

TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY
KATEDRA KYBERNETIKY A UMELEJ INTELIGENCIE

Návrh programových modulov pre riadiaci a
monitorovací systém modelov fyzikálnych systémov
CMMRaPI v simulačnom prostredí Matlab
Diplomová práca

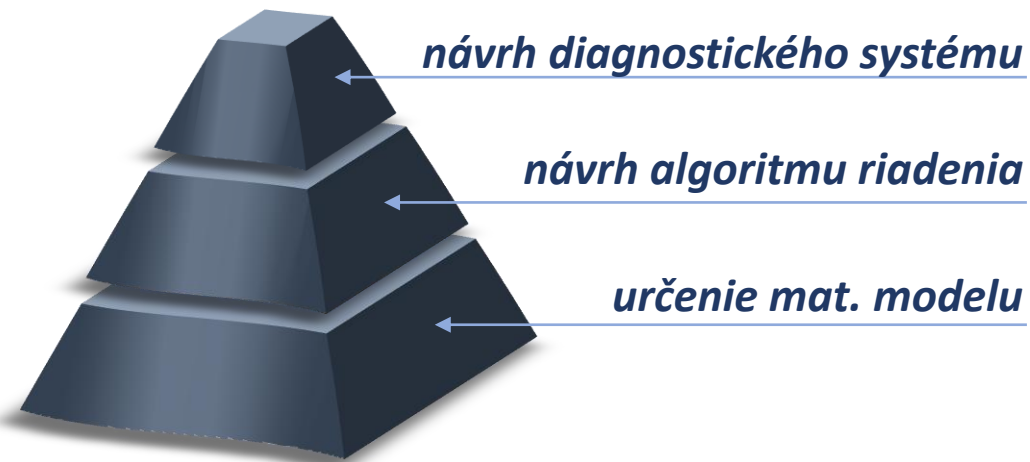
Školiteľ : doc. Ing. Anna Jadlovská, PhD.
Konzultant : Ing. Matej Oravec
Autor : Bc. Miroslav Murín

Obsah prezentácie:

1. Analýza riešenej problematiky
2. Návrh riadiaceho a monitorovacieho systému pre laboratórny model hydraulického systému
3. Návrh riadiaceho a monitorovacieho systému pre laboratórny model trojfázového motora
4. Charakteristika vytvorenej aplikácie *RaDFS*
5. Zhodnotenie dosiahnutých výsledkov

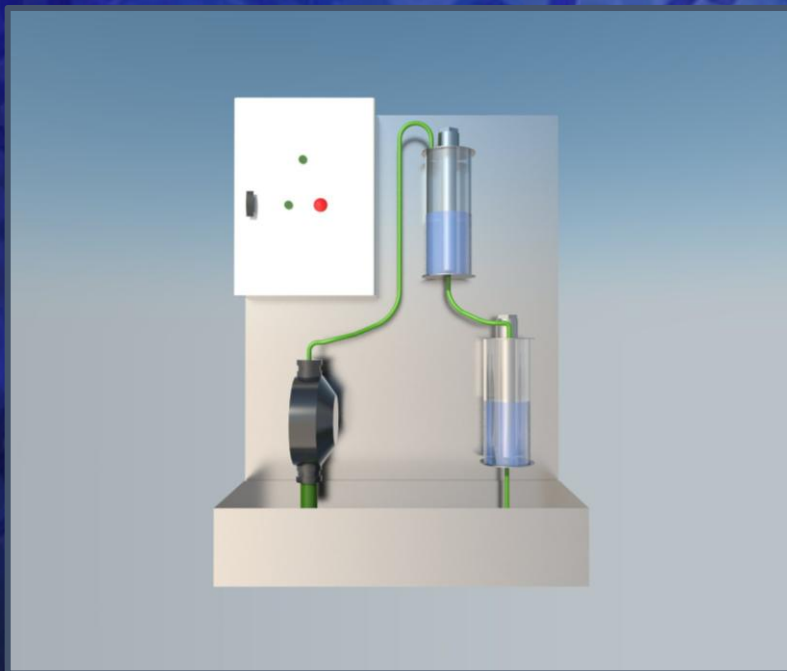
1. Analýza riešenej problematiky

- ✓ cieľ → návrh riadiaceho a monitorovacieho/diagnostického systému pre fyzikálne systémy

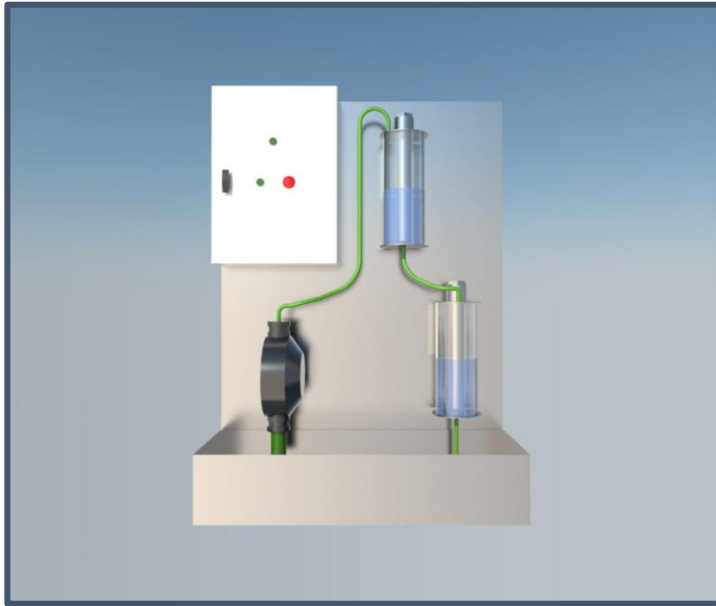


- ✓ návrh diagnostického systému → na základe matematického modelu a nameraných dát

2. Návrh riadiaceho a monitorovacieho systému pre laboratórny model hydraulického systému



2. Popis hydraulického systému



Parametre:

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	$[mm]$

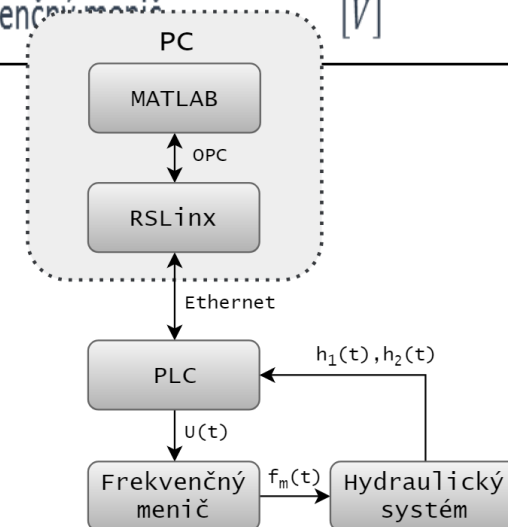
Fyzikálne veličiny:

$q_0(t), q_1(t)$	– prítok do 1. a 2. nádrže	$[mm^3 s^{-1}]$
$q_1(t), q_2(t)$	– voľný odtok z 1. a 2. nádrže	$[mm^3 s^{-1}]$
$h_1(t), h_2(t)$	– výška hladín v 1. a 2. nádrži	$[mm]$
$U(t)$	– napätie privádzané na frekvenčný menič	$[V]$

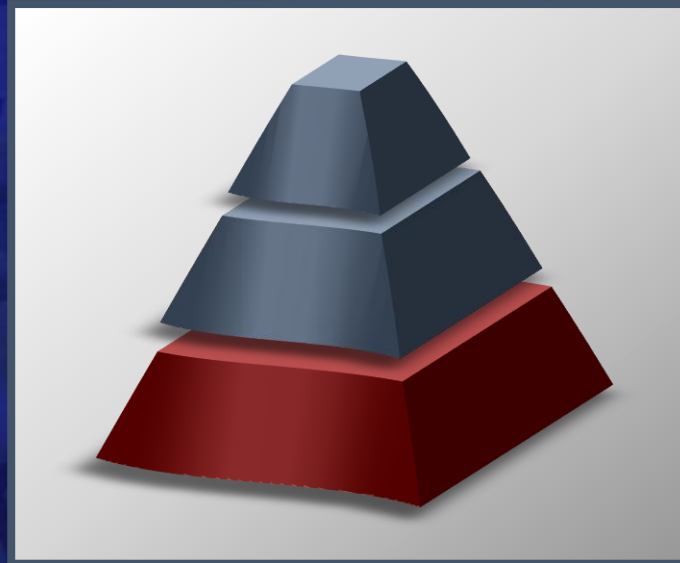
Vstup systému → napätie privádzané na frekvenčný menič (Allen-Bradley Power Flex 40)

Výstup systému → výšky hladín v nádobách snímané kapacitnými snímačmi (Dinel)

Komunikácia → pomocou OPC protokolu (Matlab – RSLinx), pomocou Ethernet (RSLinx – PLC Allen-Bradley Micrologix 1200)

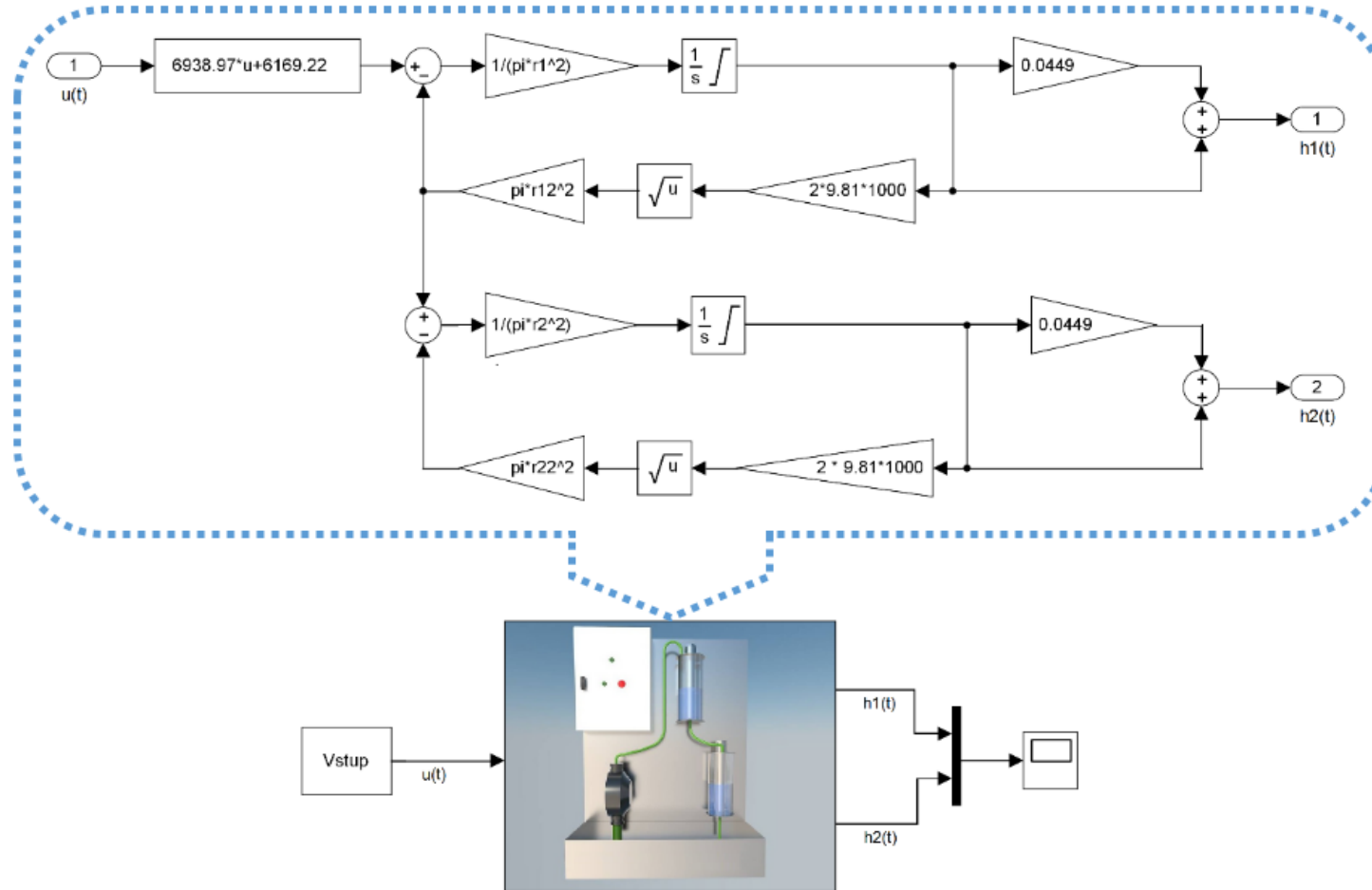


2.A Modelovanie hydraulického systému



2.A Analytická identifikácia hydraulického systému

Model určený za pomoci rovníc pre materiálovú bilanciu



2.A Experimentálna identifikácia hydraulického systému

Periódá vzorkovania $\rightarrow T_s = 1$ [s]

Pracovný bod pre identifikáciu \rightarrow

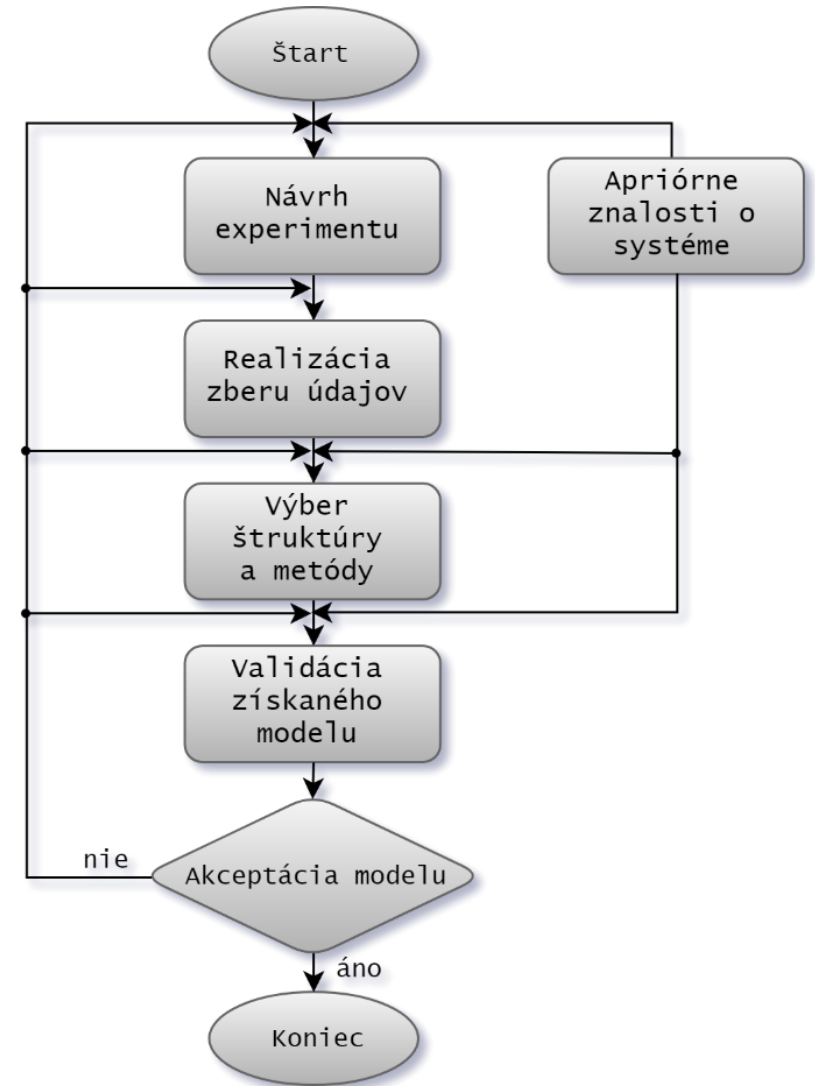
$PB = \{u_0$ [V]; y_{10} [mm]; y_{20} [mm] $\} = \{6; 158,5; 157,5\}$

