

Riadenie laboratórneho modelu hydraulického systému

Š. Jajčišin, A. Jadlovská

Katedra kybernetiky a umelej inteligencie, Fakulta elektrotechniky s informatiky, TU v Košiciach,
Letná 9, Košice, Slovenská republika

E-mail : stefan.jajcisin@tuke.sk, anna.jadlovska@tuke.sk

Anotace:

V článku je prezentovaný laboratórny model hydraulického systému z hľadiska matematicko-fyzikálneho opisu jeho dynamiky a technickej realizácie, ktorá umožňuje overovať rozličné algoritmy identifikácie a riadenia dynamických systémov. Uvedené sú dva rôzne prístupy k riadeniu laboratórneho modelu z pohľadu komunikácie s riadiacim členom. Článok sa zaoberá riadením laboratórneho modelu hydraulického systému pomocou niekoľkých algoritmov riadenia navrhnutých na základe lineárnej aproximácie fyzikálneho systému. V článku sú uvedené výsledky riadenia laboratórneho modelu pomocou klasických číslicových PID regulátorov a polynomiálneho regulátora, optimálne algoritmy riadenia zastupuje lineárne kvadratické riadenie a jeho rozšírená verzia so sumátorom a taktiež dva odlišné algoritmy prediktívneho riadenia.

Abstract:

In this article a laboratory model of hydraulic system is presented with emphasis to mathematically-physical description of its dynamics and technical implementation, which makes possible to verify different algorithms for dynamical system identification and control. Two different approaches to laboratory model control in term of communication with control system are introduced. The article proceeds with the laboratory model of hydraulic system control by several control algorithms designed on the basis of linear approximation of physical system. Results of laboratory model control with classical digital PID and polynomial controllers are mentioned in the article. Optimal control algorithms are represented by linear quadratic control and its extended version with summator and also with two different predictive control algorithms.

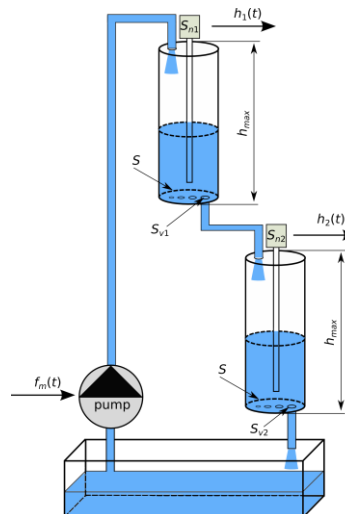
ÚVOD

V článku sa zaoberáme riadením laboratórneho modelu hydraulického systému, ktorý je umiestnený v laboratóriu Katedry kybernetiky a umelej inteligencie Fakulty elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach. Prezentujeme hardvérovú štruktúru a rôzne prístupy k riadeniu tohto systému z hľadiska komunikácie s riadiacim systémom. Pri návrhu algoritmov riadenia budeme vychádzať z lineárneho modelu určeného klasickou linearizáciou nelineárnych diferenciálnych rovníc popisujúcich dynamiku hydraulického systému, ktorých štruktúru sme vyjadrili na základe známych fyzikálnych princípov. V rámci článku prezentujeme získané výsledky riadenia laboratórneho modelu hydraulického systému pomocou viacerých algoritmov riadenia v podobe časových priebehov akčného zásahu a merateľných stavových veličín.

Článok nadväzuje na predchádzajúce dve publikácie, kde v prvej z nich [1] sme sa venovali realizácií komunikácie medzi laboratórnym modelom a riadiacim členom v podobe osobného počítača s využitím DDE a OPC komunikačných protokolov. V publikácii [2] sme sa zaoberali návrhom a testovaním algoritmov klasických číslicových PID regulátorov. V tomto článku si kladieme za cieľ prezentovať algoritmy modernejších metód riadenia a otestovať ich pri riadení laboratórneho modelu hydraulického systému.

LABORATÓRNY MODEL HYDRAULICKÉHO SYSTÉMU

Laboratórny model hydraulického systému dvoch valcových nádob je umiestnený v laboratóriu Katedry kybernetiky a umelej inteligencie pre účely overovania rôznych algoritmov identifikácie a riadenia dynamických systémov. Princiipiálna schéma laboratórneho modelu hydraulického systému je znázornená na obr.1.



Obr. 1: Hydraulický systém dvoch nádob bez interakcie

Kvapalina je do prvej nádoby privádzaná z vanečky cez prívodnú trubicu prostredníctvom čerpadla [3].

pod vplyvom hydrostatického tlaku preteká cez prepojovaciú hadičku do druhej nádoby a následne vyteká späť do vaničky. Veľkosť prierezu výstupných otvorov oboch nádob je možné meniť, pričom k dispozícii sú štyri rôzne prierezy pre každú nádobu. Z hľadiska dynamiky modelu sú dôležité parametre:

S - prierez nádob,

S_{v1}, S_{v2} - prierez výstupných ventilov oboch nádob,

h_{max} - výška nádob (maximálna výška hladiny).

Na obr. 1 sú znázornené aj fyzikálne veličiny na vstupe, resp. výstupe laboratórneho modelu:

$f_m(t)$ - frekvencia na výstupe frekvenčného meniča [4], ktorý ovláda motora čerpadla,

$h_1(t), h_2(t)$ - výška hladiny kvapaliny v nádobách meraná kapacitnými snímačmi S_{n1} a S_{n2} [5].

Matematický opis hydraulického systému

Analytickou identifikáciou, to znamená s využitím známych fyzikálnych princípov, ako je rovnica kontinuity alebo Torricelliho vzorec, je možné odvodiť nelineárne diferenciálne rovnice (1), ktoré popisujú dynamiku hydraulického systému a majú tvar:

$$\frac{dh_1(t)}{dt} = \frac{1}{S} (k_p U(t) - S_{v1} \sqrt{2gh_1(t)}) \quad (1)$$

$$\frac{dh_2(t)}{dt} = \frac{1}{S} (S_{v1} \sqrt{2gh_1(t)} - S_{v2} \sqrt{2gh_2(t)})$$

pričom g je gravitačné zrýchlenie. Konštanta čerpadla k_p , ktorá vyjadruje lineárny prevod medzi vstupným jednosmerným napätím $U(t)$ a prítokom do prvej nádoby $q_{in1}(t)$, bola určená na základe experimentálnych meraní.

Zo systémového hľadiska predstavuje napätie $U(t)$ v rozsahu 0 – 10V vstup do hydraulického systému. Meranými výstupmi a zároveň stavovými veličinami $x_1(t)$ a $x_2(t)$ sú výšky hladín $h_1(t)$ a $h_2(t)$ v rozsahu 0 – 0,3m, avšak výstupom v zmysle regulovanej veličiny je výška hladiny $h_2(t)$. Rovnice (1) sú konkrétnym vyjadrením stavového opisu dynamického systému

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= f_1(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) \\ \dot{x}_2(t) &= f_2(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) \end{aligned} \quad (2)$$

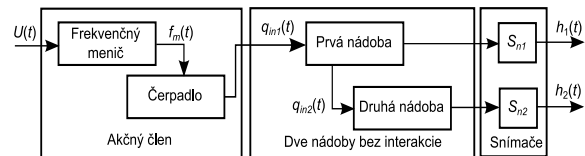
kde f_1 a f_2 sú nelineárne diferenciálne rovnice, $\mathbf{x}(t)$ a $\mathbf{u}(t)$ je vektor stavov a vstupov a t predstavuje čas.

Cieľom riadenia je zabezpečiť, aby výška hladiny $h_2(t)$ dosiahla požadovanú hodnotu $w(t)$. Poruchovú veličinu predstavuje v našom prípade zmena veľkosti prierezu výstupného otvoru druhej nádoby ΔS_{v2} . Konkrétne sme vplyv poruchovej veličiny realizovali dočasným otvorením ďalšieho výstupného otvoru druhej nádoby v prípadoch, kedy časový priebeh požadovanej hodnoty mal tvar konštantnej funkcie. Vypustili sme tak určité množstvo kvapaliny v čase, keď regulovaná veličina dosiahla vplyvom akčného zásahu požadovanú hodnotu, resp. bola ustálená v jej okolí s nejakou regulačnou odchýlkou. Riadeniu na konštantnú hodnotu s vplyvom poruchy prislúchajú

jednotlivé časové priebehy výsledkov riadenia uvedené v článku, na ktorých je zreteľný pokles výšky hladiny druhej nádoby v čase, kedy nastala porucha.

Hardvérová štruktúra modelu

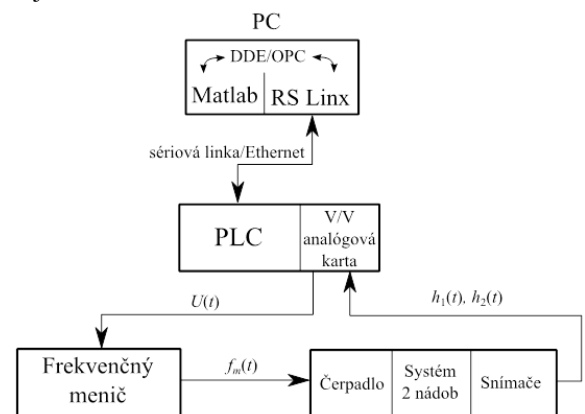
Systémový pohľad na hydraulický systém, ktorý sme predstavili v predchádzajúcich častiach je znázornený na obr.2, kde okrem už spomenutých veličín je $q_{in1}(t)$, resp. $q_{in2}(t)$ prítok do prvej, resp. druhej nádoby.



