

# Návrh metodiky pre diagnostiku modelov fyzikálnych systémov a jej aplikácia do distribuovaného systému riadenia

Ing. Matej Oravec  
Katedra kybernetiky a umelej inteligencie  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Technická univerzita, Košice  
matej.oravec@tuke.sk

doc. Ing. Anna Jadlovská, PhD.  
Katedra kybernetiky a umelej inteligencie  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Technická univerzita, Košice  
anna.jadlovska@tuke.sk

**Abstrakt**—Tento článok prezentuje časť výsledkov dosiahnutých počas PhD. štúdia, ktoré sú spracované v dizertačnej práci *Návrh metodiky pre diagnostiku modelov fyzikálnych systémov a jej aplikácia do distribuovaného systému riadenia*. Hlavným cieľom dizertačnej práce je návrh metodiky na zostavenie diagnostického systému pre modely fyzikálnych systémov, ktorý pozostáva z vhodných algoritmov riadenia a diagnostiky chýb s ich následnou implementáciou do distribuovaného systému riadenia. Vzhľadom na rozdelenie metód diagnostiky chýb sa dizertačná práca zaoberá vybranými metódami diagnostiky chýb, ktoré sú založené na matematickom modeli alebo na dátach získaných meraním sledovanej fyzikálnej veličiny dynamického systému. Metodika návrhu diagnostického systému je v dizertačnej práci overená s využitím simulačných a reálnych laboratórnych modelov tvoriacich experimentálne pracovisko, ktoré je súčasťou Centra moderných metód riadenia a priemyselnej informatiky na KKUI, FEI, TU v Košiciach. Metodika a overenie jej návrhu je spracované v dizertačnej práci v štyroch modelových scenároch, pričom softvérový výstup dizertačnej práce je implementovaný v prostredí *MATLAB/Simulink* s využitím aplikačných toolboxov.

**Keľové slová**—modelovanie, experimentálna identifikácia, optimálne stavové LQ riadenie, prediktívne riadenie, diagnostika chýb snímačov a akčných členov, riadenie s prispôbením sa chybám, diagnostika vibrácií, supervízne riadenie, distribuovaný systém riadenia, simulácia, *MATLAB/Simulink*

## I. ÚVOD

Súčasným trendom vo všetkých priemyselných oblastiach je tvorba stále zložitejších komplexných systémov, od ktorých sa požaduje vysoká výkonnosť, efektivita, kvalita produkcie a zároveň veľká miera spoľahlivosti. Zložitá štruktúra komplexných systémov so sebou nesie veľkú pravdepodobnosť výskytu chýb jeho častí. Dôraz sa preto kladie na sledovanie stavu systému a včasné odhalenie prípadných chýb, aby bola zabezpečená ochrana zdravia ľudí, ktorý systém obsluhujú a rovnako aby sa predišlo veľkému znehodnoteniu strojov i zariadení systému, čo môže výrazne obmedziť výkonnosť celého systému a priniesť finančné straty. Sledovanie stavu systému a včasné odhalenie chýb je úlohou diagnostiky chýb v dynamických systémoch, ktorej je v súčasnej dobe venovaná veľká pozornosť, pretože je užitočným nástrojom pre zabezpečenie vysokej spoľahlivosti celého systému [1].

Dizertačná práca *Návrh metodiky pre diagnostiku modelov fyzikálnych systémov a jej aplikácia do distribuovaného systému riadenia* sa venuje problematike diagnostiky chýb fyzikálnych systémov a jej implementácii v distribuovanom systéme riadenia, ktorý je realizovaný na Katedre kybernetiky a umelej inteligencie (KKUI), FEI, TU. Dizertačná práca pozostáva z dvoch hlavných častí. Prvá časť sa skladá zo štyroch kapitol. V prvej kapitole dizertačnej práce sú uvedené základné poznatky a rozdelenie metód v oblasti diagnostiky chýb fyzikálnych systémov. V druhej a tretej kapitole dizertačnej práce sú popísané predpoklady pre vytvorenie diagnostického systému, ktoré zahŕňajú zostavenie nominálneho modelu fyzikálneho systému, návrh riadenia nominálneho systému a návrh algoritmov diagnostiky chýb fyzikálnych systémov s využitím chybového matematického modelu alebo nameraných dát [2], [3]. V týchto kapitolách je venovaná pozornosť výberu metód diagnostiky chýb vhodných na riešenie cieľov dizertačnej práce v podmienkach laboratórií Centra moderných metód riadenia a priemyselnej informatiky (CMMRaPI) na KKUI. V poslednej kapitole prvej časti dizertačnej práce bude predstavený model distribuovaného systému riadenia, ktorý je implementovaný na KKUI. Pozornosť je zameraná na možnosti diagnostiky chýb na jednotlivých úrovniach DSR. V tejto kapitole je stručne opísaný aj Detector Control System experimentu ALICE v CERN-e, ktorý má podobnú štruktúru ako DSR na KKUI a v implementácii navrhnutého diagnostického systému do DSR využijeme kroky riešenia úloh súvisiacich s monitorovaním stavu detektora experimentu ALICE prostredníctvom DCS [4].

Druhá časť dizertačnej práce pozostáva z dvoch kapitol, ktoré nadväzujú na kapitoly uvedené v prvej časti. Piata kapitola je venovaná návrhu metodiky pre diagnostiku chýb snímačov a akčných členov fyzikálnych systémov založenej na matematických modeloch. Pozostáva z definovania a overenia jednotlivých krokov metodiky s využitím simulačných a reálnych fyzikálnych systémov. V tejto kapitole sú uvedené tri modelové scenáre, ktoré zahŕňajú postup zostavenia matematického modelu fyzikálneho systému, návrh algoritmov jeho riadenia a diagnostického systému na základe metód

popísaných v prvej časti dizertačnej práce. Všetky kroky navrhutej metodiky návrhu diagnostického systému sú simulačne a experimentálne overené a zhodnotené v modelových scenároch. Šiesta kapitola obsahuje návrh metodiky pre diagnostiku chýb fyzikálnych systémov založenej na meraných dátach. Navrhnutá metodika je experimentálne overená na vybranom reálnom laboratórnom modeli a výsledky sú taktiež spracované v modelovom scenári. V siedmej kapitole sú stručne zhrnuté dosiahnuté výsledky prezentované v dizertačnej práci.

## II. CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

V dizertačnej práci je venovaná pozornosť vybraným metódam riadenia a diagnostiky chýb dynamických systémov. Na základe vybraných metód sú navrhnuté algoritmy riadenia a diagnostiky chýb s cieľom ich využitia v podmienkach laboratórií CMMRaPI na KKUI, FEI, TU. Navrhnuté algoritmy riadenia a diagnostiky chýb sú implementované v 5 - úrovňovom modeli distribuovaného systému riadenia s využitím dostupných výpočtových, programových a technických prostriedkov. Predložená dizertačná práca sa zaoberá riešením definovaných cieľov:

- Spracovať teoretické východiská, analyzovať klasické/inteligentné metódy, prístupy a prostriedky pre meranie a vyhodnocovanie parametrov nedeštruktívnej diagnostiky fyzikálnych systémov.
- Vypracovať metodiku pre diagnostiku chýb fyzikálnych systémov s využitím metód založených na modeloch a metód založených na dátach a aplikovať ju do návrhu algoritmov riadenia odolného voči chybám.
- Overiť metodiku návrhu diagnostického a riadiaceho systému na modelových aplikáciách s využitím vhodných riadiacich štruktúr a simulačných nástrojov.
- Vytvoriť experimentálne pracovisko pre realizáciu úloh nedeštruktívnej diagnostiky s aplikačným využitím v riadení kybernetických systémov v rámci štruktúry DSR na školiacom pracovisku.

Pre riešenie definovaných cieľov dizertačnej práce je navrhnutá nasledujúca štruktúra dizertačnej práce, ktorá je znázornená na OBRAZOK.

## III. NÁVRH METODIKY PRE DIAGNOSTIKU FYZIKÁLNYCH SYSTÉMOV

V dizertačnej práci je hlavná pozornosť venovaná návrhu metodiky pre diagnostiku chýb fyzikálnych systémov založenej na matematických modeloch alebo meraných dátach a jej implementácii do distribuovaného systému riadenia na KKUI, FEI, TU.

Jednotlivé kroky návrhu diagnostického systému sú obsiahnuté v troch moduloch:

**Modul A:** Návrh riadenia pre nominálny systém

**Modul B:** Návrh diagnostického systému a jeho simulačné overenie

**Modul C:** Implementácia diagnostického systému do distribuovaného systému riadenia

**Modul A** pozostáva z dvoch hlavných krokov:

A.1 Zostavenie matematického modelu nominálneho systému na základe analytickej/experimentálnej identifikácie. V tomto kroku musí byť splnený dôležitý predpoklad, že matematický model je zostavený pre systém, ktorý nie je ovplyvnený chybou snímačov alebo akčných členov.

A.2 Výber vhodného typu riadenia, návrh algoritmu riadenia s využitím nominálneho modelu fyzikálneho systému a implementácia v zvolenej riadiacej štruktúre s využitím dostupných technologických a výpočtových prostriedkov. Dôležitým krokom je overenie navrhnutého algoritmu riadenia pre rôzne ciele (riadenie do pracovného bodu, riadenie na nový ustálený stav alebo sledovanie zmien žiadaných hodnôt výstupov fyzikálneho systému).

Realizácia uvedených krokov v module A bezprostredne ovplyvňuje činnosť diagnostického systému, pretože výstup riadenia (riadiaci zásah  $\mathbf{u}(k)$ ) sú spolu s meranými výstupmi  $\mathbf{y}(k)$  (získanými zo snímačov) fyzikálneho systému vstupnými veličinami diagnostického systému.

**Modul B** zahŕňa kroky potrebné pre návrh a vytvorenie diagnostického systému, pričom pozostáva z nasledovných krokov:

B.1 Zostavenie chybového matematického modelu fyzikálneho systému s využitím modelu nominálneho systému. Tento krok je podmienený voľbou metódy diagnostiky chýb akčných členov alebo snímačov.

B.2 Výber metódy diagnostiky chýb akčných členov a snímačov, na základe ktorej bude navrhnutý diagnostický systém. Zvolená metóda je využitá pre návrh skupiny estimátorov, ktoré súčasne estimujú stavové veličiny fyzikálneho systému a chyby jednotlivých snímačov, resp. akčných členov. Estimované stavy sú použité pre generovanie rezíduí, ktoré sú dôležité pre detekciu a lokalizáciu chýb fyzikálneho systému.

B.3 Voľba a implementácia vhodnej metódy pre detekciu chýb. Z mnohých metód sme aplikovali GLR test, ktorý vo svojom návrhu vyžaduje znalosť strednej hodnoty a rozptylu jednotlivých rezíduí  $\mathbf{r}(k)$ , ktoré sú ovplyvnené šumom. Na základe rezíduá  $\mathbf{r}(k)$  je určená hodnota funkcie detekcie  $J(k)$ . Rovnako je potrebné stanoviť prahovú hodnotu funkcie detekcie  $J_{th}(k)$ , po prekročení ktorej bude diagnostický systém generovať symptómy chyby. Symptómy chyby sú využité pre lokalizáciu chyby. V prípade online realizácie detekcie a lokalizácie je dôležitým predpokladom voľba správnej veľkosti pohyblivého okna  $M_d$ .

