

Adaptívne prediktívne riadenie na báze analytickej a experimentálnej identifikácie riadeného systému

¹Štefan JAJČIŠIN, ²Anna JADLOVSKÁ

¹ Katedra kybernetiky a umelej inteligencie, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Slovenská republika

¹stefan.jajcisin@tuke.sk, ²anna.jadlovska@tuke.sk

Abstrakt — Článok prezentuje klasický prístup pri návrhu algoritmov zovšeobecného prediktívneho riadenia a dva odlišné spôsoby adaptácie parametrov riadiacich algoritmov v rámci riadiaceho cyklu. V článku je uvedený algoritmus adaptácie parametrov riadiaceho algoritmu v závislosti na vopred známych časových priebehoch riadiacej veličiny a taktiež algoritmus založený na experimentálne nameraných signáloch vstupných a výstupných veličín riadeného systému. V rámci článku sú porovnané výsledky simulačného riadenia nelineárneho modelu hydraulického systému pomocou klasického zovšeobecného prediktívneho riadenia s výsledkami získanými pri použití adaptívnych algoritmov prediktívneho riadenia.

Kľúčové slová — adaptívne prediktívne riadenie, zovšeobecnené prediktívne riadenie, analytická a experimentálna identifikácia, hydraulický systém

I. ÚVOD

V článku prezentujeme základný princíp a teoretický návrh algoritmu prediktívneho riadenia pri použití lineárneho modelu riadeného systému vo forme vstupno-výstupného opisu. Konkrétne sa zaoberáme algoritmom zovšeobecného prediktívneho riadenia na báze CARIMA modelu [1]. Ďalej sa zaoberáme dvoma rôznymi prístupmi pre algoritmičné riešenie adaptácie parametrov riadiacich algoritmov v rámci riadiacej štruktúry prediktívneho riadenia, bližšie rozobranými v [2]. Prezentujeme prístup vychádzajúci zo známeho matematicko-fyzikálneho opisu a taktiež prístup založený na experimentálnej identifikácii parametrov modelu riadeného systému s využitím rekurzívnej metódy najmenších štvorcov. V závere článku uvádzame získané výsledky pri riadení nelineárneho simulačného modelu hydraulického systému, ktorý sa nachádza v Laboratóriu mechatronických systémov na Katedre kybernetiky a umelej inteligencie pomocou všetkých navrhnutých algoritmov prediktívneho riadenia.

II. ZOVŠEOBECNENÉ PREDIKTÍVNE RIADENIE – KLASICKÝ PRÍSTUP

Prediktívne riadenie je typické tým, že na výpočet akčného zásahu v danom kroku používa predikciu správania sa riadeného fyzikálneho systému. Vo väčšine prípadov sú predikované hodnoty príslušných veličín určované na základe lineárneho modelu riadeného systému. V tomto článku sa budeme zaoberať zovšeobecným prediktívnym riadením (GPC), ktoré vychádza zo vstupno-výstupného opisu riadeného systému vo forme CARIMA modelu

$$A_z(z^{-1})y(k) = B_z(z^{-1})u(k-1) + \frac{C_z(z^{-1})}{\Delta} \xi(k), \quad (1)$$

kde $B_z(z^{-1})$ a $A_z(z^{-1})$ sú polynómy čitateľa a menovateľa rádu m a n , $u(k)$ je vstup, $y(k)$ je výstup dynamického systému, $\xi(k)$ je chyba výstupu systému, resp. šum merania výstupu, $C_z(z^{-1})$ je polynóm a $\Delta = 1 - z^{-1}$ [1].

Metódy prediktívneho riadenia patria k moderným optimalizačným metódam. Vo všeobecnosti sa v rámci nich minimalizuje funkcionál

$$J = \sum_{i=N_1}^{N_p} Q_e(i) [\hat{y}(k+i) - w(k+i)]^2 + \sum_{i=1}^{N_u} R_u(i) [\Delta u(k+i-1)]^2 + \sum_{i=N_1}^{N_p} S_e(i) [\hat{y}_s(k+i)]^2, \quad (2)$$

kde $\hat{\mathbf{y}}(k)$ je vektor hodnôt výstupu, $\mathbf{w}(k)$ je vektor požadovaných hodnôt výstupu, $\Delta\mathbf{u}(k)$ je vektor hodnôt zmeny akčného zásahu, $\hat{\mathbf{y}}_s(k)$ je sumátor odchýlok požadovaných a aktuálnych hodnôt výstupu, ktorého hodnota je v každom kroku k vypočítavaná na základe vzťahu

$$\hat{\mathbf{y}}_s(k+1) = \hat{\mathbf{y}}_s(k) + \mathbf{w}(k) - \mathbf{y}(k), \quad (3)$$

kde $\mathbf{y}(k)$ je výstup riadeného systému.

