

Návrh diagnostického systému pre estimáciu chýb senzorov laboratórneho modelu hydraulického systému

Design of a diagnostic system for sensor fault estimation of hydraulic laboratory model

Anna JADLOVSKÁ, Matej ORAVEC, Miroslav MURÍN

Katedra kybernetiky a umelej inteligencie, Fakulta elektrotechniky a informatiky,
Technická univerzita v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, Slovenská Republika,
E-mail: anna.jadlovská@tuke.sk, matej.oravec@tuke.sk, miroslav.murín@student.tuke.sk

Abstrakt: Článok sa venuje problematike návrhu diagnostického systému pre estimáciu chýb senzorov laboratórneho modelu hydraulického systému založeného na známom matematickom modeli. V článku je prezentovaná metóda návrhu filtrov pre jednotlivé senzory, využívajúce princípy Kalmanovej filtrácie použité pre estimáciu stavov systému a veľkosti chyby. S využitím výstupov jednotlivých filtrov je navrhnutý diagnostický systém schopný detegovať, izolovať a odhadnúť pretrvávajúce chyby senzorov hydraulického systému. Časť článku sa stručne venuje určeniu matematického modelu s využitím experimentálnej identifikácie a návrhu riadenia za pomoci identifikovaných matic diskrétného stavového popisu a ich implementácii do programového prostredia MATLAB/Simulink. Navrhnutý diagnostický systém je overený sériou experimentov, ktorých výsledky sú vyhodnotené v poslednej časti tohto článku.

Abstract: The article deals with the design of a sensor fault diagnosis system based on known mathematical model of a hydraulic laboratory model. The article presents a method of filter design for each sensor, using the Kalman filtering principles used to estimate system states and sensor fault. Using the outputs of the filters, a diagnostic system is capable to detect, isolate and estimate the persistent fault of the hydraulic system sensors. Part of the article briefly focuses on the determination of the mathematical model using experimental identification and optimal state control design using identified matrices of the discrete state space model and their implementation into the MATLAB / Simulink programming environment. The proposed diagnostic system is validated by a series of experiments, the results of which are evaluated in the last part of this article.

ÚVOD

Vzhľadom na to, že technologické procesy sa stávajú čoraz zložitejšími, výrazne vzrástli aj požiadavky na bezpečnosť riadenia. Platí to predovšetkým pre aplikácie kritické z hľadiska ochrany ľudských životov, majetku, ale aj životného prostredia. Bez ohľadu na to z akých odolných materiálov a dômyselne prepracovaných komponentov je systém zložený, disponuje len obmedzenou životnosťou. Jediný spôsob, ako zabezpečiť spoľahlivú prevádzku systému je teda monitorovať a priebežne diagnostikovať jednotlivé komponenty systému, bez nutnosti ich demontáže.

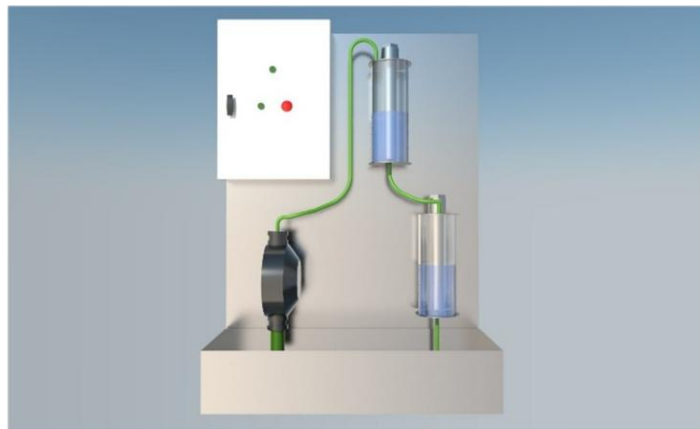
Jeden z hlavných cieľov tohto článku je priblížiť problematiku návrhu diagnostického systému, ktorý dokáže výrazným spôsobom zvýšiť spoľahlivosť celého systému bez jeho deštrukcie, alebo demontáže. Výhodou navrhovanej metódy diagnostiky je schopnosť detekcie, izolácie a odhadu chyby senzorov aj v prípade prítomnosti šumu v procese. Základným predpokladom pre návrh diagnostického systému je známy matematický model systému a navrhnutý algoritmus riadenia úspešne realizujúci ciele riadenia.

Úvodná kapitola článku je venovaná príprave a realizácii experimentálnej identifikácie matematického modelu hydraulického systému a jeho krátkemu popisu. V druhej kapitole je prezentovaný návrh stavového optimálneho algoritmu riadenia s integrátorom použitým pre riadenie.

Tretia a štvrtá kapitola tvorí jadrovú časť článku a je zameraná na návrh algoritmov pre zostavenie diagnostického systému estimujúceho chyby senzorov a jeho implementácii do programového prostredia MATLAB/Simulink. Článok tiež sumarizuje a vyhodnocuje výsledky experimentov na simulačnom ako aj reálnom laboratórnom modeli.

1. EXPERIMENTÁLNA IDENTIFIKÁCIA LABORATÓRNEHO MODELU HYDRAULICKÉHO SYSTÉMU

Uvažovaný laboratórny model hydraulického systému zobrazený na Obr. 1, sa nachádza v laboratóriu Centra moderných metód riadenia a priemyselnej informatiky na Katedre kybernetiky a umelej inteligencie FEI TU Košice <<http://kyb.fei.tuke.sk/laboratoria/modely/hyd.php>>.



