



# **APLIKÁCIA VÝSLEDKOV EXPERIMENTÁLNEJ IDENTIFIKÁCIE V NÁVRHU RIADENIA REÁLNEHO MODELU HYDRAULICKÉHO SYSTÉMU**

**Vypracoval:**

**Bc. Jakub Čerkala**

**Vedúci DP:**

**doc. Ing. Anna Jadlovská PhD.**

# PREHL'AD DIPLOMOVEJ PRÁCE

## A. Laboratórny model hydraulického systému

- 1) Popis laboratórneho modelu
- 2) Komunikácia s modelom
- 3) Voľba pracovného bodu

## B. Analytická identifikácia

- 1) Odvodenie nelineárneho modelu na základe nameraných parametrov
- 2) Linearizácia nelineárneho modelu v pracovnom bode

## C. Experimentálna identifikácia

- 1) Stochastické regresné model ARX a ARMAX
- 2) Pseudonáhodný binárny signál pre budenie motora čerpadla
- 3) Predspracovanie dát pre experimentálnu identifikáciu
- 4) Metóda najmenších štvorcov
- 5) Validácia výsledku identifikácie a porovnanie aproximácii
- 6) Prístupy experimentálnej identifikácie pre Matlab/Simulink

## D. Syntéza riadenia

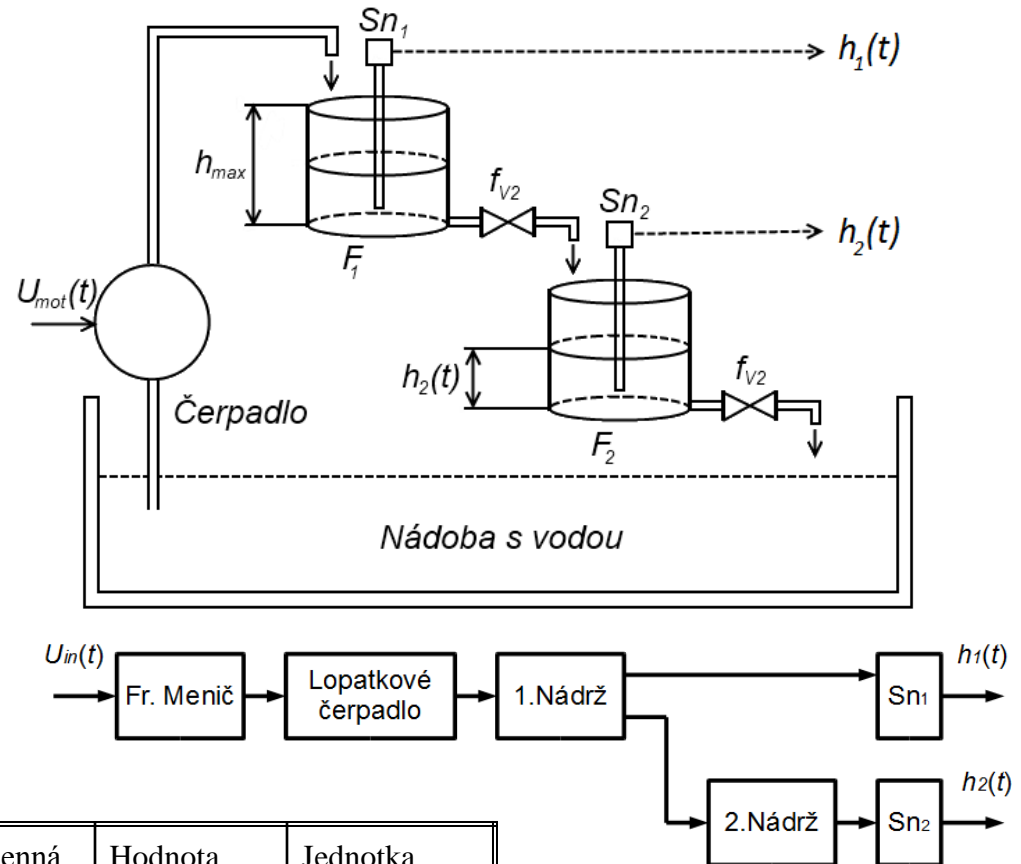
- 1) Spätno-väzobné riadenie metódou umiestnenia pólov
- 2) Stavové LQ riadenia podľa kvadratického kritéria
- 3) Porovnanie výsledkov riadenia

