r(s)} = \frac{0,25}{s^2 + s + 0,25}$$

Ďalej sa v nasledujúcom používajú hodnoty parametrov:

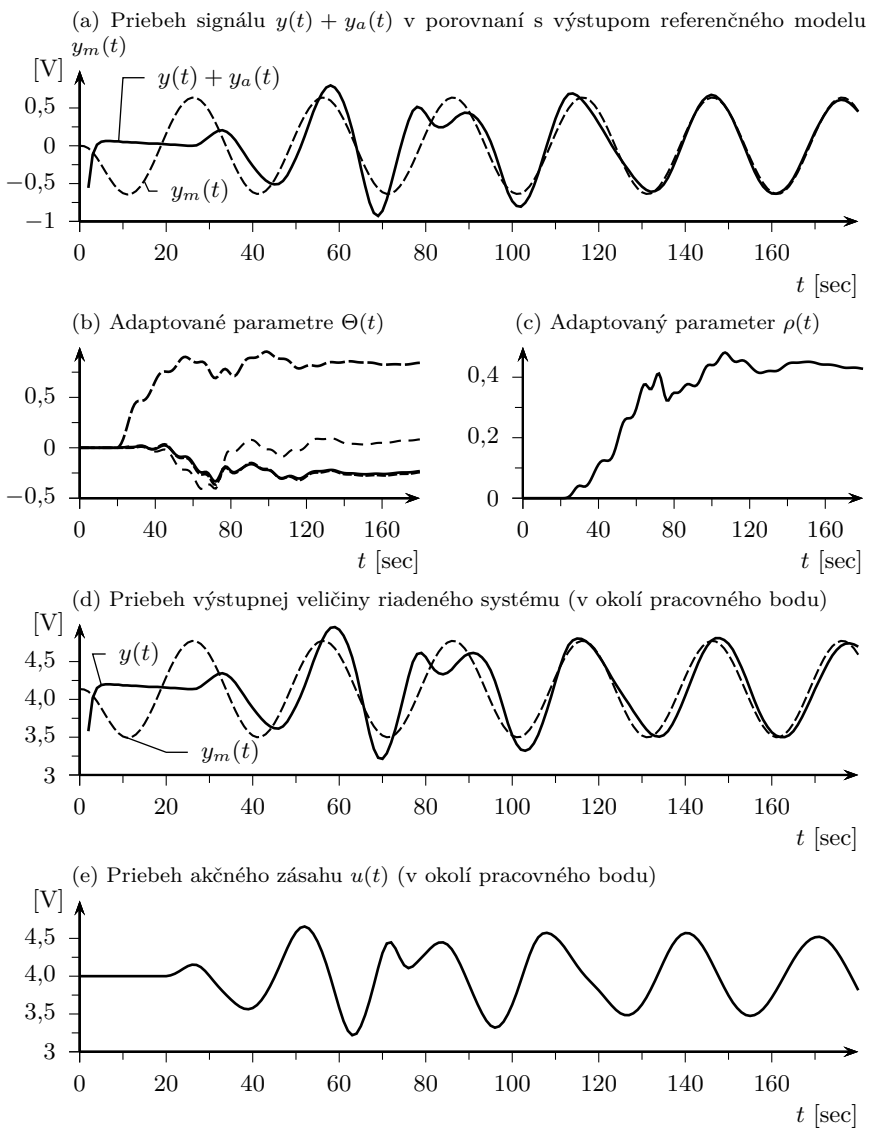
$$\begin{aligned} \varrho &= 0,5 \\ \Lambda &= -0,5 \end{aligned}$$

Adaptívny regulátor je spustený až v čase  $t = 20$  [sec], keď je proces v ustálenom stave.