Obr. 2: Systémový pohľad na hydraulický systém

Štruktúra hydraulického systému na obr.2 vyjadruje iba riadený systém s jedným riadiacim vstupom $U(t)$ a dvoma meranými výstupmi $h_1(t)$ a $h_2(t)$.

Celková štruktúra hardvérového vybavenia laboratórneho modelu je znázornená na obr.3. Je zrejmé, že riadený hydraulický systém predstavuje najnižšiu úroveň celého laboratórneho modelu.



Obr. 3: Schéma kompletného hardvérového vybavenia laboratórneho modelu hydraulického systému

Riadiaci vstup $U(t)$, ako aj merané výstupy riadeného systému $h_1(t)$ a $h_2(t)$ majú analógový charakter. Tieto signály sú pripojené na vstupno-výstupnú analógovú kartu (1762 IF20F2) PLC automatu od firmy Rockwell Automation [6], ktorý je spolu s frekvenčným meničom umiestnený v skrinke vedľa hydraulického systému dvoch nádob. PLC automat je vybavený konektorom pre pripojenie sériovej linky RS232 a taktiež je k nemu pripojený aj ethernetový modul s označením 1761-NET-ENI [7]. Pomocou oboch uvedených komunikačných kanálov je možné komunikovať s PLC automatom z iných zariadení. V našom prípade je trvalou súčasťou laboratórneho modelu aj osobný počítač (ďalej len PC) s nainštalovaným softvérovým produktom RS Linx [8], ktorý poskytuje nástroje pre rôzne nastavenia a realizáciu komunikácie medzi PC a PLC automatom. V PC je nainštalované aj vývojové prostredie RS Logix 500 [9], v ktorom je možné

vytvárať a následne s využitím RS Linxu nahrávať programy do PLC. Okrem toho, pre naše účely je nevyhnutné, aby PC obsahoval aj simulačný softvérový produkt Matlab.

RÔZNE PRÍSTUPY K RIADENIU LABORATÓRNEHO MODELU

Vychádzajúc z existujúcej hardvérovej štruktúry laboratórneho modelu hydraulického systému (obr.3) sme realizovali dva rôzne prístupy riadenia laboratórneho modelu. Tieto prístupy sa líšia v použitom riadiacom člene. V prvom prípade je riadiacim členom PLC automat, v ktorom je nahratý príslušný algoritmus riadenia. Druhý prípad predstavuje riadenie, kde algoritmus riadenia je vykonávaný v PC a PLC automat realizuje iba načítavanie hodnôt výstupov, resp. zapisovanie hodnôt vstupov hydraulického systému prostredníctvom analógovej karty.

Riadenie na úrovni PLC

Riadenie laboratórneho modelu hydraulického systému na úrovni PLC automatu nezahŕňa najvyššiu úroveň štruktúry na obr.3. PC s vývojovým prostredím RS Logix 500 je potrebné iba vo fáze programovania algoritmu riadenia v jazyku pre PLC, napr. vo forme rebríkových schém. Naprogramovaný algoritmus je potom potrebné nahráť do PLC automatu cez niektorý z komunikačných kanálov s využitím RS Linxu.

Tým, že algoritmus riadenia sa vykonáva v PLC automate, kde sú vstupy a výstupy analógovej karty priamo dostupné, nie je nutné realizovať akúkoľvek formu komunikácie s inými softvérovými produktmi. Algoritmus riadenia sa vyznačuje vysokou rýchlosťou, čo je veľkou výhodou tohto prístupu, pretože v princípe nevznikajú žiadne požiadavky na obmedzenie periódy vzorkovania. Na druhej strane, implementácia zložitejších algoritmov riadenia do tohto konkrétneho PLC automatu je relatívne náročná, a teda tento prístup je vhodný pre jednoduché algoritmy riadenia, ktoré generujú akčný zásah na základe niekoľkých základných matematických vzťahov, napr. číslicové PID regulátory.

Tento prístup využívajú predovšetkým študenti v rámci vypracovávania svojich bakalárskych a diplomových prác. V rámci tohto článku je našim cieľom prezentovať výsledky riadenia hydraulického systému pomocou druhého prístupu.

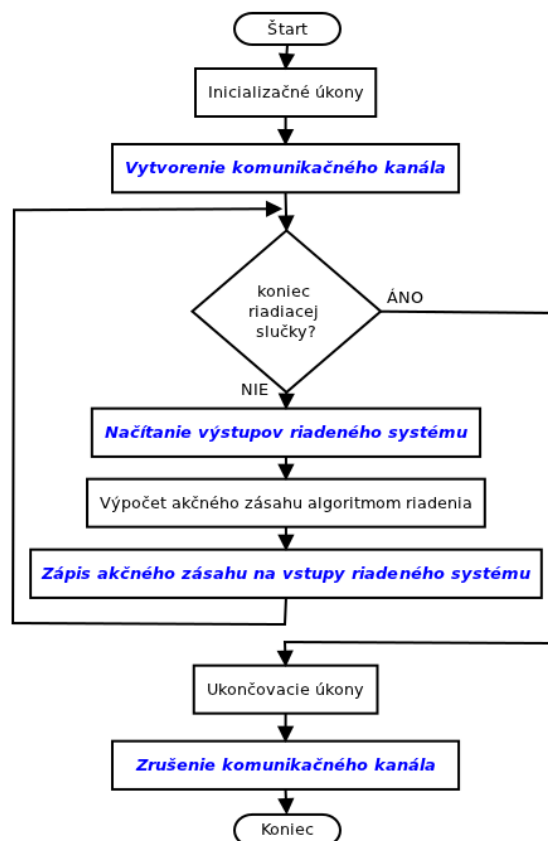
Riadenie cez komunikačný kanál s Matlabom

Keďže sa vo výskumnej oblasti zaoberáme algoritmi prediktívneho riadenia, ktoré patria k výpočtovo náročnejším optimalizačným úlohám, je pre nás softvérový produkt Matlab vynikajúci nástroj pri návrhu, programovaní a samotnom používaní algoritmov prediktívneho riadenia. To nás viedlo

k vytvoreniu najvyššej úrovne hardvérovej štruktúry laboratórneho modelu, teda k využívaniu PC s Matlabom v úlohe riadiaceho člena. Je potrebné poznamenať, že aj v tomto prípade sme museli vytvoriť program pre PLC automat. Avšak ide o relatívne jednoduchý program, ktorý spracováva údaje z analógovej karty, t.j. škáluje ich na požadovaný rozsah a ošetruje limitné hodnoty, aby nedochádzalo k havarijným stavom modelu. Samotný prístup k premenným programu v PLC automate zabezpečuje RS Linx.

Použitie tohto prístupu má však aj svoje nedostatky. Na to, aby bolo možné v algoritme riadenia, ktorý je spustený v Matlabe, používať skutočné hodnoty meraných veličín hydraulického systému, sme museli realizovať komunikáciu medzi Matlabom a RS Linxom. Keďže RS Linx sa môže správať ako DDE, resp. OPC server, rozhodli sme sa využiť práve tieto dva komunikačné protokoly. Oba komunikačné protokoly sú založené na architektúre *klient-server*. Matlab v tomto prípade vykonáva úlohu DDE, resp. OPC klienta. Bližší popis oboch protokolov, spôsob ich použitia v algoritmoch identifikácie a riadenia dynamických systémov, ako aj príslušné funkcie prostredia Matlab sme uviedli v [1].

Základný princíp použitia komunikačných protokolov v rámci riadiacej slučky je znázornený na obr.4.



Obr. 4: Prvky komunikačných protokolov v riadiacej slučke

Načítavanie, resp. zapisovanie hodnôt vstupov a výstupov hydraulického systému do premenných PLC automatu z Matlabu cez RS Linx s využitím

DDE alebo OPC komunikačného protokolu vyžaduje výpočtový čas navyše. Preto je potrebné v rámci jedného cyklu riadiacej slučky kontrolovať, či zvolená perióda vzorkovania riadiaceho algoritmu postačuje na vykonanie všetkých potrebných úkonov. V nemalej miere tento nedostatok súvisí aj s výpočtovými možnosťami PC.

V našom prípade boli z hľadiska časovej náročnosti počas prijímania a odosielania dát oba protokoly vyhovujúce. Je však potrebné zároveň podotknúť, že pri identifikácii a riadení reálneho hydraulického systému úplne postačuje perióda vzorkovania 1s. V rámci takéhoto času sa stihnú vykonať aj funkcie komunikačných protokolov. V prípade systémov s vyšším nárokom na dĺžku periódy vzorkovania môže byť tento prístup nepoužiteľný alebo bude nutná zmena niektorých častí algoritmov.

PREHLAD POUŽITÝCH ALGORITMOV RIADENIA

V tejto časti uvedieme základný princíp, prípadne stručnú charakteristiku algoritmov riadenia, ktoré sme overovali na laboratórnom modeli hydraulického systému. Pri každom rozoberanom algoritme uvedieme aj získané výsledky.

Pred samotným overením algoritmov riadenia na laboratórnom modeli sme uskutočnili simuláciu riadenia v prostredí Matlab na simulačnom modeli, ktorý sme vytvorili na základe nelineárnych diferenciálnych rovníc (1). V článku prezentujeme iba výsledky riadenia reálneho laboratórneho modelu. Všetky testované algoritmy, či už vo fáze návrhu alebo výpočtu akčného zásahu, predpokladajú znalosť modelu fyzikálneho systému v lineárnom tvare, teda buď vo forme prenosovej funkcie alebo stavového opisu.