Hodnoty N_1 a N_p vo funkcionáli (2) udávajú horizont predikcie a hodnota N_u predstavuje riadiaci horizont, na ktorom sa vypočítava optimálna postupnosť hodnôt akčného zásahu $\mathbf{u}(k)$, pričom platí $N_u \leq N_p$. Podľa [1] by hodnota N_1 mala byť najmenej $d + 1$, kde d je dopravné oneskorenie systému. V našom prípade budeme uvažovať $N_1 = 1$. Ak sa pri metódach prediktívneho riadenia používa redukcia stupňov voľnosti akčného zásahu, platí $N_u < N_p$ [2].

Parametre, ktoré môžeme v rámci funkcionálu (2) nastavovať sú:

- váhová matica odchýlok požadovaných a predikovaných hodnôt výstupov $\mathbf{Q}_e(i)$,
- váhová matica hodnôt akčného zásahu pre jednotlivé vstupy systému $\mathbf{R}_u(i)$,
- váhová matica sumátora $\mathbf{S}_e(i)$.

V článku budeme váhové matice $\mathbf{Q}_e(i)$, $\mathbf{R}_u(i)$ a $\mathbf{S}_e(i)$ považovať za diagonálne matice s hodnotami váhových koeficientov q , r , s a zároveň za konštantné na celej dĺžke oboch horizontov, takže v ďalšom sa obmedzíme na označenie \mathbf{Q}_e , \mathbf{R}_u a \mathbf{S}_e . Tiež je potrebné poznamenať, že najviac rozšírené implementácie prediktívneho riadenia neuvažujú so sumátorom $\hat{\mathbf{y}}_s$, resp. matica \mathbf{S}_e je nulová. Taktiež v tomto článku nebudeme uvažovať sumátor.

Pre algoritmy prediktívneho riadenia je typické využitie *stratégie pohyblivého horizontu* [2]. Jedná sa o vypočítanie optimálnej postupnosti akčného zásahu $\mathbf{u}_{opt} = [\mathbf{u}_{opt}(k) \ \cdots \ \mathbf{u}_{opt}(k + N_u)]$ na celej dĺžke riadiaceho horizontu N_u v každom kroku k , pričom na vstup systému $\mathbf{u}(k)$ je privedený iba prvý člen postupnosti $\mathbf{u}_{opt}(k)$.

Využitie stratégie pohyblivého horizontu vyžaduje poznať požadované hodnoty výstupov (referenčnú trajektóriu) $\mathbf{w}(k)$ na dĺžke predikčného horizontu N_p . V prípade, že referenčná trajektória nie je známa, používa sa tzv. *náhodná prechádzka*, kde $\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) + \xi(k)$, pričom $\xi(k)$ je biely šum [2].

Samotný návrh algoritmov prediktívneho riadenia je možné rozdeliť do troch fáz:

1. odvodenie prediktora na základe lineárneho modelu riadeného systému (získaného linearizáciou analytického modelu alebo ako výsledok experimentálnej identifikácie),
2. vyjadrenie gradientu \mathbf{g}^T a Hesiánu \mathbf{H} dosadením prediktora do funkcionálu J ,
3. výpočet optimálnej postupnosti hodnôt akčného zásahu minimalizáciou funkcionálu J na základe predikcie správania sa dynamického systému bez pôsobenia budúcich hodnôt akčného zásahu, tzv. *voľnej odozvy systému*.

