

# Adaptívne LQ riadenie laboratórneho výmenníka tepla

Luboš Čirka, Miroslav Fikar

## Úvod

Príspevok sa venuje adaptívnemu lineárno-kvadratickému (LQ) riadeniu laboratórneho výmenníka tepla LTR700, ktorý sa nachádza na Katedre informatizácie a riadenia procesov FCHPT STU v Bratislave [1], pomocou riadiaceho systému dSPACE [2]. Nelineárny model výmenníka tepla je pre adaptívne riadenie aproximovaný externým SISO (Single-input Single-output) lineárnym modelom pomocou rekurzívnej identifikácie. Riadiaci algoritmus je založený na polynomicom prístupe [3], [4].

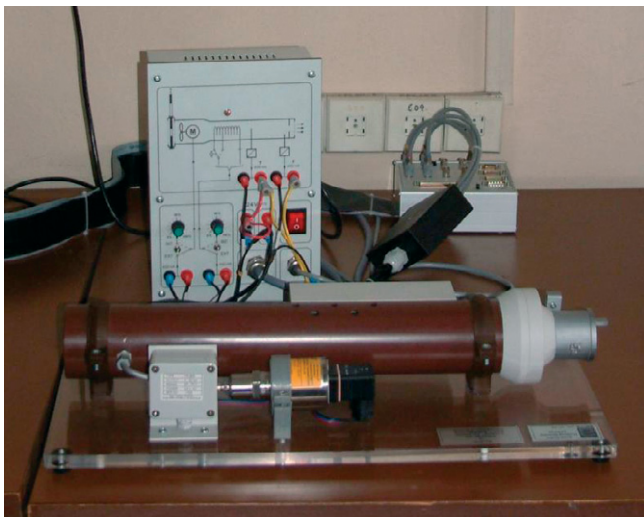
Hlavným cieľom tohto príspevku je prezentovať návrh adaptívneho LQ riadenia zahŕňajúceho Youlovu-Kučerovu (YK) parametrizáciu regulátora a demonštrovať jeho vlastnosti na laboratórnom výmenníku tepla. Adaptívny algoritmus riadenia je zložený z dvoch častí, ktoré sa vykonávajú v každom kroku. V prvej časti je identifikovaný neznámy externý lineárny model (ELM) objektu riadenia použitím modifikovanej identifikačnej metódy LDDIF [6]. V druhej časti sa identifikované parametre riadeného objektu využívajú na riešenie LQ úlohy, ktorej výsledkom je taký kompenzátor  $Q$  ( $Q_r$ ,  $Q_y$ ), že úplný (parametrizovaný) regulátor minimalizuje nekonvenčné kvadratické kritérium.

Návrh LQ riadenia vedie k riešeniu diofantických rovníc a rovníc spektrálnej faktorizácie. Kvadratický funkcionál je modifikovaný na základe praktických potrieb riadenia procesov, ktoré ukazujú, že vždy nestačí obmedzovať iba akčnú a výstupnú veličinu (resp. regulačnú odchýlku), ale veľmi často musíme obmedzovať aj zmeny akčnej veličiny [5].

## 1. Opis výmenníka tepla

Laboratórny výmenník tepla LTR700 je produktom nemeckej firmy Amira [7]. LTR700 sa skladá z dvoch základných častí (obr. 1):

- mechanickej zostavy (trubice), ktorá obsahuje ventilátor a ohrevnú špirálu, diferenciálny tlakový snímač a snímač teploty;
- skrinky so zdrojom, ktorá obsahuje prepínač medzi internými a externými signálmi a 4 – 20 mA vstupy a výstupy.



Obr.1 Laboratórny výmenník tepla LTR700

LTR700 má dva merateľné výstupné signály (teplota, prietok vzduchu), ako aj dva vstupné signály (otáčky ventilátora, ohrev). Práve preto sa používa na skúšanie dynamických vlastností riadeného systému pri rôznych štruktúrach riadenia, pričom teplota a prietok vzduchu sú riadené veličiny.

Jednoduché riadiace obvody:

- riadenie prietoku vzduchu pri neriadenej teplote;
- riadenie teploty pomocou ohrevu pri neregulovanom prietoku vzduchu;
- riadenie teploty pomocou otáčok ventilátora pri neregulovanom ohreve.