Obr. 1 Schéma mechanického prevedenia laboratórneho modelu

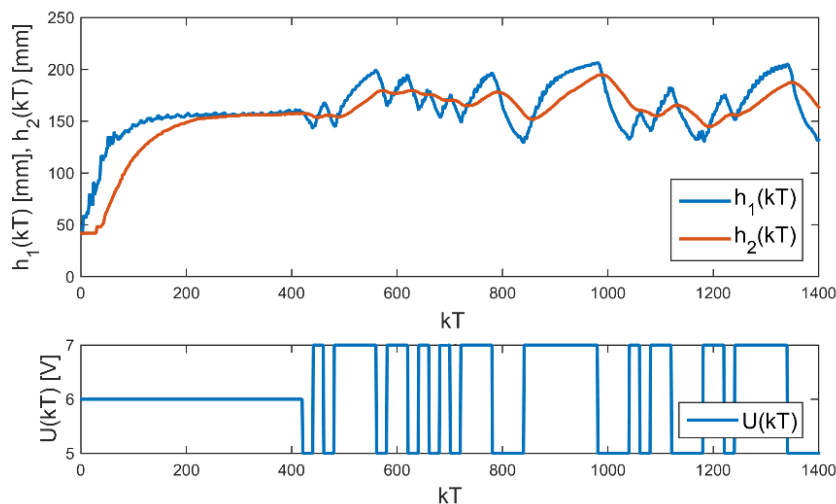
Model pozostáva z dvoch valcových nádob bez interakcie umiestnených pod sebou navzájom prepojených hadičkou. Kvapalina je do prvej nádoby privádzaná $q_0(t)$ z vaničky za pomoci membránového čerpadla. Pod vplyvom hydrostatického tlaku preteká cez hadičku do druhej nádoby $q_1(t)$ a následne vyteká späť do vaničky $q_2(t)$ [1].

| | |
|--|----------------|
| <i>Fyzikálne Parametre:</i> | |
| S_1 – obsah kolmého prierezu 1. nádoby | $[mm^2]$ |
| S_2 – obsah kolmého prierezu 2. nádoby | $[mm^2]$ |
| s_1 – obsah kolmého prierezu výtokového otvoru z 1. nád. | $[mm^2]$ |
| s_2 – obsah kolmého prierezu výtokového otvoru z 2. nád. | $[mm^2]$ |
| g – gravitačné zrýchlenie | $[mms^{-2}]$ |
| h_{max} – maximálna výška hladín v oboch nádobách | $[mm]$ |
| <i>Fyzikálne veličiny:</i> | |
| $q_0(t), q_1(t)$ – prítok do 1. a 2. nádrže | $[mm^3s^{-1}]$ |
| $q_1(t), q_2(t)$ – voľný odtok z 1. a 2. nádrže | $[mm^3s^{-1}]$ |
| $h_1(t), h_2(t)$ – výška hladín v 1. a 2. nádrži | $[mm]$ |
| $U(t)$ – napätie privádzané na frekvenčný menič | $[V]$ |

Tab. 1 Tabuľka parametrov a fyzikálnych veličín hydraulického systému

Zmenu frekvencie motora čerpadla zodpovedného za zmenu prítoku riadi frekvenčný menič *Allen-Bradley Power Flex 40*, ktorý je priamo pripojený na vstupno-výstupnú analógovú kartu PLC automatu *Allen-Bradley Micrologix 1200*. Vstupom do systému je privádzané napätie $U(t)$ na frekvenčný menič generované z rozsahu $U = < 0 - 10V >$ a výstupom sú aktuálne výšky hladín v nádobách $h_1(t), h_2(t)$ [1].

V prípade identifikovania laboratórneho modelu hydraulického systému pomocou experimentálnej identifikácie je nutné zvoliť vhodný pracovný bod v okolí ktorého chceme systém riadiť a periódu vzorkovania pre jeho diskretizáciu. Zvolený pracovný bod je charakterizovaný nasledovným vstupom a výstupom $PB = \{u_0 [V]; y_{10} [mm]; y_{20} [mm]\} = \{6; 158,5; 157,5\}$ pri perióde vzorkovania $T_s = 1 [s]$. Časovú odozvu laboratórneho modelu hydraulického systému na vstupný pseudo-náhodný signál zobrazuje Obr. 2 [1].



Obr. 2 Odozva laboratórneho modelu na pseudo-náhodný binárny signál

Pred identifikovaním je nutné odstrániť nábeh systému do pracovného bodu, normovať získané dáta a na záver ich rozdeliť na tréningové a testovacie dáta. Samotná identifikácia, ako aj predspracovanie údajov je realizované v užívateľskom rozhraní *System Identification Tool*, ktoré je súčasťou programového prostredia MATLAB. Pre nájdenie výsledného matematického modelu je využité štruktúra stavového popisu s kanonickou formou výstupnej matice. Odhad parametrov modelu prebehol s využitím metódy najmenších štvorcov, minimalizujúce kvadratické odchýlky od požadovanej rovnice. Výsledný odchýlkový model je popísaný nasledovným diskretným stavovým popisom [3]:

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

kde $\Delta x(k) = x(k) - x_0$ predstavuje vektor odchýlok vnútorných stavov, $\Delta u(k) = u(k) - u_0$ predstavuje odchýlku vstupnej veličiny, $\Delta y(k) = y(k) - y_0$ predstavuje vektor odchýlok výstupov a A_d, B_d, C_d sú matice diskretného stavového popisu dané vzťahom (2), získané experimentálnou identifikáciou pri perióde vzorkovania $T_s = 1 [s]$ [1].

$$A_d = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}, B_d = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}, C_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, T_s = 1 [s] \quad (2)$$

Identifikovaný matematický model v diskretnom tvare aproximuje dynamické správanie sa reálneho laboratórneho modelu zobrazené na Obr. 2 s presnosťou prevyšujúcou 93%. Matice diskretného stavového popisu (2) sú v nasledovnej kapitole použité pre návrh stavového optimálneho riadenia s integrátorom regulačnej odchýlky.