Vstupom do prvej fázy návrhu algoritmov prediktívneho riadenia je lineárny model riadeného fyzikálneho systému, v našom prípade vyjadrený vo forme CARIMA modelu (1). Jeho postupnou úpravou podľa [1] je možné pomocou riešenia diofantických rovníc

$$\mathbf{C}_z = \mathbf{E}_j \Delta \mathbf{A}_z + z^{-j} \mathbf{F}_j \quad \text{a} \quad \mathbf{B}_z \mathbf{E}_j = \mathbf{G}_j \mathbf{C}_z + z^{-j} \mathbf{F}_j \quad (4)$$

vyjadriť maticový zápis prediktora v tvare

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{y}_f + \mathbf{G} \Delta \mathbf{u}, \quad (5)$$

kde $\hat{\mathbf{y}}$ je vektor predikovaných hodnôt výstupov, \mathbf{y}_f je vektor hodnôt *voľnej odozvy* systému a $\mathbf{G} \Delta \mathbf{u}$ predstavuje *vynútenú odozvu* systému, pričom vychádzajúc z [1], resp. [4] je matica \mathbf{G} tvorená koeficientami prechodovej charakteristiky systému lineárneho modelu.

Druhá fáza návrhu algoritmov prediktívneho riadenia pozostáva z dosadenia prediktora (5) do maticového tvaru funkcionálu (2) (uvažujeme váženie zmeny akčného zásahu $\Delta \mathbf{u}$)

$$J = (\hat{\mathbf{y}} - \mathbf{w})^T \mathbf{Q} (\hat{\mathbf{y}} - \mathbf{w}) + \Delta \mathbf{u}^T \mathbf{R} \Delta \mathbf{u}, \quad (6)$$

kde jednotlivé vektory $\hat{\mathbf{y}}$, \mathbf{w} , resp. $\Delta \mathbf{u}$ a váhové matice \mathbf{Q} , resp. \mathbf{R} majú rozmer v súlade s dĺžkou horizontu N_p , resp. N_u a počtom výstupov, resp. vstupov riadeného systému.

Po dosadení prediktora (5) do funkcionálu (6) a následnom roznásobení získame rovnicu

$$J = \Delta \mathbf{u}^T (\mathbf{G}^T \mathbf{Q} \mathbf{G} + \mathbf{R}) \Delta \mathbf{u} + [(\mathbf{y}_f - \mathbf{w})^T \mathbf{Q} \mathbf{G}] \Delta \mathbf{u} + \Delta \mathbf{u}^T [\mathbf{G}^T \mathbf{Q} (\mathbf{y}_f - \mathbf{w})] + c, \quad (7)$$

ktorú je možné ďalej zjednodušiť na kvadratickú formu

$$J = \Delta \mathbf{u}^T \mathbf{H} \Delta \mathbf{u} + 2 \mathbf{g}^T \Delta \mathbf{u} + c, \quad (8)$$

kde matica \mathbf{H} (Hesián) a vektor \mathbf{g}^T (gradient) majú tvar

$$\mathbf{H} = \mathbf{G}^T \mathbf{Q} \mathbf{G} + \mathbf{R}, \quad \mathbf{g}^T = (\mathbf{y}_f - \mathbf{w})^T \mathbf{Q} \mathbf{G}. \quad (9)$$

Výhodou prediktívneho riadenia oproti klasickým postupom je možnosť zohľadniť rôzne obmedzenia (napr. akčného zásahu, zmeny akčného zásahu, výstupu) vo výpočte optimálnej postupnosti akčného zásahu numerickými metódami *kvadratického programovania*. My sme na tento účel využili funkciu *quadprog*, ktorá je súčasťou toolboxu *Optimization Toolbox* v prostredí Matlab a numericky vypočítava vektor optimálnych hodnôt $\Delta \mathbf{u}$ podľa vzťahu

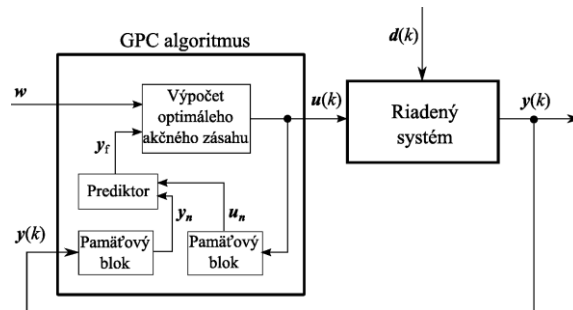
$$\min_{\mathbf{u}} \frac{1}{2} \Delta \mathbf{u}^T \mathbf{H} \Delta \mathbf{u} + \mathbf{g}^T \Delta \mathbf{u}, \text{ pri zohľadnení obmedzení } \mathbf{A}_{obm} \Delta \mathbf{u} \leq \mathbf{b}_{obm}, \quad (10)$$

pričom maticu \mathbf{A}_{obm} a vektor \mathbf{b}_{obm} je potrebné zostaviť podľa požadovaných obmedzení. Konkrétny tvar matice \mathbf{A}_{obm} a vektora \mathbf{b}_{obm} pre jednotlivé obmedzenia je uvedený v [2].