Štruktúra modelu \rightarrow diskretný stavový popis
s kanonickou formou matice C_d

$$\Delta x(k+1) = A_d \Delta x(k) + B_d \Delta u(k)$$

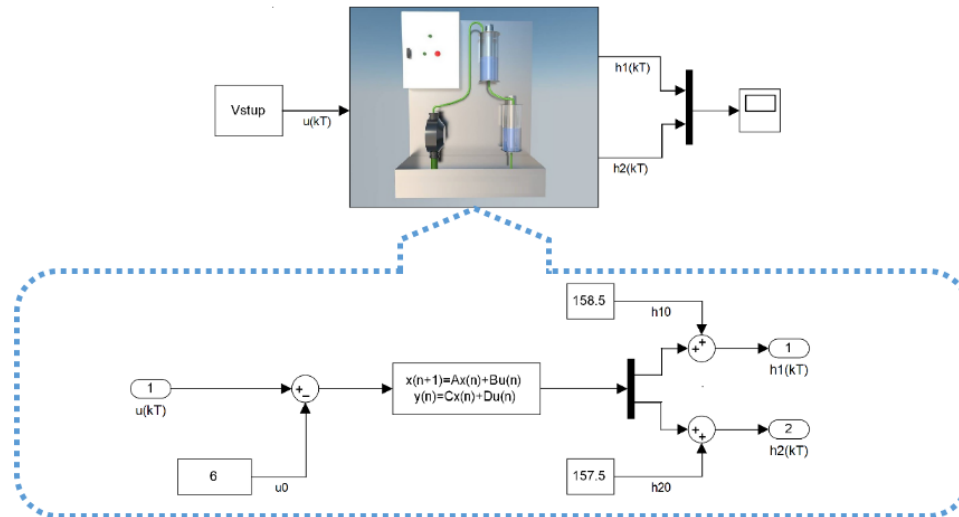
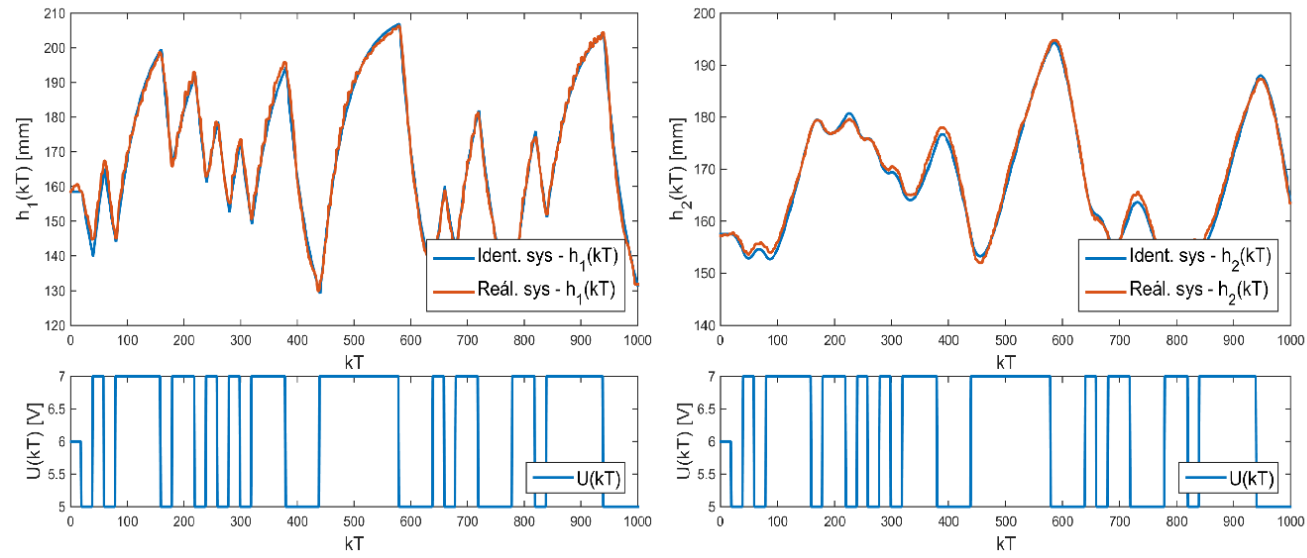
$$\Delta y(k) = C_d \Delta x(k)$$

$$A_d = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}, B_d = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}, C_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

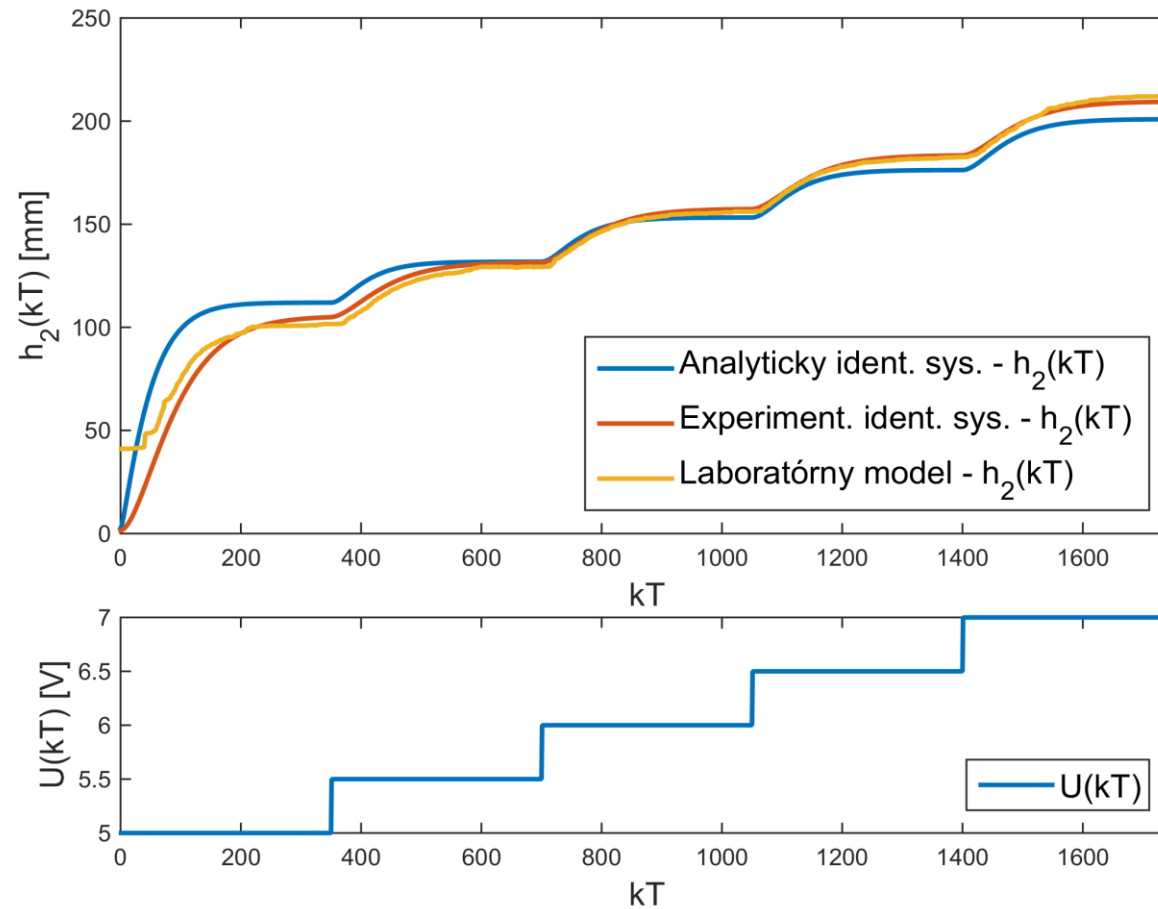


2.A Experimentálna identifikácia hydraulického systému

Porovnanie odozvy laboratórneho modelu a identifikovaného modelu hydraulického systému

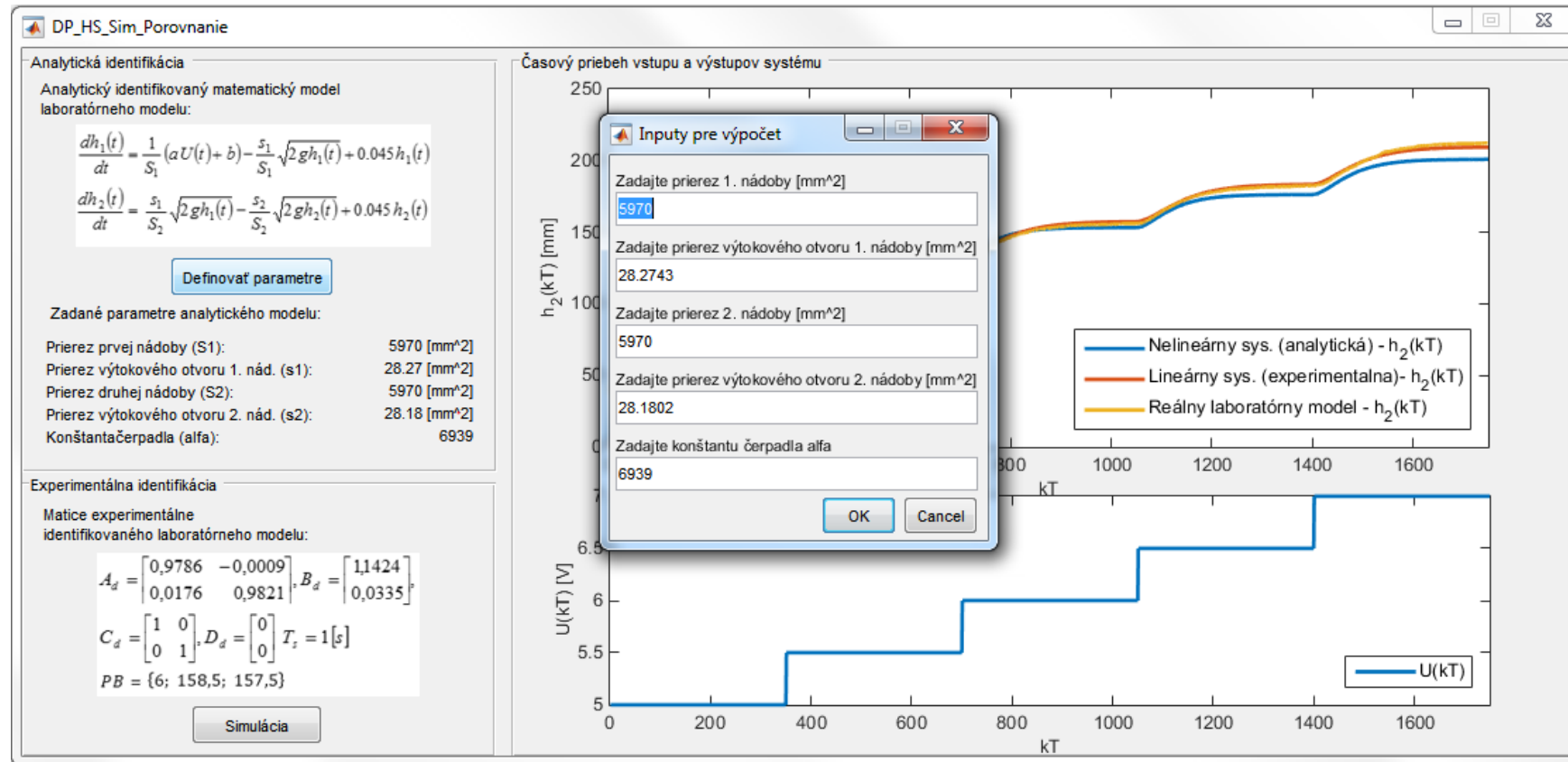


2.A Porovnanie identifikovaných systémov

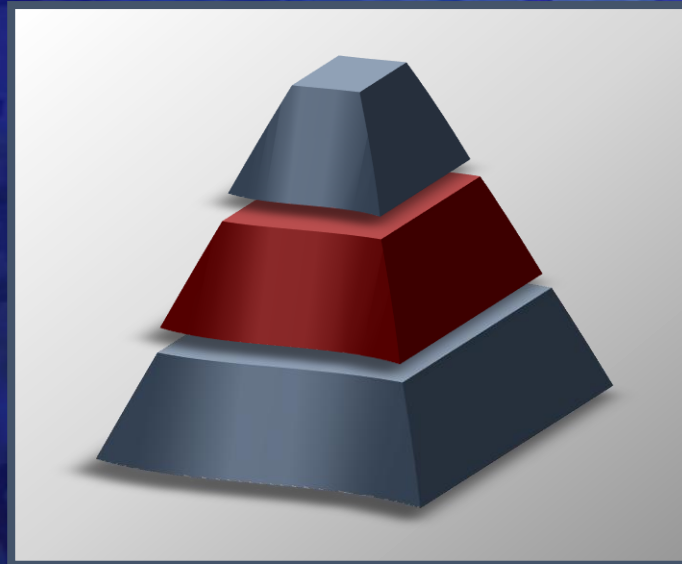


Porovnanie jednotlivých modelov

2.A Modelovanie a porovnanie simulačných modelov (RaDFS)