2. NÁVRH STAVOVÉHO OPTIMÁLNEHO RIADENIA PRE LABORATÓRNY MODEL HYDRAULICKÉHO SYSTÉMU

Návrh stavového optimálneho algoritmu riadenia k identifikovanému procesu tvorí základ pre návrh diagnostického systému prezentovaného v nasledovnej kapitole. Úlohou stavového optimálneho riadenia s integrátorom je nájsť také výsledné riadenie, ktoré úspešne realizuje stanovené ciele riadenia, pričom minimalizuje kritérium optimálneho riadenia (5). Algoritmus optimálneho riadenia vychádza z matíc diskretného stavového popisu dynamického systému v tvare (2). Modifikovaný algoritmus stavového riadenia s integrátorom je rozšírený o integrátor regulačnej odchýlky, ktorého diskretné vyjadrenie je nasledovné [2]:

$$x_i(k+1) = x_i(k) + T_s(w(k) - y(k)) \quad (3)$$

Cieľom návrhu je návrh matice spätnoväzobného zosilnenia K stavového riadenia vyjadreného zákonom riadenia (4),

$$\Delta u(k) = -K \begin{bmatrix} \Delta x(k) \\ x_i(k) \end{bmatrix} = -K \Delta z(k) \quad (4)$$

ktoré minimalizuje danú kritériálnu funkciu zohľadňujúca rozšírený stavový vektor v tvare:

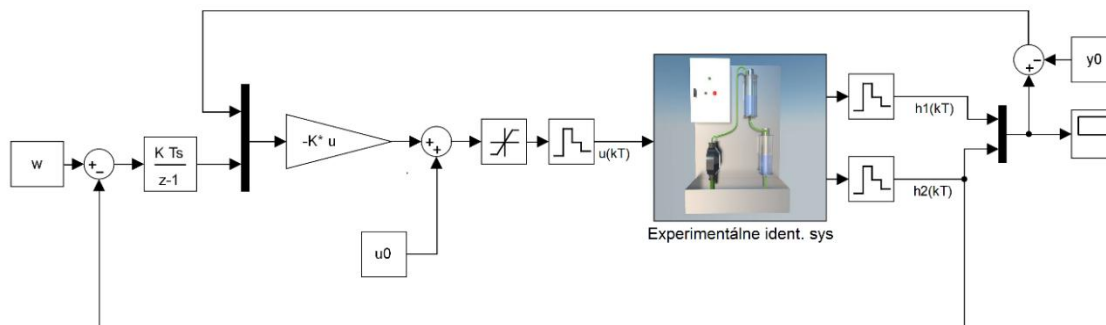
$$J = \sum_{k=1}^{\infty} \{ \Delta z^T(k) Q \Delta z(k) + \Delta u^T(k) R \Delta u(k) \} \quad (5)$$

kde Q – predstavuje rozšírenú váhovú maticu stavov a integrátora regulačnej odchýlky, pričom platí, že $Q \geq 0$,

R – predstavuje váhovú maticu riadenia pričom platí, že $R > 0$ [2].

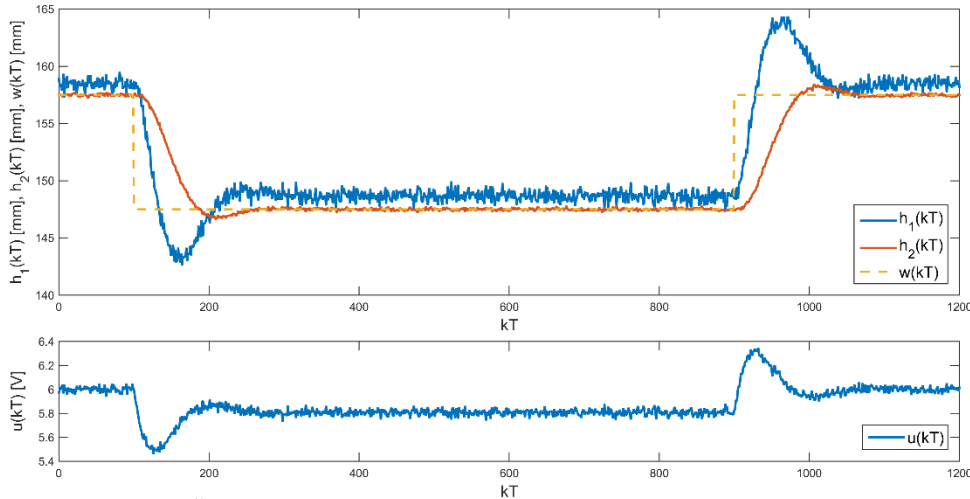
Výpočet samotného spätnoväzobného zosilnenia K v programovacom prostredí *MATLAB* je realizovaný vstavanou funkciou *lqi*. Navrhnutý zákon riadenia (4) zabezpečuje, aby výstup hydraulického systému reagoval na zmenu ustálenej hodnoty.