V prípade, že nie je stanovená požiadavka na rešpektovanie obmedzení riadeného systému, je podľa [1], resp. [2] možné minimalizovať funkcionál analytickým spôsobom na základe vzťahu

$$\Delta \mathbf{u} = -\mathbf{H}^{-1} \mathbf{g}. \quad (11)$$

Pri riadení dynamických systémov je možné algoritmus prediktívneho riadenia, ktorého návrh sme prezentovali vyššie, použiť v riadiacej štruktúre podľa Obr. 1, kde \mathbf{w} je vektor požadovaných hodnôt výstupov na dĺžke predikčného horizontu, $\mathbf{u}(k)$ je akčný zásah vypočítaný GPC algoritmom, $\mathbf{d}(k)$ je vektor poruchových veličín a $\mathbf{y}(k)$ je výstup riadeného systému. Predikcia voľnej odozvy systému \mathbf{y}_f je vypočítavaná na základe aktuálnej hodnoty výstupu $\mathbf{y}(k)$ a hodnôt vstupov, resp. výstupov v predchádzajúcich krokoch \mathbf{u}_n , resp. \mathbf{y}_n .



Obr. 1 Riadiaca štruktúra s GPC algoritmom

III. ADAPTÍVNE PREDIKTÍVNE RIADENIE

Použitelnosť prezentovaného prediktívneho riadenia závisí na možnostiach vytvorenia relevantnej lineárnej aproximácie riadeného systému, ktorá by v dostatočnej miere vyjadrovala dynamiku riadeného systému v celej škále rôznych pracovných bodov. V tejto časti sa budeme zaoberať adaptívnym prediktívnym riadením, pričom pod pojmom adaptácia budeme chápať zmenu parametrov riadiaceho algoritmu (zmenu hodnôt dátových členov údajovej štruktúry reprezentujúcej riadiaci algoritmus z programátorského hľadiska) na základe aktuálneho stavu, resp. pracovného bodu riadeného systému. Budeme pritom vychádzať z analytickej a experimentálnej identifikácie riadeného systému.

A. Adaptívne prediktívne riadenie na báze analytickej identifikácie riadeného systému

Využitie analytickej identifikácie pri adaptácii parametrov riadiaceho algoritmu môže byť realizované vo forme okamžitej linearizácie riadeného systému a následnom prepočítaní príslušných parametrov, ktoré sú potrebné pre výpočet optimálneho akčného zásahu v každom kroku riadiaceho cyklu. Avšak takýto prístup je náročný na výpočtový čas a výrazne tak obmedzuje možnosti voľby periódy vzorkovania.

Iný prístup je možný vtedy, keď je známy konečný počet pracovných bodov, v ktorých by mal riadený systém pracovať, a teda je možné vopred vypočítať parametre riadiaceho algoritmu pre konkrétny pracovný bod. Na určenie množiny pracovných bodov sme navrhli a v prostredí Matlab naprogramovali funkciu so syntaxou $\mathbf{L} = \text{Levels}(\mathbf{W}, c)$, ktorá na základe citlivosti c zistí, aké úrovne \mathbf{L} nadobúdajú časové priebehy usporiadané v matici \mathbf{W} . Po vypočítaní parametrov riadiaceho algoritmu pre príslušné pracovné body môžeme v rámci riadiaceho cyklu medzi nimi prepínať na základe aktuálne požadovaného pracovného bodu. Na tento účel sme naprogramovali funkciu $i = \text{GetIndex}(\mathbf{L}, \mathbf{v})$, v rámci ktorej je realizovaný algoritmus hľadania najkratšej vzdialenosti vektora aktuálneho pracovného bodu \mathbf{v} od jednotlivých pracovných bodov \mathbf{L} . Funkcia vracia poradové číslo najbližšieho i -tého pracovného bodu podľa metriky

$$d(\mathbf{L}_i, \mathbf{v}) = \sqrt{\sum_{j=1}^{nO} (\mathbf{L}_{i,j} - \mathbf{v}_j)^2}, \quad (12)$$

kde nO je dĺžka vektora \mathbf{v} , resp. \mathbf{L}_i , a teda aj počet výstupov riadeného systému.