Výsledky experimentu sú na Obr 5. Obr. 5a ukazuje úspešnosť riadiaceho algoritmu s pohľadu splnenia cieľa riadenia uvažovaného pri návrhu riadiaceho systému. Po prechodnom procese adaptácie sa adaptované parametre ustália, Obr. 5b a Obr. 5c a sú ohraňované. Priebeh signálu  $y(t) + y_a(t)$  sleduje výstup referenčného modelu  $y_m(t)$ . Podľa očakávania, samotný signál  $y(t)$  pre dopravné oneskorenie zaostáva za signálom  $y_m(t)$  ako ukazuje Obr. 5d. Pre uvažovaný prípad tiež platí, že tvar priebehu signálu  $y(t)$ , a teda jeho kvalita, je rovnaký ako tvar priebehu signálu  $y(t) + y_a(t)$ . Rozdiel je len vo vzájomnom časovom posunutí.

### Dávkovanie inzulínu

Jedným z príkladov, kde možno využiť lineárny systém s dopravným oneskorením ako model riadeného systému je inzulín-glukózový systém subjektu s ochorením diabetes mellitus prvého typu. Takýto model je



Obr. 5: Výsledky aplikácie adaptívneho riadiaceho systému na riadenie laboratórneho procesu.

samozrejme kompromisom medzi presnosťou modelu a jednoduchosťou modelu pre jeho využitie pri návrhu riadiaceho systému.

Riadenou veličinou je v tomto prípade koncentrácia glukózy v podkožnom tkanive, presnejšie v intersticiálnej tekutine. Táto veličina zodpovedá koncentrácii glukózy v krvi (v krvnej plazme). Ideálnym by bolo riadenie

priamo koncentrácie glukózy v krvi, avšak túto nie je možné priebežne merať vhodne jednoduchým spôsobom. Pre meranie koncentrácie glukózy v podkožnom tkanive sa uvažuje systém pre kontinuálne meranie glykémie. Tieto systémy sú v súčasnosti komerčne dostupné [7, 15, 14]. Glukóza v podkoží reaguje na koncentráciu glukózy v krvi s istým oneskorením.

Dynamiku koncentrácie glukózy v krvi je možné opísať tzv. *minimálnym modelom* [13], [A2]. Skladá sa z dvoch nelineárnych diferenciálnych rovníc. Po linearizácii sa získa prenosová funkcia druhého rádu s relatívnym stupňom 2. Vstupnou veličinou tohto systému je koncentrácia inzulínu v krvi. Inzulín sa však podáva podkožne. Tým opäť vzniká oneskorenie medzi podaním inzulínu a zvýšením koncentrácie inzulínu v krvi. V tomto prípade sa uvažuje podávanie inzulínu pomocou inzulínovej pumpy [6].

Ďalším vstupom do riadeného systému je príjem glukózy (sacharidov) v jedle. Z pohľadu návrhu riadiaceho systému je to veličina, ktorá spôsobuje poruchu na výstupnej veličine. Avšak tento poruchový signál je merateľný pretože čas, zloženie a množstvo jedla môže byť v dostatočnej miere známe. Navyše môže byť tento poruchový signál známy aj s predstihom, pretože jedlo je možné naplávať dopredu.

Na základe uvedeného je možné uvažovať identifikáciu lineárneho modelu s dopravným oneskorením v okolí pracovného bodu. Pracovný bod je daný tzv. bazálnou dávkou inzulínu, presnejšie rýchlosťou podávania bazálneho inzulínu, ktorá v ideálnom prípade, bez poruchy, udržiava koncentráciu glukózy na stanovenej hodnote. Akčným zásahom regulátora sa pridáva alebo uberá rýchlosť podávania inzulínu.

Pre potlačenie poruchy je hlavný riadiaci algoritmus doplnený o heuristický adaptívny regulátor [A1, A14]. K pôvodnému akčnému zásahu, ktorý je vypočítaný hlavným riadiacim algoritmom sa pripočíta prídavný akčný zásah

$$u_d = \Psi^T(t)w(t) \quad (14)$$

kde  $\Psi(t) \in \mathbb{R}^3$  sú adaptované parametre a signál

$$w^T(t) = [\Delta d(t + \tau) \quad \Delta d(t - \tau_1 + \tau) \quad \Delta d(t - \tau_2 + \tau)]$$

Signál  $\Delta d(t)$  [mg/min] predstavuje rýchlosť príjmu glukózy z jedla. Oneskorenia  $\tau = 60$  [min],  $\tau_1 = 15$  [min],  $\tau_2 = 30$  [min] sú známe.