2.B Návrh riadenia pre hydraulického systému



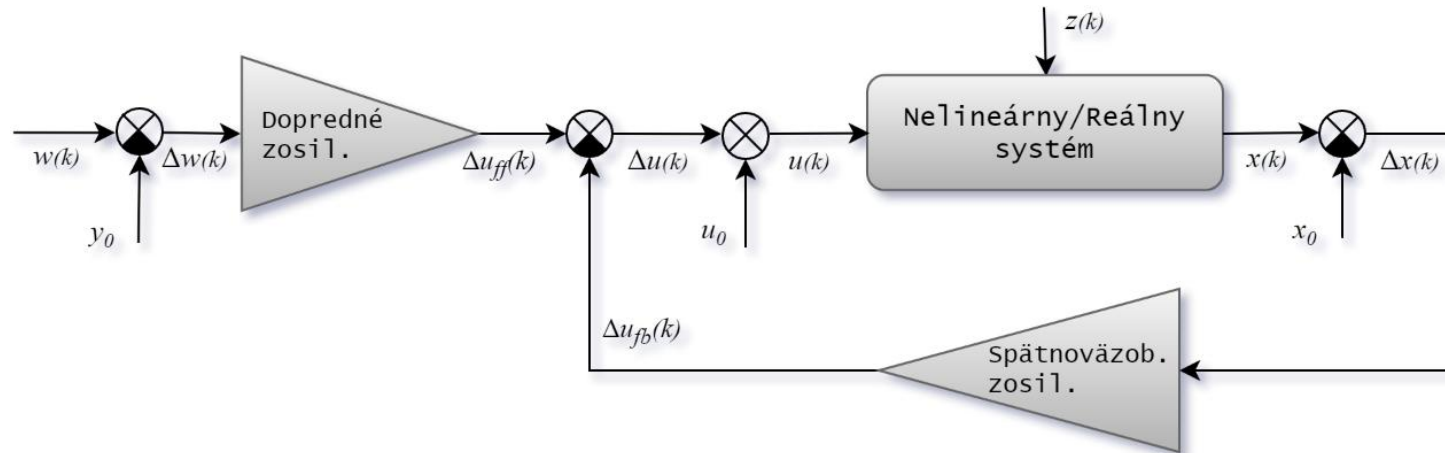
2.B Stavové optimálne riadenie s dopredným zosilnením

Kritérium optimálneho riadenia:

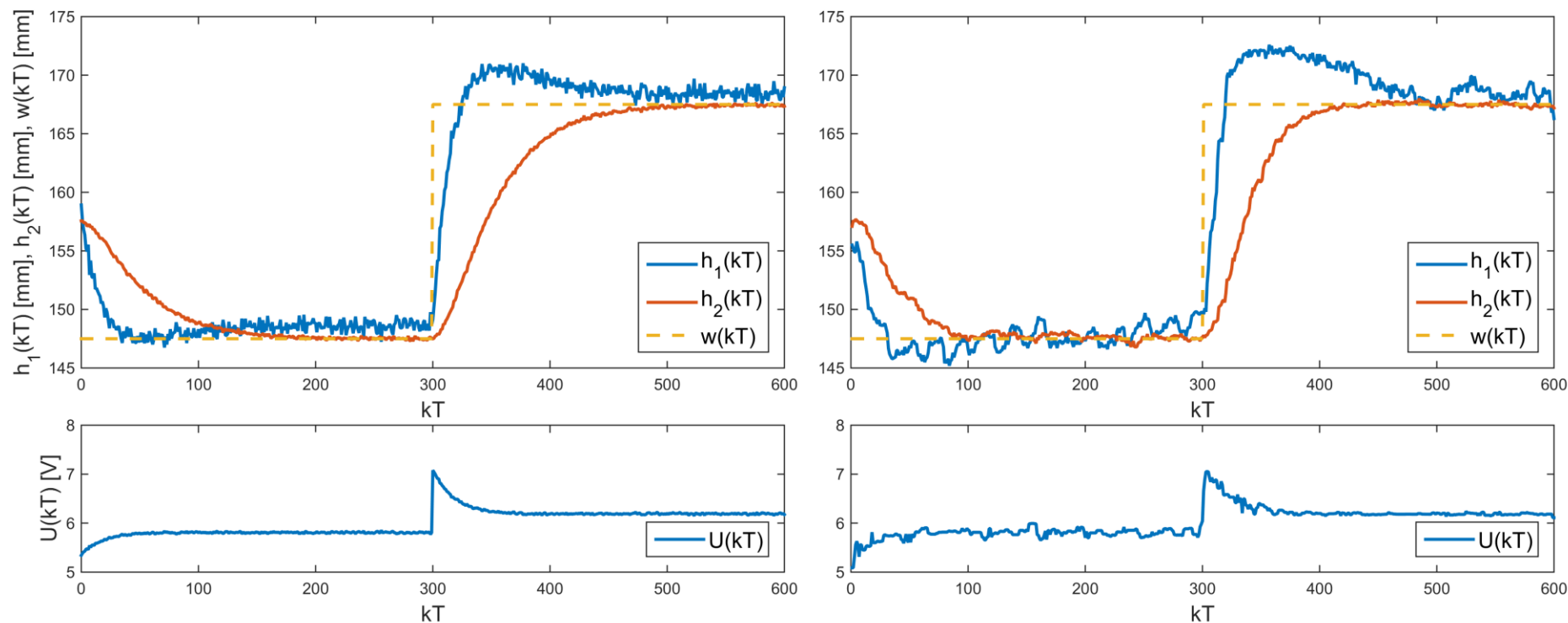
$$J = \sum_{k=1}^{\infty} \{ \Delta x^T(k) Q \Delta x(k) + \Delta u^T(k) R \Delta u(k) \} \quad (1)$$

Zákon riadenia pre odchýlkový model:

$$\Delta u(k) = -K \Delta x(k) + N \Delta w(k) \quad (2)$$



2.B Simulačné a experimentálne overenie stavového optimálneho riadenia s dopredným zosilnením



Priebeh riadenia simulačného (vľavo) a reálneho modelu (vpravo)

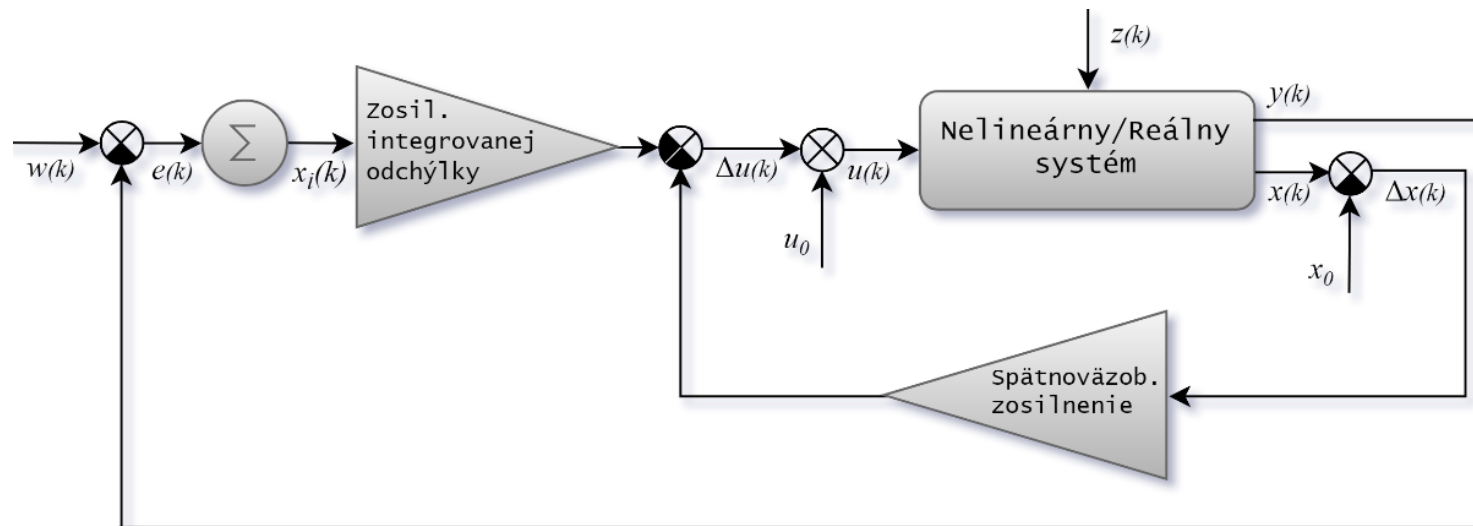
2.B Stavové optimálne riadenie s integrátorom

Kritérium optimálneho riadenia:

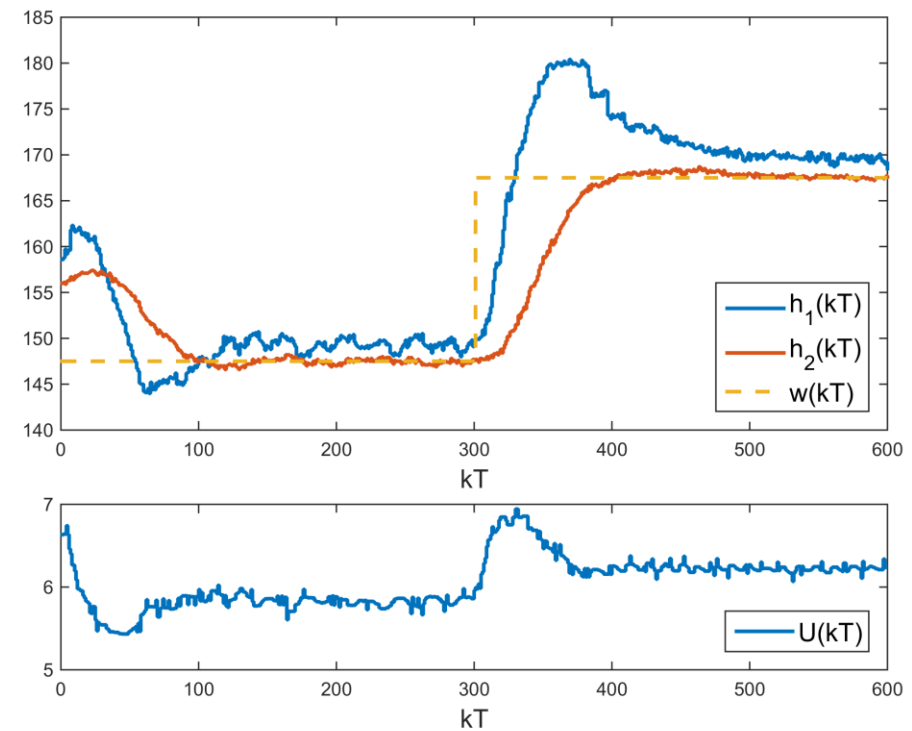
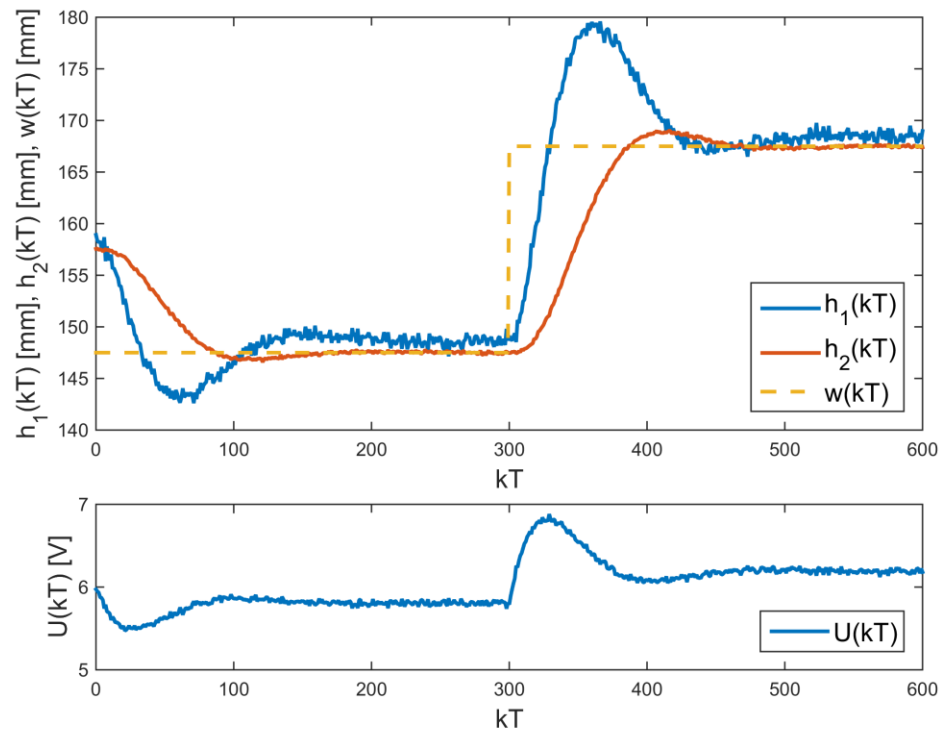
$$J = \sum_{k=1}^{\infty} \{ \Delta z^T(k) Q \Delta z(k) + \Delta u^T(k) R \Delta u(k) \} \quad (3)$$

Zákon riadenia pre odchýlkový model:

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



2.B Simulačné a experimentálne overenie stavového optimálneho riadenia s integrátorom



Priebeh riadenia simulačného (vľavo) a reálneho modelu (vpravo)

2.B Prediktívne riadenie vážiace zmenu akčného zásahu

Kritérium optimálneho riadenia:

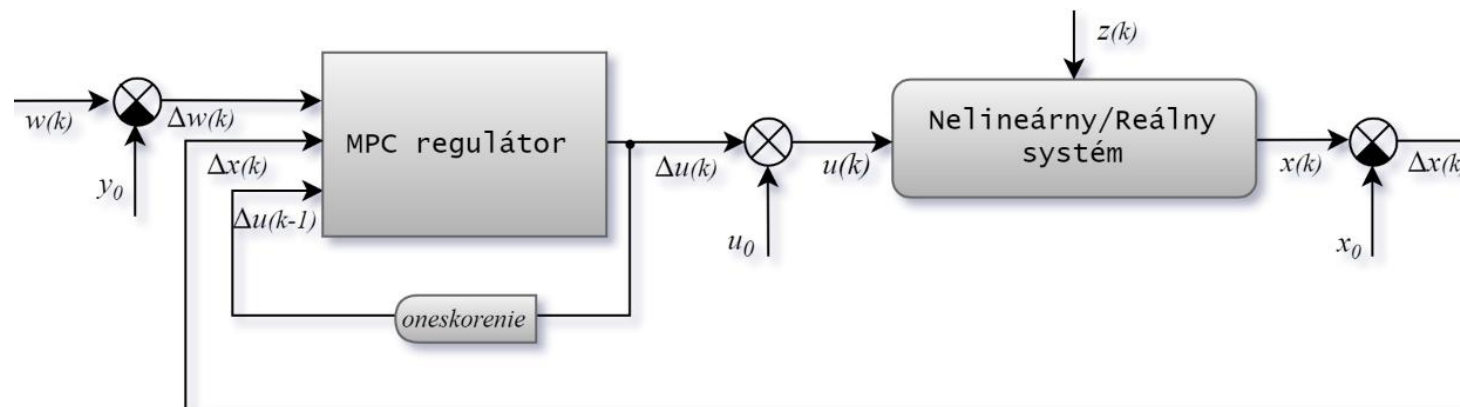
$$J = \sum_{i=k}^{k+N_p-1} \{Q[\Delta y(i) - \Delta w(i)]^2 + R[\delta \Delta u(i)]^2\} \quad (5)$$