B. Adaptívne prediktívne riadenie na báze experimentálnej identifikácie riadeného systému

Podstata tohto prístupu k adaptácii algoritmov prediktívneho riadenia spočíva v určení lineárneho modelu riadeného systému a jeho následnom použití pri výpočte parametrov riadiaceho algoritmu v rámci periódy vzorkovania. Výpočet parametrov lineárneho modelu budeme realizovať experimentálnou identifikáciou s využitím rekurzívnej metódy najmenších štvorcov (RMNŠ) podľa [5]. Vstupnými údajmi pre RMNŠ v danom kroku sú hodnoty časových priebehov vstupov a výstupov riadeného systému v m , resp. n predchádzajúcich vzorkách. Výsledkom sú koeficienty čitateľa b_i a menovateľa a_i prenosovej funkcie

$$F(z^{-1}) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}}, \quad (13)$$

ktorá reprezentuje lineárny model riadeného systému potrebný pri výpočte parametrov algoritmov prediktívneho riadenia.

Podstata RMNŠ spočíva v korekcii predchádzajúcich hodnôt koeficientov b_i a a_i na základe aktuálneho výstupu systému, ktorý je odozvou na predchádzajúce hodnoty vstupu a výstupu. Ak $\theta = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n \ b_1 \ b_2 \ \dots \ b_m]^T$ je vektor neznámych koeficientov prenosovej funkcie (13) a $\varphi(k) = [y(k-1) \ y(k-2) \ \dots \ y(k-n) \ u(k-1) \ u(k-2) \ \dots \ u(k-m)]^T$ je vektor predchádzajúcich hodnôt vstupov a výstupov systému, môžeme výpočet nových hodnôt koeficientov b_i a a_i vyjadriť prostredníctvom vzťahu

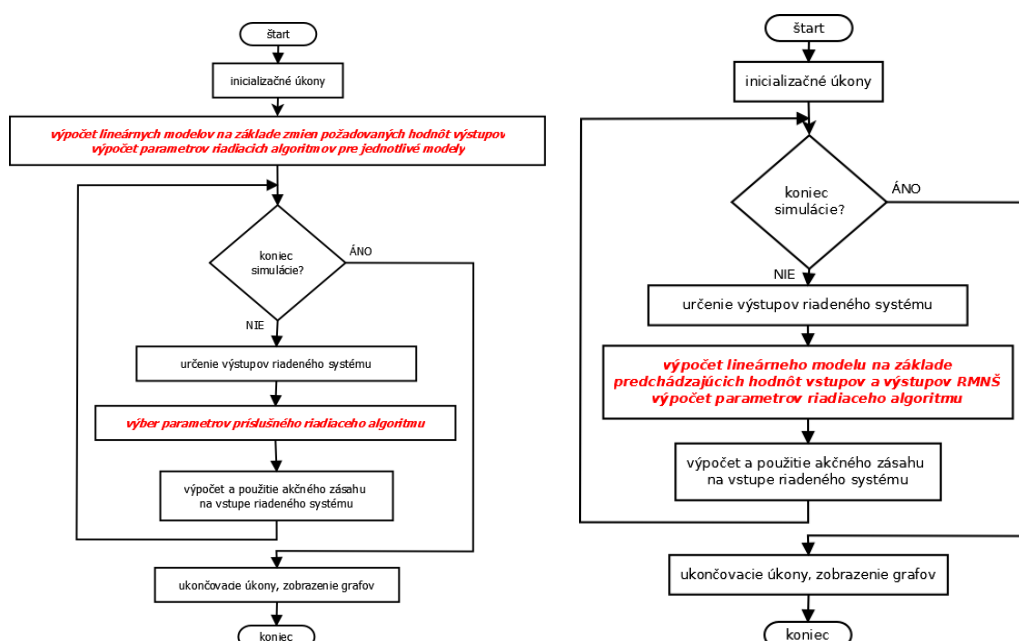
$$\underbrace{\theta(k+1)}_{\text{nové hodnoty parametrov}} = \underbrace{\theta(k)}_{\text{predchádzajúce hodnoty parametrov}} + \underbrace{\tau(k+1)}_{\text{korekčný vektor}} \underbrace{[y(k+1) - \varphi^T(k+1)\theta(k)]}_{\text{predikčná chyba}}, \quad (14)$$