## E. Výukové a programové moduly

- 1) Modul pre experimentálnu identifikáciu
- 2) Modul pre stavové LQ riadenie

# A.1. POPIS LABORATÓRNEHO MODELU HYDRAULICKÉHO SYSTÉMU

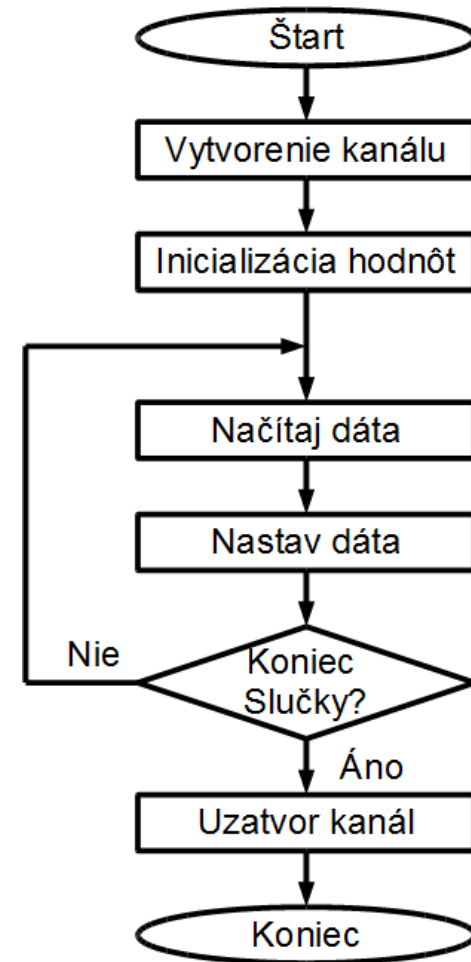
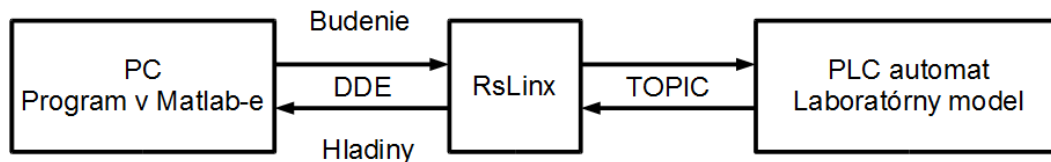
- Súčasť **Laboratória mechatronických systémov**
- Vstupom je napätie budenia čerpadla  $u_{in}(t)$
- Výstupom výšky hladín  $h_1(t)$  a  $h_2(t)$
- Vlastnosti modelu:
  - PLC
  - frekvenčný menič
  - Lopatkové čerpadlo
  - kapacitné snímače
  - modifikovateľné výtokové ventily



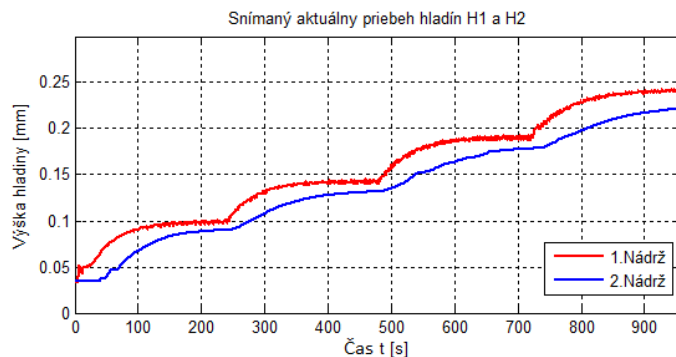
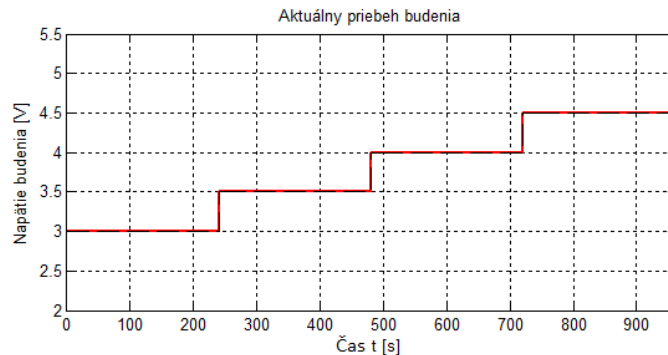
Veličina	Premenná	Hodnota	Jednotka
Výška nádrže	$h_{max}$	0.3	m
Blokovanie pretečenia	$h_{lim}$	280	mm
Rozsah budiaceho signálu	$U_{in}$	0 – 10	V
Polomer prvého výtokového ventilu	$f_{v1}$	0.003	m
Polomer druhého výtokového ventilu	$f_{v2}$	0.0031	m

## A.2. KOMUNIKÁCIA S LABORATÓRNYM MODELOM

- Komunikácia na báze DDE kanálu
- Ethernet s RsLinx
- Vlastná séria funkcií pre spravovanie komunikácii v prostredí Matlab
- Priebežné vykresľovanie grafov v Matlab figure
- Navrhnutý program umožňuje:
  - Testovanie komunikácie
  - Experiment budenia
  - Experiment riadenia
  - Ukladanie dátových súborov