Navrhnutý algoritmus stavového optimálneho riadenia s integrátorom implementovaný do prostredia Simulink je zobrazený na Obr. 3.



Obr. 3 Zostavená simulačná schéma stavového optimálneho riadenia s integrátorom

Výsledok riadenia nominálneho stavu systému (bez simulovanej chyby senzora) zobrazuje Obr. 4 a slúži predovšetkým pre určenie hodnôt prahov jednotlivých rezíduí, bližšie popísaných v nasledovnej kapitole. Z obrázku je jasné, že navrhnutý algoritmus riadenia realizuje vopred stanovené ciele regulácie, takže môžeme pristúpiť k návrhu diagnostického systému.



Obr. 4 Časová odozva riadenia nominálneho stavu systému (Simulačný model)

3. NÁVRH DIAGNOSTICKÉHO SYSTÉMU PRE LABORATÓRNY MODEL HYDRAULICKÉHO SYSTÉMU

Táto kapitola článku je venovaná návrhu monitorovacieho/diagnostického systému za účelom odhalenia chýb senzorov hydraulického systému. Návrh diagnostického systému predstavuje dôležitý krok k zvýšeniu celkovej spoľahlivosti riadenia, pretože akýkoľvek druh poruchy alebo degradácie môže viesť k zníženiu výkonnosti, prípadne strate funkčnosti samotného zariadenia.

Návrh filtra odhadu chýb je založený na predpoklade chybového modelu hydraulického systému, ktorý je odvodený z diskretného modelu stavového popisu systému. Model systému s poruchou má tvar:

$$\begin{aligned}\Delta x(k+1) &= A_d \Delta x(k) + B_d \Delta u(k) + v(k) \\ \Delta y(k) &= C_d \Delta x(k) + F_s f_s(k) + o(k)\end{aligned}\quad (6)$$

kde diskretný stavový popis systému je rozšírený o maticu chýb senzorov $F_s \in \mathfrak{R}^{m \times q}$ a vektor chýb $f_s(k) \in \mathfrak{R}^q$. Predpokladá sa, že systémový šum $v(k)$ a šum merania $o(k)$ majú charakter nekorelovaného bieleho šumu s rovnakým rozdelením pravdepodobnosti, pričom je ich možné vyjadriť vo forme kovariančných matic $Q = E\{v(k), v^T(k)\} \geq 0$ a $R = E\{o(k), o^T(k)\} > 0$ [4][5].

Pre maticu chýb F_s platí podmienka daná nasledovným vzťahom:

$$\text{rank}(F_s) = q, q < m \quad (7)$$

Vo všeobecnosti sa predpokladá, že počet porúch v diagnostikovanom objekte je menší ako počet meraní, čo je vyjadrené vzťahom (7). Treba poznamenať, že tvar matice distribúcie porúch F_s nie je pevne daný, pretože sa môžu vyskytnúť dva rôzne poruchové stavy popísané nasledovne:

$$F_s \in \{F_{s1}, F_{s2}\} \quad (8)$$

kde jednotlivé výrazy v zátvorke sa odvíjajú od matice výstupu C_d , pričom sú dané ako výber jednotlivých stĺpcov tejto matice vo forme $F_{s1} = [1 \ 0]^T$ a $F_{s2} = [0 \ 1]^T$ [4][5].

Pre odhad chyby snímača definujeme vektor rozšíreného stavu ako:

$$\tilde{x}(k) = \begin{bmatrix} \Delta x(k) \\ f_s(k) \end{bmatrix} \quad (9)$$

kde $f_s(k)$ predstavuje chybu a $\Delta x(k)$ vektor odchýlok stavov. Na základe (9) potom systém (6) s poruchou snímača môže byť upravený do nasledovnej deskriptorovej formy [4][5]:

$$\begin{aligned} E \tilde{x}(k+1) &= \tilde{A} \tilde{x}(k) + \tilde{B} \Delta u(k) + \tilde{G} v(k) \\ \Delta y(k) &= \tilde{C} \tilde{x}(k) + o(k) \end{aligned} \quad (10)$$

kde sú jednotlivé matice vyčíslené podľa vzťahov (11) a I_n predstavuje jednotkovú maticu rozmeru daného rádom systému [4][5].

$$E = \begin{bmatrix} I_n & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \tilde{A} = \begin{bmatrix} A_d & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \tilde{B} = \begin{bmatrix} B_d \\ 0 \end{bmatrix}, \tilde{G} = \begin{bmatrix} I_n \\ 0 \end{bmatrix}, \tilde{C} = [C_d \quad F_s] \quad (11)$$

Pomocou uvedenej sústavy rovníc deskriptorového vyjadrenia (10) je možné estimovať stavy systému a chybu snímača súčasne. Pre ich odhad navrhujeme filter na základe princípov Kalmanovho filtrovania vo forme [4]:

$$\hat{\tilde{x}}(k+1) = T \tilde{A} \hat{\tilde{x}}(k) + T \tilde{B} \Delta u(k) + L(k) (\Delta y(k) - \tilde{C} \hat{\tilde{x}}(k)) + N \Delta y(k+1) \quad (12)$$

kde $\hat{\tilde{x}}(k)$ predstavuje vektor odhadnutých stavov hydraulického systému a chybu snímača. Matice $T \in \mathfrak{R}^{(n+q) \times (n+q)}$, $N \in \mathfrak{R}^{(n+q) \times m}$, $L(k) \in \mathfrak{R}^{(n+q) \times m}$ zo vzťahu (12) určíme podľa nasledovných vzťahov [4]:

$$\begin{aligned} T &= \Phi^{\oplus} \phi_1 + I_{\varphi} (I_{n+q+m} - \Phi \Phi^{\oplus}) \phi_1 \\ N &= \Phi^{\oplus} \phi_2 + I_{\varphi} (I_{n+q+m} - \Phi \Phi^{\oplus}) \phi_2 \end{aligned} \quad (13)$$

kde znak Φ^{\oplus} predstavuje pseudoinverziu matice Φ a zvyšné matice rovníc (13) sú dané [4]:

$$\Phi = \begin{bmatrix} E \\ \tilde{C} \end{bmatrix}, \phi_1 = \begin{bmatrix} I_{n+q} \\ 0 \end{bmatrix}, \phi_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ I_m \end{bmatrix}, I_{\varphi} = \begin{bmatrix} I_{n+q} & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Pre výpočet matice zosilnenia filtra chýb $L(k)$ uvedenú vo vzťahu (16), je nutné zaviesť do odvodenia kovariančnú maticu chyby estimácie $P(k)$ definovanú ako [4]:

$$\begin{aligned} P(k) &= E \{ e(k) e^T(k) \} \\ P(k+1) &= E \{ e(k+1) e^T(k+1) \} \end{aligned} \quad (15)$$

pričom chyba estimácie je určená ako $e(k) = \tilde{x}(k) - \hat{\tilde{x}}(k)$. Zavedením kovariančnej matice $P(k)$ je možné vyjadriť maticu zosilnenia filtra reypočítanú v každom kroku algoritmu [4][5]:

$$L(k) = T \tilde{A} P(k) \tilde{C}^T [\tilde{C} P(k) \tilde{C}^T + R]^{-1} \quad (16)$$

Takto určená matica zosilnenia $L(k)$ minimalizuje stopu definovanej kovariančnej matice $P(k+1)$, aktualizovanú každú iteráciu podľa vzťahu:

$$P(k+1) = T\tilde{A}P(k)(T\tilde{A})^T - L(k)\tilde{C}P(k)(T\tilde{A})^T + T\tilde{G}Q\tilde{G}^T T^T + NRN^T \quad (17)$$

Navrhnutý filter použijeme ako generátor rezíduí pre následnú detekciu, lokalizáciu a izoláciu chýb senzorov hydraulického systému. V prípade, že rezíduum vyhodnotené *Generalized Likelihood Ratio testom* (ďalej uvedené ako *GLR-test*) prekročí prah stanovený maximálnou hodnotou rezíduí nominálneho systému, tak diagnostický systém generuje symptóm poruchy použitý pre lokalizáciu prítomnosti chyby. Rezíduum v kroku k je dané rovnicou (18) [4][5].

$$r(k) = \Delta y(k) - \tilde{C}\tilde{x}(k) \quad (18)$$

kde matica \tilde{C} je rovná $\tilde{C} = [C_d \ F_S]$. Keďže podľa vzťahu (8) predpokladáme dva tvary chybovej matice F_S , je zřejmé, že pre oba senzory je nutné navrhnuť jeden filter. Vyhodnotením rezíduí *GLR-testom* pomocou funkcie detekcie chyby s uvažovaním posúvajúceho sa okna v čase o veľkosti M (19) dostávame výslednú hodnotu rezíduí [4]:

$$r^i(k) = \begin{cases} \max_{1 \leq j \leq k} \left\{ \frac{1}{2} \left[\sum_{j=1}^k (r^i(j) - \mu_0^i) \right]^T \sigma^i \left[\sum_{k=1}^k (r^i(j) - \mu_0^i) \right] \right\}, & \Rightarrow k < M \\ \max_{k-M+1 \leq j \leq k} \left\{ \frac{1}{2} \left[\sum_{j=k-M+1}^k (r^i(j) - \mu_0^i) \right]^T \sigma^i \left[\sum_{j=k-M+1}^k (r^i(j) - \mu_0^i) \right] \right\}, & \Rightarrow k \geq M \end{cases} \quad (19)$$

kde $r^i(k)$ predstavuje vyhodnotenú rezíduum generovanú i -tým filtrom, dvojica štatistických ukazovateľov μ_0^i, σ_0^i je určená zo sekvencie rezíduí nominálneho systému generovaných i -tým filtrom ($i \in \{1,2\}$). Porovnaním vyhodnoteného rezídua $r^i(k)$ s prahovou hodnotou τ^i pre i -ty filter, určenou z rezíduí nominálneho stavu diagnostikovaného objektu pomocou vzťahu (21)

$$\tau^i = c \left(\sup_{\substack{\text{nominal} \\ \text{sys}}} r^i(k) \right), c > 1 \quad (20)$$

vieme lokalizovať chybu senzora generovaním a kombinovaním symptómov chyby s^i podľa tabuľky Tab. 2. Tieto symptómy sú generované podľa podmienok [1][4]:

$$\begin{aligned} r^i(k) > \tau^i &\Rightarrow s^i = 1, \\ r^i(k) \leq \tau^i &\Rightarrow s^i = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