kde $\tau(k+1) = P(k)\varphi(k+1)[\sigma(k+1) + \varphi^T(k+1)P(k)\varphi(k+1)]^{-1}$, pričom σ je faktor zabúdania a P je kovariančná matica, ktorej hodnoty sú v každom kroku dané vzorcom

$$P(k+1) = \frac{1}{\sigma(k+1)} \left\{ P(k) - P(k)\varphi(k+1)[\sigma(k+1) + \varphi^T(k+1)P(k)\varphi(k+1)]^{-1} \varphi^T(k+1)P(k) \right\}. \quad (15)$$

Algoritmus RMNŠ sme naprogramovali v podobe m-funkcie $[B_v, A_v] = RLS(y_i, u_i, N_{ab}, p, FZ)$, kde y_i, u_i sú vektory predchádzajúcich hodnôt vstupov a výstupov, N_{ab} je dvojprvkový vektor s požadovanými hodnotami rádu menovateľa a čitateľa prenosu (13), parameter p slúži pre inicializáciu kovariančnej matice v podobe jednotkovej matice na hlavnej diagonále a FZ je hodnota faktora zabúdania. Funkcia RLS vracia vektory koeficienty čitateľa B_v a menovateľa A_v .

Riadiaca štruktúra na Obr. 1 je platná aj v prípade algoritmov adaptívneho prediktívneho riadenia. Avšak jej algoritimizáciu pri riadení dynamických systémov je potrebné realizovať v súlade vývojovými diagramami uvedenými na Obr.2.

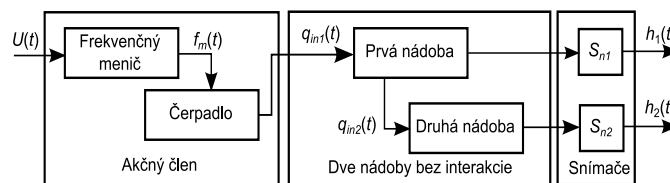


Obr. 2 Vývojové diagramy algoritimizácie riadiacej štruktúry s adaptívnym GPC algoritmom na báze analytickej (vľavo) a experimentálnej identifikácie (vpravo)

Najvýraznejší rozdiel oboch prezentovaných prístupov k adaptácii algoritmov prediktívneho riadenia spočíva vo výpočtovej náročnosti algoritmov v rámci jednej periódy vzorkovania. Použitie prístupu s experimentálnou identifikáciou kladie vyššie nároky na voľbu periódy vzorkovania, keďže v rámci jedného riadiaceho cyklu je potrebné odhadnúť parametre lineárneho modelu riadeného systému a zároveň kompletne prepočítať parametre riadiaceho algoritmu. Na druhej strane, veľkou výhodou tohto prístupu je jeho použiteľnosť v prípadoch, kedy nie je možné získať lineárny model riadeného systému matematicko-fyzikálnym opisom. Tento prístup je efektívnejší aj pri riadení dynamických systémov s premenlivými parametrami, ktorých zmenu nie je možné zahrnúť vopred do matematicko-fyzikálneho opisu, teda v rámci analytickej identifikácie.

IV. VÝSLEDKY RIADENIA HYDRAULICKÉHO SYSTÉMU S ADAPTÍVNÝM GPC ALGORITMOM

V tejto časti uvádzame výsledky simulačného riadenia nelineárneho modelu hydraulického systému pomocou klasického a adaptívnych algoritmov riadenia prezentovaných v predchádzajúcej časti. Detailný popis modelu hydraulického systému, jeho hardvérová konfigurácia a popis fyzikálnych veličín a parametrov je uvedený v [6] a [7]. V tomto článku ho predstavíme len veľmi stručne. Jedná sa o laboratórny model hydraulického systému dvoch nádob, ktorý sa nachádza v Laboratóriu mechatronických systémov na Katedre kybernetiky a umelej inteligencie. Kvapalina je privádzaná do prvej nádoby zo zásobníka prostredníctvom čerpadla, ktoré je priamo ovládané frekvenciou frekvenčného meniča $f_m(t)$, resp. riadiacim napätím $U(t)$ v rozsahu 0 – 10V. Kvapalina vytekajúca z prvej nádoby preteká hadičkou do druhej nádoby, z ktorej sa opätovne vracia do zásobníka. Výšky hladín kvapaliny v oboch nádobách $h_1(t)$ a $h_2(t)$ sú merané kapacitnými snímačmi S_{n1} a S_{n2} a ich hodnoty sa pohybujú v rozsahu 0 – 0,3m. Zo systémového hľadiska môžeme tento systém znázorniť pomocou Obr. 3, kde $q_{in1}(t)$ a $q_{in2}(t)$ sú vstupné prítoky do nádob.