# A.3. VOĽBA PRACOVNÉHO BODU HYDRAULICKÉHO SYSTÉMU

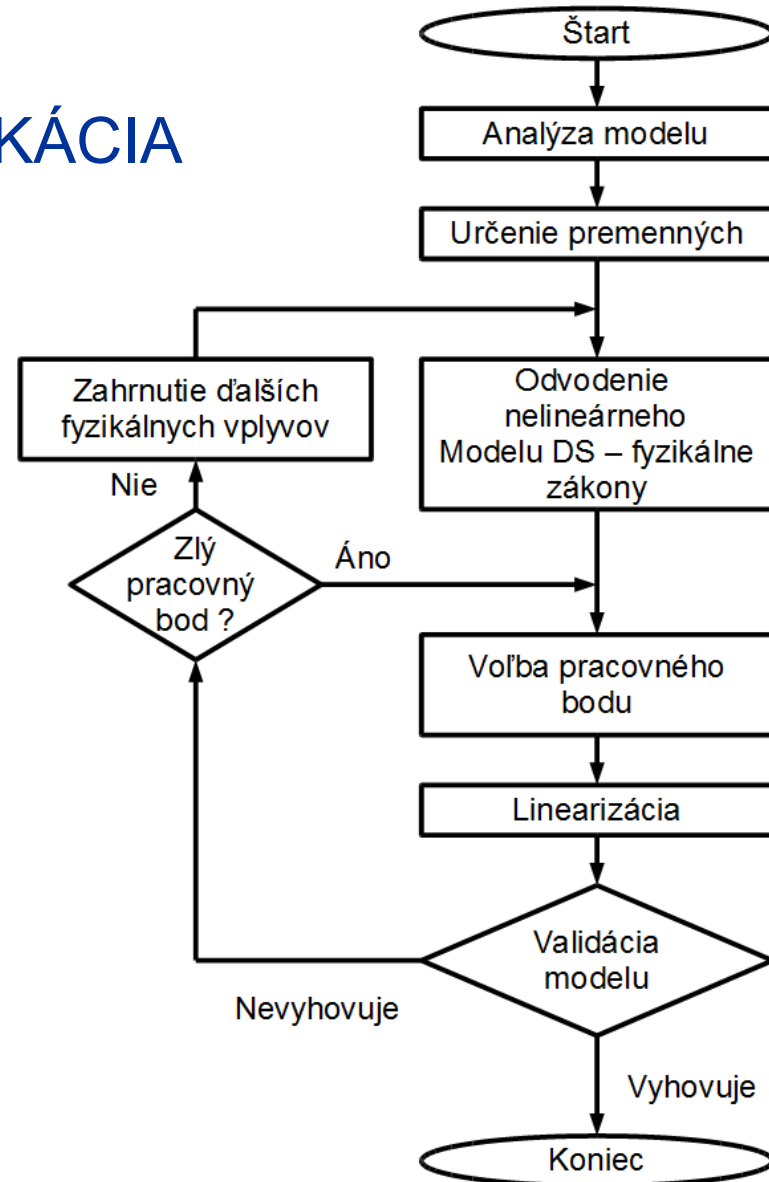


- Požadovaný pracovný bod v strede druhej nádrže
- Experimentálne určovanie požadovaného budiaceho napätia
- Určenie limitov modelu
  - Presnosť snímačov
  - Pretekánie nádrží
  - Vplyv porúch

Veličina	Premenná	Hodnota	Jednotka
Budiace napätie	$U_{ust}$	3.7	V
Výška hladiny v prvej nádrži	$H_{1ust}$	0.1625	m
Výška hladiny v druhej nádrži	$H_{2ust}$	0.1525	m

## B. ANALYTICKÁ IDENTIFIKÁCIA

- Vychádza z parametrov modelu
- Využíva matematicko-fyzikálne vzťahy
- **Výhody**
  - Pre presné parametre je veľmi presná
  - Viac stupňov presnosti
  - Nevyžaduje časovo náročné experimenty
  - Možno ju použiť aj bez dotyku so zariadením
- **Nevýhody**
  - Pre neznáme neodhadnuteľné parametre je metóda nepoužiteľná
  - Na opis niektorých zariadení nemusí existovať dostatočný teoretický podklad (napr. Chemický reaktor)



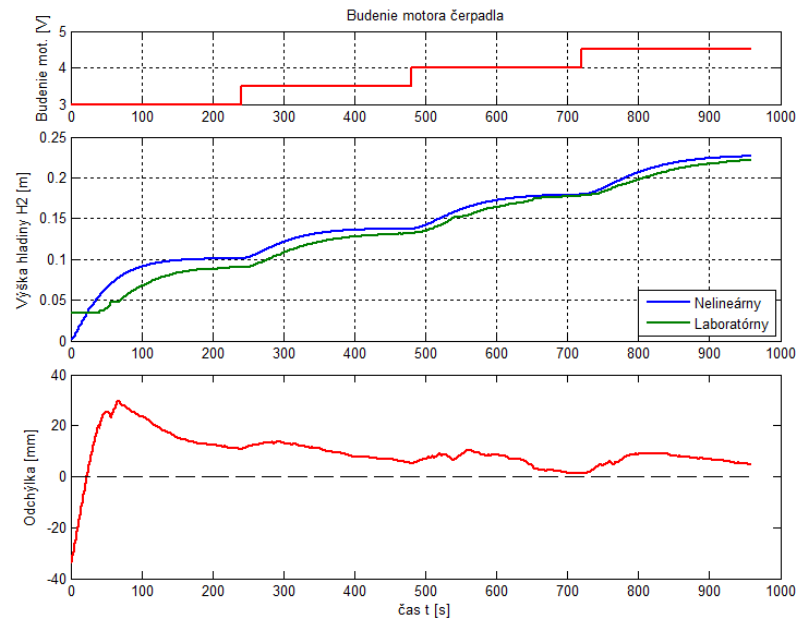
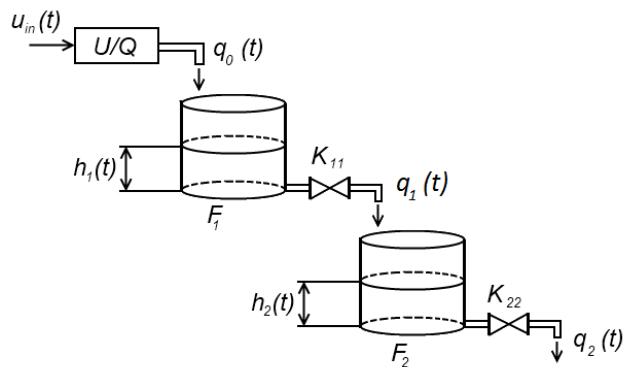
# B.1. ODVODENIE NELINEÁRNEHO MODELU NA ZÁKLADE ODMERANÝCH PARAMETROV