V simulačnom experimente sa uvažuje nenulový poruchový signál. Po jednodňovom ustálení sa riadeného systému je simulovaná konzumácia jedla nasledovná: Vo všetkých dňoch sú množstvo a čas jedla rovnaké. Jedlo obsahuje 30g glukózy na raňajky (8:00), 50g glukózy na obed (12:00) a 50g glukózy na večeru (20:00).

Výsledky simulačného experimentu sú na Obr. 6 a na Obr. 7. Z pohľadu splnenia cieľa riadenia sa obe časti riadiaceho systému úspešne adaptujú. Obr. 6a ukazuje, že signál  $y(t) + y_a(t)$  sleduje výstup referenčného modelu  $y_m(t)$ . Odchýlky sú spôsobené vplyvom poruchového signálu. Je vidieť, že po prechodnom deji adaptácie je vplyv poruchového signálu vo výraznej miere potlačený. To svedčí o úspešnej adaptácii časti riadiaceho systému zodpovedajúcej heuristickému adaptívnemu potlačeniu poruchy. Tiež je zrejmy dominantný charakter priebehu signálu, ktorý sleduje výstup re-

ferenčného modelu, čo znamená úspešnú adaptáciu hlavnej časti riadiaceho systému. Adaptované parametre hlavnej časti regulátora, Obr. 6b a Obr. 6c sú ohraničené a tiež adaptované parametre prídavnej časti pre potlačenie poruchy sú pre využitie  $\sigma$ -modifikácie ohraničené, Obr. 6d. Tým je ukázaná stabilita celého riadiaceho obvodu.

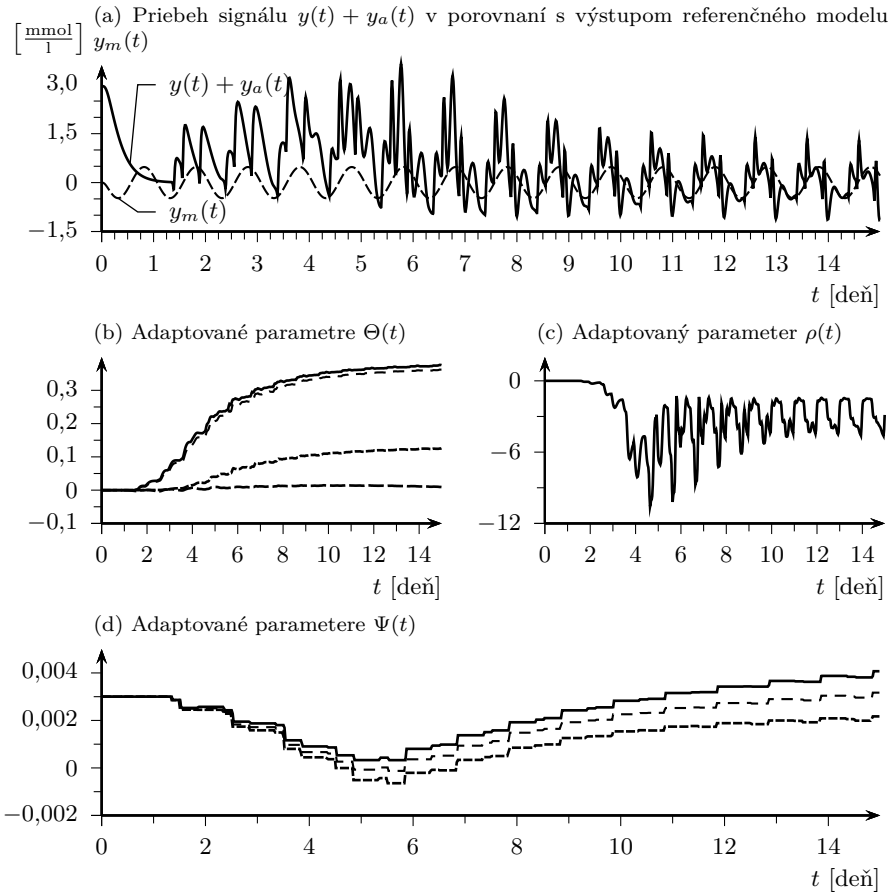
Adaptívny riadiaci systém je v tomto prípade úspešný aj z pohľadu riadenia glykémie, ako ukazuje Obr. 7. Hlavným cieľom je udržiavať glykémiu v cieľovom rozsahu 4 až 10 mmol/l. Po prechodnom procese adaptácie je tento cieľ splnený. Dôležitým výsledkom je, že v tomto prípade sa nevyskytujú prípady hypoglykémie, teda nízkej koncentrácie glukózy, a to ani v priebehu adaptácie, teda pred ustálením sa adaptovaných parametrov. Akčný zásah, teda rýchlosť podávania inzulínu ukazuje Obr. 7b. Je vidieť, že hlavná časť riadiaceho systému určuje množstvo bazálneho inzulínu najmä na základe splnenia cieľa riadenia uvažovaného pri návrhu regulátora. Akokoľvek, na základe výsledkov na Obr. 7 je možné povedať, že podávanie bazálneho inzulínu je vyhovujúce. V prípade dobrého potlačenia poruchy udržiava glykémiu v okolí žiadanej hodnoty. Akčný zásah prídavnej časti pre potlačenie poruchy má charakter impulzov v čase jedla. Je možné povedať, že veľkosť impulzov sa adaptuje tak, aby vplyv poruchy bol minimálny. Vďaka procesu adaptácie je možné pozorovať aj vplyv veľkosti impulzu na potlačenie vplyvu poruchy.