Obr. 3 Systémový pohľad na hydraulický systém

Matematicko-fyzikálny opis hydraulického systému tvoria nelineárne diferenciálne rovnice

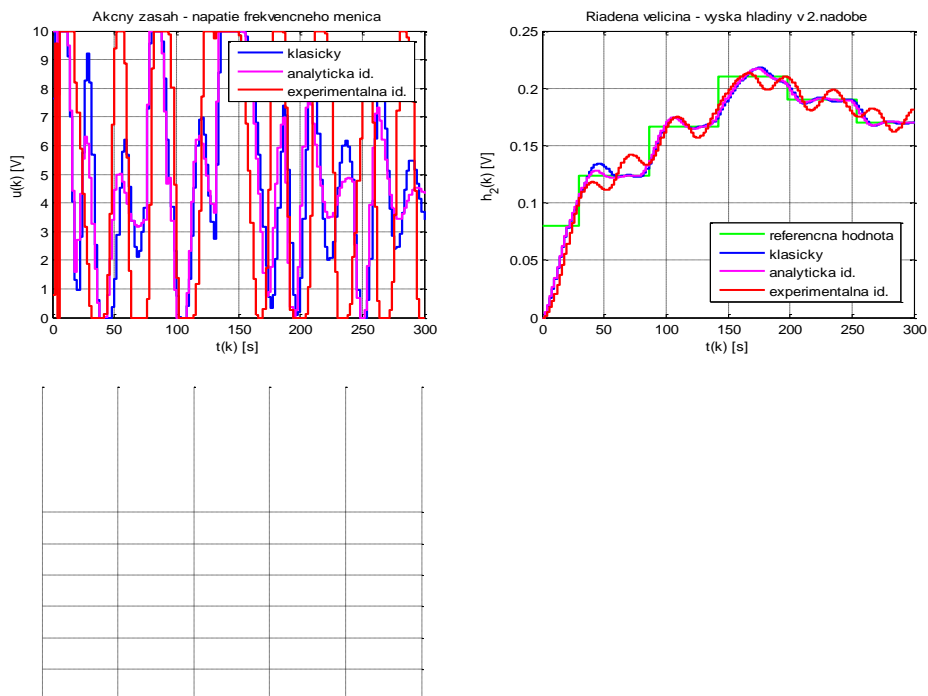
$$\begin{aligned} \frac{dh_1(t)}{dt} &= \frac{1}{S} \left(k_p U(t) - S_{v1} \sqrt{2gh_1(t)} \right) \\ \frac{dh_2(t)}{dt} &= \frac{1}{S} \left(S_{v1} \sqrt{2gh_1(t)} - S_{v2} \sqrt{2gh_2(t)} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

kde S je prierez nádob, k_p je konštanta čerpadla vyjadrujúca vzťah medzi vstupným napätím $U(t)$ a prítokom $q_{in1}(t)$, g je gravitačné zrýchlenie a S_{v1} , S_{v2} sú prierezy výstupných ventilov nádob.

Na základe nelineárnych diferenciálnych rovníc (16) sme zostavili simulačný model v podobe funkcie jazyka Matlab, ktorý predstavuje riadený systém. Za referenčný signál sme zvolili skokovú funkciu s niekoľkými úrovňami. Linearizáciou rovníc (16) pre jednotlivé požadované úrovne (pracovné body), sme vytvorili množinu lineárnych modelov. Výpočet parametrov riadiacich algoritmov, či už s využitím vopred určených lineárnych modelov alebo na báze experimentálnej identifikácie sme realizovali s hodnotami váhových koeficientov a jednotlivých horizontov funkcionálu (2), resp. (6): váhové koeficienty $q = 1000$; $r = 0,01$; $s = 0$; horizont predikcie $N_p = 8$ a 5; riadiaci horizont $N_u = 2$. Pri výpočte akčného zásahu algoritmom prediktívneho riadenia sme uvažovali s vyššie uvedenými obmedzeniami vstupov a výstupov riadeného systému.