B.4 Funkčnosť diagnostického systému musí byť overená experimentami, ktoré simulujú chybu vybraného akčného člena alebo snímača. Overenie je vhodné vykonať s využitím simulačného modelu fyzikálneho systému.

B.5 Modifikácia zvoleného typu riadenia na riadenie s prispôbením sa vzniknutej chybe snímačov alebo akčných členov v zvolenej riadiacej štruktúre. V prípade

ak chyba nie je fatálna, takáto modifikácia zabezpečí splnenie cieľa riadenia aj napriek výskytu chyby vo fyzikálnom systéme. Takto modifikované riadenie zohľadní výskyt chyby vo fyzikálnom systéme a predíde sa náhlym zmenám riadiaceho zásahu  $u(k)$  alebo dosiahnutiu hraničných hodnôt riadených fyzikálnych veličín (v závislosti od veľkosti a charakteru chyby).

**Modul C** pozostáva z krokov pre návrh supervízneho riadenia a jeho implementácie spolu s diagnostickým systémom v distribuovanom systéme riadenia. Tento modul tvoria nasledovné kroky:

C.1 Supervízne riadenie, ktorého úlohou je posúdenie stavu fyzikálneho systému na základe informácií získaných z diagnostického systému. Supervízne riadenie je založené na stavovom automate, ktorý je potrebné navrhnuť vzhľadom na charakter diagnostikovaného fyzikálneho systému. Supervízne riadenie rozširuje funkcionalitu diagnostického systému.

C.2 Implementácia diagnostického systému a supervízneho riadenia na technologickej a SCADA/HMI úrovni distribuovaného systému riadenia na KKUI s využitím vybudovanej sieťovej infraštruktúry (<http://kyb.fe.i.tuke.sk/laboratoria/infdsr.php>).

V module C je implementovaná aj metodika riešenia úloh na projekte ALICE-CERN (doktorand bol počas doktorandského štúdia riešiteľom projektu: "Experiment ALICE na LHC v CERN-e: Štúdium silno interagujúcej hmoty v extrémnych podmienkach," 2016 - 2020).

Návrh diagnostického systému, ktorý je založený na meraní vibrácií diagnostického systému sme spracovali vo forme metodiky pozostávajúcej z viacerých krokov. Rovnako ako v prípade metodiky diagnostiky chýb založenej na matematickom modeli fyzikálneho systému sú kroky na zostavenie diagnostického systému pre meranie vibrácií zjednotené do troch modulov, pričom odlišnosť je iba v module B.

Modul B pozostáva z dvoch krokov potrebných pre návrh diagnostického systému:

B.1 Predspracovanie a filtrácia šumu signálu získaného z merania vibrácií. Pre odstránenie šumu je možné využiť dolnopásmový filter a pre potlačenie "leakage efektu" váhové okná [5].

B.2 Frekvenčná analýza upraveného vibrodiagnostického signálu s cieľom odhalenia chýb diagnostikovaného fyzikálneho systému. Pre posúdenie stavu fyzikálneho systému je dôležitým predpokladom vykonať experimenty s nominálnym systémom. Ďalšie frekvenčné analýzy sú porovnané a vyhodnotené na základe výsledkov získaných z experimentu s nominálnym systémom.

V dizertačnej práci sú jednotlivé kroky metodiky založenej na matematickom modeli alebo nameraných vibrácií fyzikálneho systému spracované vo forme modelových scenárov, pričom v tomto článku je uvedený Scenár 1 a Scenár 4.

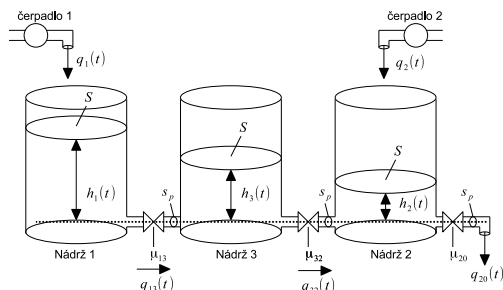
#### IV. SCENÁR 1: DIAGNOSTIKA CHÝB SNÍMAČOVA AKČNÝCH ČLENOV PRE SIMULAČNÝ MODEL HYDRAULICKÝ SYSTÉM

Model hydraulického systému je využívaný v mnohých publikáciách autormi pre overenie metód riadenia a diagnostiky chýb fyzikálnych systémov [1], [6] [7]. Uvedený fyzikálny systém bol využitý v dizertačnej práci na overenie krokov, ktoré sú obsiahnuté v moduloch A, B navrhutej metodiky pre diagnostiku chýb fyzikálnych systémov založenej na jeho matematickom modeli.

##### A. Návrh riadenia nominálneho systému

Pre návrh riadenia nominálneho systému je potrebné poznať systémový opis fyzikálneho systému a na jeho základe zostaviť matematický model s využitím analytickej identifikácie.

Uvažovaný hydraulický systém pozostáva z troch identických valcových nádrží (Obr. 1), ktoré sú navzájom v interakcii. Do prvej a druhej nádrže sú privedené vstupné prietoky  $q_1(t)$  a  $q_2(t)$ . Kvapalina vyteká z druhej nádrže s prietokom  $q_{20}(t)$ . Sledovanými výstupmi systému sú výšky hladín  $h_1(t)$ ,  $h_2(t)$ ,  $h_3(t)$ . Označenie použitých parametrov je uvedené v Tab. I.



Obr. 1. Schematické znázornenie hydraulického systému tri nádrže v interakcii [7]

Tab. I  
PARAMETRE A FYZIKÁLNE VELIČINY HYDRAULICKÉHO SYSTÉMU TRI NÁDRŽE V INTERAKCII

prierez nádrží	$S$	$0.0154[\text{m}^2]$
prierez prietokových otvorov	$s_p$	$5 \times 10^{-5}[\text{m}^2]$
koefficient prietoku - 1. nádrž	$\mu_{13}$	0.5
koefficient prietoku - 3. nádrž	$\mu_{32}$	0.5
koefficient prietoku - 2. nádrž	$\mu_{20}$	0.675
vstupný prietok - 1. nádrž	$q_1(t)$	$[\text{m}^3\text{s}^{-1}]$
vstupný prietok - 2. nádrž	$q_2(t)$	$[\text{m}^3\text{s}^{-1}]$
výstupný prietok - 2. nádrž	$q_{20}(t)$	$[\text{m}^3\text{s}^{-1}]$
výška hladiny - 1. nádrž	$h_1(t)$	[m]
výška hladiny - 2. nádrž	$h_2(t)$	[m]
výška hladiny - 3. nádrž	$h_3(t)$	[m]

##### A.1 Zostavenie matematického modelu nominálneho systému

Na základe systémového opisu (Obr. 1) a bilančných rovníc je zostavený matematický model hydraulického systému v tvare nelineárnych diferenciálnych rovníc:

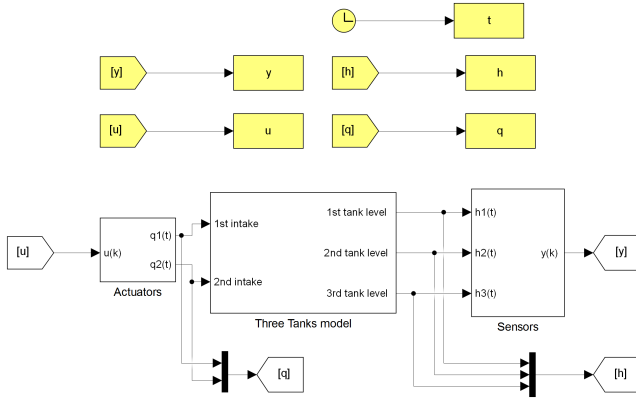
$$\begin{aligned}\frac{dh_1(t)}{dt} &= \frac{1}{S} (q_1(t) - q_{13}(t)) \\ \frac{dh_2(t)}{dt} &= \frac{1}{S} (q_2(t) + q_{32}(t) - q_{20}(t)) \\ \frac{dh_3(t)}{dt} &= \frac{1}{S} (q_{13}(t) - q_{32}(t))\end{aligned}\quad (1)$$

za predpokladu, že  $h_1(t) > h_3(t) > h_2(t)$ .

Prietok kvapaliny medzi nádržami  $q_{13}(t), q_{32}(t), q_{20}(t)$  je možné s využitím Torriceliiho zákona vyjadriť:

$$\begin{aligned}q_{13}(t) &= \mu_{13} s_p \sqrt{2g |h_1(t) - h_3(t)|} \\ q_{32}(t) &= \mu_{32} s_p \sqrt{2g |h_3(t) - h_2(t)|} \\ q_{20}(t) &= \mu_{20} s_p \sqrt{2gh_2(t)}\end{aligned}\quad (2)$$

Nelineárny matematický model (1) je implementovaný v simulačnom prostredí Simulink a jeho programová schéma pre simulačný model je znázornená na Obr. 2.



Obr. 2. Simulačný model hydraulického systému tri nádrže v interakcii [2]

Matematický model hydraulického systému (1) je možné zapísať v stavovom priestore ako sústavu nelineárnych diferenciálnych rovníc s algebraickou rovnicou pre vyjadrenie výstupu hydraulického systému:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t), \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{g}(\mathbf{x}(t), t),\end{aligned}\quad (3)$$

kde stavový vektor  $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ :

$$\mathbf{x}(t) = [h_1(t), h_2(t), h_3(t)]^T = [x_1(t), x_2(t), x_3(t)]^T \quad (4)$$

vektor vstupov  $\mathbf{u}(t) \in \mathbb{R}^q$ :

$$\mathbf{u}(t) = [q_1(t), q_2(t)]^T = [u_1(t), u_2(t)]^T \quad (5)$$

a vektor výstupu  $\mathbf{y}(t) \in \mathbb{R}^m$ :

$$\mathbf{y}(t) = [h_1(t), h_2(t), h_3(t)]^T \quad (6)$$

Za účelom návrhu stavového riadenia hydraulického systému je jeho nelineárny model zapísaný v stavovom priestore (3) linearizovaný rozvojom do Taylorovho rádu v okolí zvoleného pracovného bodu  $\mathbf{PB} = [\mathbf{x}_{PB}, \mathbf{u}_{PB}]$ , kde:

$$\mathbf{x}_{PB} = [0.4, 0.2, 0.3]^T \text{ m},$$

$$\mathbf{u}_{PB} = [3.5018, 3.1838]^T 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}.$$

a následne diskretizovaný pri perióde vzorkovania  $T_{vz} = 1\text{s}$ . Výsledkom je lineárny odchýlkový model hydraulického systému v tvare diskrétného stavového opisu:

$$\begin{aligned}\Delta \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}_d \Delta \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_d \Delta \mathbf{u}(k), \\ \Delta \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C} \Delta \mathbf{x}(k),\end{aligned}\quad (7)$$

kde  $\mathbf{A}_d$  je matica dynamiky a  $\mathbf{B}_d$  je matica vstupu. Maticu výstupu odchýlkového modelu uvažujeme  $\mathbf{C} = \mathbf{I}_3$ , kde  $\mathbf{I}_3$  je jednotková matica rozmeru  $3 \times 3$ .

Diskrétny stavový opis (7) dochýlkového modelu hydraulického systému využijeme pre návrh algoritmov riadenia nominálneho systému [2].