Aproximácia modelom s lineárnou štruktúrou

Lineárny model, aproximujúci dynamiku laboratórneho modelu hydraulického systému danú rovnicami (1), sme získali na základe rozvoja nelineárnych diferenciálnych rovníc (1), resp. (2) do Taylorovho radu v okolí pracovného $u_0 = 4V$, $x_{10} = h_{10} = 0.187m$, $x_{20} = h_{20} = 0.157m$ vo forme všeobecného spojitého stavového opisu

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

kde $\mathbf{x}(t)$, $\mathbf{u}(t)$ a $\mathbf{y}(t)$ je vektor stavov, vstupov a výstupov. Matica dynamiky \mathbf{A} , matica vstupov \mathbf{B} , matica výstupov \mathbf{C} a matica priamej väzby medzi vstupom a výstupom \mathbf{D} je daná vzťahmi

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{bmatrix}_{\substack{x_1 = x_{10} \\ x_2 = x_{20}}}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u} \end{bmatrix}_{u=u_0} \quad (3)$$

$$\mathbf{C} = [0 \quad 1] \quad \mathbf{D} = 0$$

Na základe rovnice pre vyjadrenie prenosovej funkcie zo stavového opisu dynamického systému (3), ktorá má tvar

$$F(s) = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{D} \quad (4)$$

kde s je Laplaceov operátor, je možné vyjadriť vstupno-výstupný opis hydraulického systému

$$F_s(s) = \frac{H_2(s)}{U(s)} = \frac{K}{(a_2s^2 + a_1s + 1)} \quad (5)$$

Je nutné poznamenať, že obe vyššie uvedené formy opisu lineárneho modelu hydraulického systému majú spojité charakter. Avšak pri návrhu niektorých algoritmov riadenia, ktoré uvedieme neskôr, sme používali ich diskretnú formu získanú diskretizáciou s príslušnou periódou vzorkovania T_s .

Klasické algoritmy riadenia

V rámci tejto kategórie algoritmov sa budeme zaoberať číslícovým PID regulátorom a regulátorom v tvare podielu polynómov, ktorý budeme ďalej nazývať polynomiálny regulátor.

Číslícový PID regulátor má diskretnú prenosovú funkciu v tvare

$$F_R(z^{-1}) = \frac{U(z^{-1})}{E(z^{-1})} = \frac{q_0 + q_1z^{-1} + q_2z^{-2}}{1 - z^{-1}} \quad (6)$$

kde z^{-1} je tzv. operátor posunutia o jednu periódu vzorkovania späť v čase, $U(z^{-1})$, resp. $E(z^{-1})$ je obrazový prenos výstupu (akčného zásahu), resp. vstupu (regulačnej odchýlky) regulátora, a teda algoritmu generujúceho akčný zásah.

Hoci existujú metódy priamo na návrh koeficientov q_i číslícového PID regulátora, my sme pri ich určovaní vychádzali zo známych koeficientov spojitého PID regulátora, ktorého prenosová funkcia má tvar

$$F_R(s) = P + \frac{I}{s} + Ds \quad (7)$$

kde P , I a D je proporcionálne, derivačné a integračné zosilnenie.

Na základe vzťahov uvedených v [10], je možné jednoducho určiť koeficienty číslícového PID regulátora (6) z koeficientov P , I a D .

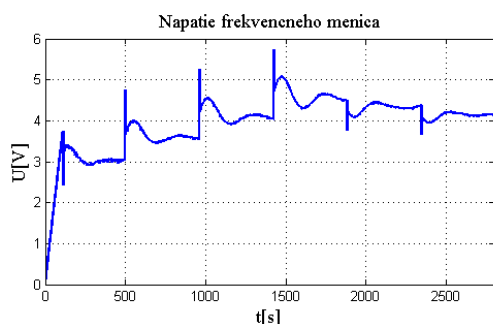
Návrh koeficientov spojitého PID regulátora (7) sme uskutočnili na základe metódy štandardných tvarov (Butterworth) a na základe metódy optimálneho modulu. Vychádzali sme pri tom zo spojitej prenosovej funkcie lineárneho modelu (5).

Z prenosovej funkcie (6) vyplýva vzťah pre výpočet akčného zásahu $u(k)$, ktorý je použitý v riadiacej slučke pri riadení laboratórneho modelu hydraulického systému

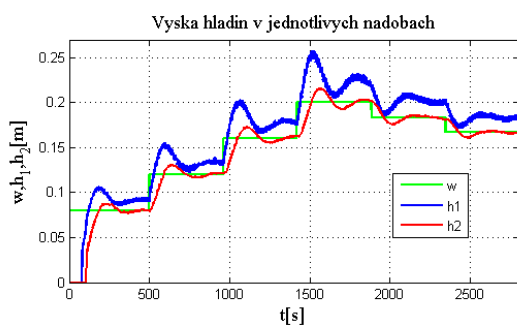
$$u(k) = u(k-1) + q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2) \quad (8)$$

kde $e(k)$ predstavuje odchýlku medzi požadovanou hodnotou $w(k)$ a aktuálnou hodnotou výstupu systému $y(k)$, čo je v našom prípade $h_2(k)$.

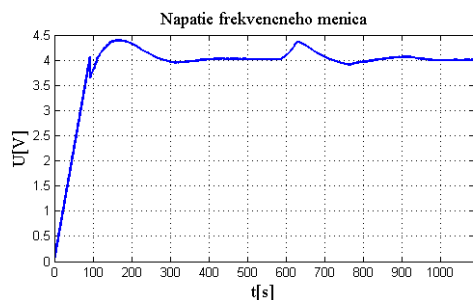
Riadením laboratórneho modelu hydraulického systému pomocou číslicových PID riadiacich algoritmov sme sa zaoberali v [2]. Na nasledujúcich obrázkoch uvádzame získané výsledky, pričom pri riadení sme použili periódu vzorkovania $T_s = 1$ s.



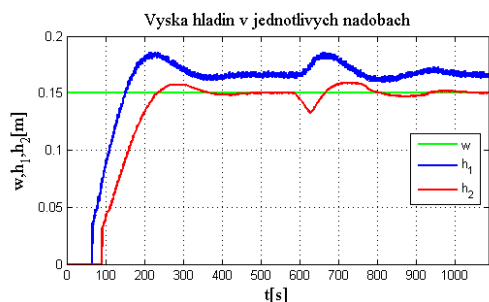
Obr. 5: Časový priebeh akčného zásahu číslicového PID regulátora (metóda štandardných tvarov - Butterworth)



Obr. 6: Časové priebehy výšok hladín pri riadení číslicovým PID regulátorom (metóda štandardných tvarov - Butterworth)



Obr. 7: Časový priebeh akčného zásahu číslicového PID regulátora (metóda optimálneho modulu)



Obr. 8: Časové priebehy výšok hladín pri riadení číslicovým PID regulátorom (metóda optimálneho modulu)

Ďalším algoritmom riadenia, ktorý bol navrhnutý je polynomiálny regulátor. Je to vlastne rozšírený číslicový PID regulátor. Polynomiálny regulátor má prenosovú funkciu v tvare

$$F_R(z^{-1}) = \frac{U(z^{-1})}{E(z^{-1})} = \frac{Q(z^{-1})}{P(z^{-1})} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2} + \dots + q_v z^{-v}}{1 + p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2} + \dots + p_r z^{-r}} \quad (9)$$

kde v a r je stupeň polynómu čitateľa a menovateľa. Podobne, vzťah pre výpočet akčného zásahu, ktorý je použitý v riadiacej slučke má tvar

$$u(k) = p_1 u(k-1) + p_2 u(k-2) + \dots + p_r u(k-r) + q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2) + \dots + q_v e(k-v). \quad (10)$$

Pri návrhu koeficientov polynomiálneho regulátora sme vychádzali z diskretnej prenosovej funkcie lineárneho obvodu, pričom sme využili metódu umiestnenia pólov (*Pole-placement*). Táto metóda je založená na predpísaní pólov charakteristického polynómu uzavretého regulačného obvodu

$$CH = A_z(z^{-1})P(z^{-1}) + Q(z^{-1})B_z(z^{-1}) \quad (11)$$

kde A_z , resp. B_z je menovateľ, resp. čitateľ diskretnej prenosovej funkcie dynamického systému.

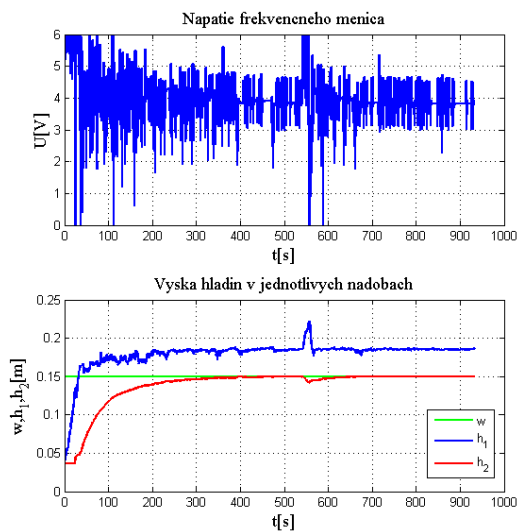
Hodnoty polynómov $P(z^{-1})$ a $Q(z^{-1})$ sa vypočítajú na základe porovnania koeficientov charakteristického polynómu CH a požadovaného polynómu

$$CH_{pož} = (z - z_1)(z - z_2) \dots (z - z_h) / z^h \quad (12)$$

pri rovnakých exponentoch operátora z , kde h je stupeň polynómu CH .