- Rovnica materiálovej bilancie
- Odmerané parametre
- Experimentálne získaná prevodová konštanta čerpadla
- Model naprogramovaný v prostredí Simulink
- Kontrola presnosti porovnaním simulovanej odozvy s laboratórnym modelom

$$\frac{\text{zmena objemu}}{\text{zmena času}} = \text{vstupujúci materiál} - \text{vystupujúci materiál} \quad (1)$$

$$\frac{dh_1(t)}{dt} = \frac{u_{in}(t) \cdot K_{\text{čer}}}{F} - \frac{K_{11}}{F} \cdot \sqrt{h_1(t)},$$

$$\frac{dh_2(t)}{dt} = \frac{K_{11}}{F} \cdot \sqrt{h_1(t)} - \frac{K_{22}}{F} \cdot \sqrt{h_2(t)}. \quad (2)$$



# B.2. LINEARIZÁCIA NELINEÁRNEHO MODELU V PRACOVNOM BODE

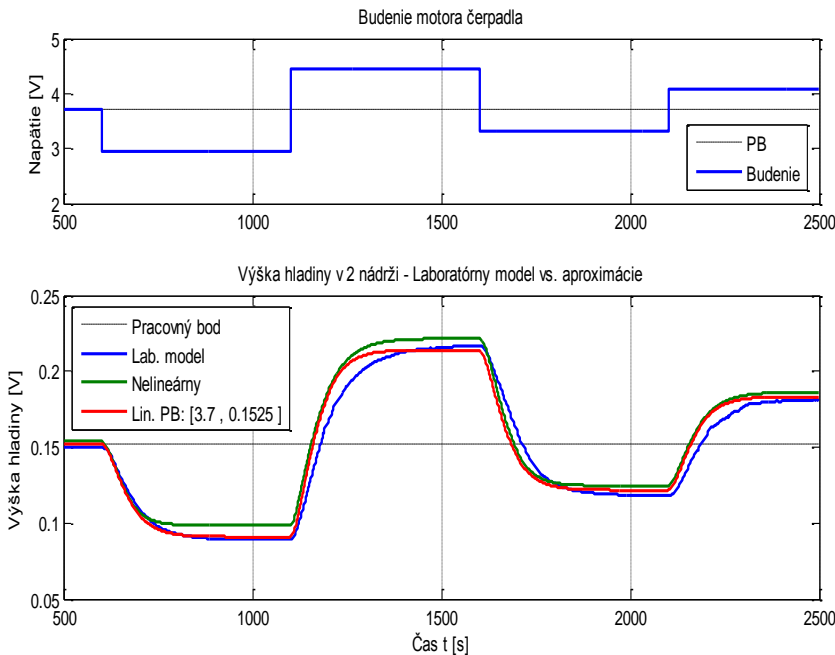
- Pracovný bod je vypočítaný z nelineárneho modelu

$$\frac{dh_2(t)}{dt} = 0 \Rightarrow h_2^s = \frac{(u_{in}^s K_{\text{cer}})^2}{(K_{22})^2} \quad (1)$$

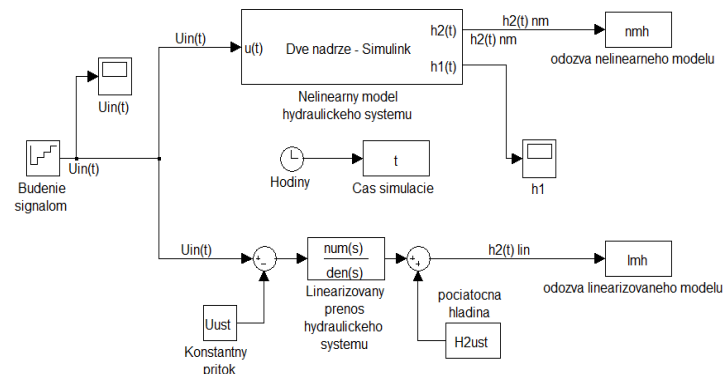
- Vzájomné porovnanie nelineárneho, linearizovaného a laboratórneho modelu

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_1(t) \\ \Delta \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K_{11}}{2F\sqrt{h_1^s}} & 0 \\ \frac{K_{11}}{2F\sqrt{h_1^s}} & -\frac{K_{22}}{2F\sqrt{h_2^s}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1(t) \\ \Delta x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K_{\text{cer}}}{F} \\ 0 \end{bmatrix} \Delta u(t)$$

$$\Delta y(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1(t) \\ \Delta x_2(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$