Kaskádové riadiace obvody:

- riadenie teploty ako primárnej riadenej veličiny a prietoku ako sekundárnej riadenej veličiny pomocou manipulácie s ohrevom;
- riadenie teploty ako primárnej riadenej veličiny a prietoku ako sekundárnej riadenej veličiny pomocou manipulácie s otáčkami ventilátora.

## 1.2 Matematický model

Matematický model objektu závisí od konkrétnej konfigurácie. Rôznymi kombináciami môžeme získať modely s dynamikami prvého a druhého rádu s dopravným oneskorením. My sme sa rozhodli pre riadenie prietoku vzduchu pri neriadenej teplote. Parametre, ako aj štruktúra prenosovej funkcie sa získali z experimentov pri teplote  $\approx 50$  °C a prietoku vzduchu  $\approx 50$  % (pracovný bod). Výsledná prenosová funkcia opisuje zmeny vstupného a výstupného signálu v pracovnom bode.

$$G(s) = \frac{\text{prietok vzduchu [\%]}}{\text{otáčeta ventilátora [\%]}} = \frac{0,9}{1,3s+1} e^{-0,1s} \quad (1)$$

## 2. Externý lineárny model

Externý lineárny model je reprezentovaný diferenciálnou rovnicou:

$$A(s)y(t) = B(s)u(t) + A(s)d(t) \quad (2)$$

kde  $y(t)$ ,  $u(t)$  a  $d(t)$  sú riadená, riadiaca a poruchová veličina. Predpokladáme, že  $\deg B(s) \leq \deg A(s)$  (t. j. prenos systému je rýdži) a  $A(s)$ ,  $B(s)$  sú nesúdeliteľné polynómy. Po Laplaceovej transformácii s uvažovaním nulových začiatkových podmienok (pri riadení zo základného ustáleného stavu je tento predpoklad oprávnený) je ELM v komplexnej oblasti vyjadrený ako:

$$A(s)y(s) = B(s)u(s) + A(s)d(s) \quad (3)$$

## 3. Identifikácia parametrov ELM

Vzhľadom na to, že derivácie vstupu a výstupu nemôžu byť priamo merateľné, zavádzajú sa filtrované veličiny vzťahmi:

$$F_f(s)u_f(t) = u(t) \quad F_f(s)y_f(t) = y(t) \quad (4)$$

kde  $F_f$  je stabilný polynóm a platí  $\deg A \leq \deg F_f$ .

Prenosové vlastnosti medzi filtrovanými a nefiltrovanými veličinami sú rovnaké. Ak sú filtrované veličiny spolu s ich deriváciami merané na výstupe z filtrov (4) v diskrétnych časových okamihoch

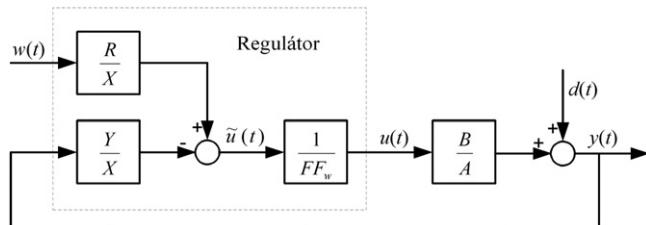
hoch  $t_k = kT_s, k = 0, 1, \dots$ , kde  $T_s$  je perióda vzorkovania, môžu byť koeficienty polynómov  $A, B$  rekurzívne odhadované (za predpokladu nulovej strednej hodnoty  $d$ ) z rovnice:

$$y(t_k) = b_0 u_f(t_k) + b_1 u_f^{(1)}(t_k) + \dots + b_m u_f^{(m)}(t_k) - a_1 y_f^{(1)}(t_k) - \dots - a_n y_f^{(n)}(t_k) \quad (5)$$

niektorou z metód priebežnej identifikácie. V príspevku bol použitý algoritmus podľa [6].

#### 4. Návrh regulátora

Uvažujme spätnoväzbový obvod zobrazený na obr. 2.