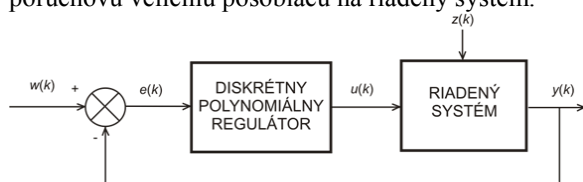
Výsledky získané riadením laboratórneho modelu hydraulického systému pomocou rozoberaného algoritmu sú uvedené na obr.9. Pri návrhu koeficientov polynómov polynomiálneho regulátora $P(z^{-1})$ a $Q(z^{-1})$ sme volili póly: 0,99 ; 0,98 ; 0,5 ; 0,1. Pri takejto voľbe pólov sa nám podarilo znížiť dobu regulácie takmer o polovicu oproti algoritmu číslicového PID regulátora, avšak za cenu kmitavého priebehu akčného zásahu. Navyše, je potrebné podotknúť, že obmedzenie akčného zásahu sme znížili na 6V. Ak by sme tak neurobili, riadiaci algoritmus by pri veľkej regulačnej odchýlke, t.j. rozdiel medzi požadovanou a skutočnou výškou hladiny v druhej nádobe, generoval maximálne možné napätie, teda 10V, čo by zapríčinilo, že kvapalina v prvej nádobe by veľmi rýchlo dosiahla maximálnu výšku. Na základe naprogramovaných bezpečnostných opatrení by program v PLC automate vypol frekvenčný menič a cieľ riadenia by tak nebol splnený.

Jednou z možností obísť tento problém je voľba „pomalších“ pólov uzavretého regulačného obvodu, čo by zmiernilo priebeh akčného zásahu, ale tiež predĺžilo dobu regulácie. My sme sa rozhodli pre rýchlejšiu reguláciu na úkor plynulosti akčného zásahu, keďže spomínaná kmitavosť sa prejavila v prvej nádobe a na výšku hladiny v druhej nemala vplyv.



Obr. 9: Časové priebehy získané riadením laboratórneho modelu pomocou polynomiálneho regulátora

Keďže číslicový PID regulátor je špeciálnym prípadom polynomiálneho regulátora, riadiaca štruktúra uvedená na obr.10 je platná pre oba vyššie uvedené algoritmy riadenia. Signál $z(k)$ predstavuje poruchovú veličinu pôsobiacu na riadený systém.



Obr. 10: Riadiaca štruktúra s polynomiálnym regulátorom

Oba rozoberané klasické algoritmy riadenia sme naprogramovali tak, aby negenerovali akčný zásah mimo požadovaného rozsahu, hoci z hľadiska bezpečnosti je toto obmedzenie naprogramované aj v programe PLC automatu.

Lineárne kvadratické riadenie

Algoritmy riadenia, ktoré budeme rozoberať v tejto časti, vychádzajú z diskrétného stavového opisu dynamického systému

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}_d \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_d \mathbf{u}(k) \\ y(k) &= \mathbf{C} \mathbf{x}(k) + \mathbf{D} \mathbf{u}(k) \end{aligned} \quad (13)$$

kde význam jednotlivých symbolov je totožný ako v prípade spojitého stavového opisu (3), avšak matica dynamiky \mathbf{A}_d a matica vstupov \mathbf{B}_d majú iné číselné vyjadrenie, v našom prípade získané diskretizáciou pri perióde vzorkovania $T_s = 1$ s.

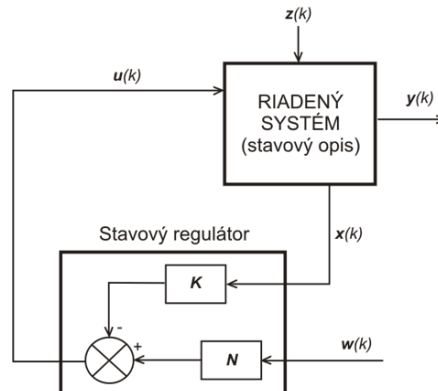
Prvý algoritmus riadenia používa na výpočet vektora akčného zásahu (vstupov riadeného systému $\mathbf{u}(k)$) v každom cykle riadiacej slučky vzťah

$$\mathbf{u}(k) = -\mathbf{K} \mathbf{x}(k) + \mathbf{N} \mathbf{w}(k) \quad (14)$$

kde \mathbf{K} je matica zosilnení stavových veličín a \mathbf{N} je matica zosilnení vektora požadovaných hodnôt výstupov $\mathbf{w}(k)$.

Všeobecná riadiaca štruktúra tohto typu algoritmov je uvedená na obr.11, kde signály akčného zásahu $\mathbf{u}(k)$,

poruchovej veličiny $z(k)$, výstupu $y(k)$, stavov $\mathbf{x}(k)$ a požadovanej hodnoty $\mathbf{w}(k)$ sú vektory s príslušnou dĺžkou.



Obr. 11: Riadiaca štruktúra stavového riadenia

Maticy \mathbf{K} a \mathbf{N} sú v prípade SISO systému, čo je aj náš prípad, redukované na vektor \mathbf{k} a skalárnu veličinu N . Avšak, pre všeobecnosť, v ďalšom budeme naďalej uvažovať ich maticové vyjadrenie.

Vzťah (14) predstavuje podľa [11] zákon stavového riadenia lineárnych dynamických systémov na zvolený ustálený stav. Cieľom syntézy je v tomto prípade určiť hodnoty matic \mathbf{K} a \mathbf{N} .

Vychádzajúc z [11] lineárne kvadratické riadenie spočíva v nájdení takých hodnôt matice \mathbf{K} , aby bol minimalizovaný funkcionál

$$\begin{aligned} J_{LQ} &= \mathbf{x}^T(M) \mathbf{Q}^* \mathbf{x}(M) + \\ &+ \sum_{k=0}^{M-1} \mathbf{x}^T(k) \mathbf{Q} \mathbf{x}(k) + \mathbf{x}^T(k) \mathbf{S} \mathbf{u}(k) + \\ &+ \mathbf{u}^T(k) \mathbf{S}^T \mathbf{x}(k) + \mathbf{u}^T(k) \mathbf{R} \mathbf{u}(k) \end{aligned} \quad (15)$$

kde $\mathbf{Q}^* \geq 0$, $\mathbf{Q} \geq 0$ sú kladne semidefinitné váhové matice stavov, $\mathbf{R} > 0$ je kladne definitná váhová matica vstupov a matica \mathbf{S} musí vyhovovať podmienke $\mathbf{Q} - \mathbf{S} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{S}^T \geq 0$.

Na základe odvodenia v [11] je možné vypočítať koeficienty matice \mathbf{K} pomocou vzťahu

$$\mathbf{K} = [\mathbf{R} + \mathbf{B}_d^T \mathbf{P} \mathbf{B}_d]^{-1} [\mathbf{S} + \mathbf{A}_d^T \mathbf{P} \mathbf{B}_d]^T \quad (16)$$

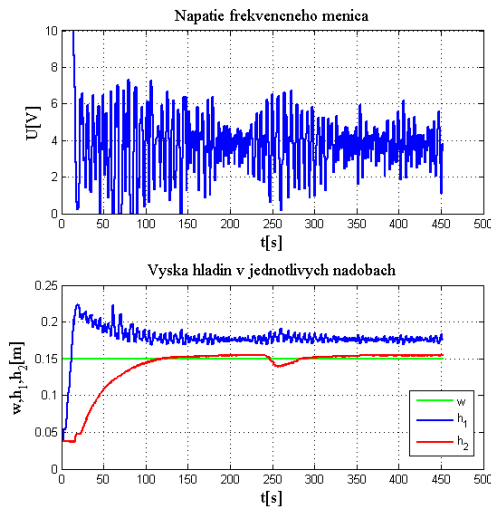
kde \mathbf{P} je symetrická, kladne definitná matica, ktorá je ustáleným riešením diskrétnej algebraickej Riccatiho rovnice

$$\begin{aligned} \mathbf{P} &= \mathbf{Q} + \mathbf{A}_d^T \mathbf{P} \mathbf{A}_d - \\ &- [\mathbf{S} + \mathbf{A}_d^T \mathbf{P} \mathbf{B}_d] [\mathbf{R} + \mathbf{B}_d^T \mathbf{P} \mathbf{B}_d]^{-1} [\mathbf{S} + \mathbf{A}_d^T \mathbf{P} \mathbf{B}_d]^T \end{aligned} \quad (17)$$

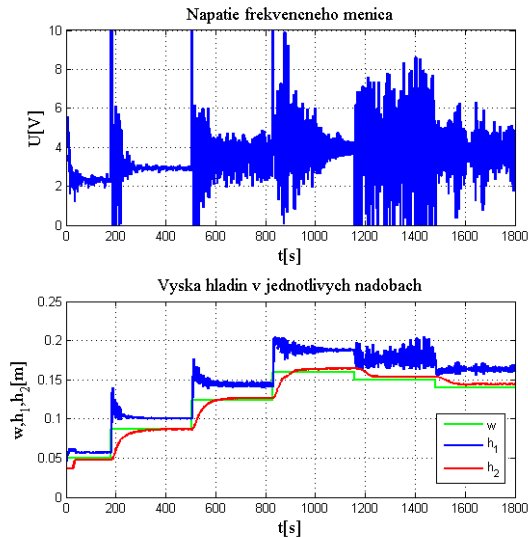
Na základe [11] sme maticu \mathbf{N} vypočítali podľa vzťahu

$$\mathbf{N} = \left\{ \mathbf{C} [\mathbf{I} - (\mathbf{A}_d - \mathbf{B}_d \mathbf{K})]^{-1} \mathbf{B}_d \right\}^{-1} \quad (18)$$

keďže v našom prípade ide o riadenie SISO systému. Výsledky riadenia laboratórneho modelu pomocou algoritmu stavového riadenia na báze minimalizácie funkcionálu J_{LQ} sú uvedené na obr.12. Pri návrhu sme pre váhové matice funkcionálu (15) zvolili nasledujúce hodnoty: $\mathbf{Q} = 1000\mathbf{I}$, $\mathbf{R} = 0,001\mathbf{I}$ a $\mathbf{S} = \mathbf{0}$, kde \mathbf{I} je jednotková matica.