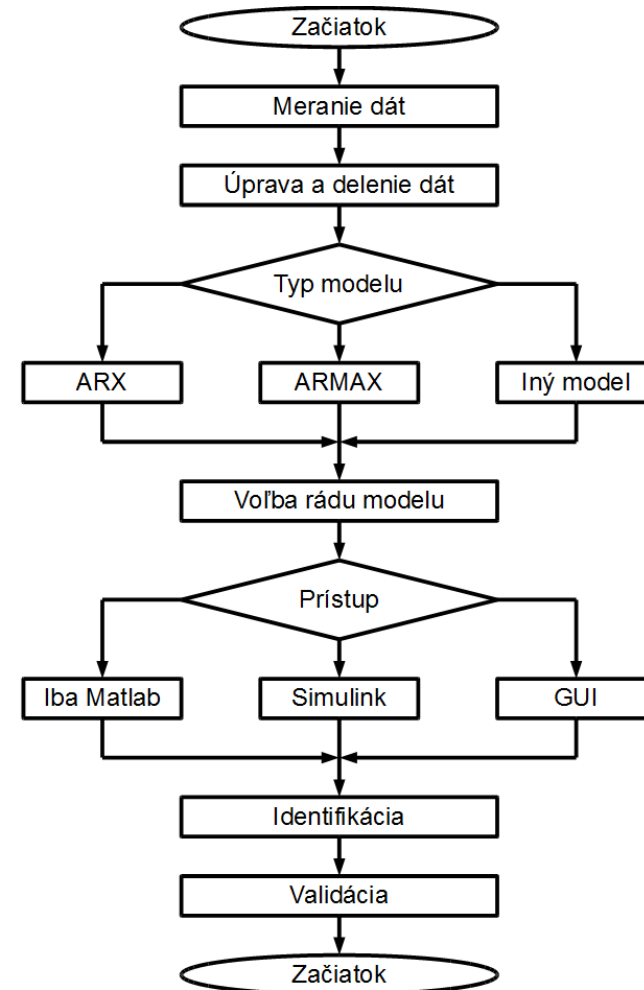
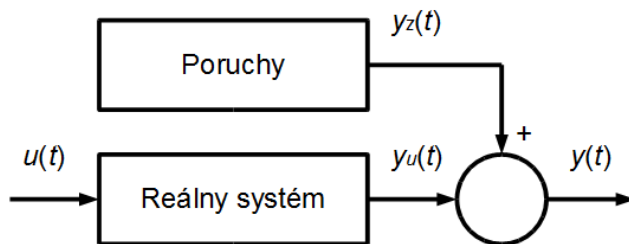
$$F(s) = \frac{\Delta H_2(s)}{\Delta U(s)} = \frac{2K_{11}K_{\text{cer}}\sqrt{h_2^s}}{(2F\sqrt{h_1^s}s + K_{11}) \cdot (2F\sqrt{h_2^s}s + K_{22})} \quad (3)$$





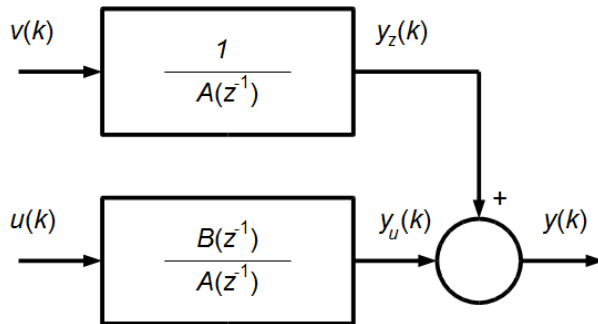
# C. EXPERIMENTÁLNA IDENTIFIKÁCIA

- Jednorazová identifikácia
- Hľadaná aproximácia lineárneho dynamického systému
- Využitie stochastických modelov
- **Výhody**
  - Univerzálnosť použitia v praxi
  - Identifikácia systémov s neznámymi parametrami alebo dynamikou
  - Zahŕňa opotrebenie alebo inú zmenu parametrov
  - Potláčanie šumu
- **Nevýhody**
  - Nevyhnutnosť reálneho experimentu
  - Výpočtové kapacity



# C.1. STOCHASTICKÉ REGRESNÉ MODELY ARX A ARMAX

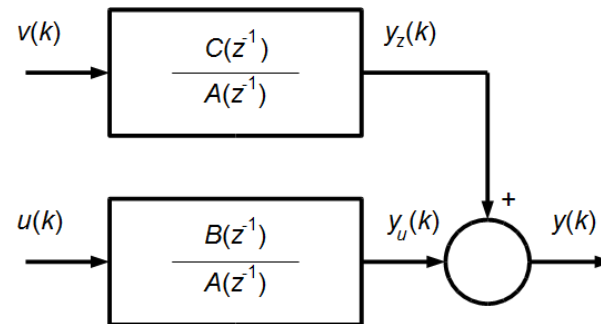
## ARX



Auto-Regresive with  
eXogenous variable

$$y(k) = z^{-d} \cdot \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \cdot u(k) + \frac{1}{A(z^{-1})} \cdot v(k)$$