Na Obr. 4 sú porovnané výsledky simulačného riadenia hydraulického systému pomocou klasického GPC algoritmu s výsledkami získanými pomocou oboch prezentovaných adaptívnych algoritmov. Perióda vzorkovania bola $T_{vz} = 2s$, v hornej časti obrázka sú výsledky, kde $N_p = 8$ vzoriek, v dolnej časti pri $N_p = 5$ vzoriek. Z Obr. 4 je vidieť, že pri dostatočne dlhom horizonte predikcie sú výsledky pomocou klasického GPC algoritmu (navrhnutého z lineárneho modelu pre jeden reprezentatívny pracovný bod) takmer identické s výsledkami pri použitom adaptívnom algoritme na báze analytickej identifikácie (navrhnutého pre viacero príslušných pracovných bodov). Avšak použitie klasického GPC algoritmu pri kratšom horizonte predikcie

spôsobuje veľké prekmity riadenej veličiny, kým adaptívne algoritmy (hoci tiež mierne kmitavo) udržiavajú riadenú veličinu v blízkosti referenčnej hodnoty. Z porovnania analytického a experimentálneho prístupu sa dá usudzovať, že použitie experimentálnej identifikácie je menej výhodné. Avšak, ako už bolo spomenuté, veľkou výhodou tohto prístupu je jeho použiteľnosť v prípadoch, kedy nie je možné analyticky odvodiť model riadeného systému a k dispozícii sú iba experimentálne namerané údaje reprezentujúce dynamiku fyzikálneho systému.



Obr. 4 Výsledky simulačného riadenia nelineárneho hydraulického systému pomocou rozoberaných algoritmov

V. ZÁVER

Cieľom článku bolo prezentovať prístupy algoritmickej adaptívneho prediktívneho riadenia a porovnať získané výsledky s použitím klasického zovšeobecneného prediktívneho riadenia. Vzhľadom na to, že všetky uvedené prístupy sú založené na aproximácii dynamiky riadeného systému lineárnym modelom, ako ďalšiu možnosť pri návrhu adaptívnych algoritmov vidíme použitie metód umelej inteligencie, konkrétne použitie dopredných neurónových sietí v prediktívnom riadení nelineárnych systémov.

POĎAKOVANIE

Tento článok bol vytvorený realizáciou projektu Rozvoj Centra informačných a komunikačných technológií pre znalostné systémy (ITMS kód: 26220120030) na základe podpory operačného programu Výskum a vývoj financovaného z Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] FIKAR, M.: Predictive Control – An Introduction. Bratislava: Slovenská technická univerzita - FCHPT, 1999.
- [2] JAJČIŠIN, Š.: Aplikácia moderných metód v prediktívnom riadení modelov fyzikálnych systémov. Písomná práca k dizertačnej skúške. Košice: TU-FEI, 2012.
- [3] ROUBAL, J. - HAVLENA, V.: Range Control MPC Approach For Two-Dimensional System, Proceedings of the 16th IFAC World Congress, Volume # 16, Part# 1, 2005.
- [4] CLARKE, D.W. – MOHDANI, C. – TUFFS, P.S.: Generalized Predictive Control, Part 1 and 2. In Automatica, Vol 23, No.2, 137 – 160, 1987.
- [5] FIKAR, M. – MIKLEŠ, J.: Identifikácia systémov. CHTF STU Bratislava, 1998, ISBN N 80-227-1177-2.
- [6] JAJČIŠIN, Š.: Verification of Control Algorithms with DDE Communication on Real Hydraulic System, in: SCYR 2011:11th Scientific Conference of Young Researchers of Faculty of Electrical Engineering and Informatics Technical University of Košice, pp. 388-391, 2011, ISBN 978-80-553-0644-5.
- [7] JAJČIŠIN, Š. - JADLOVSKÁ, A.: Riadenie laboratórneho modelu hydraulického systému, in: Electroscope – online časopis pro elektrotechniku, ročník 2011, č. III. ISSN 1802-4564, Dostupné na internete: http://147.228.94.30/index.php?option=com_content&view=article&id=280:riadenie-laboratorneho-modelu-hydraulickeho-systemu-&catid=34:cislo-32011-&Itemid=48.