### 3 Záver

Hlavným výsledkom práce je návrh adaptívneho riadiaceho systému pre riadenie systémov s dopravným oneskorením. Navrhnutý algoritmus riadenia je možné zaradiť do triedy adaptívnych algoritmov, ktoré sú podrobne opísané v rámci prehľadu súčasného stavu. Hlavným spoločným znakom týchto algoritmov je, že pre návrh je potrebné poznať presnú hodnotu dopravného oneskorenia. Algoritmus navrhnutý v práci uvažuje rovnaké predpoklady ako algoritmy uvedené v prehľade vybraných algoritmov.

Hlavnú nevýhodu algoritmov uvedených v literatúre vidíme v prílišnom odklone od štandardných postupov klasického adaptívneho riadenia. Napriek tomu, že pri návrhu týchto algoritmov sa deklaruje, že ide o algoritmy založené na priamom adaptívnom riadení s referenčným modelom v mnohých bodoch návrhu sú v značnej miere využité predpoklady a postupy, ktoré nezodpovedajú klasickému adaptívnemu riadeniu s referenčným modelom. To spôsobuje okrem iného, že navrhnuté algoritmy nie je možné ďalej rozširovať na širšie triedy riadených systémov. Tiež to spôsobuje, že implementácia algoritmu je príliš náročná, čo vedie k aproximáciám a teda strate teoretickej kvality riadenia.

Práca sa zameriava na princíp sledovania referenčného modelu s ohraňenou odchýlkou. Hlavnou výhodou je jednoduchosť implementácie takéhoto algoritmu. V tejto oblasti boli dosiahnuté, ako bolo uvedené, výsledky najmä pre stavovú spätnú väzbu. To má skôr teoretický význam ako praktický, pretože stavové veličiny riadeného systému často nie sú dostupné. Pre vstupno-výstupnú verziu algoritmu boli dosiahnuté výsledky