#### A.2 Návrh optimálneho stavového LQ riadenia s integrátorom regulačnej odchýlky

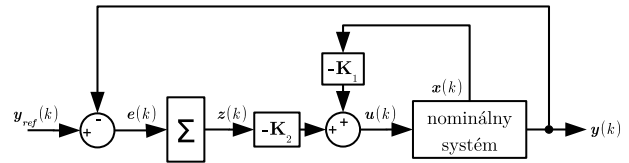
Optimálne stavové LQ riadenie nominálneho systému s integrátorom regulačnej odchýlky je navrhnuté na základe diskrétného lineárneho odchýlkového stavového opisu (7) hydraulického systému.

Návrh algoritmu riadenia rešpektuje definovaný cieľ riadenia, ktorým je zmena požadovaných výšok hladín  $\mathbf{y}_{ref}$  v okolí zvoleného pracovného bodu.

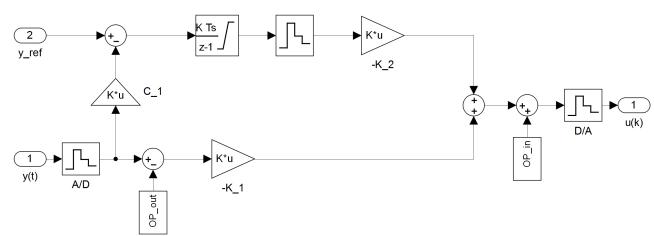
Algoritmus optimálneho stavového LQ riadenia s integrátorom regulačnej odchýlky  $\mathbf{z}(k)$  je vyjadrený zákonom riadenia:

$$\mathbf{u}(k) = -\mathbf{K}_1 \mathbf{x}(k) - \mathbf{K}_2 \mathbf{z}(k), \quad (8)$$

Toto riadenie je implementované v zvolenej riadiacej štruktúre (Obr. 3) do prostredia *MATLAB/Simulink* (Obr.4).



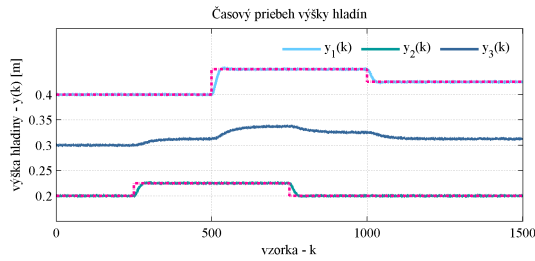
Obr. 3. Riadiaca štruktúra optimálneho stavového LQ riadenia s integrátorom



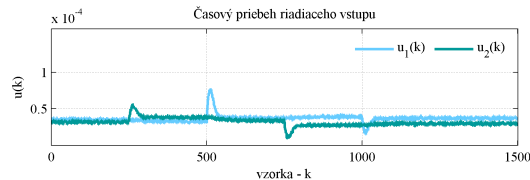
Obr. 4. Simulačná schéma LQ riadenia s integrátorom regulačnej odchýlky v prostredí *Simulink*

Výsledky riadenia s cieľom sledovania zmien požadovaných výšok hladín v prvej a druhej nádrži  $\mathbf{y}_{ref}$  sú znázornené na Obr.5 a Obr.6.

Uvedené typy riadenia nominálneho systému sú ďalej využité pre nastavenie prahových hodnôt v detekcii chýb akčných členov alebo snímačov nelineárneho simulačného



Obr. 5. Časový priebeh výšok hladín hydraulického systému - stavové LQ riadenie s integrátorom



Obr. 6. Časový priebeh radiaceho vstupu - stavové LQ riadenie s integrátorom

modelu hydraulického systému. Rovnako pre správnu činnosť diagnostického systému je nevyhnutným predpokladom správny návrh riadenia fyzikálneho systému.

### B. Návrh a simulčné overenie diagnostického systému

Návrh diagnostického systému pre odhalenie a estimáciu chýb akčných členov a snímačov simulčného nelineárneho modelu hydraulického systému je založený na skupine filtrov pre estimovanie stavov a chýb snímačov fyzikálneho systému. S cieľom využitia diagnostického systému simulčného modelu aj pre detekciu a estimáciu chýb akčných členov je v II. časti dizertačnej práce (Scenár 1) uvedená modifikácia algoritmu filtra pre estimovanie stavov a chýb fyzikálneho systému.

Pre návrh diagnostického systému je potrebné najprv uviesť chybové modely hydraulického systému tri nádrže v interakcii.

#### B.1 Chybový matematický model hydraulického systému

Vo všeobecnosti pre návrh filtra na estimovanie stavov a chýb snímačov fyzikálneho systému je využitý stochastický chybový model hydraulického systému v tvare:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}_d \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_d \mathbf{u}(k) + \mathbf{v}(k) \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C}^T \mathbf{x}(k) + \mathbf{F}_s \mathbf{f}_s(k) + \mathbf{o}(k) \end{aligned} \quad (9)$$

kde vektor  $\mathbf{f}_s(k) \in \mathbb{R}^p$  pozostáva z hodnôt chýb snímačov fyzikálneho systému.

Pre návrh filtra na estimovanie stavov a chýb akčných členov hydraulického systému bude využitý, podľa [8], stochastický chybový model fyzikálneho systému v tvare:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}_d \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_d \mathbf{u}(k) + \mathbf{F}_a \mathbf{f}_a(k) + \mathbf{v}(k) \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C}^T \mathbf{x}(k) + \mathbf{o}(k) \end{aligned} \quad (10)$$

kde  $\mathbf{F}_a \in \mathbb{R}^{n \times q}$  je matica chýb akčných členov fyzikálneho systému. Vektor  $\mathbf{f}_a(k) \in \mathbb{R}^q$  pozostáva z hodnôt chýb akčných členov fyzikálneho systému.

Uvedené chybové matematické modely (9), (10) sú použité pre modifikáciu a návrh filtrov na estimovanie stavov a chýb snímačov alebo akčných členov simulčného modelu hydraulického systému.

#### B.2 Návrh skupiny filtrov pre estimovanie stavov a chýb simulčného modelu hydraulického systému

Navrhovaný diagnostický systém simulčného modelu hydraulického systému pozostáva z päťice filtrov, ktoré možno vo všeobecnosti vyjadriť:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_l(k+1|k) &= \mathbf{T}_l \bar{\mathbf{A}}_l \hat{\mathbf{x}}_l(k|k-1) + \mathbf{T}_l \bar{\mathbf{B}}_l \mathbf{u}(k) + \\ &+ \mathbf{L}_l(k) (\mathbf{y}(k) - \bar{\mathbf{C}}_l \hat{\mathbf{x}}_l(k|k-1)) + \\ &+ \mathbf{N}_l \mathbf{y}(k+1), \end{aligned} \quad (11)$$

kde pre tri snímače výšky hladín simulčného modelu  $l = 1, 2, 3$  a pre dva akčné členy  $l = 4, 5$ . V prípade filtrov, ktoré sú navrhnuté za účelom detekcie a estimácie chýb snímačov, sú jednotlivé matice filtra a spätnoväzobné zosilnenie  $\mathbf{L}_l$ ,  $l = 1, \dots, 3$  vypočítané s využitím stochastického chybového modelu (9) na základe algoritmu znázorneného na Obr. 7.

Návrh filtra pre estimovanie stavov a chýb akčných členov fyzikálneho systému je spracovaný v tvare vývojového diagramu (Obr. 8).

Filter pre estimovanie stavov fyzikálneho systému a chýb snímačov alebo akčných členov je implementovaný do simulčného prostredia *MATLAB/Simulink* (Obr. 9), pričom použité kovariančné matice šumov  $\mathbf{Q}_v = 0.0005 \mathbf{I}_3$ ,  $\mathbf{R}_o = 0.001 \mathbf{I}_3$  sú zvolené pre všetky filtre rovnako.

Estimované stavy získané skupinou filtrov sú využité pre detekciu a lokalizáciu chýb simulčného modelu hydraulického systému.

#### B.3 Detekcia a lokalizácia chýb simulčného modelu hydraulického systému

Detekcia chýb je založená na estimovaných stavoch z navrhutej skupiny filtrov. Detekcia chyby je založená na generovaných rezíduách v tvare:

$$\mathbf{r}_l(k) = \mathbf{y}(k) - \hat{\mathbf{y}}_l(k) = \mathbf{C} \mathbf{x}(k) - \bar{\mathbf{C}}_l \hat{\mathbf{x}}_l(k|k-1), \quad (12)$$

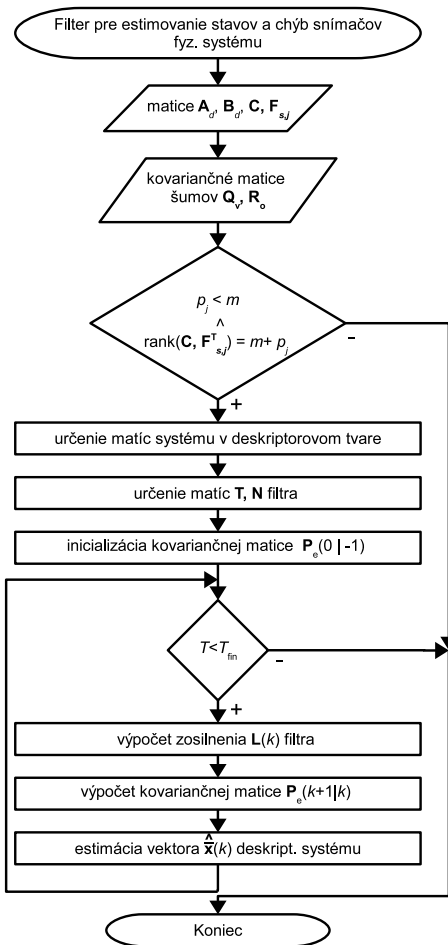
pre  $l = 1, \dots, 5$ .

Generované rezíduá sú použité vo funkciách detekcie  $J_1, \dots, J_5$ , ktoré využívajú kľzavé okno  $M_d$  s nastavenou veľkosťou  $M_d = 15$ . Prahové hodnoty  $J_{1,th}, \dots, J_{5,th}$  sú nastavené na základe časových priebehov funkcií detekcie  $J_1, \dots, J_5$  získaných zo simulácie riadenia nominálneho systému (Obr. 10).

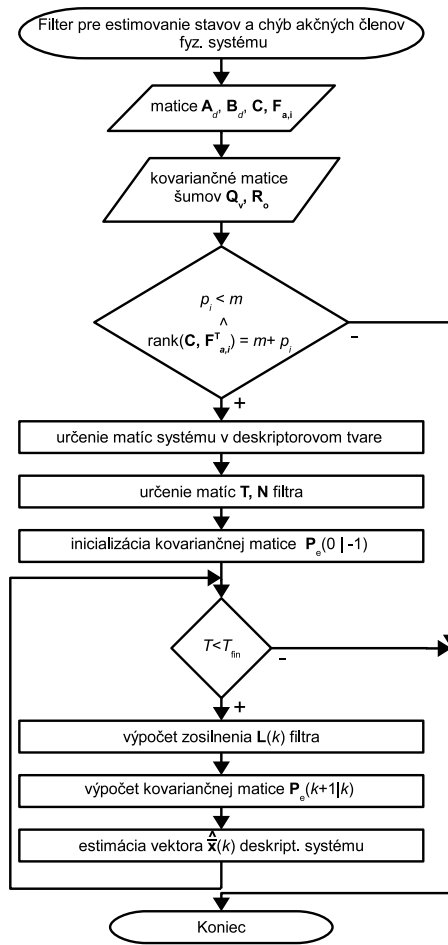
Funkcie detekcie sú využité pre generovanie symptómov  $s_l$ ,  $l = 1, \dots, 5$ . Chyba je lokalizovaná na základe generovaných symptómov podľa tabuľky Tab. II.