## ARMAX



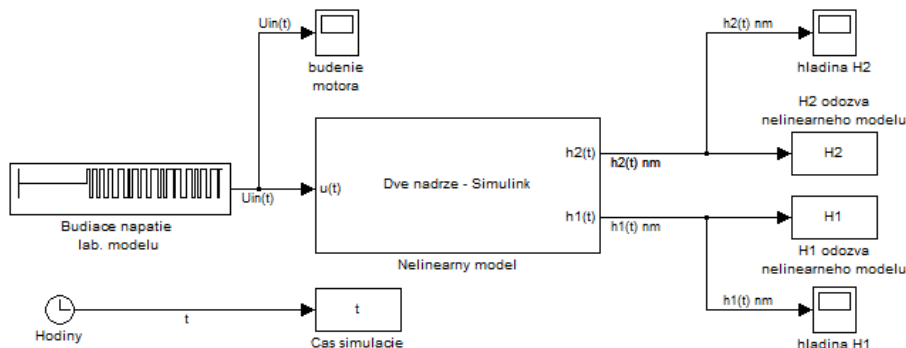
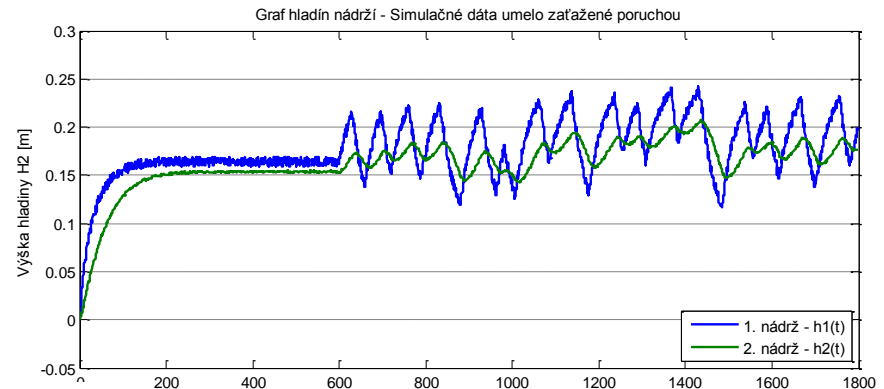
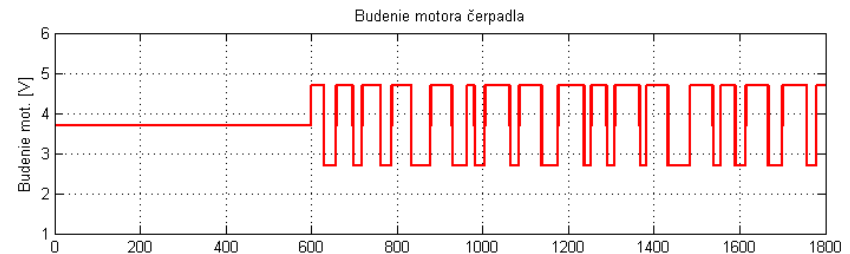
Auto-Regresive Moving Average  
with eXogenous variable

$$y(k) = z^{-d} \cdot \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \cdot u(k) + \frac{C(z^{-1})}{A(z^{-1})} \cdot v(k)$$

Deterministická časť modelu je lineárnou dynamickou aproximáciou hydraulického systému.

# C.2. PSEUDONÁHODNÝ BINÁRNÝ SIGNÁL PRE BUDENIE MOTORA ČERPADLA

- Budiaci signál, ktorý sa náhodne preklápa okolo napätia pracovného bodu
- Má obmedzenie minimálneho a maximálneho intervalu
- Pridaný nábeh do PB
- Zabezpečuje:
  - Sústavný dynamický pochod
  - Udržanie systému v pracovnej oblasti

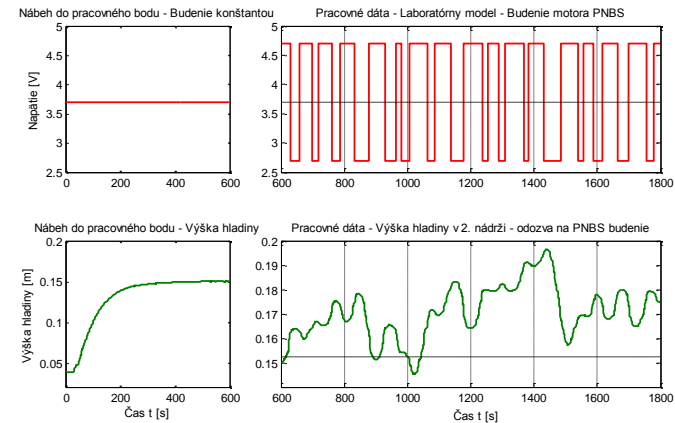


Program umožňuje:

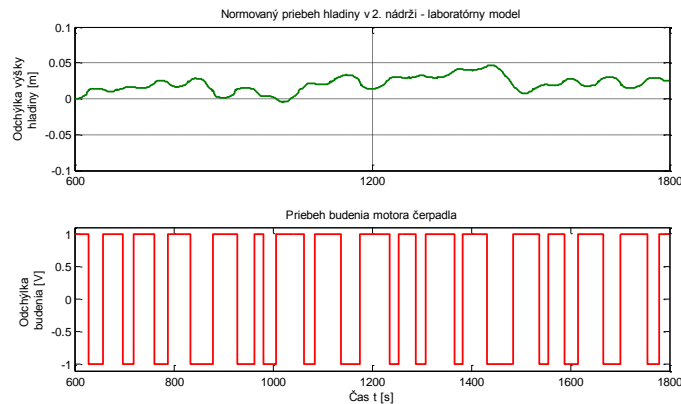
- Simulačný experiment
- Reálny laboratórny experiment

# C.3. PREDSPRACOVANIE DÁT PRE IDENTIFIKÁCIU

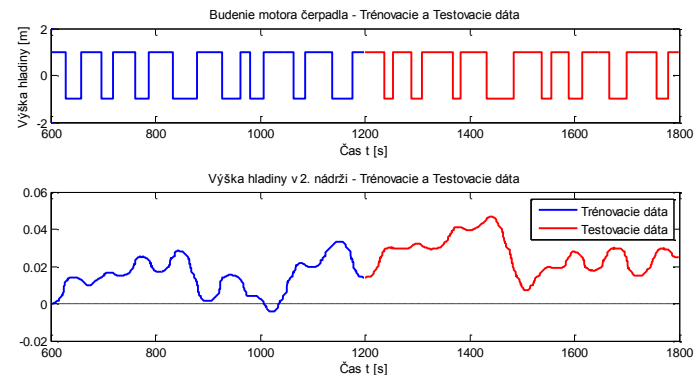
- Práca s IDDATA objektmi
- Pozostáva z týchto krokov:
  1. Odstránenie nábehu
  2. Normovanie dát
  3. Rozdelenie na
    - Trénovacie dáta
    - Validačné dáta