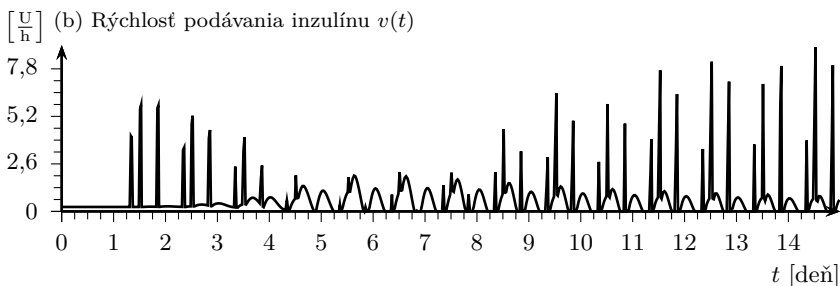
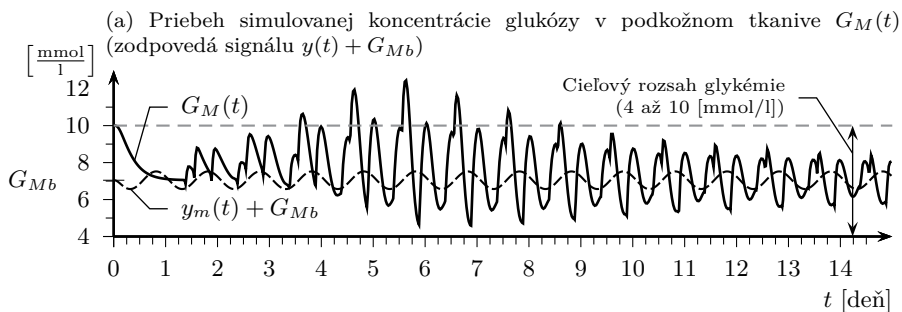


Obr. 6: Výsledky simulačného experimentu č.2 z pohľadu splnenia cieľa riadenia.

s predpokladom, že riadený systém je má relatívny stupeň 1. Algoritmus pre systém s vyšším relatívnym stupňom nebol priamo navrhnutý.

Spracovanie existujúceho algoritmu s uvažovaním stavovej spätnej väzby v takej forme, že sú dodržané všetky základné postupy klasického adaptívneho riadenia s referenčným modelom, umožnilo ďalej rozvíjať tento algoritmus aj pri uvažovaní spätnej väzby len od vstupných a výstupných veličín riadeného systému. Priamočiarim postupom je preto navrhnutý algoritmus využívajúci vstupno-výstupné veličiny pre riadený systém s relatívnym stupňom 1. Následne sú všeobecné postupy štandardného adaptívneho riadenia umožňujúce navrhnúť algoritmus pre systém s relatívnym stupňom 2 použité aj v tomto konkrétnom prípade. Výsledkom je algoritmus prinášajúci všetky výhodné vlastnosti aj pre prípad riadeného systému s relatívnym stupňom 2. Navyše práve pre bezpodmienečné zachovanie všet-





Obr. 7: Výsledky simulačného experimentu č.2 z pohľadu riadenia glykémie

kých postupov klasického adaptívneho riadenia je možné tento algoritmus ďalej rozšíriť aj pre systémy s vyšším relatívnym stupňom. Nárast zložitosti algoritmu pri takomto rozširovaní je pri tom vo veľkej miere porovnateľný ako v prípade klasického adaptívneho riadenia.

Návrh adaptívnych algoritmov riadenia, ako pre stavovú spätnú väzbu tak aj pre vstupno-výstupnú spätnú väzbu je doplnený ilustračnými príkladmi. Tie slúžia aj pre vysvetlenie vplyvu a spôsobu nastavovania voliteľných parametrov algoritmu, najmä adaptačných zosilnení. To súvisí aj s vysvetlením rozdielu medzi cieľom riadenia uvažovaným pri návrhu a výslednou kvalitou priebehu samotnej výstupnej veličiny riadeného systému.

Jednou z aplikácií navrhnutého algoritmu je jeho využitie pre automatické dávkovanie inzulínu. Algoritmus je súčasťou riadiaceho systému. Opäť sa ukazuje výhoda dodržiavania štandardných postupov adaptívneho riadenia, keď je algoritmus, presnejšie zákony adaptácie, modifikovaný v zmysle robustného adaptívneho riadenia tak aby ho bolo možné využiť aj pre nelineárny riadený systém, ktorým je simulovaný subjekt (pacient) s ochorením diabetes mellitus 1. typu.