Návrh diagnostického systému je implementovaný do prostredia *Simulink* v štruktúre ilustrovanej na Obr. 11.

Navrhutý diagnostický systém je simulčne overený v prostredí *Simulink* s využitím algoritmu optimálneho stavového LQ riadenia s integrátorom [2].



Obr. 7. Vývojový diagram pre návrh filtra na estimovanie stavov a chýb snímačov simulačného modelu hydraulického systému



Obr. 8. Vývojový diagram pre návrh filtra na estimovanie stavov a chýb akčných členov simulačného modelu hydraulického systému

Tab. II

LOKALIZÁCIA CHÝB SNÍMAČOV A AKČNÝCH ČLENOV SIMULAČNÉHO MODELU HYDRAULICKÉHO SYSTÉMU TRI NÁDRŽE NA ZÁKLADE GENEROVANÝCH SYMPTÓMOV DIAGNOSTICKÝM SYSTÉMOM

	bez chyby	chyba 1. sn	chyba 2. sn	chyba 3. sn	chyba 1. ač	chyba 2. ač	viac chýb
s <sub>1</sub>	0	0	1	1	1	1	1
s <sub>2</sub>	0	1	0	1	1	1	1
s <sub>3</sub>	0	1	1	0	1	1	1
s <sub>4</sub>	0	1	1	1	0	1	1
s <sub>5</sub>	0	1	1	1	1	0	1

#### B.4 Simulačné overenie diagnostického systému

Simulačné overenie navrhnutého diagnostického systému je realizované s uvažovaním dvoch typových chýb, ktoré sa počas riadenia fyzikálneho systému môžu vyskytnúť.

Prvou je multiplikatívna chyba 1. akčného člena (strata zosilnenia na 50% výkonu), ktorá sa vyskytne v čase  $T = 600s$ . Druhou chybou je výskyt náhlej aditívnej chyby snímača v druhej nádrži (sníma hodnotu s konštantou chybou  $-0.05m$ ), ktorá nastala v  $T_f = 600s$ .

V simulačnom modeli uvažujeme, že výšky hladín v nádržach  $h_1(t), h_2(t), h_3(t)$  a vstupné prietoky  $q_1(t), q_2(t)$  sú spo-

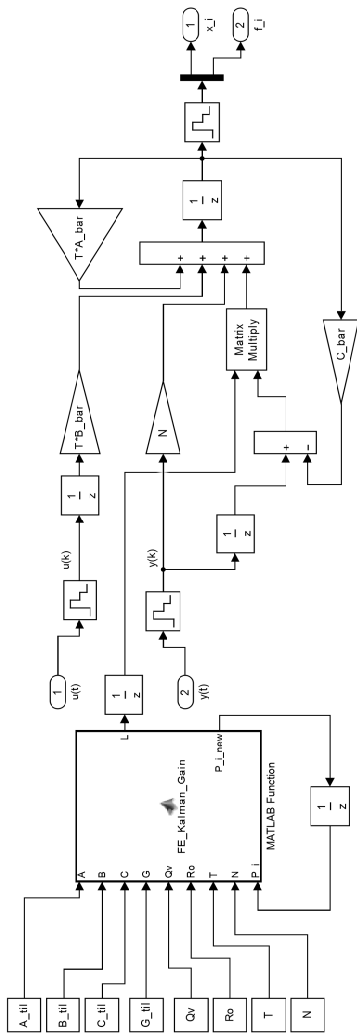
jité fyzikálne veličiny. Riadiaci vstup  $u_1(k), u_2(k)$  vypočítaný zvoleným algoritmom riadenia a merané výstupy systému  $y_1(k), y_2(k), y_3(k)$ , ktoré sú výsledkom A/D prevodu spojitych fyzikálnych veličín  $h_1(t), h_2(t), h_3(t)$ , sú diskrétné veličiny.

Simulačné overenie diagnostického systému pre cieľ sledovania zmien výšky hladín  $y_{ref}$  v 1. a 2. nádrži hydraulického systému je realizované s využitím stavového optimálneho LQ riadenia s integrátorom.

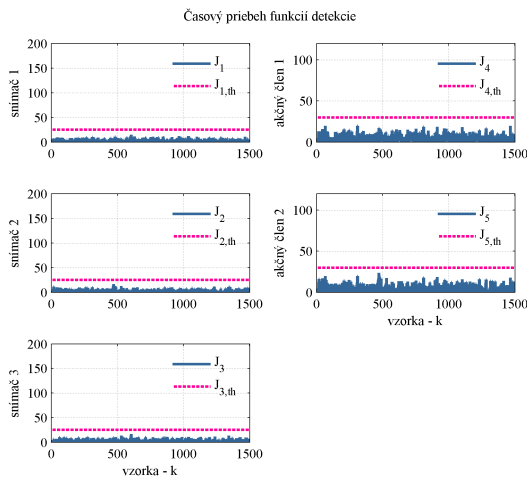
V hydraulickom systéme troch nádrží sme simulovali chybu 1. akčného člena. Časové priebehy výstupu, riadiaceho vstupu, funkcií detekcie a estimácie chyby simulačného modelu sú znázornené na Obr. 12 - Obr. 15.

Taktiež bola funkčnosť navrhnutého diagnostického systému simulačne overená pre prípad výskytu chyby 2. snímača hydraulického systému a dosiahnuté výsledky v tvare časových priebehov sú znázornené na Obr. 16 - Obr. 18

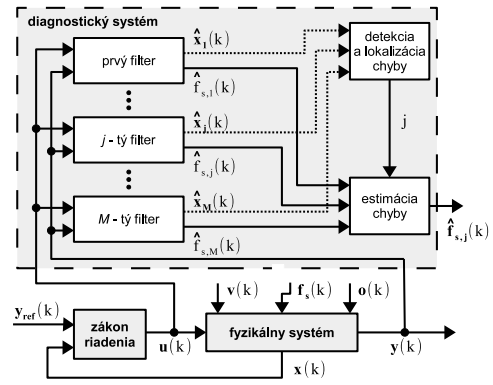
Dosiahnuté výsledky simulácií v porovnaní s [1], [7], [9] preukazujú, že navrhnutý diagnostický systém simulačného modelu hydraulického systému je možné využiť pre diagnostiku chýb snímačov a akčných členov fyzikálneho systému.



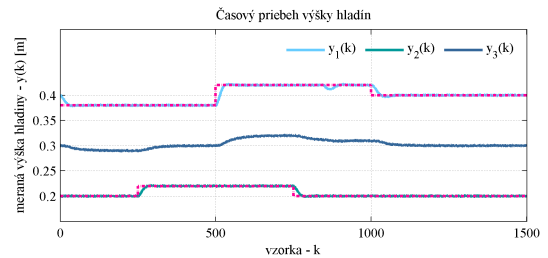
Obr. 9. Filter pre estimovanie stavov a chýb snímačov alebo akčných členov implementovaný v prostredí Simulink



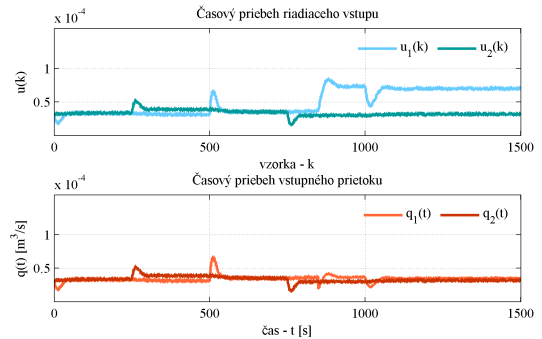
Obr. 10. Časový priebeh funkcií detekcie - nominálny systém



Obr. 11. Schematické znázornenie štruktúry navrhovaného diagnostického systému



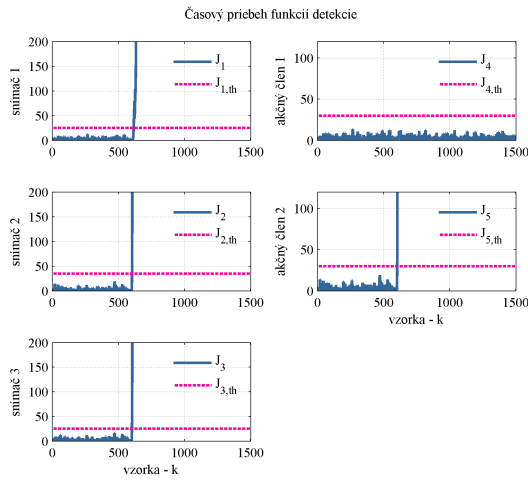
Obr. 12. Časový priebeh výšok hladín hydraulického systému - chyba 1. akčného člena



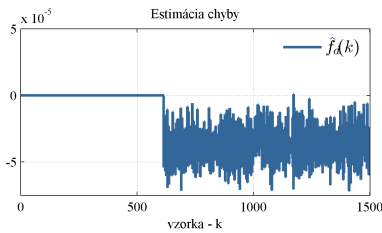
Obr. 13. Časový priebeh riadiaceho vstupu a vstupného prietoku - chyba 1. akčného člena

### B.5 Návrh prispôsobenia sa riadenia chybám akčných členov a snímačov simuláčného modelu hydraulický systém

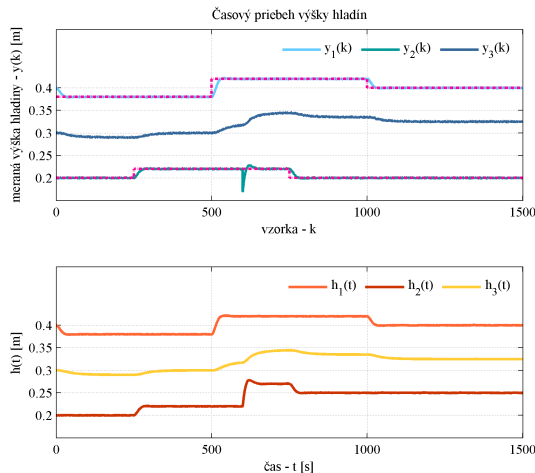
Cieľom prispôsobenia sa riadenia fyzikálneho systému vzniknutým chybám snímačov  $f_s(k)$  a akčných členov  $f_a(k)$  je eliminovať ich vplyv na riadený model fyzikálneho systému tak, aby aj po ich výskyte bol dosiahnutý cieľ riadenia [1], [10]. V dizertačnej práci v Scenári 1 pre tento cieľ uvádzame úpravu vybraných algoritmov riadenia za účelom ich prispôsobenia sa vzniknutým chybám akčných členov alebo snímačov, ktorých miesto vzniku a veľkosť získame na základe ich lokalizácie a estimácie z diagnostického systému. V tomto článku uvidíme úpravu algoritmu optimálneho stavového LQ riadenia s integrátorom pre prispôsobenie sa vzniknutým chybám snímačov a akčných členov fyzikálneho systému.