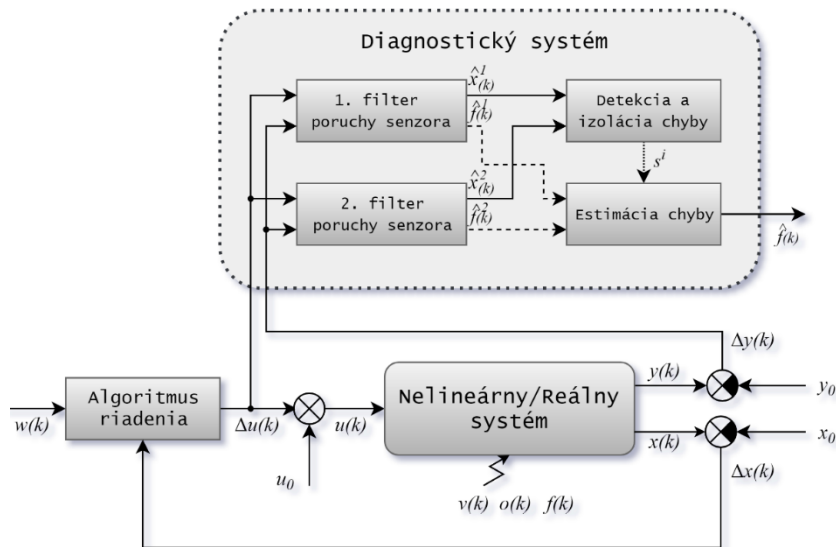
| | Nominálny stav | Chyba 1. senzora | Chyba 2. senzora |
|-------|----------------|------------------|------------------|
| s^1 | 0 | 0 | 1 |
| s^2 | 0 | 1 | 0 |

Tab. 2 Tabuľka lokalizácie a izolácie chyby

Po detekcii a lokalizácii poruchy je vektor estimovanej chyby \hat{f}_{est} izolovaný a tvorí výstup celého diagnostického systému implementovaného do programového prostredia *Simulink*, pre jeho overenie na simulačnom modeli a zároveň je naprogramovaný v prostredí *MATLAB*, za účelom jeho validácie na reálnom laboratórnom modeli hydraulického systému.

4. SIMULAČNÉ A EXPERIMENTÁLNE OVERENIE NAVRHNUTÉHO DIAGNOSTICKÉHO SYSTÉMU

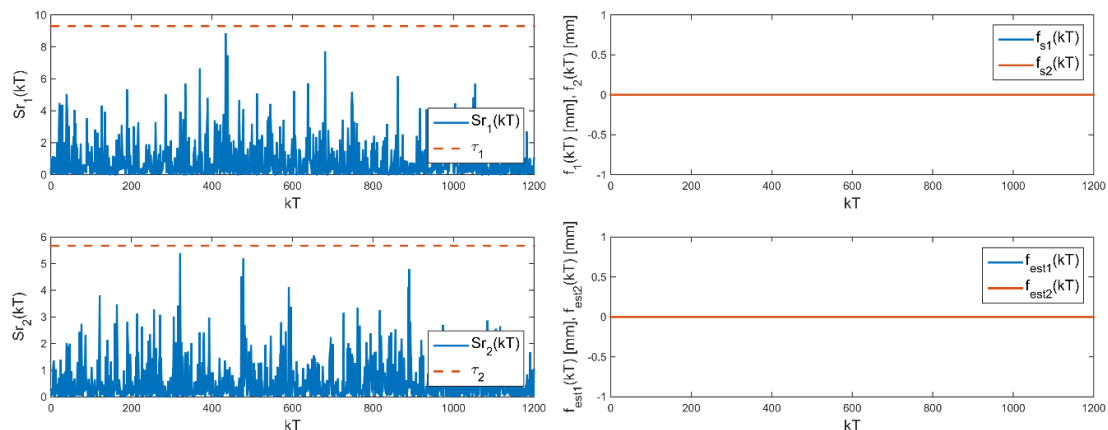
Základnú konceptuálnu schému diagnostického systému implementovanú do prostredia *MATLAB/Simulink* za účelom overenia jeho overenia na simulačnom, ale aj laboratórnom modeli hydraulického systému zobrazuje Obr. 5.



Obr. 5 Všeobecná schéma diagnostického systému estimujúceho chyby snímača[6]

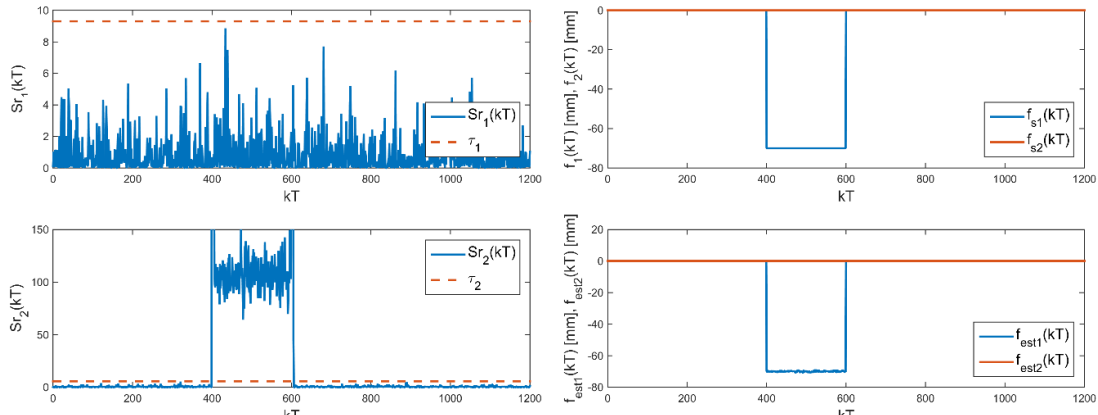
Na uvedenom obrázku je jasne vidieť jednotlivé funkčné celky diagnostického systému, ktoré boli popísané v predošlej kapitole. Implementovaný diagnostický systém je overený pomocou viacerých experimentov. Vo všetkých prípadoch je čas simulácie nastavený na $T_{fin} = 1200[s]$ pri perióde vzorkovania $T_s = 1[s]$.