## Zoznam publikácií autora

- [A1] T. Ludwig, I. Ottinger, M. Tárník, and E. Miklovičová. T1DM subject as a time-delay system: Modeling and adaptive control. In *19th International Conference on Process Control*, 2013. accepted.
- [A2] E. Miklovičová and M. Tárník. GPC for diabetes control without meal announcement — control loop design and control performance study. In O. Arslan and S. Oprisan, editors, *Recent Advances in Mechanical Engineering and Automatic Control, Proceedings of the 3rd European Conference of Control (ECC '12), Paris, France December 2-4*, pages 58 – 63. WSEAS Press, December 2012.
- [A3] M. Tárník. Direct model reference adaptive control of small laboratory DC motor. *posterus.sk*, 4(1), 2011.
- [A4] M. Tárník. Adaptive posi-cast control for PMSM speed control. *Selected Topics in Modelling and Control*, 8:84-87, 2012. Bratislava: Slovak University of Technology Press.
- [A5] M. Tárník. On adaptive posi-cast controller: PMSM speed controller design. In *Power Engineering 2012. Control of Power Systems 2012 : 10th International Scientific Conference CPS 2012. Tatranské Matliare, Slovakia, May 15-17, 2012.*, pages 141–142. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2012.
- [A6] M. Tárník. The study on selected model of the glucose-insulin system. *Journal of Cybernetics and Informatics*, 13:54-64, 2012.
- [A7] M. Tárník and E. Miklovičová. T1DM control model design and identification based on glucose kinetics minimal model. In *ELITECH '12 : 14th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 22 May 2012*. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2012. CD Rom.
- [A8] M. Tárník and J. Murgaš. Additional adaptive controller for mutual torque ripple minimization in PMSM drive systems. In *Proceedings of the 18th IFAC world congress 2011, Milano, Italy, August 28 - September 2*, pages 4119–4124, 2011.
- [A9] M. Tárník and J. Murgaš. Decentralized adaptive control and the possibility of utilization of networked control system. In *Recent Researches in Engineering and Automatic Control : ECC '11: 2nd European Conference of Control; Puerto De La Cruz, Tenerife, Spain, 10.-12. December 2011*, pages 83–87. WSEAS Press, 2011.
- [A10] M. Tárník and J. Murgaš. Direct MRAC of small laboratory DC motor in the presence of input constraints. *Selected Topics in Modelling and Control*, 7:67–72, 2011. Bratislava: Slovak University of Technology.
- [A11] M. Tárník and J. Murgaš. Model reference adaptive control of permanent magnet synchronous motor. *Journal of Electrical Engineering*, 62(3):117–125, 2011.

- [A12] M. Tárnik and J. Murgaš. Utilization of cybernetic principles and methods for modeling and control of diabetes. In *ELOSYS. Elektrotechnika, informatika a telekomunikácie 2012; Trenčín, 9.-12.10.2012*, pages 154–156. Bratislava: FEI STU, 2012. CD-ROM.
- [A13] M. Tárnik, J. Murgaš, and E. Miklovičová. Direct adaptive smith predictor based control with application for T1DM subject. In *Recent Advances in Mechanical Engineering and Automatic Control : Proceedings of the 3rd European Conference of Control (ECC'12). Paris, France, 2-4 December 2012*, pages 52–57. WSEAS Press, 2012.
- [A14] M. Tárnik, J. Murgaš, E. Miklovičová, and L. Farkas. Adaptive control of time-delayed systems with application for control of glucose concentration in type 1 diabetic patients. In *11th IFAC International Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing - July 3-5 2013, Caen, France*, 2013. accepted.