Obr. 14. Časový priebeh funkcií detekcie - chyba 1. akčného člena



Obr. 15. Časový priebeh skutočnej a estimovanej hodnoty chyby - chyba 1. akčného člena

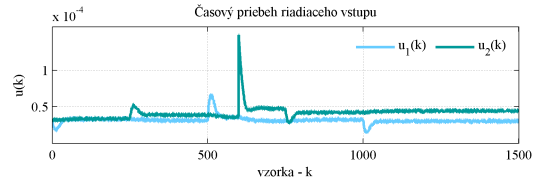


Obr. 16. Časový priebeh výšok hladín hydraulického systému - chyba 2. snímača

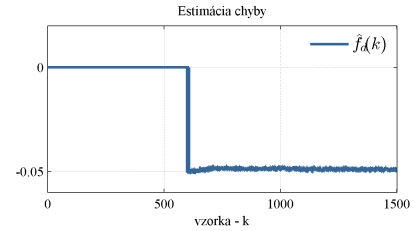
Zákon stavového LQ riadenia ovplyvnený vzniknutými chybami akčných členov možno vyjadriť:

$$\mathbf{u}_f(k) = -\mathbf{K}_{fb}\mathbf{x}(k) + \mathbf{f}_a(k), \quad (13)$$

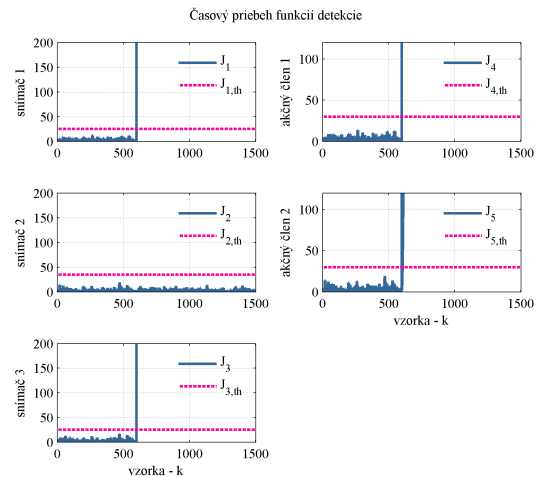
čo sa prejaví bezprostredne po vzniku chýb na stavových



Obr. 17. Časový priebeh riadiaceho vstupu a vstupného prietoku - chyba 2. snímača



Obr. 18. Časový priebeh estimovanej hodnoty chyby - chyba 2. snímača



Obr. 19. Časový priebeh funkcií detekcie - chyba 2. snímača

veličinách nasledovne:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_f(k+1) &= \mathbf{A}_d\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_d\mathbf{u}_f(k) = \\ &= \mathbf{A}_d\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_d(-\mathbf{K}_{fb}\mathbf{x}(k) + \mathbf{f}_a(k)), \end{aligned} \quad (14)$$

Za predpokladu, že fyzikálny systém ovplyvňuje chyba  $i$ -tého akčného člena a za predpokladu, že  $\mathbf{F}_a = \mathbf{B}_d$ , stavovú rovnicu (14) možno po úprave vyjadriť:

$$\mathbf{x}_f(k+1) = \mathbf{A}_d\mathbf{x}(k) - \mathbf{B}_d\mathbf{K}_{fb}\mathbf{x}(k) + \mathbf{F}_{a,i}\mathbf{f}_{a,i}(k) \quad (15)$$

Zákon riadenia rozšírime o aditívnu zložku:

$$\mathbf{u}(k) = \mathbf{u}_f(k) + \mathbf{u}_{ad}(k), \quad (16)$$

ktorá má eliminovať vplyv chyby  $i$ -tého akčného člena a výpočet  $\mathbf{u}_{ad}(k)$  možno odvodiť dosadením (16) do stavovej



rovnice:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}_d \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_d \mathbf{u}(k) = \\ &= \mathbf{A}_d \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_d \mathbf{u}_f(k) + \mathbf{B}_d \mathbf{u}_{ad}(k) = \\ &= \mathbf{A}_d \mathbf{x}(k) - \mathbf{B}_d \mathbf{K}_f \mathbf{x}(k) + \\ &+ \mathbf{F}_{a,i} f_{a,i}(k) + \mathbf{B}_d \mathbf{u}_{ad}(k), \end{aligned} \quad (17)$$

Aditívnu zložku v zákone riadenia určíme na základe podmienky:

$$\mathbf{F}_{a,i} f_{a,i}(k) + \mathbf{B}_d \mathbf{u}_{ad}(k) \stackrel{!}{=} \mathbf{0} \quad (18)$$

Podľa [7], v prípade ak počet vstupov systému  $q$  sa rovná počtu jeho stavov ( $q = n$ ), je možné vypočítať aditívnu zložku riadenia nasledovne:

$$\mathbf{u}_{ad}(k) = -\mathbf{B}_d^{-1} \mathbf{F}_{a,i} \hat{f}_{a,i}(k) \quad (19)$$

V prípade ak počet vstupov  $q$  fyzikálneho systému je menší ako počet jeho stavov ( $q < n$ ), tak využijeme SVD dekompozíciu matice  $\mathbf{B}_d$ :

$$\mathbf{B}_d = \mathbf{U} \begin{bmatrix} \mathbf{S} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{V}^T \quad (20)$$

a na základe jej výsledku vyjadríme výpočet aditívnej zložky riadenia:

$$\mathbf{u}_{ad}(k) = -\mathbf{V} \mathbf{S}^{-1} \mathbf{U}^T \mathbf{F}_{a,i} \hat{f}_{a,i}(k), \quad (21)$$

kde  $\hat{f}_{a,i}(k)$  je estimovaná hodnota chyby  $i$ -tého akčného člena.

Úprava algoritmu riadenia spočíva v uvažovaní aditívnej zložky  $\mathbf{u}_{ad}$  pre elimináciu chyby  $i$ -tého akčného člena fyzikálneho systému v zákone riadenia optimálneho stavového LQ riadenia [1].

Odvođený zákon optimálneho stavového LQ riadenia s prispôbením sa vzniknutým chybám akčných členov sme implementovali do prostredia *Simulink* a simulačne overili s využitím simulačného modelu hydraulického systému. Výsledky riadenia s prispôbením sa vzniknutej chybe 1. akčného člena hydraulického systému (rovnaká chyba ako v prípade overenia diagnostického systému) sú znázornené na Obr. 20, Obr. 21.

Pre porovnanie uvádzame aj kvantitatívne porovnanie optimálneho stavového LQ riadenia s integrátorom bez a s prispôbením sa vzniknutej chybe akčný členov, pričom je realizované s využitím normy regulačnej odchýlky:

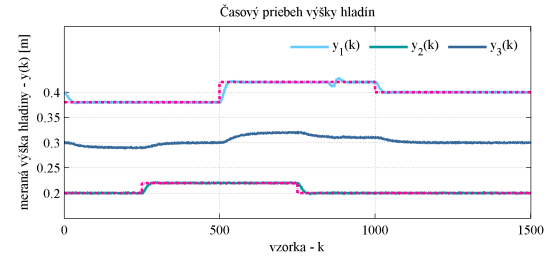
$$\|\mathbf{e}\| = \sqrt{\sum_{k=0}^T \mathbf{e}^2(k)} = \sqrt{\sum_{k=0}^T (\mathbf{y}_{ref}(k) - \mathbf{y}(k))^2} \quad (22)$$

Kvantitatívne vyhodnotenie optimálneho stavového LQ riadenia s integrátorom a prispôbením sa chybe 1. akčného člena pre cieľ sledovania zmien požadovanej výšky hladín v 1. a 2. nádrži je uvedené v Tab. III.

Dosiahnuté výsledky zo simulačného overenia navrhnutého diagnostického systému a riadenia s prispôbením sa chybám akčných členov sú porovnateľné s časovými priebehmi riadenia a výšky hladín s uvažovaním chyby 1. akčného člena hydraulického systému uvedené v publikácii [7].

Tab. III  
NORMA CHYBY OPTIMÁLNEHO STAVOVÉHO LQ RIADENIA S INTEGRÁTOROM - CHYBA 1. AKČNÉHO ČLENA

	bez prispôsobenia	s prispôbením
$\ \mathbf{e}\ $	0.168409042322904	0.165095281594631



Obr. 20. Časový priebeh výšok hladín hydraulického systému - optimálne stavové LQ riadenie s integrátorom - chyba 1. akčného člena

Vybrané algoritmy riadenia sú upravené s využitím aditívnej zložky  $\mathbf{u}_{ad}(k)$  v zákonoch riadenia aj pre prispôbenie sa v prípade výskytu chýb snímačov fyzikálneho systému.

Úprava algoritmu optimálneho stavového LQ riadenia s prispôbením sa chybe  $j$ -tého snímača  $f_{s,j}$ , podľa [1], spočíva v odvodení a využití aditívnej zložky  $\mathbf{u}_{ad}$  v zákone riadenia ovplyvneným chybou snímača:

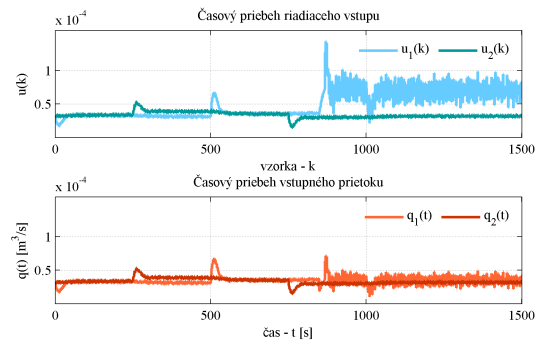
$$\begin{aligned} \mathbf{u}_f(k) &= -\mathbf{K}_1 \mathbf{x}_f(k) - \mathbf{K}_2 \mathbf{z}_f(k) = \\ &= -\mathbf{K}_1 (\mathbf{x}(k) + \mathbf{F}_{s,j} f_{s,j}(k)) - \mathbf{K}_2 \mathbf{z}_f(k), \end{aligned} \quad (23)$$

príčom integrátor  $\mathbf{z}_f$  ovplyvnený chybou snímača  $f_{s,j}$ , ktorá sa vyskytla v systéme v kroku  $k$ , môže byť vyjadrený:

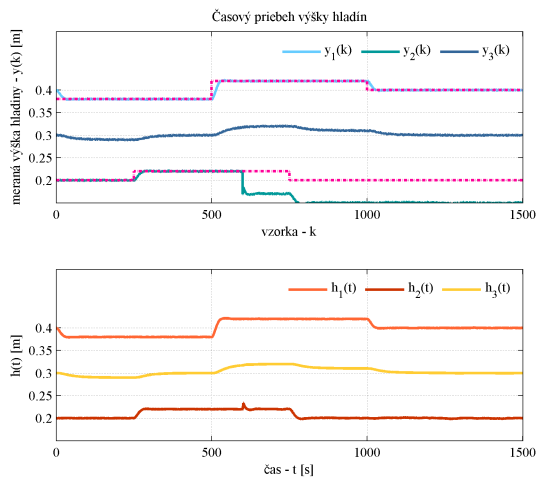
$$\begin{aligned} \mathbf{z}_f(k+1) &= \mathbf{z}(k) + T_s [\mathbf{y}_{ref}(k) - \mathbf{C}_1 \mathbf{x}_f(k)] = \\ &= \mathbf{z}(k) + T_s [\mathbf{y}_{ref}(k) - \mathbf{C}_1 (\mathbf{x}(k) + \mathbf{F}_{s,j} f_{s,j}(k))] = \\ &= \underbrace{\mathbf{z}(k) + T_s [\mathbf{y}_{ref}(k) - \mathbf{C}_1 \mathbf{x}(k)]}_{\mathbf{z}(k+1)} - T_s \mathbf{C}_1 \mathbf{F}_{s,j} f_{s,j}(k) \end{aligned} \quad (24)$$