Obr.2 Bloková schéma 2DoF spätnoväzbového obvodu

Základnou úlohou optimálneho deterministického sledovania je navrhnuť regulátor, ktorý zabezpečí základné požiadavky kladené na spätnoväzbový obvod:

- stabilita spätnoväzbového obvodu,
- asymptotické sledovanie žiadanej hodnoty,
- zároveň minimalizuje kvadratický funkcionál:

$$\int_0^{\infty} (\varphi \tilde{u}^2(t) + \psi e^2(t)) dt \quad (6)$$

kde  $e(t) = w(t) - y(t)$  je regulačná odchýlka a  $\varphi > 0, \psi \geq 0$  sú váhové koeficienty. Žiadaná hodnota výstupu  $w(t)$  a poruchová hodnota  $d(t)$  sú definované vzťahmi:

$$F_w w = H_w \quad (7)$$

$$F d = H \quad (8)$$

kde  $H_w, F_w$  a  $H, F$  sú dvojice nesúdeliteľných polynómov a  $\deg H_w \leq \deg F_w$  a  $\deg H \leq \deg F$ .

#### 4.1 Nominálny regulátor

Nominálny 2DoF regulátor (regulátor s 2 stupňami voľnosti), ktorý stabilizuje lineárny systém je opísaný vstupno-výstupným modelom v tvare:

$$X\tilde{u} = R w - Y y \quad (9)$$

kde  $X, Y$  a  $R$  sú dvojice nesúdeliteľných polynómov a  $X(0)$  je nenulový.

**Poznámka:** ak  $R = Y$ , potom ide o prípad jednoduchého spätnoväzbového riadenia (1DoF).

Asymptotické sledovanie referenčného signálu (7) a odstránenie poruchového signálu (8) zabezpečuje predkompenzátor:

$$F F_w u = \tilde{u} \quad (10)$$

ktorý je súčasťou regulátora.

Polynómy nominálneho regulátora  $X, Y$  a  $R$  získame riešením polynómových diofantických rovníc:

$$A F X + B Y = M_1 M_2 = M \quad (11)$$

$$F_w W + B R = M_1 M_2 = M \quad (12)$$

kde  $M_1$  a  $M_2$  sú stabilné polynómy a  $\deg H_w \leq \deg F_w$  a  $\deg H \leq \deg F$ .

#### 4.2 YK parametrizácia regulátora

Polynómové diofantické rovnice (11) a (12) sú lineárne, a preto ich riešenie je dané súčtom partikulárneho riešenia úplnej rovnice

ce a riešenia skrátenej rovnice (s nenulovou pravou stranou). Všeobecné riešenie rovníc sa dá vyjadriť v tvare:

$$Y_q = M_1 Y + M_2 A F F_w Q_y \quad (13)$$

$$X_q = M_1 X - M_2 B Q_y \quad (14)$$

$$R_q = M_1 R + M_2 F_w Q_r \quad (15)$$

kde  $X, Y$  a  $R$  sú parametre nominálneho regulátora a  $Q_y$  a  $Q_r$  sú YK parametre.

Riešením polynómových rovníc

$$\psi D_f B^* F_w X - \phi D_f A^* F^* F_w F_w Y = Q_{yn} D_c^* F_w + M V^* \quad (16)$$

$$\psi D_r B^* M - D_r D_c D_c^* R = Q_{rn} D_c^* F_w + M F_w^+ T^* \quad (17)$$

získame optimálne YK parametre

$$Q_y = \frac{Q_{yn}}{D_c D_f} \frac{M_1}{M_2} \quad Q_r = \frac{Q_{rn}}{D_c D_r} \frac{M_1}{M_2} \quad (18)$$

ktoré minimalizujú kvadratický funkcionál (6). Polynómy  $D_c, D_f$  a  $D_r$  sa získali z rovníc spektrálnych faktorizácií:

$$D_c^* D_c = \phi A^* F^* F_w^* A F F_w + \psi B^* B \quad (19)$$

$$D_f^* D_f = A^* H^* A H \quad (20)$$

$$D_r^* D_r = H_w^* H_w \quad (21)$$

Podrobnosti boli publikované v [4].

#### 5. Experiment

Na demonštrovanie vlastností adaptívneho riadenia daného výmenníka tepla sa vykonali dva experimenty. Cieľom adaptívneho riadenia bolo sledovať žiadaný prietok na výstupe z výmenníka tepla.