Výpočet vektoru riadenia -> každom kroku minimalizovaním výrazu:

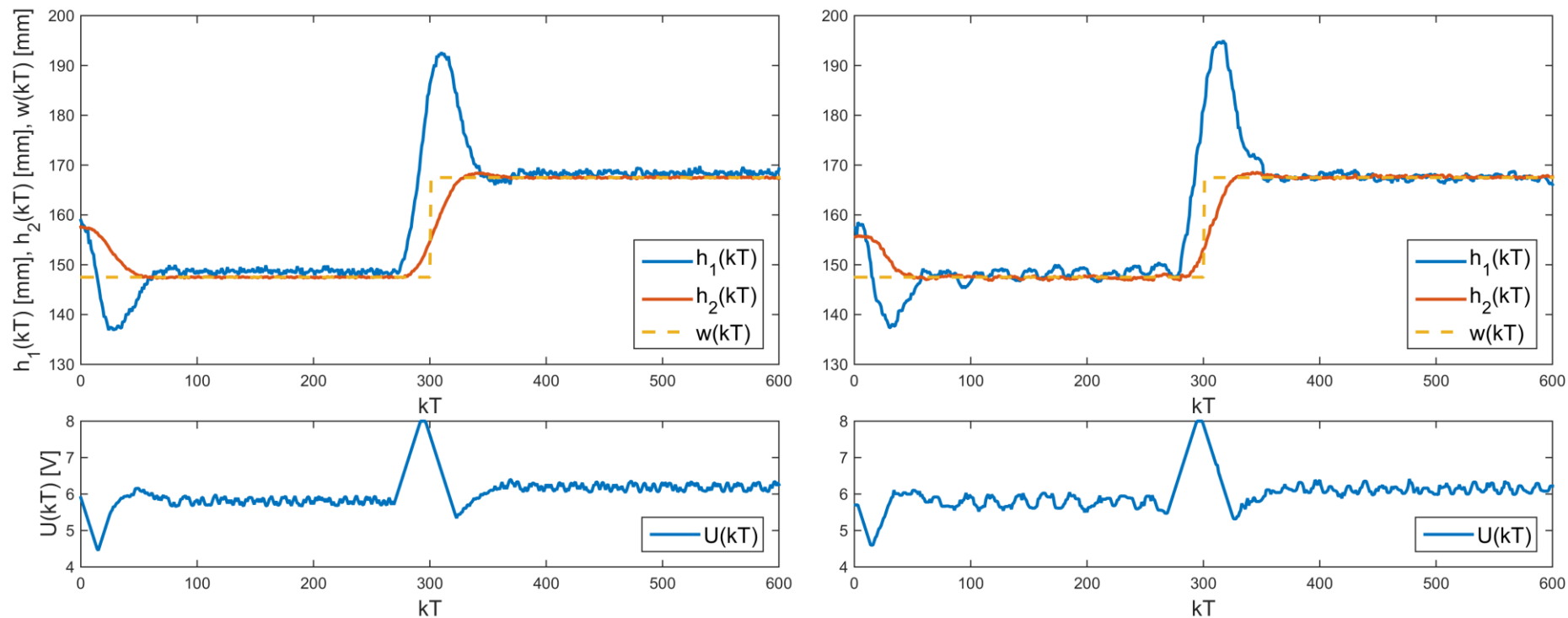
$$\min_{\Delta u} \left(\frac{1}{2} \Delta u_k^T H \Delta u_k + f^T \Delta u_k \right) \quad (6)$$

kde Hessián H a vektor gradientu f^T :

$$\begin{aligned} H &= S^T Q S + D^T R D \\ f^T &= (\Delta \tilde{y}_k - \Delta w_k)^T Q S - \Delta \tilde{u}_k R D \end{aligned} \quad (7)$$



2.B Simulačné a experimentálne overenie prediktívneho riadenia vážiace zmenu akčného zásahu



Priebeh riadenia simulačného (vľavo) a reálneho modelu (vpravo)

2.B Prediktívne riadenie vážiace zmenu akčného zásahu s integrátorom

Kritérium optimálneho riadenia:

$$J = \sum_{i=k}^{k+N_p-1} \{Q[\Delta y(i) - \Delta w(i)]^2 + R[\delta \Delta u(i)]^2 + Q_e [y_e(i)]^2\} \quad (8)$$

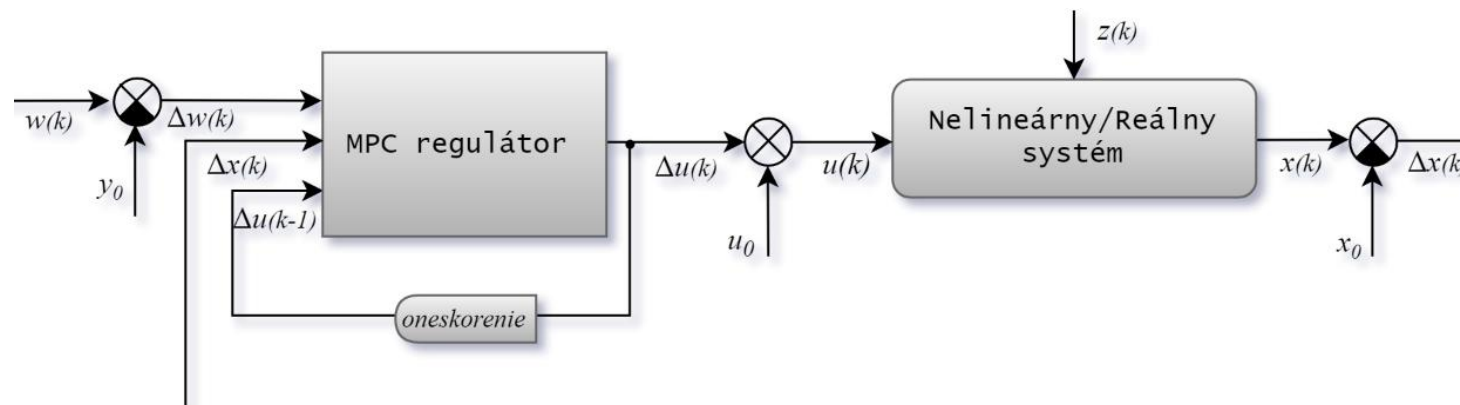
Výpočet vektoru riadenia -> každom kroku minimalizovaním výrazu :

$$\min_{\Delta u} \left(\frac{1}{2} \Delta u_k^T H \Delta u_k + f^T \Delta u_k \right) \quad (9)$$

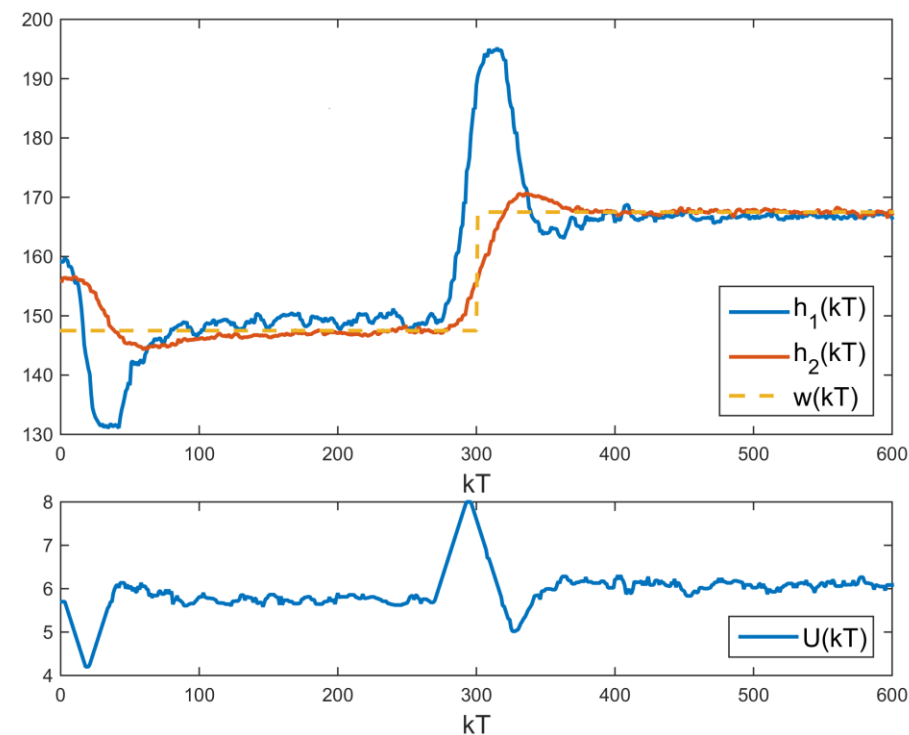
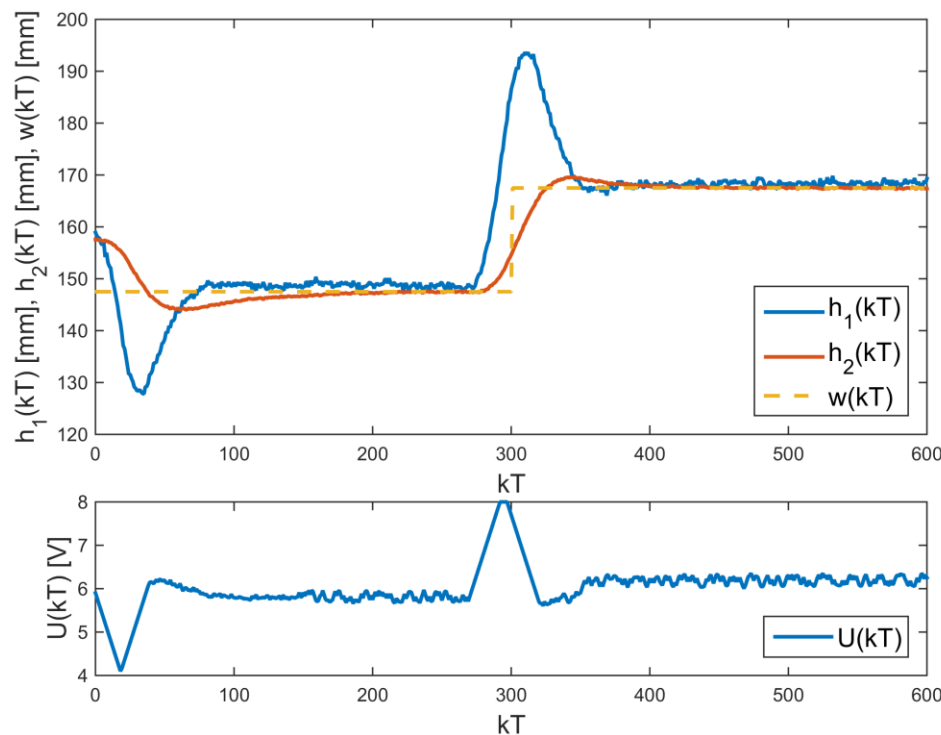
kde Hessián H a vektor gradientu f^T :

$$H = S^T Q S + D^T R D + S^T I_v^T Q_e I_v S$$

$$f^T = (\Delta \tilde{y}_k - \Delta w_k)^T Q S - \Delta \tilde{u}_k R D + \left(\hat{x}_e(k) + I_v (\Delta \tilde{y}_k - \Delta w_k) \right)^T Q_e I_v S \quad (10)$$

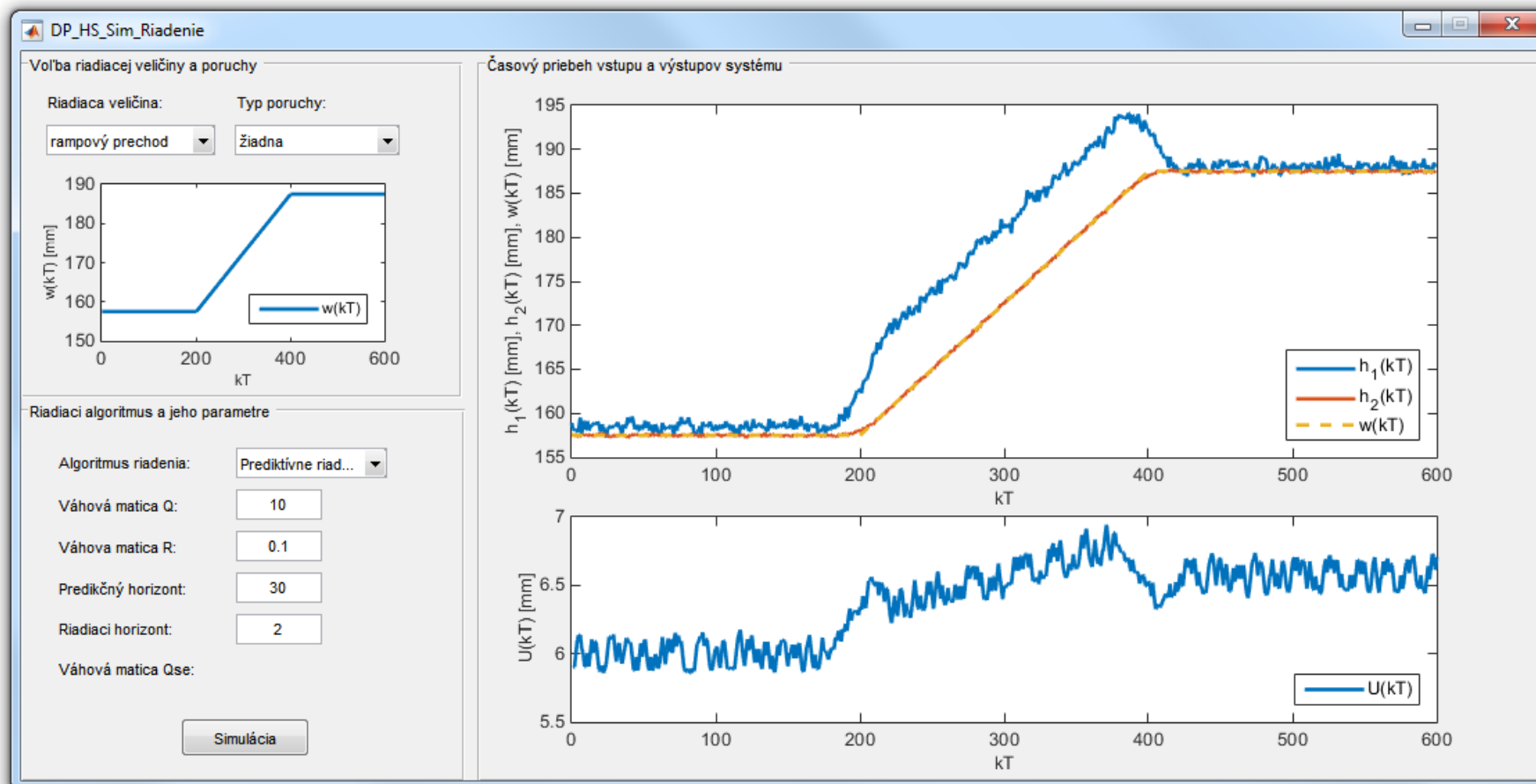


2.B Simulačné a experimentálne overenie prediktívneho riadenia vážiace zmenu akčného zásahu s integrátorom