Po  $M$  krokoch možno integrátor  $\mathbf{z}_f$  vyjadrený v (24) zapísať:

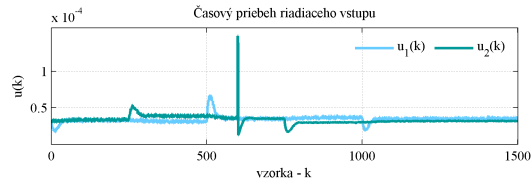
$$\mathbf{z}_f(k+M) = \mathbf{z}(k+M) + \tilde{\mathbf{f}}(k+M), \quad (25)$$



Obr. 21. Časový priebeh riadiaceho vstupu a vstupného prietoku - optimálne stavové LQ riadenie s integrátorom - chyba 1. akčného člena



Obr. 22. Časový priebeh výšok hladín hydraulického systému - chyba 2. snímača



Obr. 23. Časový priebeh riadiaceho vstupu a vstupného prietoku - chyba 2. snímača

kde  $\tilde{\mathbf{f}}(k)$  vyjadruje integrál chyby  $j$ -tého snímača  $f_{s,j}$  a možno ho iteratívne vypočítať:

$$\tilde{\mathbf{f}}(k) = \tilde{\mathbf{f}}(k-1) - T_s \mathbf{C}_1 \mathbf{F}_{s,j} f_{s,j}(k-1) \quad (26)$$

Eliminácia vplyvu chyby  $j$ -tého snímača  $f_{s,j}$  modelu fyzikálneho systému v zákone riadenia je rovnako realizovaná s využitím aditívnej zložky  $\mathbf{u}_{ad}$ , pričom má tvar:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(k) &= \mathbf{u}_f(k) + \mathbf{u}_{ad}(k) = \\ &= -\mathbf{K}_1 \mathbf{x}(k) - \mathbf{K}_1 \mathbf{F}_{s,j} f_{s,j}(k) \\ &= -\mathbf{K}_2 \mathbf{z}(k) - \mathbf{K}_2 \tilde{\mathbf{f}}(k) + \mathbf{u}_{ad}(k), \end{aligned} \quad (27)$$

a túto aditívnu zložku určíme opäť na základe podmienky:

$$-\mathbf{K}_1 \mathbf{F}_{s,j} f_{s,j}(k) - \mathbf{K}_2 \tilde{\mathbf{f}}(k) + \mathbf{u}_{ad}(k) \stackrel{!}{=} \mathbf{0}, \quad (28)$$

ktorú možno s využitím estimovaných hodnôt chyby  $\hat{f}_{s,j}$  vyjadriť:

$$\mathbf{u}_{ad}(k) = \mathbf{K}_1 \mathbf{F}_{s,j} \hat{f}_{s,j}(k) + \mathbf{K}_2 \hat{\tilde{\mathbf{f}}}(k) \quad (29)$$

V prípade využitia optimálneho stavového LQ riadenia s integrátorom a prispôbením sa chybe snímača je meraná výška hladiny mimo jej požadovanej hodnoty (o veľkosť chyby pôsobiacej na 2. snímač), ale skutočná výška hladiny v 2. nádrži dosahuje požadovanú hodnotu (Obr. 22).

Výsledky simulačného overenia navrhnutého diagnostického systému a riadenia s prispôbením sa chybám snímačov sú porovnateľné s výsledkami uvedenými v [7].

Predstavený Scenár 1 bol zameraný na moduly A, B metodiky uvedenej v dizertačnej práci (kapitola 5 *Návrh metodiky pre diagnostiku chýb fyzikálnych systémov založenej na matematických modeloch*). V tomto článku bola pozornosť venovaná zostaveniu matematického modelu a riadenia nominálneho systému, návrhu algoritmu optimálneho stavového LQ riadenia s integrátorom, návrhu diagnostického systému na základe skupiny filtrov a prispôbeniu navrhnutého algoritmu riadenia chybám akčných členov a snímačov. Zostavené algoritmy riadenia a diagnostiky chýb boli simulačne overené v prostredí *Simulink*. Časť výsledkov je prezentovaná v publikácii doktoranda [2].

## V. SCENÁR 4: DIAGNOSTICKÝ SYSTÉM PRE LABORATÓRNY MODEL 3-FÁZOVÝ MOTOR

Pre overenie navrhutej metodiky diagnostiky chýb fyzikálnych systémov, ktorá je založená na meraných dátach sme využili laboratórny model 3-fázového motora (Obr. 24). Pre tento model sme navrhli riadenie implementované v PLC a diagnostický systém, ktorého algoritmy sú realizované v technologickom PC. Informácie z riadenia a diagnostického systému sú využité na vyššej úrovni DSR pre účely vizualizácie a supervízneho riadenia. V Scenári 4 sú využité rôzne programové a technologické prostriedky. Laboratórny model 3-fázový motor je prezentovaný na web stránke <http://kyb.fei.tuke.sk/laboratoria/modely/mfm.php> a slúži vo výuke so zameraním na návrh algoritmov riadenia, ktoré možno implementovať v PLC.



Obr. 24. Experimentálne pracovisko s laboratórnym modelom 3-fázový motor

### A. Návrh riadenia nominálneho systému

Pre správny návrh diagnostického systému musíme na začiatku vykonať rovnaké kroky ako v prípade využitia metód diagnostiky chýb, ktoré sú založené na matematickom modeli. Pre zostavenie matematického modelu urobíme, rovnako ako

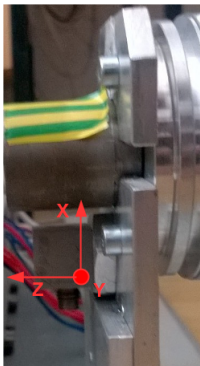
v predošlých scenároch, systémovú analýzu laboratórneho modelu 3-fázový motor.

Laboratórny model pozostáva z 3-fázového motora, ktorého vstup je riadený prostredníctvom frekvenčného meniča *Allen-Bradley Power Flex 40*, ktorý je prepojený s analógovými výstupmi PLC *Allen-Bradley Compact Logix L23E*. Riadiace PLC je rozšírené o vstupnú kartu pre *High Speed Counter*, čítač impulzov z IRC snímača, ktorý je namontovaný na hriadeľ motora. Generované impulzy z IRC snímača sú spracovávané v PLC pre určenie uhlovej rýchlosti  $\omega_M$  otáčania hriadeľa 3-fázového motora na základe vzťahu:

$$\omega_M = \frac{2\pi m_{IRC}}{M_{IRC} T_{vz}}, \quad (30)$$

kde  $T_{vz}$  je perióda vzorkovania,  $M_{IRC}$  je počet impulzov IRC snímača na jednu otáčku a  $m_{IRC}$  je počet impulzov nameraných za jednu periódu vzorkovania  $T_{vz}$ . Komunikácia medzi PLC a technologickým PC je zabezpečená prostredníctvom programu *RSLinx* s využitím OPC protokolu.

Dáta získané pre účel vykonania vibrodiagnostiky laboratórneho modelu sú merané prostredníctvom akcelerometra v mieste prepojenia hriadeľa a IRC snímača (Obr. 25). Dáta z akcelerometra sú získané prostredníctvom meracej karty *National Instruments USB 4432* a *Data Acquisition toolbox*-u do prostredia *MATLAB*, kde ich spracovávame s využitím funkcií *Signal Processing toolbox*-u.

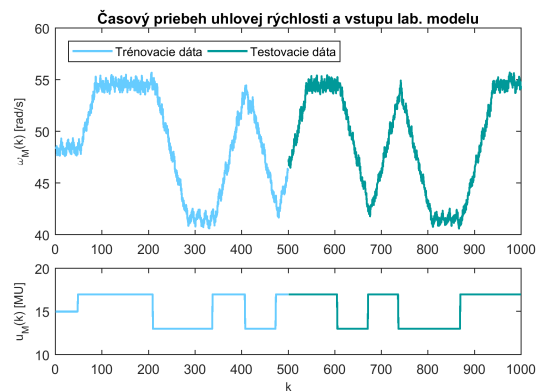


Obr. 25. Umiestnenie akcelerometra pre meranie vibrácií na laboratórnom modeli 3-fázový motor

Pre nameranie vhodných dát, potrebujeme navrhnuť riadenie nominálneho systému, ktoré zabezpečí rovnaké podmienky experimentu (rovnakú uhlovú rýchlosť  $\omega_M$ ). Pre návrh riadenia potrebujeme zostaviť matematický model nominálneho systému.

#### A.1 Zostavenie matematického modelu nominálneho systému

Vzhľadom na skutočnosť, že nepoznáme jednotlivé parametre laboratórneho modelu, ale poznáme rozsahy vstupných a výstupných hodnôt jeho fyzikálnych veličín, pre získanie modelu sme vykonali experimenty, ktoré sme využili na zostavenie matematického modelu. Pracovný bod, pre ktorý sme vykonali identifikáciu parametrov matematického modelu bol zvolený  $\mathbf{PB} = [u_{PB}, \omega_{M,PB}] = [15, 48]$  pri perióde vzorkovania  $T_{vz} = 0.01s$ .



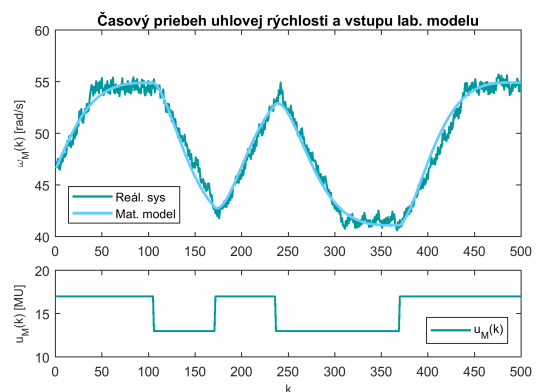
Obr. 26. Časový priebeh použitých tréningových a testovacích dát vstupného a výstupného signálu

Počas experimentálnej identifikácie parametrov matematického modelu bol motor budený pseudonáhodným binárnym signálom okolo zvoleného pracovného bodu. Odozva systému na pseudonáhodný vstupný signál je znázornená na Obr. 26.

Získané dáta pre experimentálnu identifikáciu boli rozdelené na sadu tréningových a testovacích dát. S využitím funkcií *System Identification toolbox*-u sme získali parametre matematického modelu nominálneho systému v ARMAX štruktúre, ktorý vyjadríme v tvare:

$$F_M(z) = \frac{b_{z,1}z^{-1} + b_{z,2}z^{-2}}{1 + a_{z,1}z^{-1} + a_{z,2}z^{-2}} + \frac{c_{z,1}z^{-1} + c_{z,2}z^{-2}}{1 + a_{z,1}z^{-1} + a_{z,2}z^{-2}} = \frac{B_z(z)}{A_z(z)} + \frac{C_z(z)}{A_z(z)} \quad (31)$$

Získaný matematický model bol overený s použitím testovacích dát a výsledok je znázornený na Obr. 27 a na základe dosiahnutých výsledkov bol tento matematický model využitý pre návrh riadenia nominálneho systému.