V oboch experimentoch je prenosová funkcia nominálneho modelu výmenníka tepla v tvare

$$G(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{b_0}{a_1 s + 1} = \frac{0,9}{1,3s + 1} \quad (22)$$

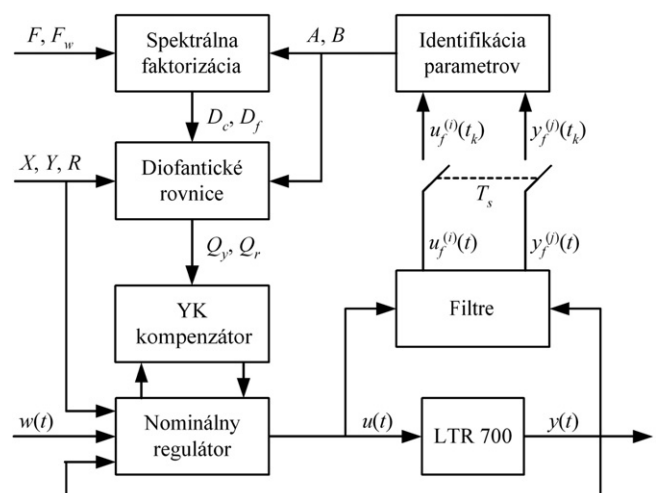
a prenosové funkcie nominálneho regulátora sú určené v tvare:

$$C_y(s) = \frac{Y(s)}{F(s)X(s)} = \frac{y_1 s + 1}{(x_1 s + x_0)s} = \frac{1,3s + 1}{(0,4111s + 0,9165)s} \quad (23)$$

$$C_r(s) = \frac{R(s)}{F(s)X(s)} = \frac{r_0}{(x_1 s + x_0)s} = \frac{1}{(0,4111s + 0,9165)s} \quad (24)$$

čas [s]	20	40	60	80	100	120	140
prietok vzduchu [%]	40	20	45	70	50	30	45

Tab.1



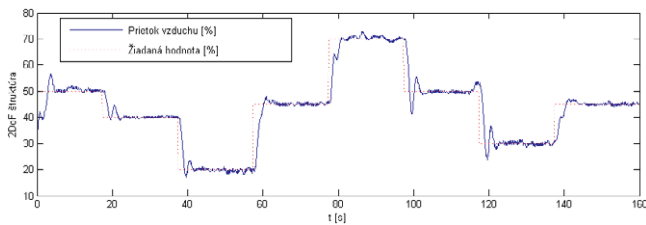
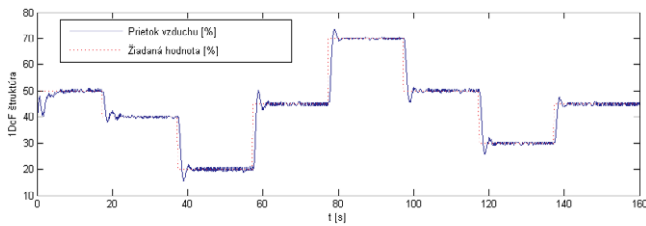
Obr.3 Schéma adaptívneho riadenia

Úlohou je:

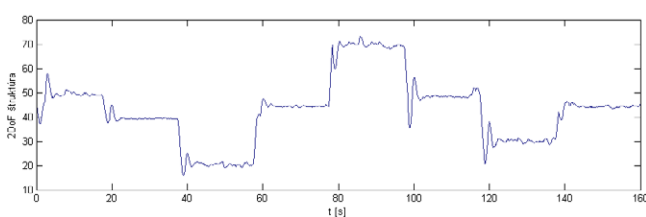
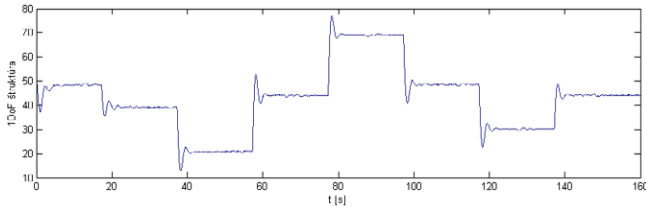
- v každom kroku identifikovať parametre modelu objektu na základe vstupných (otáčky ventilátora) a výstupných (prietok vzduchu) údajov; štruktúra identifikovaného prenosu je zvolená v tvare (22),
- navrhnúť nový YK parameter regulátora  $Q$  ( $Q_r$ ,  $Q_y$ ).