Obr. 1 Odstránenie nábehu



Obr. 2 Normovanie dát



Obr. 3 Rozdelenie dát

## C.4. METÓDA NAJMENŠÍCH ŠTVORCOV

- Metóda regresnej analýzy
- Vyšetruje statické a dynamické vzťahy medzi veličinami vyšetřovaného objektu

$$\hat{\Theta} = (F^T \cdot F)^{-1} F^T y$$

$$\Theta^T(k) = [a_1, a_2, \dots, a_{na}, b_1, b_2, \dots, b_{nb}] \quad .$$

Zvolené rády ARX sú  $na = 2$ ,  $nb = 2$ ,  $nd = 1$

ARX

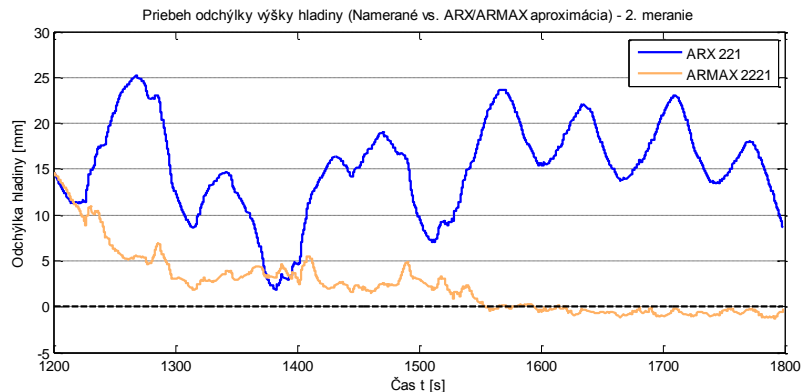
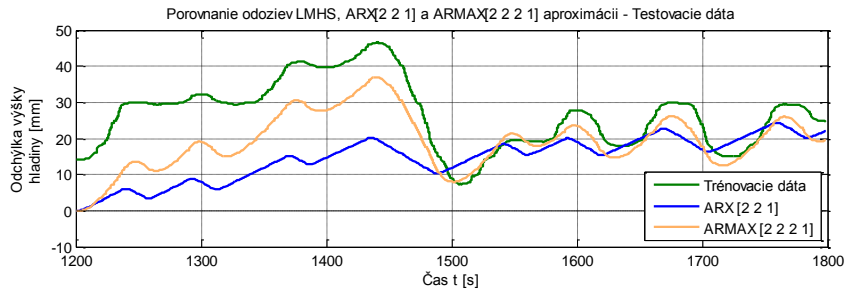
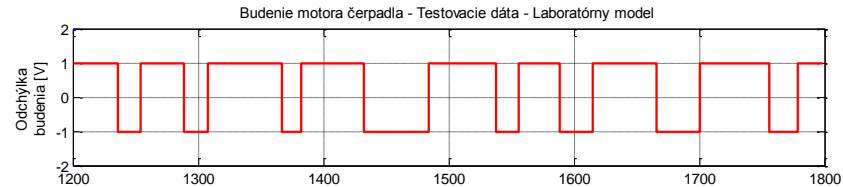
$$G_{arx\ 221}(z^{-1}) = \frac{\Delta H_2(z^{-1})}{\Delta U_{in}(z^{-1})} = \frac{-4.641 \cdot 10^{-5} z^{-1} + 9.555 \cdot 10^{-5} z^{-2}}{1 - 1.731 z^{-1} + 0.7313 z^{-2}} \quad .$$

Zvolené rády ARMAX sú  $na = 2$ ,  $nb = 2$ ,  $nc = 2$ ,  $nd = 1$

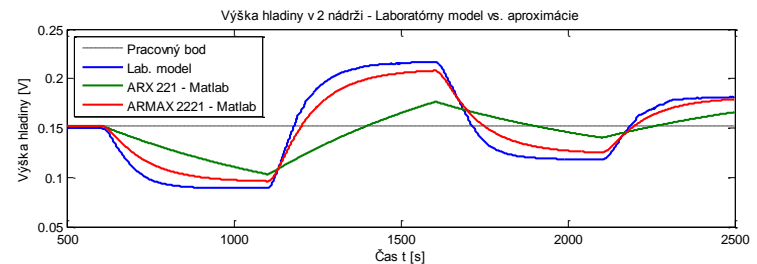
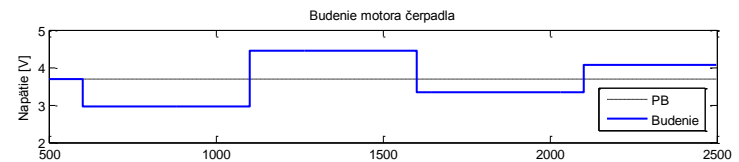
ARMAX

$$G_{amx\ 221}(z^{-1}) = \frac{\Delta H_2(z^{-1})}{\Delta U_{in}(z^{-1})} = \frac{-6.322 \cdot 10^{-5} z^{-1} + 9.538 \cdot 10^{-5} z^{-2}}{1 - 1.944 z^{-1} + 0.944 z^{-2}} \quad .$$