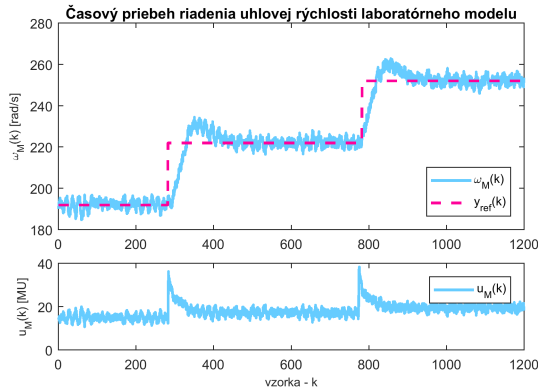
Obr. 27. Validácia matematického modelu získaného experimentálnou identifikáciou s využitím testovacích dát

Koeficienty polynómov  $B_z(z^{-1})$ ,  $A_z(z^{-1})$  ARMAX modelu (31) fyzikálneho systému, určené prostredníctvom experimentálnej identifikácie funkciou *armax*, využijeme pre účely návrhu riadenia nominálneho systému.

## A.2 Návrh riadenia nominálneho systému pre účely implementácie do PLC

Vzhľadom na štruktúru laboratórneho modelu sme zvolili číslicové riadenie s využitím metódy rozloženia pólov, ktoré je možné navrhnuť z matematického modelu (31), ktorý sme získali experimentálnou identifikáciou a súčasne je vhodné pre implementáciu do PLC. Parametre číslicového riadenia sú získané z porovnania s referenčným polynómom  $N_r(z)$ , ktorého korene sme zvolili  $z_r = [0.91, 0.92, 0.93, 0.94]$ .

Časový priebeh číslicového riadenia sme overili pre cieľ riadenia v okolí pracovného bodu **PB** a výsledok je znázornený na Obr. 28.



Obr. 28. Časový priebeh riadenia uhlovej rýchlosti laboratórneho modelu 3-fázového motoru

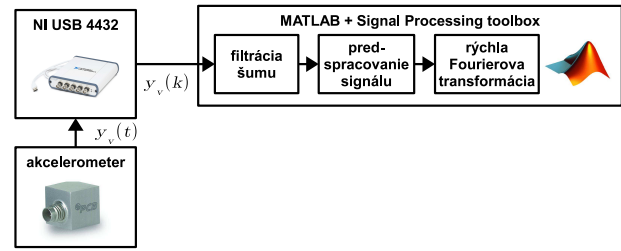
Navrhnuté číslicové riadenie využijeme pre cieľ riadenia do zvoleného **PB** za účelom zabezpečenia rovnakých podmienok pri meraní vibrácií laboratórneho modelu.

## B. Návrh a simulačné overenie diagnostického systému

Diagnostický systém laboratórneho modelu je založený na číslicovom spracovaní, filtrácii a frekvenčnej analýze vibrodiagnostického signálu  $y_v$ , ktorý sme získali meraním zrýchlenia prostredníctvom trojosého akcelerometra v smere osi x (Obr. 25). Zrýchlenie je merané prostredníctvom karty NI USB 4432, ktorá je k technologickému PC pripojená USB rozhraním. Uvedená meracia karta disponuje aj vyrovnávacou pamäťou, ktorá umožňuje uchovávať zaznamenaná dáta, v prípade, ak ešte neboli odoslané do PC. Dáta sú z akcelerometra zbierané s odlišnou periódou vzorkovania, pri akej bol fyzikálny systém identifikovaný a riadený. Perióda vzorkovania pre meranie vibrácií je  $T_{vz,M} = 0.001s$ . Namerané dáta sú spracované a následne analyzované taktiež v prostredí *MATLAB* s využitím funkcií *Signal Processing toolbox*-u (Obr. 29).

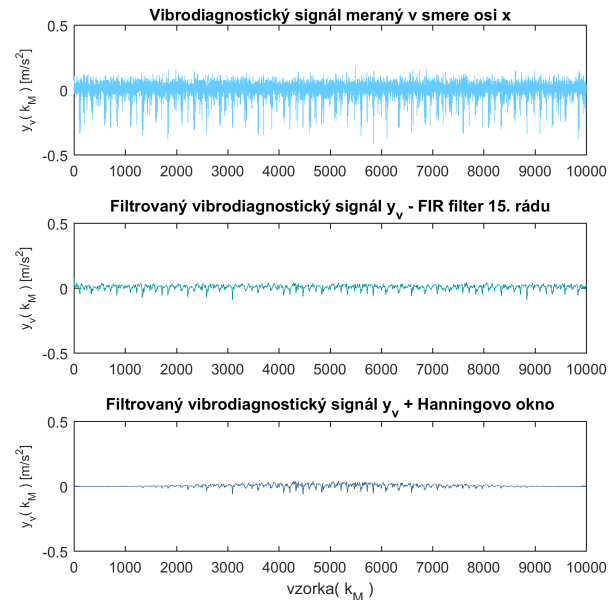
### B.1 Filtrácia a predspracovanie vibrodiagnostického signálu

Pre účely frekvenčnej analýzy sme navrhnutý filtrovaný signál predspracovali s využitím Hanningovho okna s cieľom eliminovať tzv. leakage efekt. Pre tento účel bola využitá *MATLAB* funkcia *hanning*. Následne sme vibrodiagnostický signál  $y_v$  filtrovali prostredníctvom dolnopriepustného filtra s



Obr. 29. Schematické znázornenie merania a vyhodnotenia vibrácií laboratórneho modelu 3-fázového motoru

cieľom odfiltrovania šumu z nameraného signálu a pre tento účel bola využitá funkcia *filtfilt*. Pre návrh dolnopriepustného FIR filtra sme na základe periódy vzorkovania určili jeho medznú frekvenciu  $f_m$ , rád filtra sme zvolili 15. Pre výpočet koeficientov FIR filtra sme využili funkciu *fir1*. Dosažené výsledky vo forme časových priebehu vibrodiagnostického signálu su znázornené na Obr. 30.



Obr. 30. Priebeh pôvodného, filtrovaného a predspracovaného vibrodiagnostického signálu

Predspracovaný a filtrovaný vibrodiagnostický signál  $y_v$  využijeme pre účely jeho frekvenčnej analýzy.

### B.2 Frekvenčná analýza vibrodiagnostického signálu

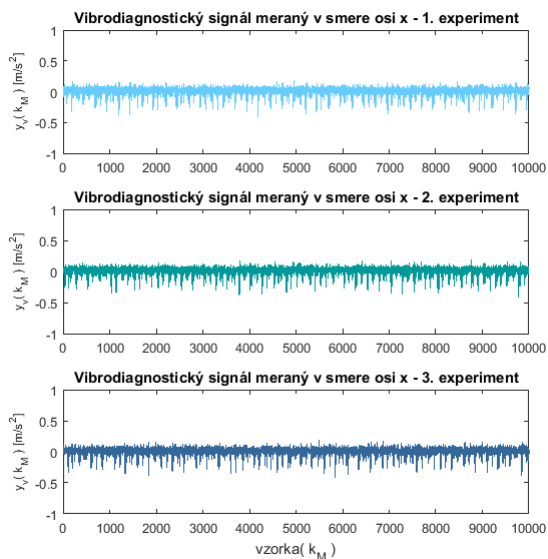
S predspracovaným a filtrovaným signálom sme vykonali frekvenčnú analýzu vibrodiagnostického signálu. Vo frekvenčnej analýze sa zameriame na nevyváženosť hriadeľa motora, ktorá by sa mala prejaviť pri frekvencii približne 8 Hz, čo reprezentuje uhlovú rýchlosť 48 rad/s.

Vzhľadom na použitie trojosého akcelerometra, sme pre frekvenčnú analýzu využili signál nameraný v smere osi x. Výsledok frekvenčnej analýzy dát z experimentov získaných

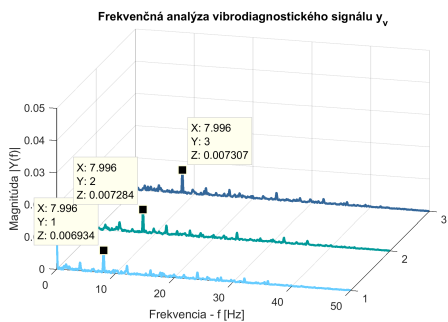


meraním vibrácií (Obr. 31) riadeného laboratórneho modelu bez pridaného závažia na jeho hriadeľi je znázornený na Obr. 32.

Ďalšia séria experimentov bola realizovaná s pridaným závažím o hmotnosti 230g na hriadeľi motora a výsledok frekvenčnej analýzy vibrodiagnostických signálov (Obr. 33) získaných z vykonaných experimentov je znázornený na Obr. 34.



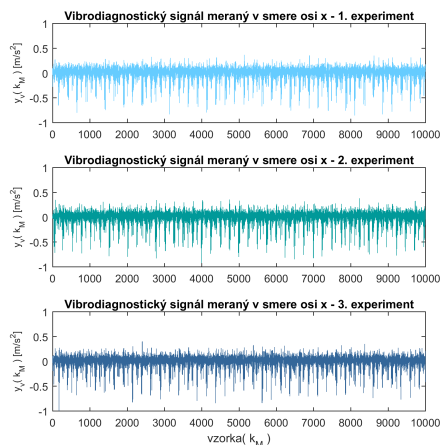
Obr. 31. Priebeh meraného vibrodiagnostického signálu počas jednotlivých experimentov - nominálny systém



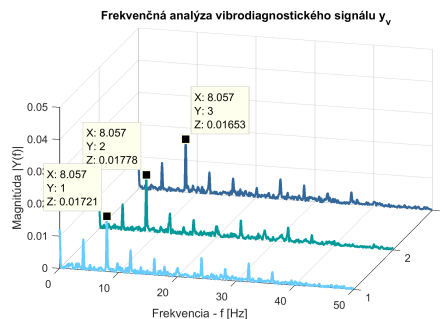
Obr. 32. Frekvenčná analýza vibrodiagnostického signálu jednotlivých experimentov - nominálny systém

V prípade frekvenčnej analýzy je viditeľný dvojnásobný nárast amplitúdy pri frekvencii približne 8Hz, ktorá odpovedá otáčkovej frekvencii hriadeľa. Efekt nevyváženosti sa prejavil aj na časovom priebehu vibrodiagnostického signálu  $y_v$ .

Výsledky frekvenčnej analýzy sú odoslané do supervízneho riadenia, ktorého úlohou je upozorniť na výskyt chyby fyzikálneho systému a v prípade prekročenia prahovej hodnoty zastaviť jeho činnosť.



Obr. 33. Priebeh meraného vibrodiagnostického signálu po jednotlivých experimentoch - nevyváženosť hriadeľa



Obr. 34. Frekvenčná analýza vibrodiagnostického signálu jednotlivých experimentov - nevyváženosť hriadeľa

### C. Implementácia diagnostického systému do distribuovaného systému riadenia

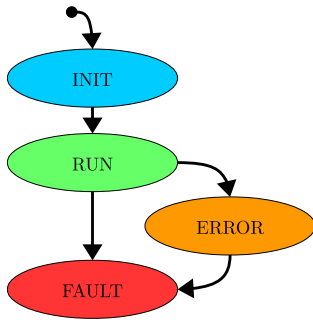
V Scenári 4 sme navrhli supervízne riadenie a spolu s diagnostickým systémom ho implementovali do distribuovaného systému riadenia. Tento modul sa však odlišuje od predošlého Scenáru 1 v návrhu supervízneho riadenia a v implementácii riadiaceho a diagnostického systému v DSR.