Žiadaná hodnota prietoku vzduchu je zvolená tak, ako to uvádza tab. 1. Riadenie je realizované podľa schémy zobrazenej na obr. 3.

Akčná veličina (otáčky ventilátora) je obmedzená intervalom (0 %, 100 %). Váňové koeficienty pri kvadrátoch regulačnej odchýlky a derivácie akčnej veličiny sú  $\varphi = 0,1$  a  $\psi = 1$ . Získané časové priebehy prietoku vzduchu na výstupe z výmenníka tepla (pre oba prípady) sú porovnané na obr. 4. Obr. 5 a 6 zobrazujú priebehy akčnej veličiny (otáčok ventilátora) a priebežnej identifikácie parametrov ELM.



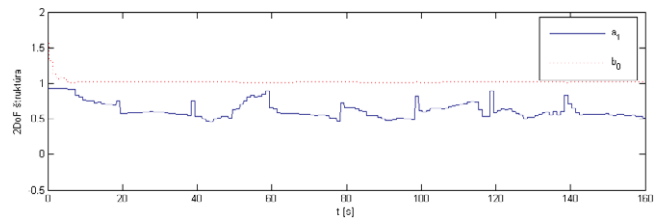
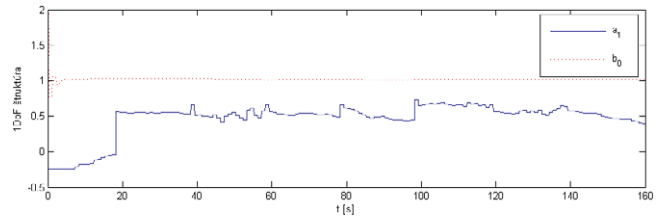
Obr.4 Priebeh riadenia prietoku vzduchu



Obr.5 Priebeh otáčok ventilátora

## Záver

V príspevku bolo prezentované adaptívne LQ riadenie prietoku vzduchu na výstupe laboratórneho výmenníka tepla LTR700 pomocou YK parametrizácie regulátora. Výsledky oboch experimentov dokumentujú opodstatnenosť uvedeného postupu.



Obr.6 Priebeh identifikácie parametrov ELM

Príspevok vznikol s grantovou podporou grantovej agentúry VEGA MŠ SR a SAV pre projekty č. 1/0135/03 a 1/1046/04.

## Literatúra

- [1] M. BAKOŠOVÁ, M. KOSTENDOVÁ, M. KARŠAIOVÁ AND M. ONDROVIČOVÁ. Selected Topics in Modelling and Control. Chap. Adaptive lambda-tracking of a laboratory fan heater, 142 – 147, Vol. 4, STU Press, 2004.
- [2] ControlDesk Experiment Guide. dSPACE GmbH, Paderborn, Germany, 2001.
- [3] L. ČIRKA, M. FIKAR AND J. MIKLEŠ: A deterministic LQ tracking problem: Parametrisation of the controller. *Kybernetika*. 38 (4), 469 – 478, 2002.
- [4] L. ČIRKA, M. FIKAR AND J. MIKLEŠ: Youla – Kučera parameterisation approach to LQ tracking and disturbance rejection problem. In: Proc. 16<sup>th</sup> IFAC World Congress, Prague, Czech Republic, 2005.
- [5] P. DOSTÁL, A. MÉSZÁROS AND J. MIKLEŠ: A modified LQ tracking problem. *Journal of Electrical Engineering* 45 (4), 129 – 133, 1994.
- [6] R. KULHAVÝ AND M. KÁRNÝ: Tracking of slowly varying parameters by directional forgetting. In: Proc. 9<sup>th</sup> IFAC World Congress, Budapest, Hungary, 79 – 83, 1984.
- [7] LTR700, Laboratory Setup Airstream and Temperature Control Plant. Amira GmbH, Technologiezentrum Duisburg, Germany, 2000.

Ing. Ľuboš Čirka, PhD.

doc. Dr. Ing. Miroslav Fikar

Slovenská technická univerzita v Bratislave  
Fakulta chemickej a potravinárskej technológie  
Katedra informatizácie a riadenia procesov  
Tel.: 02/52 49 52 69

e-mail: lubos.cirka@stuba.sk

miroslav.fikar@stuba.sk