Obr. 12: Časové priebehy získané riadením laboratórneho modelu pomocou algoritmu stavového LQ riadenia



Obr. 13: Časové priebehy získané riadením laboratórneho modelu pomocou algoritmu stavového LQ riadenia

Z obr.12 a obr.13 je zrejmé, že tento typ riadiaceho algoritmu nedokáže v prípade nelineárnych dynamických systémov odstrániť trvalú regulačnú odchýlku ani vplyv trvalých porúch pôsobiach na riadený systém.

Podľa [12] je možné uvedený nedostatok eliminovať zakomponovaním sumátora regulačnej odchýlky S_u do testovaného algoritmu.

Takto modifikovaný algoritmus vyžaduje rozšírený stavový opis dynamického systému v tvare

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}(k+1) \\ \mathbf{u}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_d & \mathbf{B}_d \\ -\mathbf{K}\mathbf{A}_d & -\mathbf{K}\mathbf{B}_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k) \\ \mathbf{u}(k) \end{bmatrix} \quad (19)$$

kde matica zosilnení stavových veličín \mathbf{K} je vypočítaná podľa rovnice (16).

Výpočet hodnoty sumátora S_u v ďalšom kroku je možné vyjadriť ako

$$\begin{aligned} S_u(k+1) &= S_u(k) + \mathbf{K}_2 e(k) = \\ &= S_u(k) + \mathbf{K}_2 [\mathbf{w}(k) - \mathbf{y}(k)] \quad (20) \\ &= S_u(k) + \mathbf{K}_2 \mathbf{w}(k) - \mathbf{K}_2 \mathbf{C} \mathbf{x}(k) \end{aligned}$$

a vzťah pre výpočet akčného zásahu rovnicou $\mathbf{u}(k+1) = -\mathbf{K}_1 \mathbf{x}(k+1) + S_u(k+1) + \mathbf{K}_2 \mathbf{w}(k+1)$ (21)

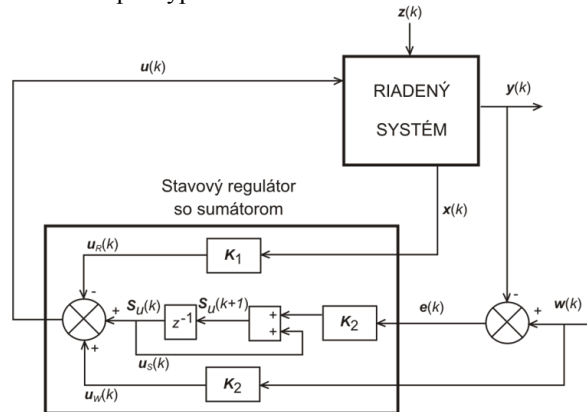
kde matice \mathbf{K}_1 a \mathbf{K}_2 sa podľa [12] vypočítajú na základe rovnosti

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{K}_1 & -\mathbf{K}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{K}\mathbf{A}_d & -\mathbf{I} - \mathbf{K}\mathbf{B}_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{A}_d - \mathbf{I} & \mathbf{B}_d \\ \mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix}^{-1} \quad (22)$$

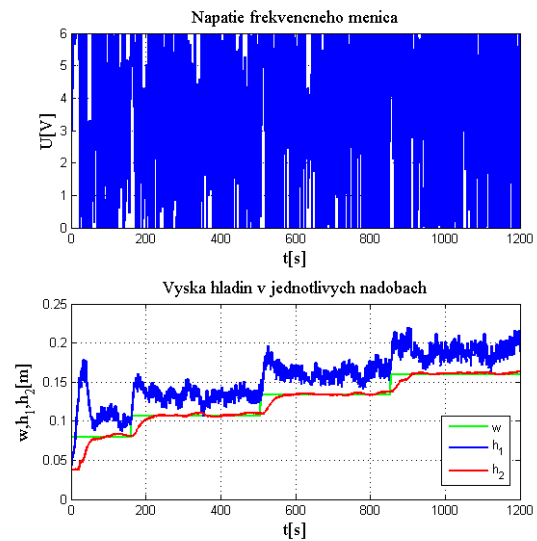
Riadiaca štruktúra obsahujúca stavový regulátor so sumátorom je znázornená na obr.14.

Výsledky riadenia laboratórneho modelu pri použití modifikovaného algoritmu stavového LQ riadenia sú znázornené na obr.15.

Je potrebné zdôrazniť, že v tomto prípade boli použité váhové matice $\mathbf{Q} = 10\mathbf{I}$, $\mathbf{R} = 0,001\mathbf{I}$ a $\mathbf{S} = \mathbf{0}$. Takáto voľba váhových koeficientov je kvôli vplyvu sumátora pri výpočte akčného zásahu.



Obr. 14: Riadiaca štruktúra stavového riadenia so sumátorom



Obr. 15: Časové priebehy získané riadením laboratórneho modelu pomocou algoritmu stavového LQ riadenia so sumátorom

Rovnako, ako v prípade klasických algoritmov riadenia, aj tieto dva rozoberané algoritmy stavového riadenia zohľadňujú fyzikálne obmedzenia vstupov a výstupov riadeného systému.

Prediktívne riadenie

Základný princíp metód prediktívneho riadenia spočíva v používaní modelu pre výpočet predikcie budúceho správania sa riadeného dynamického systému na stanovenom časovom horizonte. Výpočet hodnoty akčného zásahu je založený na minimalizácii funkcionálu, kde nastaviteľnými parametrami sú váhové matice. Podobne, ako v prípade lineárneho kvadratického riadenia, jedná sa o optimalizačnú úlohu. Algoritmy prediktívneho riadenia majú navyše tú výhodu, že výpočet akčného zásahu je možné transformovať na úlohu kvadratického programovania s zahrnúť doň aj obmedzenia fyzikálnych veličín riadeného systému. Minimalizácia funkcionálu s ohraničeniami však znamená vyššiu výpočtovú náročnosť týchto algoritmov, pretože takýto výpočet je možné realizovať iba numerickým spôsobom.

Stratégiu výpočtu akčného zásahu algoritmi prediktívneho riadenia v rámci uzavretej regulačnej slučky je možné vyjadriť v niekoľkých krokoch:

- K1 - určenie referenčnej trajektórie na dĺžke horizontu predikcie N_p ,
- K2 - zistenie skutočného stavu $x(k)$, resp. výstupu $y(k)$ systému v danom kroku,
- K3 - predikcia správania sa systému na horizonte predikcie N_p na základe skutočných hodnôt akčného zásahu a stavu systému v predošlých krokoch,
- K4 - výpočet postupnosti akčného zásahu u_{opt} minimalizáciou funkcionálu na dĺžke riadiaceho horizontu N_u .
- K5 - použitie prvej hodnoty postupnosti akčného zásahu u_{opt} na vstupe riadeného systému a návrat na K1.

Uvedený postup sa nazýva princíp pohyblivého horizontu, jeho podstatu znázorňuje aj obr. 16.

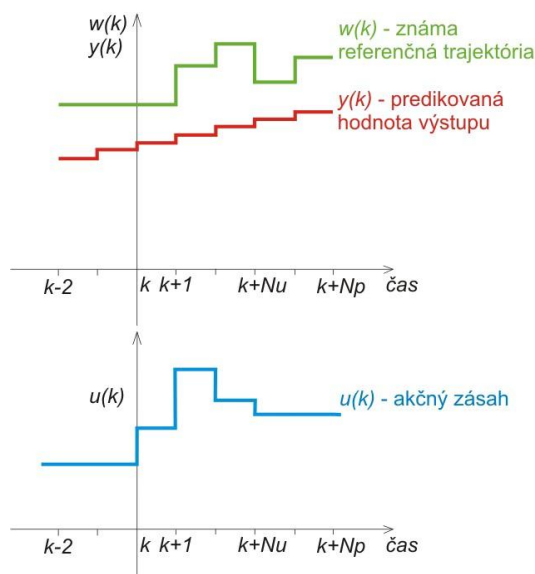
Samotný návrh algoritmov prediktívneho riadenia spočíva v realizácii dvoch fáz:

1. odvodenie prediktora,
2. výpočet akčného zásahu.