## Zoznam použitej literatúry

- [1] N. Abe and K. Yamanaka. Smith predictor control and internal model control - a tutorial. In *SICE Annual Conference in Fukui, August 4-6, 2003, Fukui University, Japan*, 2003.
- [2] S. Andersson. *Optimization of a Servo Motor for an Industrial Robot Application*. Printed in Sweden by Universitetstryckeriet, Lund University, 2000.
- [3] K.J. Astrom, C-C Hang, and B. C. Lim. A new smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead-time. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 39(2):343–345, 1994.
- [4] N. V. Azbelev, V. P. Maksimov, and L. F. Rakhmatullina. *Introduction to the Theory of Functional Differential Equations: Methods and Applications*. Hindawi Publishing Corporation, 2007.
- [5] D. Brethé and J.J. Loiseau. An effective algorithm for finite spectrum assignment of single-input systems with delays. *Mathematics and Computers in Simulation*, 45(3–4):339 – 348, 1998.
- [6] C. Cobelli, C. Dalla Man, G. Sparacino, L. Magni, G. De Nicolao, and B.P. Kovatchev. Diabetes: Models, signals, and control. *IEEE Reviews in, Biomedical Engineering*, 2:54 –96, 2009.
- [7] G. De Nicolao, L. Magni, C. Dalla Man, and C. Cobelli. Modeling and control of diabetes: Towards the artificial pancreas. In *Proceedings of the 18th IFAC World Congress*, 2011.
- [8] S. Evesque, A. M. Annaswamy, S. Niculescu, and A. P. Dowling. Adaptive control of a class of time-delay systems. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 125(2):186–193, 2003.

- [9] M. Fliess, R. Marquez, and H. Mounier. PID-like regulators for a class of linear delay systems. In *6th European Control Conference, Porto, Portugal, September 2001*, 2001.
- [10] Heide Glüsing-Lüerssen. A behavioral approach to delay-differential systems. *SIAM J. Control Optim.*, 35(2):480–499, mar 1997.
- [11] K. Gu, V. L. Kharitonov, and J. Chen. *Stability of Time-Delay Systems*. Birkhauser Basel, 2003.
- [12] N. Hopfe, A. Ilchmann, and E.P. Ryan. Funnel control with saturation: Linear mimo systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 55(2):532–538, 2010.
- [13] R. Hovorka, F. Shojaee-Moradie, P. V. Carroll, L. J. Chassin, I. J. Gowrie, N. C. Jackson, R. S. Tudor, A. M. Umpleby, and R. H. Jones. Partitioning glucose distribution/transport, disposal, and endogenous production during ivgtt. *American Journal of Physiology - Endocrinology and Metabolism*, (282):E992–E1007, January 2002.
- [14] Roman Hovorka. Management of diabetes using adaptive control. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 19(5):309–325, 2005.
- [15] Roman Hovorka, Malgorzata E. Wilinska, Ludovic J. Chassin, and David B. Dunger. Roadmap to the artificial pancreas. *Diabetes Research and Clinical Practice*, 74, Supplement 2(0):S178 – S182, 2006. Proceedings of the track “Artificial Pancreas and IT” held at the International Symposium on “New Technologies for Insulin Replacement”.
- [16] K. Ichikawa. Frequency-domain pole assignement and exact model-matching for delay systems. *International Journal of Control*, 41:1015–1024, 1985.
- [17] P. Ioannou and B. Fidan. *Adaptive Control Tutorial*. Society for Industrial and Applied Mathematics, USA., 2006.
- [18] P. Ioannou and J. Sun. *Robust Adaptive Control*. Prentice Hall, Inc, 1996.
- [19] J. Jang. *Adaptive control design with guaranteed margins for nonlinear plants*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Mechanical Engineering., 2009.
- [20] Y. Jia, H. Kokame, and J. Lunze. Simultaneous adaptive decoupling and model matching control of a fluidized bed combustor for sewage sludge. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 11(4):571–577, 2003.
- [21] S. Kajan and M. Hypiusová. LABREG software for identification and control of real processes in matlab. In *Proceedings of Conference Technical Computing Prague 2007*, 2007.
- [22] S. Majhi and D.P. Atherton. A new smith predictor and controller for unstable and integrating processes with time delay. In *Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control, 1998.*, volume 2, pages 1341–1345 vol.2, 1998.