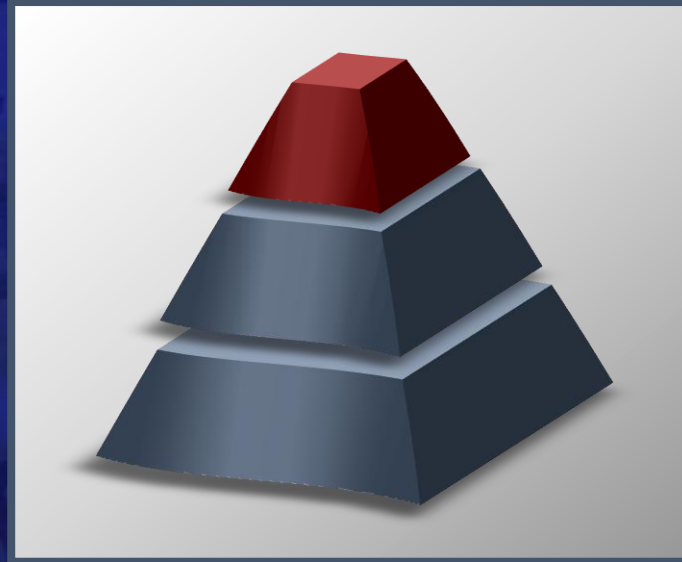


Priebeh riadenia simulačného (vľavo) a reálneho modelu (vpravo)

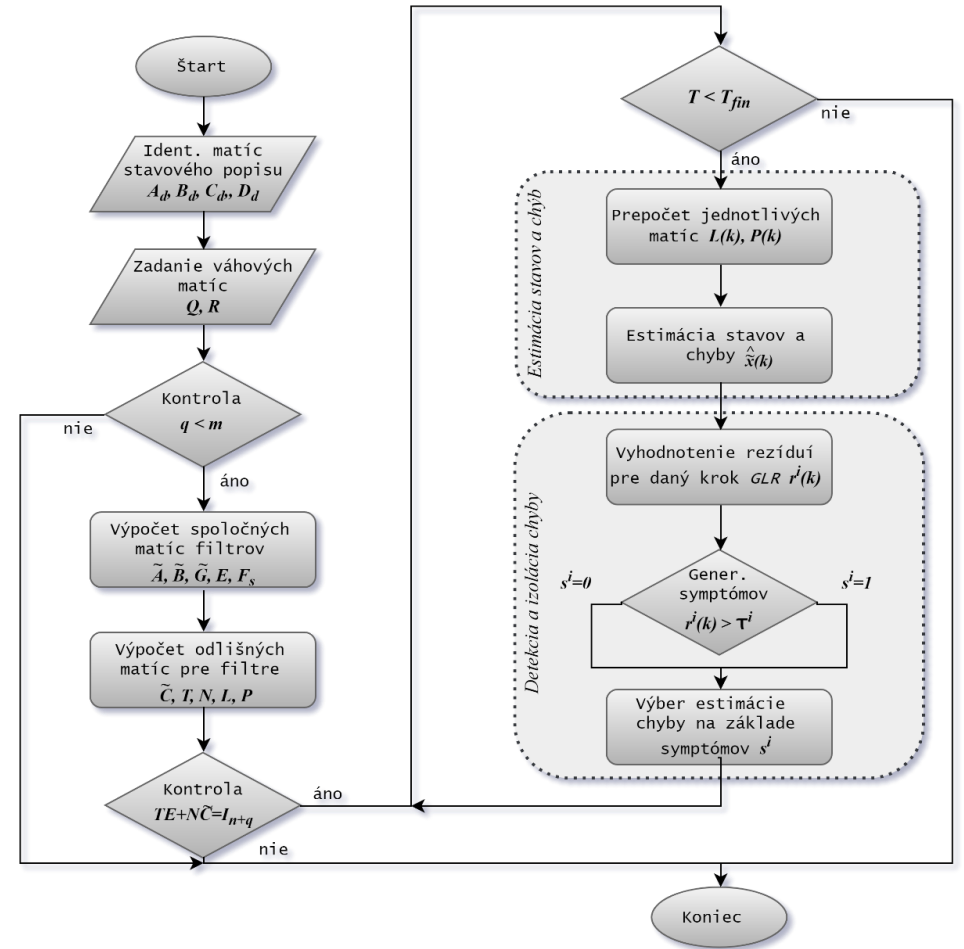
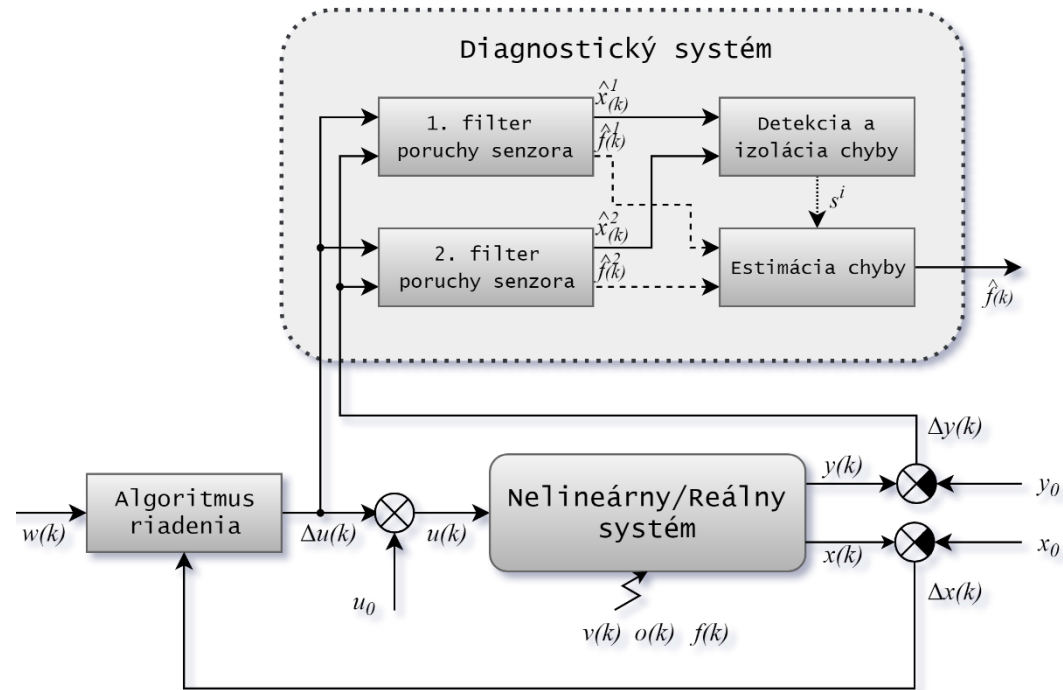
2.B Riadenie simulačného a laboratórneho modelu (RaDFS)



2.C Návrh diagnostického systému



2.C Návrh diagnostického systému



2.C Návrh filtra pre estimáciu stavov a chýb senzorov

Chybový model hydraulického systému:

$$\begin{aligned}\Delta x(k+1) &= A_d \Delta x(k) + B_d \Delta u(k) + v(k) \\ \Delta y(k) &= C_d \Delta x(k) + F_s f_s(k) + o(k)\end{aligned}\tag{11}$$

Estimácia stavov a chyby senzora s využitím Kalmanovej filtrácie:

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

Výstup estimátora:

$$\hat{\tilde{x}}(k) = \begin{bmatrix} \Delta \hat{\tilde{x}}(k) \\ \hat{f}_s(k) \end{bmatrix}\tag{13}$$

Matica zosilnenia filtra:

$$L(k) = T\tilde{A}P(k)\tilde{C}^T [\tilde{C}P(k)\tilde{C}^T + R]^{-1}\tag{14}$$

2.C Detekcia a lokalizacia chýb senzorov

Rezíduum generované filtrom:

$$r(k) = \Delta y(k) - \tilde{C}\hat{x}(k) \quad (15)$$

Funkcia detekcie chyby s uvažovaním posúvajúceho sa okna v čase (*GLR-test*)

$$r^i(k) = \begin{cases} \max_{1 \leq j \leq k} \left\{ \frac{1}{2} \left[\sum_{j=1}^k (r^i(j) - \mu_0^i) \right]^T \sigma^i \left[\sum_{j=1}^k (r^i(j) - \mu_0^i) \right] \right\}, & \rightarrow k < M \\ \max_{k-M+1 \leq j \leq k} \left\{ \frac{1}{2} \left[\sum_{j=k-M+1}^k (r^i(j) - \mu_0^i) \right]^T \sigma^i \left[\sum_{j=k-M+1}^k (r^i(j) - \mu_0^i) \right] \right\}, & \rightarrow k \geq M \end{cases} \quad (16)$$

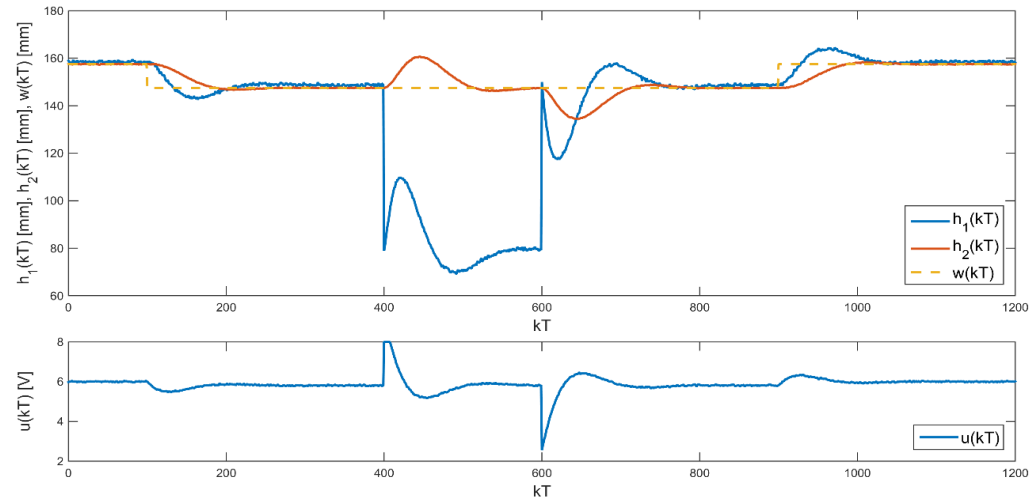
Lokalizácia chyby prebieha generovaním kombinovaním symptómov

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

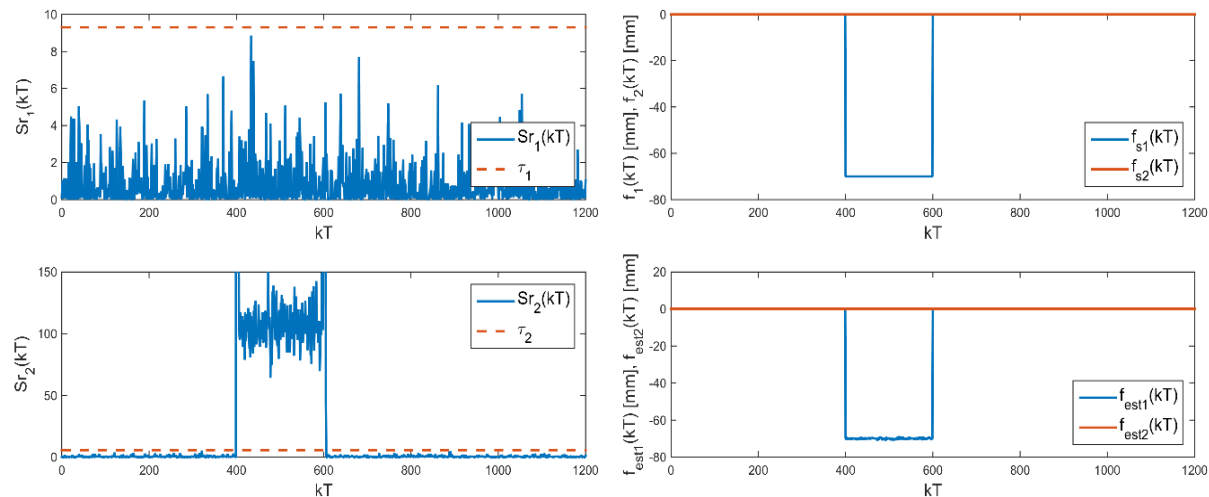
	Nominálny stav	Chyba 1. senzora	Chyba 2. senzora
s^1	0	0	1
s^2	0	1	0

(17)