#### C.1 Návrh supervízneho riadenia

V tomto scenári pozostáva supervízne riadenie iba z dvoch chybových stavov, konkrétne zo stavu ERROR a FAULT (Obr. 35). Stav ERROR nastáva v prípade, ak sledovaná frekvencia hriadeľa  $|Y_v(f)| \geq 0.01$ ,  $f = 8Hz$ . Tento stav poukazuje na výskyt chyby na hriadeľi, ale činnosť systému nie je ešte pozastavená. V prípade, ak  $|Y_v(f)| \geq 0.015$ ,  $f = 8Hz$  supervízne zmení stav systému na FAULT a zastaví jeho činnosť, aby sa predišlo deštrukcii laboratórneho modelu.

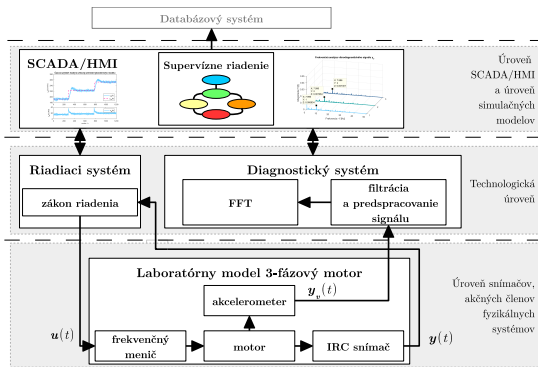
#### C.2 Realizácia diagnostického systému v distribuovanom systéme riadenia

V rámci DSR je vizualizácia dát a supervízne riadenie laboratórneho modelu implementované na jeho tretej



Obr. 35. Stavový diagram stavu laboratórneho modelu 3-fázový motor

úrovni v prostredí *MATLAB/Simulink*. Komunikácia s PLC je zabezpečená s využitím OPC protokolu prostredníctvom programu *RSLinx*. Technologické PC, ktoré má na starosti meranie a frekvenčnú analýzu vibrodiagnostického signálu  $y_v$ , komunikuje na základe TCP/IP protokolu v klient/server architektúre. Dáta z riadenia alebo diagnostiky chýb môžu byť ďalej posielané na databázovú úroveň pre ich archiváciu. Schematické znázornenie uvedenej implementácie riadiaceho a diagnostického systému spolu so supervíznym riadením a vizualizáciou do DSR je znázornené na Obr. 36.



Obr. 36. Implementácia riadiaceho a diagnostického systému so supervíznym riadením v rámci DSR

## VI. ZÁVER A DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY

V dizertačnej práci sme sa venovali návrhu metodiky diagnostiky chýb fyzikálnych systémov, ktorá zahŕňa zostavenie matematického modelu a návrh riadenia nominálneho systému, návrh diagnostického systému na základe vhodne zvolenej metódy diagnostiky chýb a jeho implementácii do distribuovaného systému riadenia. S ohľadom na tento cieľ bola zostavená štruktúra práce, ktorá pozostáva zo siedmych kapitol.

Výsledky dosiahnuté počas riešenia dizertačnej práce možno rozdeliť do troch oblastí, konkrétne v oblasti modelovania, návrhu algoritmov riadenia a diagnostiky chýb fyzikálnych systémov. V rámci riešenia dizertačnej práce sme zostavili dva simulačné modely v prostredí *MATLAB/Simulink*, na základe ich nelineárnych matematických modelov, ktoré sme získali analytickou identifikáciou fyzikálnych systémov

Hydraulický systém 3 nádrže v interakcii a Gul'ôčka na ploche (<http://kyb.fe.i.tuke.sk/laboratoria/modely/gnk.php>). Pre laboratórne modely Hydraulický systém (dve nádrže bez interakcie, <http://kyb.fe.i.tuke.sk/laboratoria/modely/hyd.php>) a 3-fázový motor (<http://kyb.fe.i.tuke.sk/laboratoria/modely/mfm.php>) sme ich matematický opis získali experimentálnou identifikáciou na báze metódy najmenších štvorcov s využitím funkcií *ss* a *armax Signal Processing toolbox*-u. Získané matematické modely fyzikálnych systémov boli využité pre návrh algoritmov riadenia a diagnostiky chýb.

Medzi dosiahnuté výsledky v oblasti riadenia patria navrhnuté algoritmy optimálneho stavového LQ riadenia a prediktívneho riadenia [2],[3]. Tieto typy algoritmov boli overené na simulačných a reálnych fyzikálnych systémoch (Hydraulický systém 3 nádrže, Gul'ôčka na ploche [11], [12], laboratórny model Hydraulický systém pozostávajúci z dvoch nádrží bez interakcie) v zvolených riadiaciach štruktúrach pre definované ciele riadenia. Rovnako boli upravené s účelom ich prispôsobenia sa vzniknutým chybám snímačov alebo akčných členov. Taktiež bolo navrhnuté číslicové riadenie s využitím metódy rozmiestnenia pólov pre laboratórny model 3-fázový motor, ktoré bolo implementované priamo v riadiacom PLC.

V oblasti diagnostiky chýb boli navrhnuté diagnostické systémy pre dva simulačné a dva reálne fyzikálne systémy. Pre návrh diagnostického systému oboch hydraulických systémov sme využili navrhnutý algoritmus na báze filtra pre estimovanie stavov fyzikálneho systému a chýb jeho snímačov. Uvedený algoritmus sme modifikovali pre účely estimácie chýb akčných členov. Pre fyzikálny systém Gul'ôčka na ploche sme navrhli algoritmus estimátora s neznámym vstupom pre diagnostický systém na odhalenie chýb jeho akčných členov. Diagnostika chýb laboratórneho modelu 3-fázový motor je realizovaná na základe frekvenčnej analýzy dát, získaných meraním jeho vibrácií, s využitím algoritmu rýchlej Fourierovej transformácie.

Pre tri fyzikálne systémy (Gul'ôčka na ploche, laboratórny model Hydraulický systém, laboratórny model 3-fázový motor) sme navrhli supervízne riadenie v tvare stavového automatu, ktorého úlohou je na základe informácií získaných z riadenia a diagnostického systému posúdiť stav monitorovaného fyzikálneho systému. V prípade reálnych laboratórnych modelov sme túto komunikáciu implementovali s využitím OPC a TCP/IP komunikačného protokolu, pričom bol riadiaci, diagnostický systém a supervízne riadenie implementované na najnižších troch úrovniach DSR na KKUI.

Využitie reálne laboratórne modely tvoria experimentálne pracovisko, ktoré je možné využiť pre overenie algoritmov modelovania, riadenia a diagnostiky chýb snímačov alebo akčných členov na základe navrhnutej metodiky pre diagnostiku chýb modelov fyzikálnych systémov. Dosiahnuté výsledky sú spracované v štyroch vytvorených modelových scenároch.

## POĎAKOVANIE

Dizertačná práca bola riešená v rámci nasledujúcich projektov:

- projekt **Univerzitný vedecký park Technicom pre inováčné aplikácie s podporou znalostných technológií**, kód ITMS:26220220182, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja, Centrum pre nedeštruktívnu diagnostiku technologických procesov so štandardným softvérovým vybavením pre riadenie a komunikáciu (aktivita 3.1), (2013 - 2015)
- projekt **Univerzitný vedecký park Technicom pre inováčné aplikácie s podporou znalostných technológií - II.fáza**, kód ITMS:313011D232, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja, (2015 - 2017), Centrum pre nedeštruktívnu diagnostiku technologických procesov so štandardným softvérovým vybavením pre riadenie a komunikáciu (aktivita 3.1, PP7), (2015 - 2017)
- projekt KEGA č.001TUKE-4/2015, **CyberLabTrainSystem - demonštrátor a trenážer informačno-riadiaceho systému - inovácia** (2015 - 2017)
- grant FEI TUKE 2015-33 s názvom **Výskumné laboratórium nelineárnych podaktuovaných systémov** (Research laboratory for nonlinear underactuated systems), (1/2017 - 12/2017)
- projekt ALICE KE FEI TUKE (0222/2016 - 2/2016-DOT) s názvom **Experiment ALICE na LHC v CERN: Štúdium silno interagujúcej hmoty v extrémnych podmienkach**, (2016-2020)

## REFERENCES

- [1] NOURA, H., THEILLIOL, D., PONSART, J.-C., a CHAMSEDDINE, A. *Fault-tolerant control systems: Design and practical applications*. Springer Science & Business Media, 2009. ISBN 978-1-84882-653-3.
- [2] ORAVEC, M. a JADLOVSKÁ, A. Sensors fault diagnosis algorithm design of a hydraulic system. *Acta Electrotechnica et Informatica*, 17(2):30-37, 2017. ISSN 1335-8243.
- [3] ORAVEC, M. a JADLOVSKÁ, A. Intelligent positioning plate predictive control and concept of diagnosis system design. *Journal of Manufacturing and Industrial Engineering*, 15(1-2):1-9, 2017. ISSN 1339-2972.
- [4] JADLOVSKÝ, J., JADLOVSKÁ, A., JADLOVSKÁ, S., KOPČÍK, M., ČABALA, J., ORAVEC, M., VOŠČEK, D., TKÁČIKČÍK, M., CHOCHULA, P., a PINAZZA, O. Communication architecture of the detector control system for the inner tracking system. strany 1930-1933, 2017. ISBN 978-3-95450-193-90.
- [5] KREIDL, M. a ŠMÍD, R. *Technická diagnostika*. BEN - technická literatúra, 2006, 408 s. ISBN 80-7300-158-6.
- [6] DING, S. *Model-based fault diagnosis techniques: design schemes, algorithms, and tools*. Springer Science & Business Media, 2008. ISBN 978-3-540-76303-1.
- [7] THEILLIOL, D., NOURA, H., a PONSART, J.-C. Fault diagnosis and accommodation of a three-tank system

based on analytical redundancy. *ISA transactions*, 41(3): 365-382, 2002. ISSN 0019-0578.

- [8] WANG, Z., RODRIGUES, M., THEILLIOL, D., a SHEN, Y. Actuator fault estimation observer design for discrete-time linear parameter-varying descriptor systems. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 29(2):242-258, 2015. ISSN 1099-1115.
- [9] MIKSCH, T., GAMBIER, A., a BADREDDIN, E. Real-time implementation of fault-tolerant control using model predictive control. In: *World Congress*, number 1, strany 11136-11141., International Federation of Automatic Control, 2008. ISBN 978-3-902661-00-5.
- [10] KROKAVEC, D. a FILASOVÁ, A. *Diagnostika dynamických systémov*. elfa s.r.o, 2007, 240 s. ISBN 978-80-8086-060-8.
- [11] ORAVEC, M. a JADLOVSKÁ, A. Model predictive control of a ball and plate laboratory model. In: *Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMII), 2015 IEEE 13th International Symposium on*, strany 165-170., IEEE, 2015. ISBN 978-1-4799-8220-2.
- [12] ORAVEC, M. a JADLOVSKÁ, A. Optimal State Control of the Mechatronical Laboratory Model B&P\_KYB. In: *Electrical Engineering and Informatics 5 : proceedings of the Faculty of Electrical Engineering and Informatics of the Technical University of Košice*, strany 9-16., Faculty of Electrical Engineering and Informatics, September 2014. ISBN 978-80-553-1704-5. (AED).