Existuje relatívne veľké množstvo rôznych interpretácií základného princípu prediktívneho riadenia. V tomto článku sa zameriame najprv na algoritmus zovšeobecneného prediktívneho riadenia (**Generalized Predictive Control - GPC**), ktorý je založený na vstupno-výstupnom opise lineárnych modelov dynamických systémov vo forme CARIMA modelu

$$A_z(z^{-1})y(k) = B_z(z^{-1})u(k-1) + \frac{C_z(z^{-1})}{\Delta} \xi(k) \quad (23)$$

kde $C_z(z^{-1})$ je polynóm, $\xi(k)$ je chyba merania výstupu systému a $\Delta = 1 - z^{-1}$ predstavuje integrátor [13].

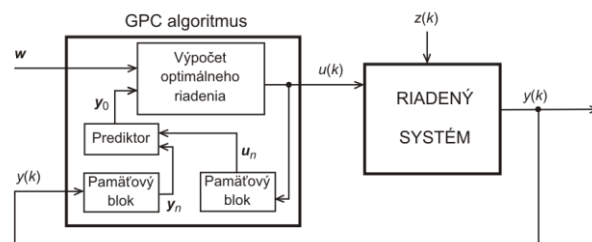


Obr. 16: Princíp pohyblivého horizontu algoritmov prediktívneho riadenia

Odvodenie GPC algoritmu prvýkrát publikoval Clarke v článku [14] v roku 1987.

Riadiaca štruktúra s GPC algoritmom pre SISO systém je znázornená na obr.17, pričom význam jednotlivých veličín je:

- w – vektor referenčnej trajektórie na dĺžke horizontu predikcie,
 - y_0 – predikcia voľnej odozvy systému na dĺžke predikčného horizontu,
 - u_n – vektor hodnôt akčného zásahu v predchádzajúcich n krokoch,
 - y_n – vektor hodnôt výstupnej veličiny v predchádzajúcich n krokoch,
 - $u(k)$ – akčný zásah,
 - $z(k)$ – poruchová veličina,
 - $y(k)$ – výstup, regulovaná veličina,
- pričom n je rád riadeného systému.



Obr. 17: Riadiaca štruktúra zovšeobecneného prediktívneho riadenia

Vychádzajúc z [13] GPC algoritmus založený na CARIMA modeli minimalizuje funkcionál

$$J_{GPC} = \sum_{i=N_1}^{N_p} [\hat{y}(k+i) - w(k+i)]^2 + \lambda \sum_{i=1}^{N_u} [\Delta u(k+i-1)]^2 \quad (24)$$

kde $\hat{y}(k)$ je predikovaná hodnota regulovanej veličiny, $\Delta u(k)$ je zmena akčného zásahu a λ je

pomerný váhový koeficient vyjadrujúci pomer váh medzi regulačnou odchýlkou a akčným zásahom. Na tomto mieste je potrebné poznamenať, že váženie zmeny akčného zásahu $\Delta u(k)$ vo funkcionáli (24) vnáša do riadenia integračný charakter s cieľom eliminovať trvalú regulačnú odchýlku a vplyv trvalých porúch [13].

Na základe postupu uvedenom v [13] je možné odvodiť prediktor v tvare

$$\hat{y} = \mathbf{G}\Delta\mathbf{u} + \mathbf{y}_0 \quad (25)$$

kde \mathbf{y}_0 je voľná odozva systému a matica \mathbf{G} je tvorená koeficientami prechodovej charakteristiky,

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} g_0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ g_1 & g_0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & \ddots & & \\ \vdots & & & g_0 & 0 \\ g_{N_p-1} & \dots & & & g_0 \end{pmatrix} \quad (26)$$

Po dosadení prediktora (25) do maticovej formy funkcionálu (24) je možné získať kvadratickú formu

$$\begin{aligned} J_{GPC} &= (\hat{y} - \mathbf{w})^T (\hat{y} - \mathbf{w}) + \lambda \Delta\mathbf{u}^T \Delta\mathbf{u} = \\ &= (\mathbf{G}\Delta\mathbf{u} + \mathbf{y}_0 - \mathbf{w})^T (\mathbf{G}\Delta\mathbf{u} + \mathbf{y}_0 - \mathbf{w}) + \lambda \Delta\mathbf{u}^T \Delta\mathbf{u} = \\ &= c + 2\mathbf{g}^T \Delta\mathbf{u} + \Delta\mathbf{u}^T \mathbf{H} \Delta\mathbf{u}, \end{aligned} \quad (27)$$

kde \mathbf{g}^T je gradient, \mathbf{H} je Hessián a c je konštanta.

Na základe podmienky

$$\frac{\partial J_{GPC}}{\partial \Delta\mathbf{u}} \stackrel{!}{=} \mathbf{0} \quad (28)$$

môžeme podľa [13] získať vzťah pre výpočet optimálneho akčného zásahu na dĺžke riadiaceho horizontu N_u analytickým spôsobom:

$$\Delta\mathbf{u} = -\mathbf{H}^{-1}\mathbf{g} \quad (29)$$

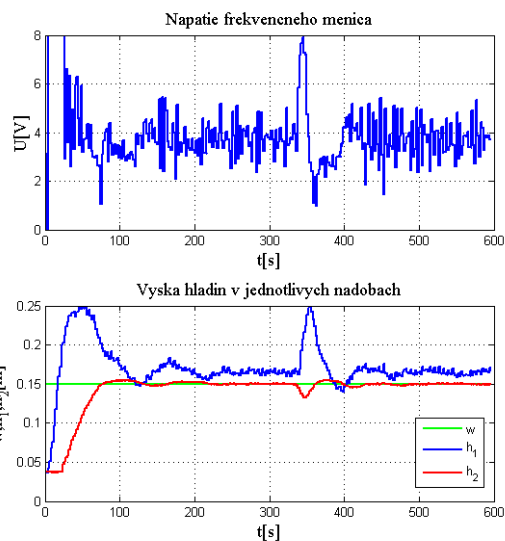
V prípade požiadavky zakomponovania ohraničení fyzikálnych veličín do výpočtu akčného zásahu, je potrebné riešiť minimalizáciu (27) kvadratickým programovaním. My sme na tento účel použili funkciu *quadprog*, ktorá je súčasťou toolboxu *Optimization Toolbox* v prostredí Matlab.

Výsledky riadenia laboratórneho modelu hydraulického systému, kde bol v úlohe riadiaceho člena použitý rozoberaný GPC algoritmus sú znázornené na obr.18 a obr.19. Pri návrhu boli použité nasledujúce nastavenia:

Tab. 1: Nastavenia GPC algoritmu

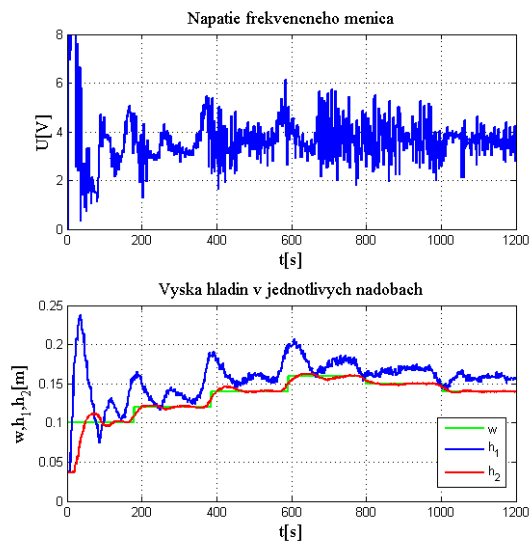
Parameter	Hodnota
N_1	1
N_p	20
N_u	2
λ	1/300
T_s	2s

Hodnoty jednotlivých parametrov v tabuľke boli zvolené na základe výsledkov riadenia nelineárneho simulačného modelu hydraulického systému.

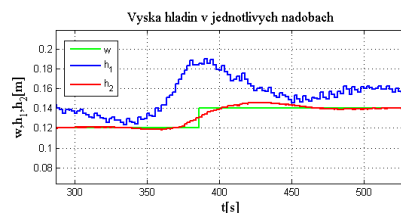


Obr. 18: Časové priebehy získané riadením laboratórneho modelu pomocou GPC algoritmu

Na obr.19 je vidieť typické správanie pri použití algoritmov prediktívneho riadenia, a to, že algoritmus „vidí“ do budúcnosti. Inými slovami, pri meniacej sa požadovanej hodnote výstupu generuje algoritmus príslušnú hodnotu akčného zásahu pre daný pracovný bod (požadovanú hodnotu výstupu) s predstihom na základe predikčného horizontu. Na obr. 20 je znázornený detail (výrez z obr. 19) spomínaného správania.



Obr. 19: Časové priebehy získané riadením laboratórneho modelu pomocou GPC algoritmu

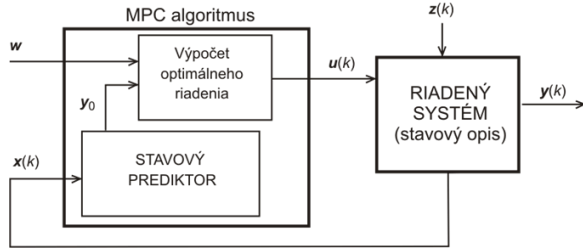


Obr. 20: Detail z obr.19 znázorňujúci skoršiu zmenu riadeného výstupu vzhľadom na požadovanú hodnotu

Ďalej uvedieme algoritmus stavového prediktívneho riadenia (State Model Based Predictive Control - SMPC), ktorý zachováva rovnaký princíp ako GPC algoritmus s tým rozdielom, že pri odvodení prediktora vychádza z diskrétného stavového opisu dynamických systémov (13).