2.C Simulačné overenie navrhnutého diagnostického systému

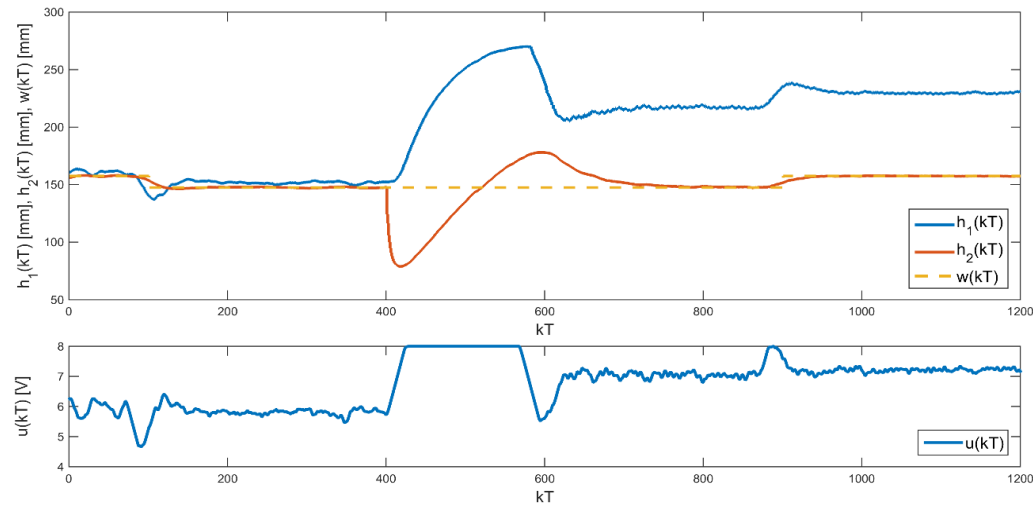


Časová odozva riadenia so simulovanou *chybou prvého snímača*

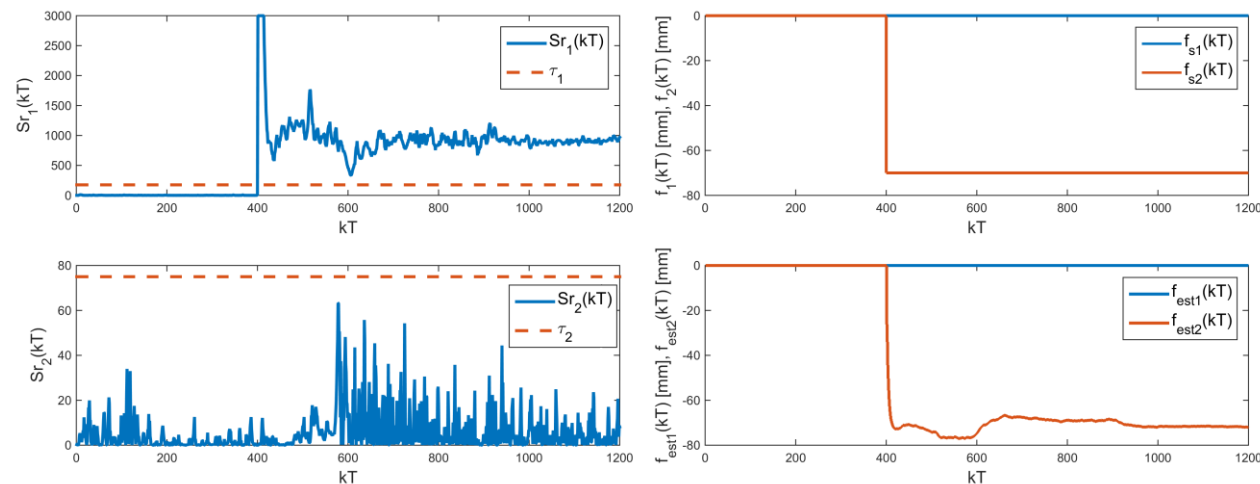


Časový priebeh rezíduí z *GLR-testu*, simulovaná a *estimovaná* chyba

2.C Experimentálne overenie navrhnutého diagnostického systému

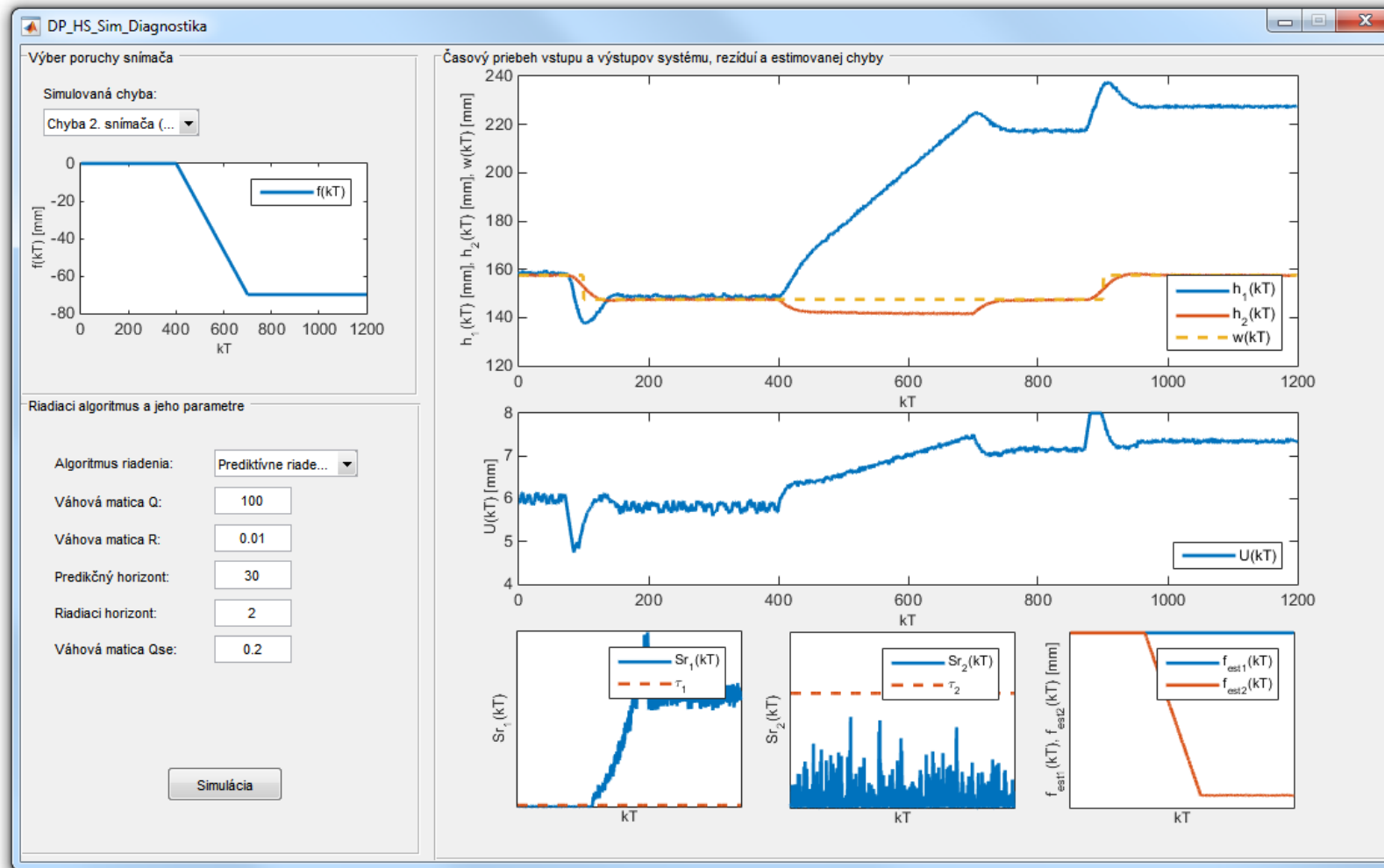


Časová odozva riadenia so simulovanou *chybou druhého snímača*



Časový priebeh rezíduí z *GLR-testu*, simulovaná a estimovaná chyba

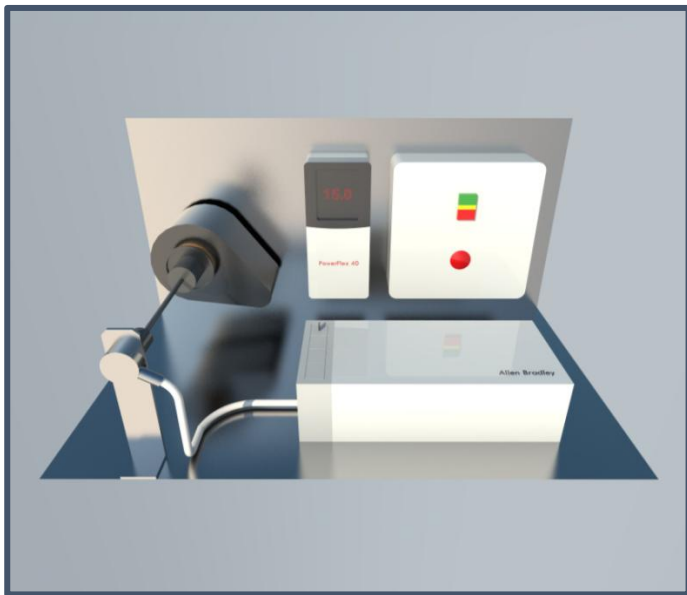
2.C Diagnostika chýb senzorov simulačného modelu (RaDFS)



3. Návrh riadiaceho a monitorovacieho systému pre laboratórny model trojfázového motora



3. Popis trojfázového motora



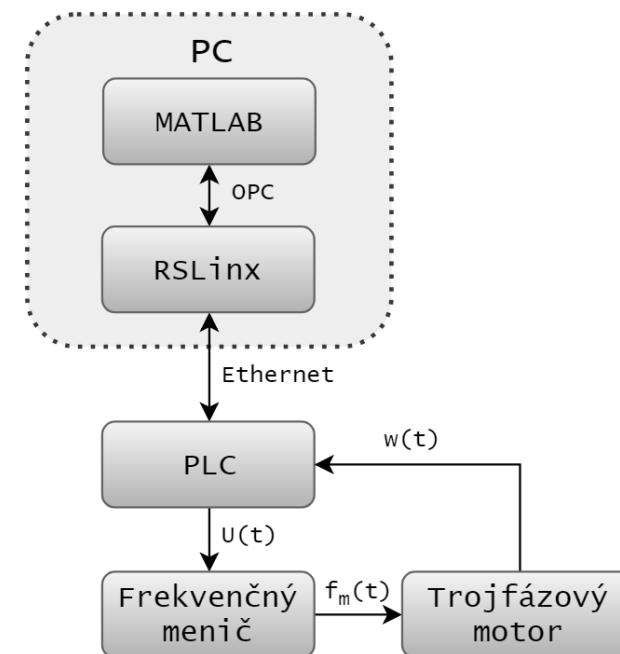
Fyzikálne veličiny:

$u(t)$ – vstupná veličina systému	[ij]
$\omega(t)$ – uhlová rýchlosť hriadeľa motora	[$rad\ s^{-1}$]
$U(t)$ – napätie pôsobiace na motor	[V]

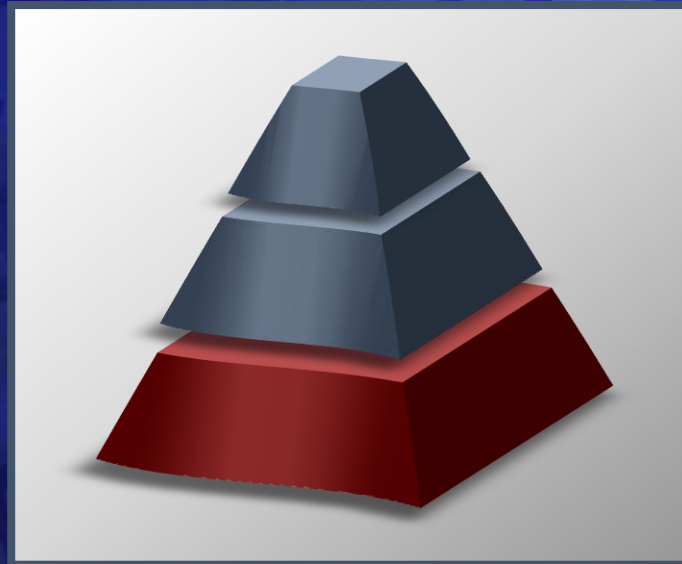
Vstup systému → vstupné napätie privádzané na frekvenčný menič (Allen-Bradley Power Flex 40)

Výstup systému → uhlová rýchlosť motora → určená enkodérom pomocou HSC

Komunikácia → pomocou OPC protokolu (Matlab – RSLinx), pomocou technológie Ethernet (RSLinx – PLC Allen-Bradley Compact Logix L23E)



3.A Modelovanie trojfázového motoru



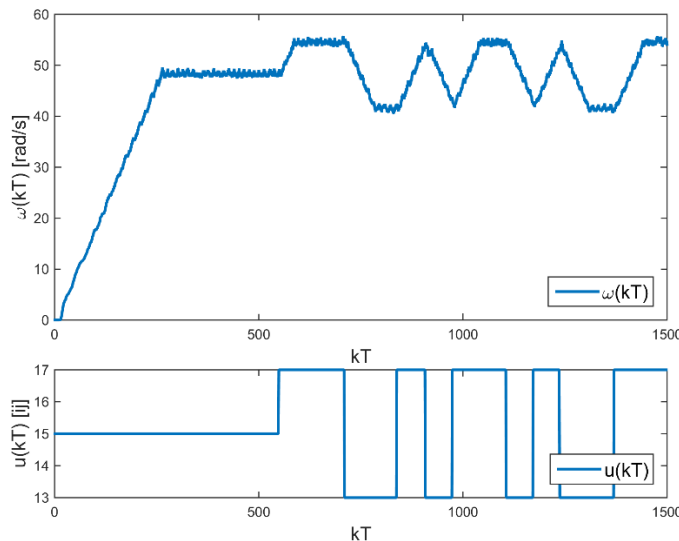
3.A Experimentálna identifikácia trojfázového motora

Periódá vzorkovania $\rightarrow T_s = 0.01$ [s]

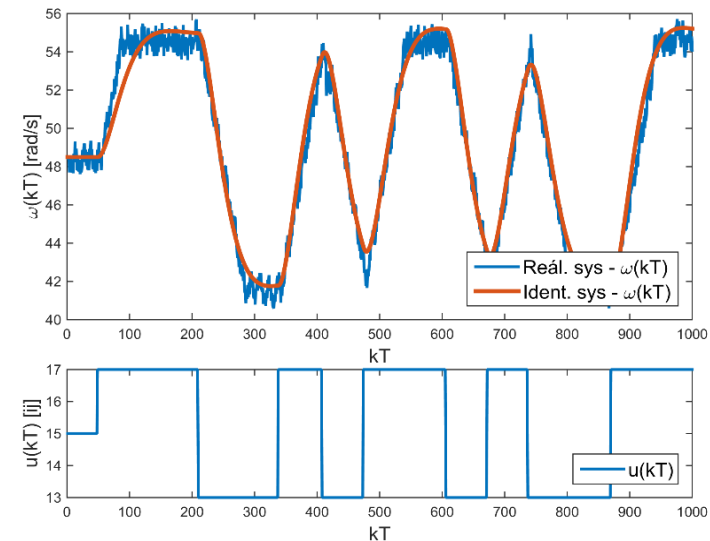
Pracovný bod pre identifikáciu $\rightarrow PB = \{u_0 [ij]; y_0 [rads^{-1}]\} = \{15; 48.5\}$