Prvý experiment predstavuje simuláciu nominálneho stavu modelu hydraulického systému, ktorého odozva je zobrazená na Obr. 4. Vyhodnotené rezíduá, simulovaná $f_S(k)$ ako aj estimovaná chyba $f_{est}(k)$ je zobrazená na Obr. 6.



Obr. 6 Časová odozva rezíduí z *GLR testu*, simulovanej a estimovanej chyby nominálneho systému

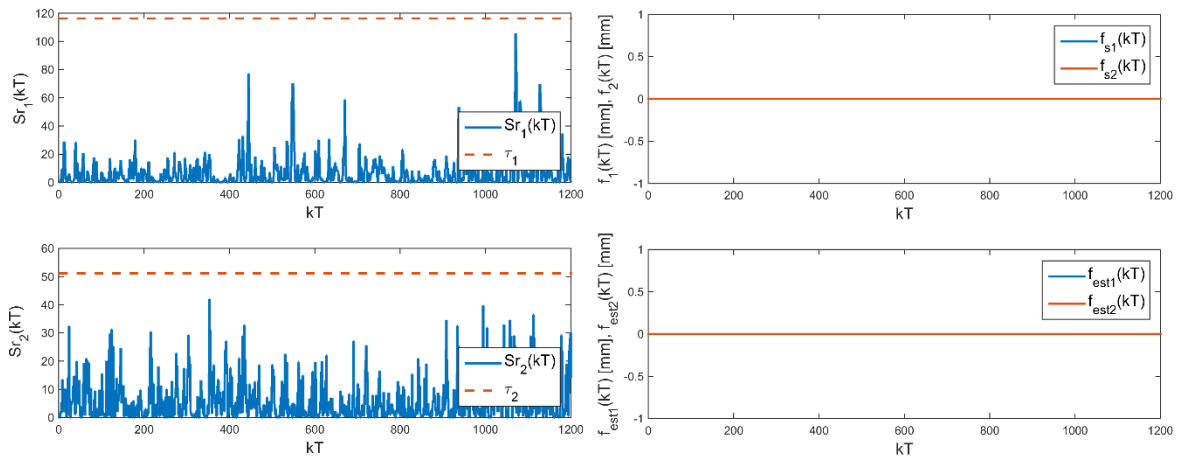
Výsledok simulácie je využitý pre stanovenie prahových hodnôt rezíduí pomocou vzťahu (20). Druhý experiment priamo testuje validitu navrhnutého diagnostického systému. Experiment simuluje dočasnú poruchu prvého senzora o veľkosti $f_{s1}(k) = -70 [mm]$. Táto porucha senzora sa prejaví na systéme skokom v čase $t = 400 [s]$ a stráca účinok v čase $t = 600 [s]$. Časový priebeh vyhodnotených rezíduí, simulovanej $f_{s1}(k)$ a estimovanej chyby $f_{est1}(k)$.



Obr. 7 Časová odozva rezíduí z *GLR testu*, simulovanej a estimovanej chyby poruchového stavu systému

Z priebehu rezíduí je zrejmé, že druhý filter zareagoval na simulovanú chybu prvého senzora $f_{s1}(k)$ a hodnoty jeho rezíduí sa dostali ďaleko nad prah τ_2 , vďaka čomu je podľa tabuľky Tab. 2 odhalená a estimovaná chyba senzora $f_{est1}(k)$. Navrhnutý diagnostický systém úspešne deteguje, lokalizuje a izoluje chybu senzora simulačného modelu hydraulického systému, preto ho overíme aj na laboratórnom modeli.

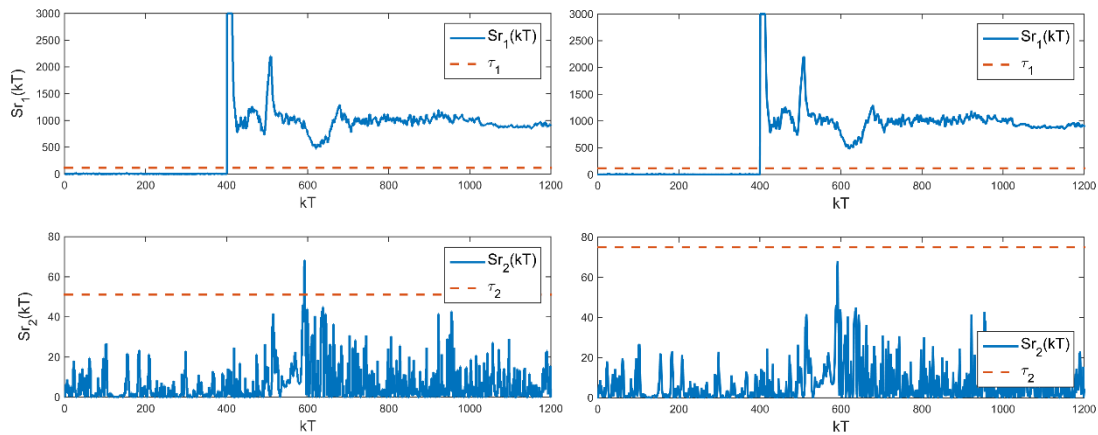
Ďalší experiment predstavuje odozvu nominálneho stavu reálneho laboratórneho modelu. Podobne ako v predošlom prípade uvažujeme totožnú dĺžku experimentu $T_{fin} = 1200$ [s] a periódu vzorkovania $T_s = 1$ [s]. Taktiež platí, že váhové matice filtrov a riadenia, ako aj ostatné parametre simulácie, sú identické s použitými v simulácii. Vyhodnotenú rezíduá, simulovaná $f_s(k)$ a estimovaná chyba $f_{est}(k)$ experimentu je zobrazená na Obr. 8.