SMPC algoritmom, ako aj ďalšími aspektami prediktívneho riadenia sa okrem mnohých ďalších zaoberajú aj publikácie [15] a [16].

Riadiaca štruktúra s SMPC algoritmom je na obr.21.



Obr. 21: Riadiaca štruktúra stavového prediktívneho riadenia

V prípade SMPC algoritmu budeme uvažovať funkcionál

$$J_{MPC} = \sum_{i=N_1}^{N_p} Q_v [\hat{y}(k+i) - w(k+i)]^2 + \sum_{i=1}^{N_u} R_v [\Delta u(k+i-1)]^2 \quad (30)$$

kde na rozdiel od funkcionálu (24) v ňom vystupujú váhové koeficienty Q_v a R_v .

Na základe [17] postupným iterovaním rovníc diskrétného stavového opisu (13) pre ďalšie kroky je možné jednoducho odvodiť prediktor v tvare

$$\hat{y} = Vx(k) + Gu \quad (31)$$

pričom

$$V = \begin{pmatrix} CA_d \\ \vdots \\ CA_d^{N_p} \end{pmatrix}, \quad G = \begin{pmatrix} CB_d & \mathbf{0} & \cdots \\ \vdots & \ddots & \ddots \\ CA_d^{N_p-1}B_d & \cdots & CB_d \end{pmatrix} \quad (32)$$

Vzhľadom na to, že potrebujeme vo funkcionáli vážiť zmenu akčného zásahu $\Delta u(k)$, bolo by nutné uskutočniť príslušné úpravy vyjadrenia funkcionálu (30). Iný prístup k váženiu zmeny akčného zásahu J_{MPC} je osamostatnenie vektora Δu už pri odvodení prediktora podľa [18].

Diskrétny stavový opis dynamického systému by potom vo všeobecnosti vyzeral takto:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= A_d x(k) + B_d u(k-1) + B_d \Delta u(k) \\ y(k) &= Cx(k) + Du(k) \\ u(k) &= u(k-1) + \Delta u(k) \end{aligned} \quad (33)$$

a maticový zápis predikcie výstupu za predpokladu, že $D = \mathbf{0}$ by bol

$$\hat{y} = Vx(k) + G_1 u(k-1) + G_2 \Delta u = y_0 + G_2 \Delta u \quad (34)$$

kde

$$G_1 = \begin{pmatrix} CB_d \\ C(A_d + I)B_d \\ \vdots \\ C(A_d^{N_p-1} + \cdots + A_d + I)B_d \end{pmatrix} \quad (35)$$

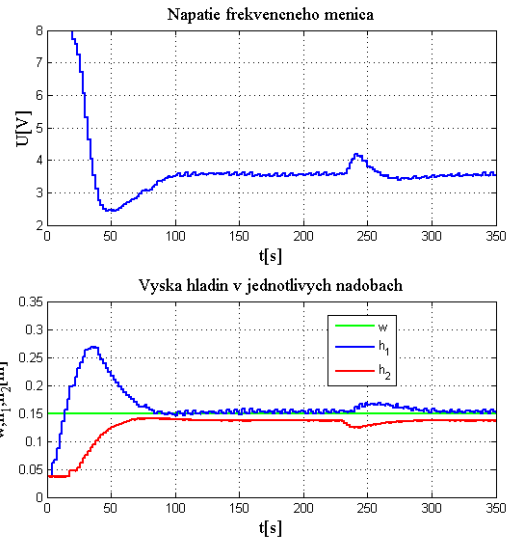
$$G_2 = \begin{pmatrix} CB_d & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ C(A_d^{N_p} + I)B_d & CB_d & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \mathbf{0} \\ C(A_d^{N_p-1} + \cdots + A_d + I)B_d & \cdots & C(A_d + I)B_d & CB_d \end{pmatrix}$$

Po dosadení rovnice prediktora (34) do maticového tvaru funkcionálu J_{MPC} (30)

$$J_{MPC} = (\hat{y} - w)^T Q (\hat{y} - w) + \Delta u^T R \Delta u \quad (36)$$

a následnom roznásobení je možné ho upraviť na kvadratickú formu a vyjadriť tak tvar matice H a vektora g , podobne ako v prípade GPC algoritmu.

Tento druhý prístup vyjadrenia prediktora v SMPC algoritme vykazoval lepšie výsledky riadenia na simulačnej úrovni, preto sme sa rozhodli prezentovať výsledky riadenia pomocou neho aj na reálnom laboratórnom modeli, viď. obr.22.



Obr. 22: Časové priebehy získané riadením laboratórneho modelu pomocou SMPC algoritmu

Pri návrhu SMPC algoritmu sme použili nastavenia jednotlivých parametrov podľa tab. 2, ktoré rovnako ako v prípade GPC algoritmu, boli zvolené na základe výsledkov riadenia nelineárneho simulačného modelu hydraulického systému.

Tab. 2: Nastavenia SMPC algoritmu

Parameter	Hodnota
N_1	1
N_p	10
N_u	2
Q_v	100
R_v	0,01
T_s	2s

Hodnoty Q_v a R_v predstavujú číselné vyjadrenie koeficientov hlavnej diagonály matic Q a R .

Vzhľadom na to, že dynamika riadeného systému je relatívne pomalá, kvôli výpočtovej náročnosti optimalizačnej úlohy vykonávanej v rámci jedného kroku riadiaceho cyklu sme použili v prípade algoritmov prediktívneho riadenia periódu vzorkovania $T_s = 2s$.

Z obr. 22 je zrejmé, že pri použití prezentovaného SMPC algoritmu na laboratórny model vzniká trvalá regulačná odchýlka. Vychádzajúc z [19] je jednou z možností na jej elimináciu rozšírenie funkcionálu J_{MPC} (30) o sumátor regulačnej odchýlky s príslušným váhovým koeficientom Q_s , čo vnesie do riadenia integračný charakter. Rozšírený funkcionál má tvar

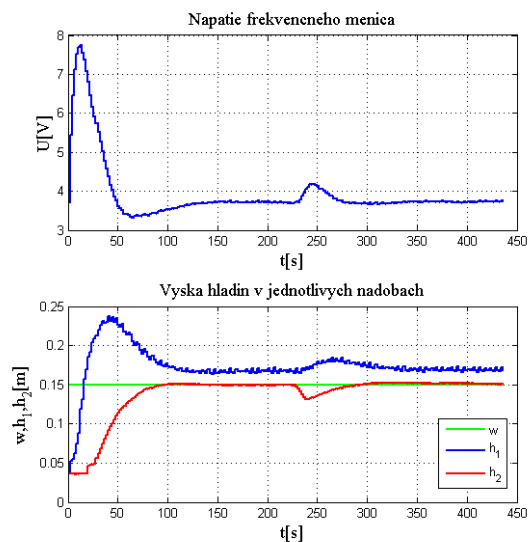
$$J_{MPC} = \sum_{i=N_1}^{N_p} Q_v [\hat{y}(k+i) - w(k+i)]^2 + \sum_{i=N_1}^{N_p} Q_s [y_s(i)]^2 + \sum_{i=1}^{N_u} R_u [\Delta u(k+i-1)]^2 \quad (37)$$

pričom pre sumátor y_s platia vzťahy

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_s(k+1) &= \mathbf{x}_s(k) + w(k) - y(k) \\ \mathbf{y}_s(k) &= \mathbf{x}_s(k) \end{aligned} \quad (38)$$

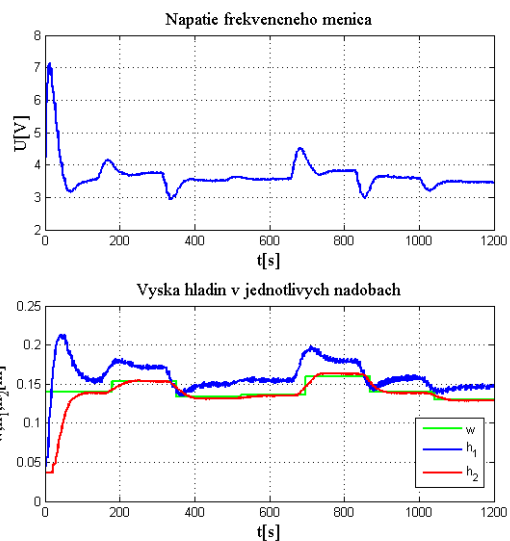
Samozrejme, po dosadení prediktora (34) do maticového tvaru rozšíreného funkcionálu (37) je pre výpočet akčného zásahu nevyhnutné vyjadriť nový tvar matice \mathbf{H} a vektora \mathbf{g} .

Na obr. 23 a obr.24 sú uvedené výsledky riadenia laboratórneho modelu hydraulického systému s rozšíreným SMPC algoritmom o sumátor.



Obr. 23: Časové priebehy získané riadením laboratórneho modelu pomocou SMPC algoritmu so sumátorom

Je potrebné zdôrazniť, že pri použití nenulového váhového koeficientu sumátora regulačnej odchýlky Q_s vo funkcionálu J_{MPC} bolo nutné zmenšiť hodnotu váhového koeficientu regulačnej odchýlky Q_v . To znamená, že nastavenia váhových koeficientov vo funkcionáli (37) sme uskutočnili na základe tab.2 s tým rozdielom, že $Q_v = 3$ a navyše $Q_s = 0,005$.