Štruktúra modelu \rightarrow ARMAX \rightarrow výstup diskrétna prenosová funkcia

$$F_s(z^{-1}) = \frac{Y(z^{-1})}{U(z^{-1})} = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}$$

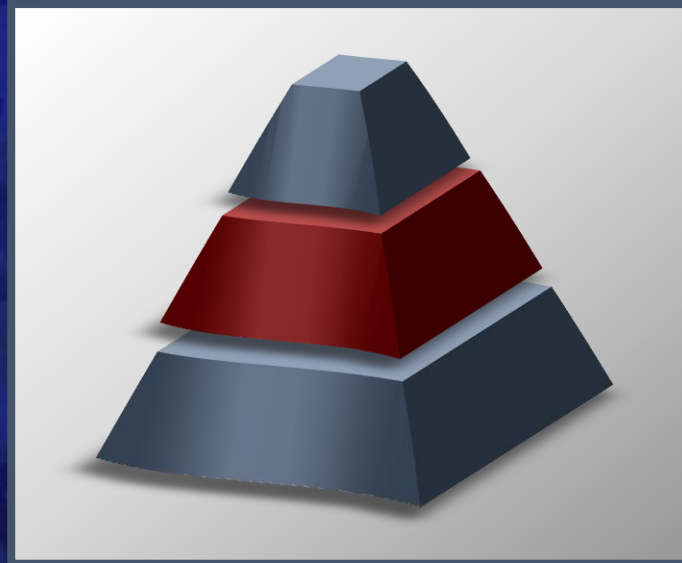


Odozva laboratórneho modelu na pseudo-náhodný binárny signál



Porovnanie odozvy laboratórneho a identifikovaného modelu trojfázového motora

3.B Návrh číslicového riadenia



3.B Návrh číslicového riadenia

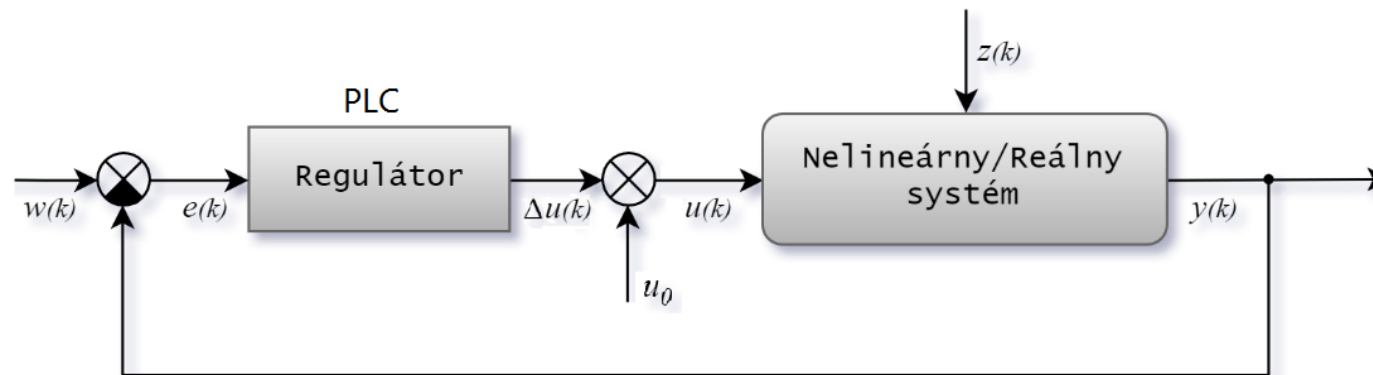
Cieľ → určiť prenos regulátora (metódou voľby pólov)

$$F_R(z^{-1}) = \frac{U(z^{-1})}{E(z^{-1})} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 + p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2}} \quad (18)$$

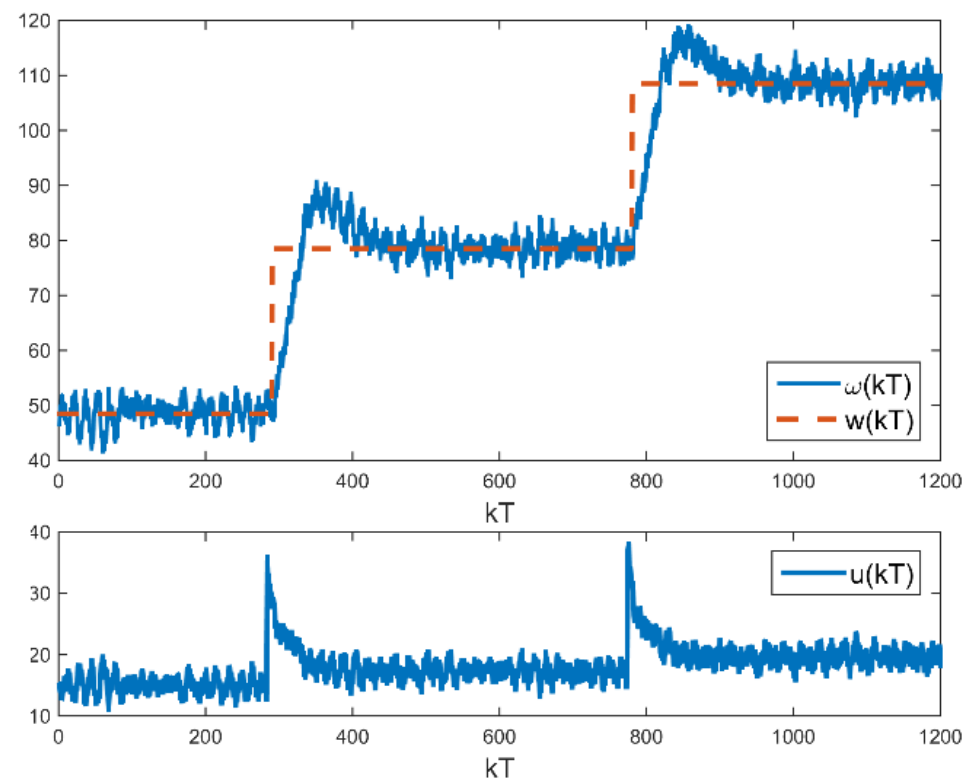
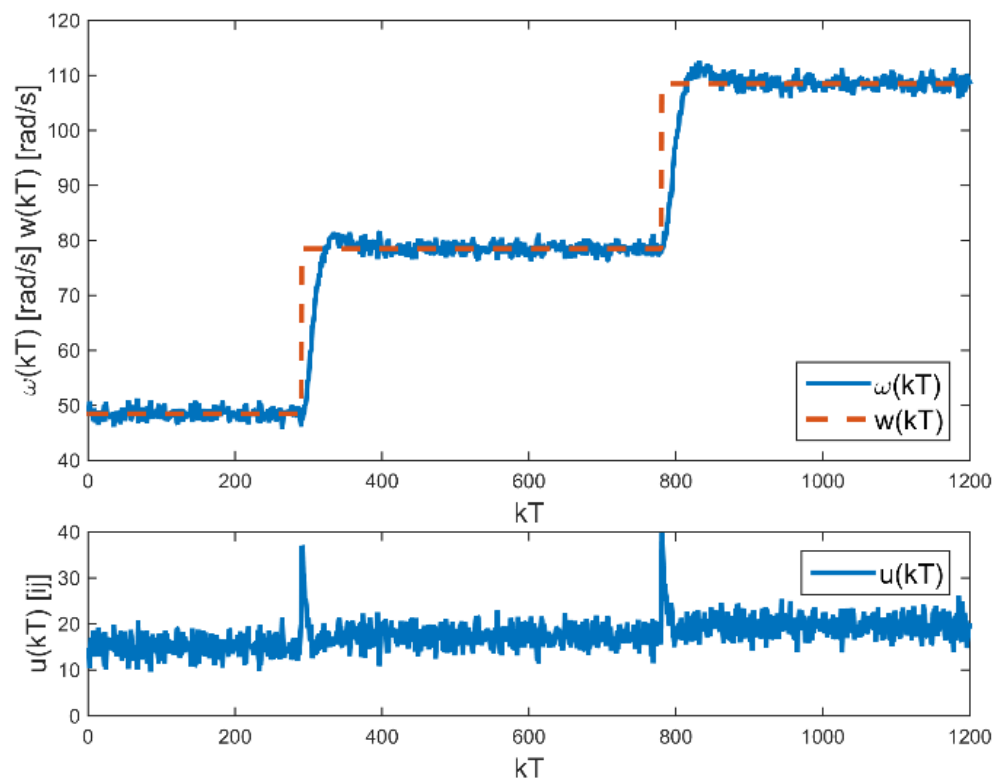
Regulátor implementovaný vo forme rýchlostného algoritmu riadenia

$$u(k) = -p_1 u(k-1) - p_2 u(k-2) + q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2) \quad (19)$$

$N_{URO}(z^{-1}) = N_D(z^{-1}) \rightarrow$ koeficienty číslicového regulátora

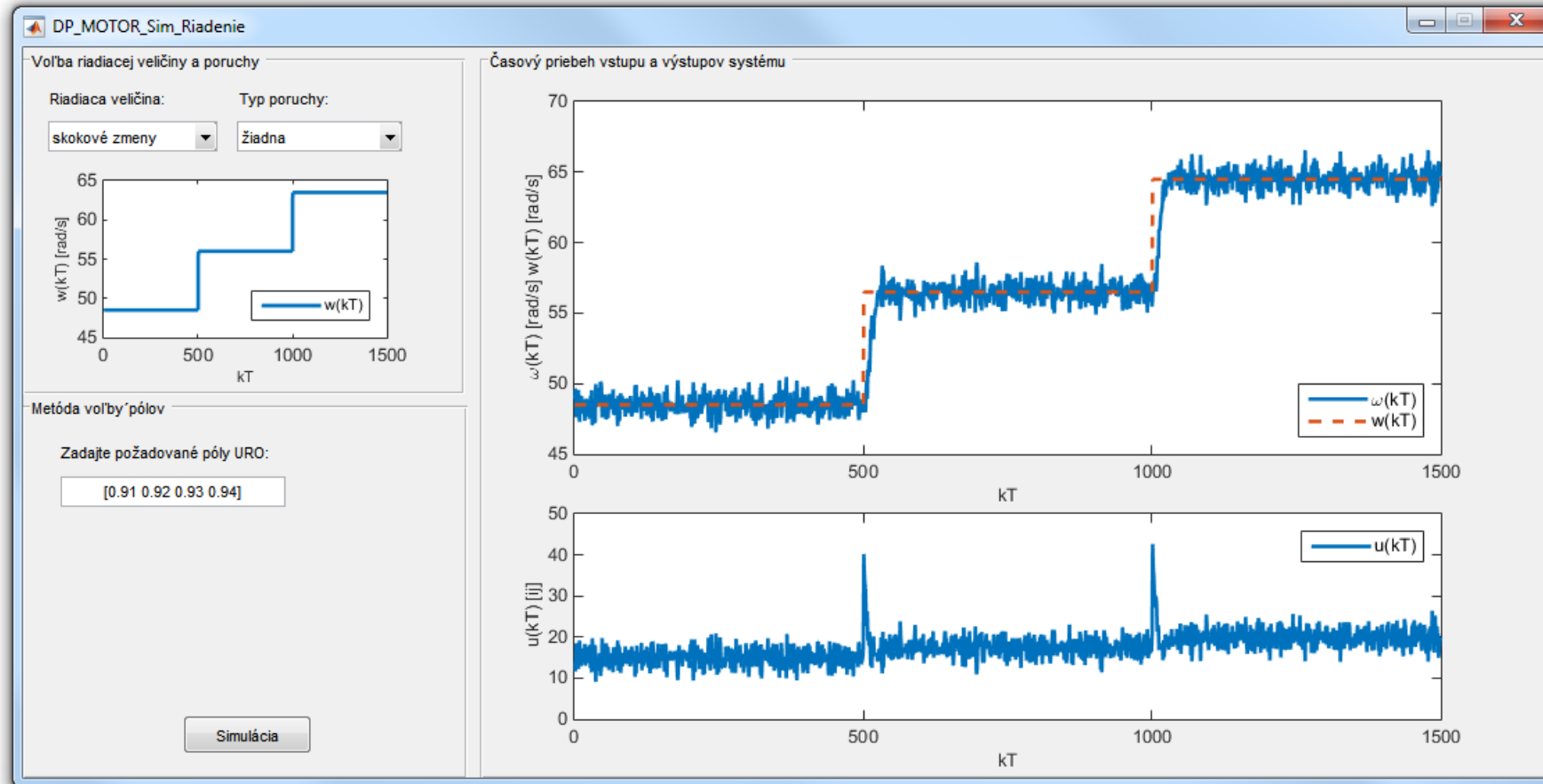


3.B Návrh číslicového riadenia

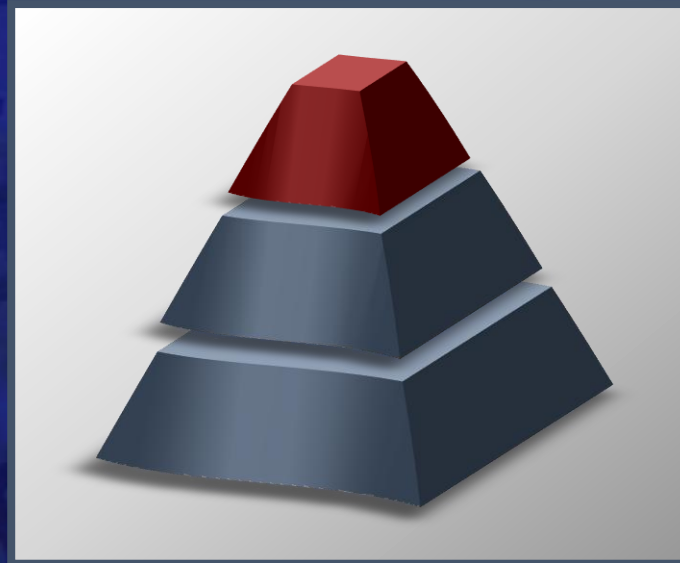


Priebeh riadenia simulačného (vľavo) a laboratórneho modelu (vpravo)