- [23] C.D. Man, D.M. Raimondo, R.A. Rizza, and C. Cobelli. Gim, simulation software of meal glucose–insulin model. *Journal of Diabetes Science and Technology*, 1(3), may 2007.
- [24] C.D. Man, R.A. Rizza, and C. Cobelli. Mixed meal simulation model of glucose–insulin system. In *Engineering in Medicine and Biology Society, 2006. EMBS '06. 28th Annual International Conference of the IEEE*, pages 307–310, 30 2006-sept. 3 2006.
- [25] A. Manitius and A.W. Olbrot. Finite spectrum assignment problem for systems with delays. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 24(4):541–552, 1979.
- [26] B. Mirkin and P. O. Gutman. Robust adaptive output-feedback tracking for a class of nonlinear time-delayed plants. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 55(10):2418–2424, 2010.
- [27] B. Mirkin and P.-O. Gutman. Adaptive following of perturbed plants with input and state delays. In *2011 9th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA)*, pages 865–870, dec. 2011.
- [28] B. Mirkin, E. L. Mirkin, and P.-O. Gutman. State-feedback adaptive tracking of linear systems with input and state delays. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 23(6):567–580, 2009.
- [29] B. Mirkin, E.L. Mirkin, and P. O Gutman. Model reference adaptive control of nonlinear plant with dead time. In *47th IEEE Conference on Decision and Control, 2008. CDC 2008*, pages 1920–1924, 2008.
- [30] B. M. Mirkin and P. O. Gutman. Output feedback model reference adaptive control for multi-input–multi-output plants with state delay. *Systems & Control Letters*, 54(10):961–972, 2005.
- [31] L. Mirkin and N. Raskin. Every stabilizing dead-time controller has an observer–predictor-based structure. *Automatica*, 39(10):1747–1754, 2003.
- [32] K. S. Narendra and A. M. Annaswamy. *Stable adaptive systems*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989.
- [33] S.I. Niculescu and A. M. Annaswamy. An adaptive smith-controller for time-delay systems with relative degree  $n^* \leq 2$ . *Systems & Control Letters*, 49(5):347–358, 2003.
- [34] R. Ortega and R. Lozano. Globally stable adaptive controller for systems with delay. *International Journal of Control*, 47(1):17–23, 1988.
- [35] S. Øvrebø. Sensorless control of permanent magnet synchronous machines. Technical report, Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Information Technology, Mathematics and Electrical Engineering, Department of Electrical Power Engineering, december 2004.

- [36] S. Park, D. Wee, A.M. Annaswamy, and A.F. Ghoniem. Adaptive low-order posicast control of a combustor test-rig model. In *Decision and Control, 2002, Proceedings of the 41st IEEE Conference on*, volume 4, pages 3698–3703 vol.4, 2002.
- [37] Jean-Pierre Richard. Time-delay systems: an overview of some recent advances and open problems. *Automatica*, 39(10):1667 – 1694, 2003.
- [38] O.J.M. Smith. A controller to overcome dead time. *ISA Trans.*, 6(2), 1959.
- [39] G. Tao. *Adaptive control design and analysis*. John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [40] K. Watanabe, E. Nobuyama, T. Kitamori, and M. Ito. A new algorithm for finite spectrum assignment of single-input systems with time delay. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 37(9):1377–1383, 1992.
- [41] H. Wu. Adaptive robust control of uncertain nonlinear systems with nonlinear delayed state perturbations. *Automatica*, 45(8):1979 – 1984, 2009.
- [42] Y. Yildiz, A. Annaswamy, I. V. Kolmanovskiy, and D. Yanakiev. Adaptive posicast controller for time-delay systems with relative degree  $n^* \leq 2$ . *Automatica*, 46(2):279 – 289, 2010.
- [43] W. Zhang. *Stability Analysis of Networked Control Systems*. PhD thesis, Case Western Reserve University, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, 2001.
- [44] Y. Zhang, W. H. Chen, and Y. Ch. Soh. Discrete-time robust backstepping adaptive control for nonlinear time-varying systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 45(9):1749–1755, 2000.
- [45] Y. Zhang, W. H. Chen, and Y. Ch. Soh. Improved robust backstepping adaptive control for nonlinear discrete-time systems without overparameterization. *Automatica*, 44(3):864 – 867, 2008.
- [46] J. Zhou, Ch. Wen, and W. Wang. Adaptive backstepping control of uncertain systems with unknown input time-delay. *Automatica*, 45(6):1415 – 1422, 2009.