Obr. 24: Časové priebehy získané riadením laboratórneho modelu pomocou SMPC algoritmu so sumátorom

Bližší popis návrhu algoritmov riadenia, ktoré sme prezentovali v tomto článku (okrem číslicového PID regulátora) a spôsob ich algoritmizácie vo forme vývojových diagramov, ktoré sme naprogramovali ako funkcie jazyka Matlab je uvedený v [20].

ZHODNOTENIE VÝSLEDKOV

V článku sme sa venovali rôznym metódam riadenia dynamických systémov, ktoré sme naprogramovali vo forme funkcií simulačného jazyka Matlab a otestovali na laboratórnom modeli hydraulického systému, čoho výsledkom sú prezentované grafy časových priebehov merateľných veličín laboratórneho modelu. Vo všetkých prípadoch riadiacich algoritmov bolo našim cieľom nastaviť ich parametre tak, aby výška hladiny druhej nádoby dosiahla požadovanú hodnotu za čo najkratší čas a pri minimálnom prekmite. Zároveň bolo potrebné vhodne nastaviť horné ohraničenia akčného zásahu, aby nedošlo k pretečeniu kvapaliny v prvej nádobe. Výsledky získané použitím jednotlivých riadiacich algoritmov sa navzájom líšia v konkrétnych ukazovateľoch kvality, či už v dobe regulácie, maximálnom prerégulovaní alebo v hladkosti, resp. kmitavosti časového priebehu akčného zásahu. Použitie daného algoritmu riadenia teda úzko súvisí s požiadavkami kladenými na riadenie.

V prípade algoritmu klasického číslicového PSD regulátora navrhnutého metódou štandardných tvarov vzniká pri skokovej zmene požadovanej hodnoty relatívne veľké prerégulovanie. Návrh koeficientov PSD regulátora metódou optimálneho modulu tento nedostatok odstraňuje, avšak doba regulácie je zreteľne veľká.

Rozšírením algoritmu číslicového PSD regulátora vo forme polynomiálneho regulátora a vhodnou voľbou pólov uzavretého regulačného obvodu je možné pri

skokovej zmene požadovanej hodnoty odstrániť prer regulovanie a skrátiť dobu regulácie aj s ohľadom na výšku hladiny v prvej nádobe. Na druhej strane akčný zásah je dosť kmitavý, čo sa prejavuje aj v kolísaní hladiny kvapaliny v prvej nádobe.

Riadenie laboratórneho modelu pomocou algoritmov vychádzajúcich zo stavového opisu dynamického systému sa typicky vyznačovalo veľkým akčným zásahom a rýchlym naplnením prvej nádoby v začiatkovej fáze, kedy bola regulačná odchýlka veľmi veľká a následne už len korigovaním hodnotami akčného zásahu prislúchajúcimi pre danú úroveň požadovanej hodnoty. Výhodou prezentovaného laboratórneho modelu je fakt, že obe stavové veličiny sú merateľné a teda nebolo potrebné navrhovať pozorovateľ stavov, čo by mohlo svojim spôsobom ovplyvniť výsledky riadenia. Klasické stavové LQ riadenie nedokázalo eliminovať trvalú regulačnú odchýlku, čo sme aj predpokladali, keďže sa to prejavovalo aj počas simulácie riadenia. Avšak pomerne jednoduchou modifikáciou zavedením sumátora sme dosiahli výborné výsledky z hľadiska prer regulovania aj doby regulácie.

Podľa nášho názoru sme najlepšie výsledky riadenia laboratórneho modelu hydraulického systému dosiahli pomocou algoritmov prediktívneho riadenia. Z hľadiska praktického použitia GPC a SMPC algoritmov bolo potrebné nájsť vyhovujúce hodnoty váhových koeficientov funkcionálu a maximálnej hodnoty akčného zásahu tak, aby nedošlo k pretečeniu kvapaliny v prvej nádobe pri veľkej skokovej zmene požadovanej hodnoty. Avšak po vhodnom nastavení týchto hodnôt, prediktívneho a riadiaceho horizontu vykazovali výsledky získané pomocou algoritmov prediktívneho riadenia najlepšie hodnoty z hľadiska doby regulácie aj prer regulovania. Veľkou výhodou algoritmov prediktívneho riadenia je ich použitie pri meniacej sa požadovanej hodnote, keďže sú schopné predikovať správanie riadeného systému na základe jeho modelu.

V rámci ďalšej výskumnej práce sa chceme zamerať práve na model riadeného systému, ktorý je použitý pri predikcii v rámci algoritmov prediktívneho riadenia. Ako medzikrok k nelineárnemu prediktívnomu riadeniu chceme na laboratórnom modeli testovať algoritmy prediktívneho riadenia, ktoré by na výpočet voľnej odozvy dynamického systému využívali nelineárny model vo forme nelineárnych diferenciálnych rovníc. Ďalej by sme sa chceli v rámci prediktívneho riadenia zamerať na použitie neurónových sietí, či už pri predikcii alebo v rámci výpočtu optimálnych hodnôt akčného zásahu.

POĎAKOVANIE

Tento článok bol vytvorený realizáciou vedeckého projektu Vega č. 1/0286/11 Grantovej agentúry SR pod názvom „Dynamické hybridné architektúry v multiagentových sieťových riadiacich systémoch“ (50%), 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 (30%) a projektu „Kybernetické edukačné centrum“ Kega č.037-011TUKE-4/2010 pod názvom (20%).

LITERATÚRA

- [1] Jajčišin, Š., Jadlovská, A. "Aplikácia DDE a OPC komunikačných protokolov v identifikácii a riadení reálneho systému," in Electrical Engineering and Informatics 2: Proceeding of the Faculty of Electrical Engineering and Informatics of the Technical University of Košice, Košice, FEI TU, 2011, pp. 365-370, ISBN 978-80-553-0611-7.
- [2] Š. Jajčišin, "Verification of Control Algorithms with DDE Communication on Real Hydraulic System," in SCYR 2011 - 11th Scientific Conference of Young Researchers, FEI TU of Košice, 2011 pp. 388-391, ISBN 978-80-553-0644-5.
- [3] Bia-Verder, SPRING membránové provedení, technická dokumentace. Dostupné na internete: <http://bia-verder.verder.ams3 footsteps.nl/Cerpadla/Davkovaci_cerpadla/Mechanicka/Seko_SPRING_MS>
- [4] Rockwell Automation, Allen-Bradley PowerFlex 40 Adjustable Frequency AC Drive, User Manual. Dostupné na internete: <<http://www.ab.com/support/abdrives/webupdate/literature.html/>>
- [5] Dinel, Kapacitní hladinoměry CLM-36, Návod k použití. Dostupné na internete: <<http://www.dinel.cz/uploads/pdf/090916081606-clm-36-nav-cz.pdf/>>
- [6] Rockwell Automation, MicroLogix 1200 Programmable Controllers, User Manual. Dostupné na internete: <http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/1762-um001_en-p.pdf/>
- [7] Rockwell Automation, MicroLogix Ethernet Interface 1761-NET-ENI and 1761-NET-ENIW, User Manual. Dostupné na internete: <http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/1761-um006_en-p.pdf/>
- [8] Rockwell Automation, RSLinx Classic, Getting Results Guide. Dostupné na internete: <http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/gr/linux-gr001_en-p.pdf/>

- [9] Rockwell Automation, *RSLogix 500*, Product Profile. Dostupné na internete: <http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/pp/lg500-pp001_-en-e.pdf>
- [10] Harsányi, L., Murgaš, J., Rosinová, D., Kozáková, A., *Teória automatického riadenia*, STU Bratislava, 1998.
- [11] Krokavec, D., Filasová, A. *Diskrétne systémy*. Košice: TU-FEI, 2006. ISBN 80-8086-028-9.
- [12] O. Modrlák, "Základy analýzy a syntézy ve stavovém prostoru," *Teorie automatického řízení II. - Studijní materiály*, Liberec, TU, 2004.
- [13] M. Fikar, "Predictive Control – An Introduction," Bratislava, Slovenská technická univerzita - FCHPT, 1999.
- [14] Clarke, D.W., Mohdani, C., TUFFS, P.S. "Generalized Predictive Control. Part 1 and 2" in *Automatica*, Vol. 23, No.2, 137 – 160, 1987.
- [15] Camacho, E.F., Bordons, C.: "Model Predictive Control". Springer, 1999.
- [16] J.A. Rossiter, J.A. "Model-based Predictive Control: A Practical Approach," CRC Press, 2004, ISBN 0-8493-1291-4.
- [17] J. Roubal "Prediktivní regulátor" - (Příklady ze cvičení – Moderní teorie řízení). Dostupné na internete: <http://support.dce.felk.cvut.cz/pub/roubalj/teaching/MTR/seminars/MTR_cv8_mpc.pdf>
- [18] Belda¹, K., Böhm¹, J., Valášek², M. "Model-Based Control for Parallel Robot Kinematics,"
¹Ústav teorie informace a automatizace AV ČR,
²ČVUT – FS, Praha, 2004.
- [19] J. Chuman "Aplikace moderních metod řízení na modelu Vodárna TQ", Diplomová práce, ČVUT-FE, Praha, 2008.
- [20] Š. Jajčišin, "Aplikácia moderných metód v riadení nelineárnych výukových modelov", Diplomová práca, FEI TU, Košice, 2010.