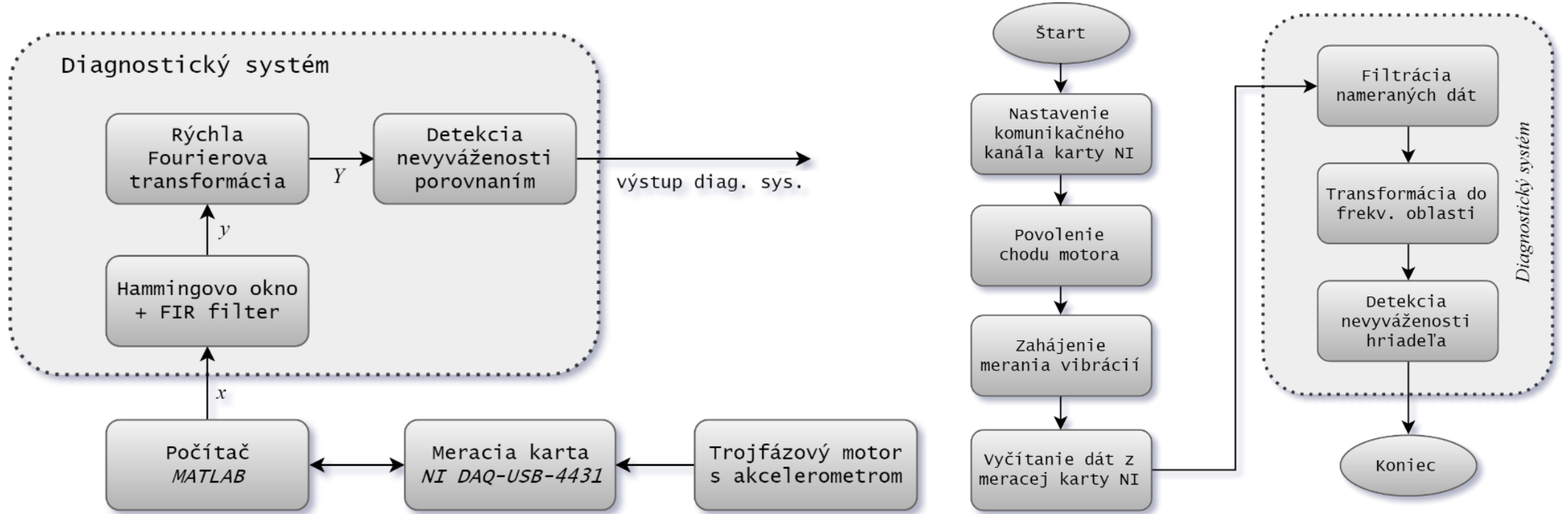
3.B Riadenie simulačného a laboratórneho modelu (RaDFS)



3.C Návrh diagnostického systému



3.C Návrh diagnostického systému založeného na meraných dátach



3.C Návrh filtra pre filtrovanie šumu z nameraného diskrétného signálu

Filter s konečnou impulzovou odpoveďou (*FIR*):

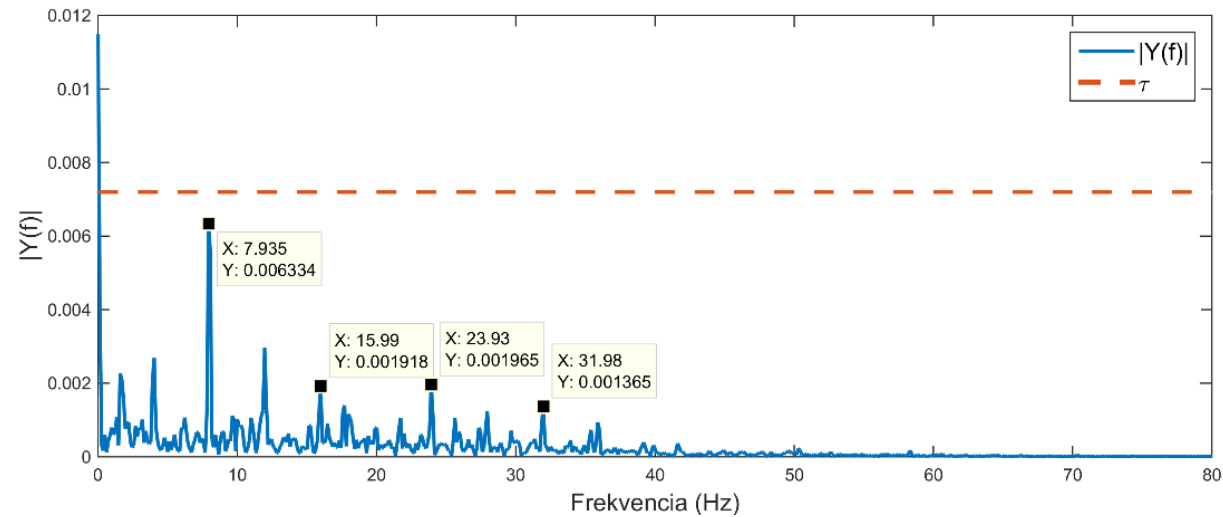
$$H(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_{N-1} z^{-(N-1)} = \sum_{k=0}^{N-1} b_k z^{-k} \quad (20)$$

3.C Frekvenčná analýza nameraného signálu

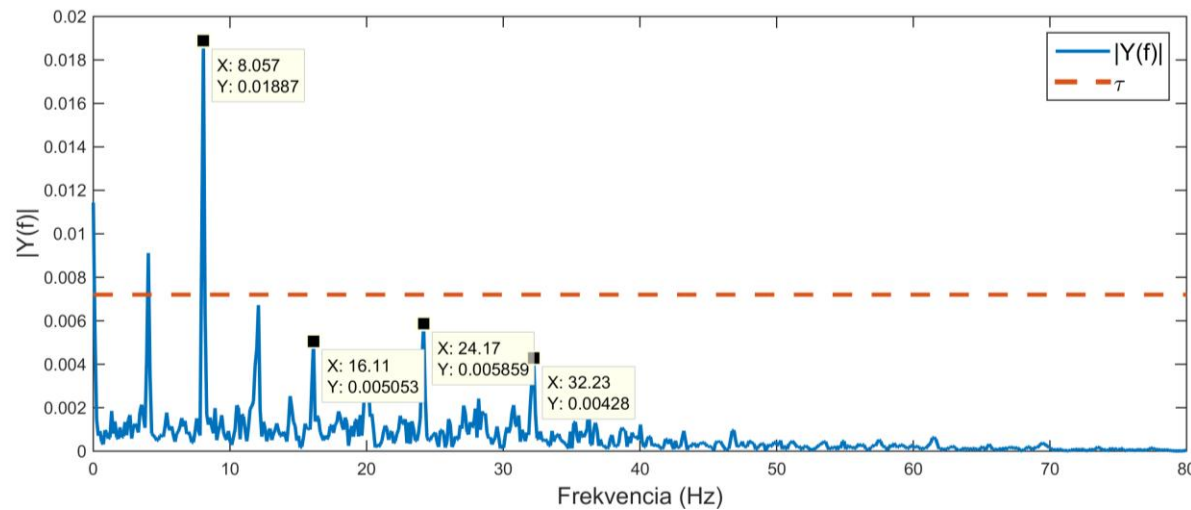
Zameraná na oblasť nízkych frekvencií

$$Y_k = \sum_{n=0}^{N-1} y_n e^{-\frac{2\pi i}{N}nk} \quad (21)$$

3.C Experimentálne overenie navrhnutého diagnostického systému



Amplitúdové spektrum nominálneho stavu systému



Amplitúdové spektrum systému s prehíbenou nevyváženosťou hriadeľa

3.C Diagnostika chyby nevyváženosti hriadeľa (RaDFS)

The screenshot shows the DP_MOTOR_Real_Diagnostika software interface. On the left, under "Nastavenie frekvencie zberu dát meracej karty:", there is a dropdown menu for "Vzorkovacia frekvencia:" set to "1000 [Hz]" and a "Vykonať experiment:" button. The main area is titled "Namerané, filtrované zrýchlenia laboratórneho modelu a jeho amplitúdové spektrum:" and contains two empty plots for acceleration $a(k)$ and $y(k)$ in $[m/s^2]$ versus frequency in Hz. A warning dialog box titled "!! Varovanie !!" is overlaid on the plots. It contains a warning icon and the following text:

Pre realizovanie experimentu na reálnom laboratórnom modeli je nutné pripojiť meraciu kartu NI DAQ-USB-4432, do USB portu počítača, taktiež je nutné nahrať program Motor_filt_riadenie.ACD (priložený na CD médiu) do PLC automatu a mať zapnutý RSLinx pre realizáciu preporenia medzi počítačom a PLC

Odporúčanie: Realizovať meranie viackrát, keďže prvý pokus sa meracia karta kalibruje, takže namerané hodnoty nezodpovedajú skutočnosti

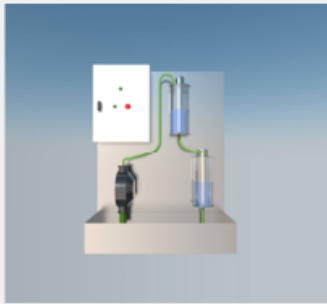
OK

4. Charakteristika vytvorenej aplikácie RaDFS

RaDFS_GUI

Vyberte fyzikálny systém s ktorým chcete ďalej pracovať

Hydraulický systém



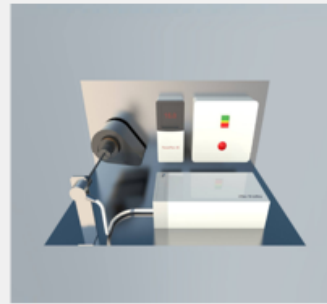
Model hydraulického systému zobrazený na obrázku sa nachádza v laboratóriu Katedry kybernetiky a umelej inteligencie. Skladá sa z dvoch valcových nádob bez interakcie umiestnených pod sebou navzájom prepojených hadičkou. Kvapalina je do prvej nádoby privádzaná z vaničky za pomoci membránového čerpadla.

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 na frekvenčný menič generované z rozsahu $<0 - 10V>$ a výstupom sú aktuálne výšky hladín v nádobách snímané kapacitnými snímačmi.

<http://kyb.fe.i.tuke.sk/laboratoria/modely/hyd.php>

Hydraulický systém

Trojfázový motor



Laboratórny model trojfázového motora je jedným z viacerých výukových modelov v centre moderných metód riadenia a priemyselnej informatiky na Katedre kybernetiky a umelej inteligencie Technickej univerzity v Košiciach

Za zmenu otáčok trojfázového motora zodpovedá frekvenčný menič Allen-Bradley Power Flex 40, ktorý je priamo prepojený s analógovými vstupmi a výstupmi PLC kontroléra Allen-Bradley Compact Logix L23E. Kontrolér je rozšírený o vstupnú kartu pre High Speed Counter, ktorá spracováva údaje z enkódera, pomocou ktorej je determinovaná uhlová rýchlosť otáčania sa motora.

<http://kyb.fe.i.tuke.sk/laboratoria/modely/mfm.php>

Trojfázový motor

Aplikácia Riadenie a diagnostika fyzikálnych systémov (RaDFS)

- ✓ užívateľské rozhranie
- ✓ možnosť pracovať so simulačnými a laboratórnymi modelmi
- ✓ užívateľská prívetivosť (defaultné hodnoty parametrov, varovné okná, chybové okná)

Hydraulický systém

- *Modelovanie a porovnanie simulačných modelov*
- *Riadenie simulačného a laboratórneho modelu*
- *Diagnostika chýb senzorov simulačného modelu*

Model trojfázového motora

- *Riadenie simulačného a laboratórneho modelu*
- *Diagnostika chyby nevyváženosti hriadeľa laboratórneho modelu*

Vykreslenie výsledkov diplomovej práce

5. Zhodnotenie dosiahnutých výsledkov



Zhodnotenie dosiahnutých výsledkov

- ✓ identifikované a verifikované matematické modely reálnych laboratórnych modelov
- ✓ navrhnutý riadiaci a monitorovací/diagnostický systém úspešne realizujúci vopred stanovené ciele
- ✓ aplikácia rozdielnych prístupov k diagnostike na reálne systémy prvý krát v rámci výskumnej skupiny
- ✓ vytvorenie aplikácie *RaDFS* poskytujúca základný prehľad metód pre riadenie a diagnostiku fyzikálnych systémov



Ďakujem za pozornosť

Otázky oponenta

V rámci záverečnej práce ste postupovali od tvorby matematického modelu, jeho verifikácie, návrhu riadenia až po diagnostiku. Sú všetky tieto kroky potrebné? Ak nie, ktoré by sa dali vynechať?

- ✓ logický sled je potrebné dodržať
- ✓ v prípade modelu trojfázového motora riadenie zabezpečuje konštantnosť otáčok aj v prípade chyby → možnosť detekcie chyby na amplitúdovom spektre
- ✓ v prípade modelu hydraulického systému sa od riadenia odvíja priebeh stavov a rezíduí nominálneho stavu → určenie parametrov pre funkcie detekcie

Otázky oponenta

V práci sa venujete dvom rozdielnym prístupom diagnostiky dynamických systémov – na základe algoritmov a na základe dát – vedeli by ste využiť obe metódy na 1 laboratórnom modeli? Aké potrebné úpravy by bolo potrebné vykonať z pohľadu modelu, prípadne riadenia alebo diagnostiky?

- ✓ možnosť vytvorenia paralelne vyhodnocujúcich diagnostických systémov, avšak cieľ diagnostiky by bol odlišný
- ✓ vhodné pre zvýšenie celkovej spoľahlivosti
- ✓ k laboratórnemu modelu HS doplniť diagnostický systém → vibro-diagnostika motora čerpadla
- ✓ k modelu trojfázového motora → obťažnejšie → doplnenie merania napr. elektrického prúdu pôsobiaceho na motor

Otázky oponenta

Nakoľko dané úlohy boli riešené s ohľadom na zameranie projektu Technicom Centrum pre nedeštruktívnu diagnostiku technologických procesov so štandardným softvérovým vybavením pre riadenie a komunikáciu, je možné aplikovať výsledky zo záverečnej práce vo výuke predmetov a ďalšom výskume CMMRaPI?

- ✓ časť naprogramovanej aplikácie → prezentácia výsledkov diplomovej práce
- ✓ overenie navrhnutých metód riadenia na simulačných laboratórnych modeloch (*RaUI, ORHS*)
- ✓ pre pokračovanie výskumu nedeštruktívnej diagnostiky a aj v iných projektoch → využívajúce metódy identifikácie alebo riadenia