Obr. 8 Časová odozva rezíduí z *GLR testu*, simulovanej a estimovanej chyby nominálneho stavu systému

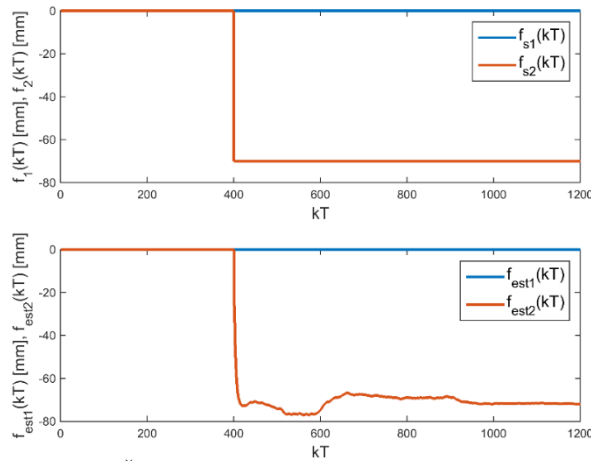
Z obrázka Obr. 8 je zrejmé, že rezíduá sú v prípade reálneho systému ovplyvnené systémovým šumom, pretože sú značne väčšie ako v prípade simulácie. Výsledok experimentu je opäť použitý pre stanovenie prahových hodnôt z rovnice (20).

V poslednom experimente vykonanom za účelom overenia navrhnutého diagnostického systému je simulovaná chyba druhého senzora laboratórneho modelu. Pre jej simulovanie uvažujeme, trvale pôsobiacu chybu $f_{s2}(k) = -70$ [mm] od času $t = 400$ [s]. Vyhodnotením rezíduí z oboch filtrov dostávame nasledovnú dvojicu grafov zobrazených na Obr. 9. Podľa očakávania sa chyba $f_{s2}(k)$ prejavila na hodnotách prvého rezídua, ktoré sú trvalo nad hodnotou prahu τ_1 , čo značí chybu druhého senzora. Nežiadúcim fenoménom je jav, kde niektoré hodnoty druhého rezídua sa tiež dostali nad vopred stanovený prah τ_2 , čo iniciuje vznik falošnej chyby v systéme.



Obr. 9 Časová odozva rezíduí z *GLR testu* s upravením prahu

Pre elimináciu týchto falošných chýb sme pre druhé rezíduum určili novú hodnotu prahu τ_2 , ktorú vypočítané rezídua nepresiahnu a zároveň vhodnú pre prípadnú detekciu chyby prvého senzora. Simulovanú $f_{s2}(k)$ a estimovanú chybu $f_{est2}(k)$ tvoriacu výstup diagnostického systému zobrazuje Obr. 10.



Obr. 10 Časová odozva simulovanej a estimovanej chyby

Výsledky simulácií a experimentov dokazujú, že navrhnutý diagnostický systém na základe princípov Kalmanovho filtrovania úspešne realizuje metódy pre detekciu, lokalizáciu a izoláciu chyby.

ZÁVER

Cieľom tohto článku bol návrh a implementácia algoritmov pre zostavenie diagnostického systému za účelom detekcie, lokalizácie a izolácie chýb senzorov na laboratórnom modeli hydraulického systému nachádzajúceho sa vo výskumnej skupine Centra moderných metód riadenia a priemyselnej informatiky do prostredia *MATLAB/Simulink*. Článok predstavuje metodiku tvorby diagnostického systému, ktorý je založený na princípoch Kalmanovej filtrácie a vyhodnotení rezíduí pomocou *GLR testu*. Algoritmy navrhnutého diagnostického systému, uvedené v článku majú všeobecný charakter a môžu byť použité pre rôzne dynamické systémy.

ZDROJE

- [1] MURÍN, M. Návrh programových modulov pre riadiaci a monitorovací systém modelov fyzikálnych systémov CMMRaPI v simulačnom prostredí Matlab. Diplomová práca. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2018. 106 s.
- [2] JAJČIŠIN, Š., JADLOVSKÁ, A.: Riadenie laboratórneho modelu hydraulického systému. *Electroscope*, 2011, No. 3. ISSN 1802-4564.

- [3] ČERKALA, J., JADLOVSKÁ A.: Experimentálna identifikácia nelineárneho dynamického systému pomocou IDENT Tool v prostredí Matlab. *Electrical Engineering and Informatics*. 2012, ISSN 978-80-553-0460-1.
- [4] ORAVEC, M., JADLOVSKÁ, A. Sensors fault diagnosis algorithm design of a hydraulic system. *Acta Electrotechnica et Informatica*, 2017, Vol. 17, No. 2, p.30–37, ISSN 1338-3957.
- [5] WANG, Z. a kol. Sensor fault estimation filter design for discrete-time linear time-varying systems. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40 (10), p.2364-2369. <hal-00989944>.
- [6] NOURA, H. a kol. *Fault-tolerant Control Systems: Design and Practical Applications*. London: Springer-Verlag, 2009. 233 s. ISBN 978-1-84882-652-6.