# C.5. VALIDÁCIA VÝSLEDKU IDENTIFIKÁCIE A POROVNANIE APROXIMÁCIÍ



- ARMAX aproximácia 2. rádu je výhodnejšia ako ARX.
- Prejav šumu na výsledok identifikácie
- Odchýlka je ovplyvnená aj pracovným bodom



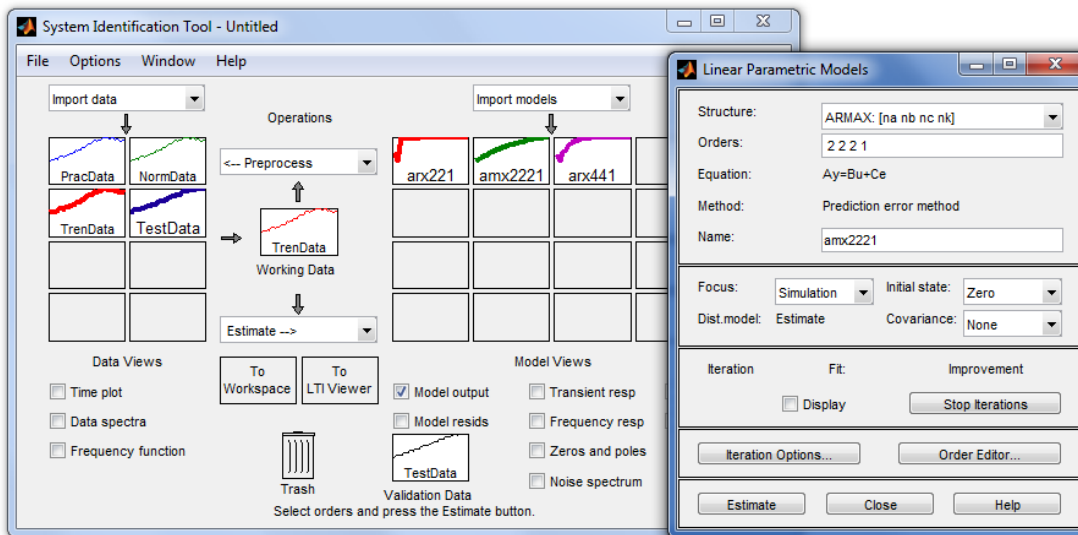
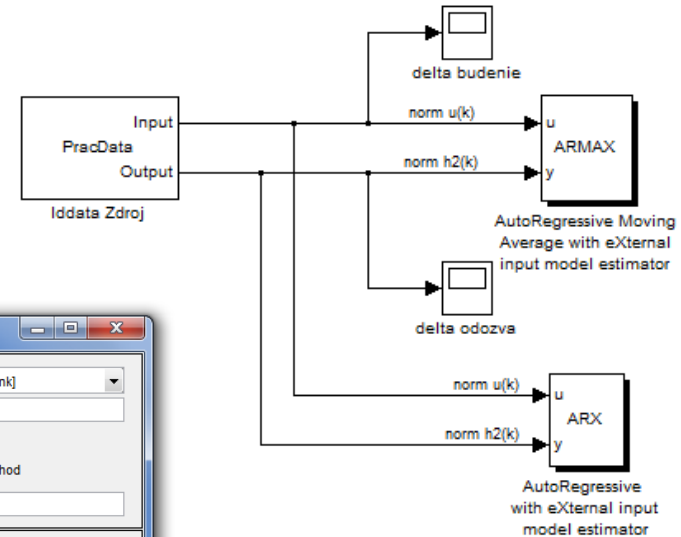
# C.6. PRÍSTUPY EXPERIMENTÁLNEJ IDENTIFIKÁCIE PRE MATLAB/SIMULINK

- System Identification toolbox ponúka:

- Klasický programový prístup
- Bloky v prostredí Simulink
- IDENT tool GUI

$$Tm = arx(TrenData,[na nb nd])$$

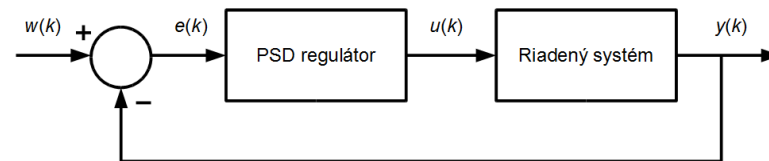
$$Tm = armax(TrenData,[na nb nc nd])$$



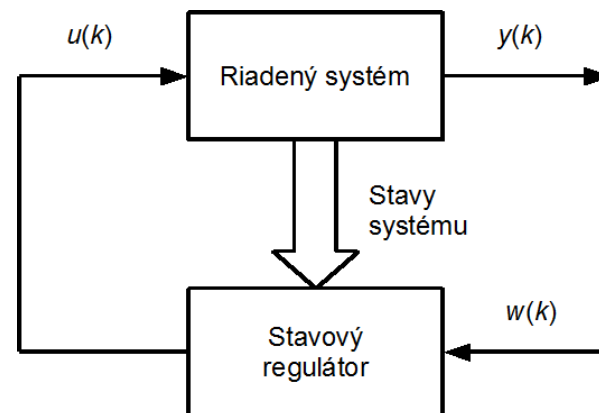
# D. SYNTÉZA RIADENIA HYDRAULICKÉHO SYSTÉMU

- Riadenie navrhované na základe výsledkov experimentálnej identifikácie
- Simulačné a reálne experimenty
- Experimenty riadenia
  - Riadenie na rovnovážny stav
  - Riadenie do ustáleného stavu
  - Potláčanie porúch prvej nádrže

Spätno-väzobné riadenie



Stavové riadenie



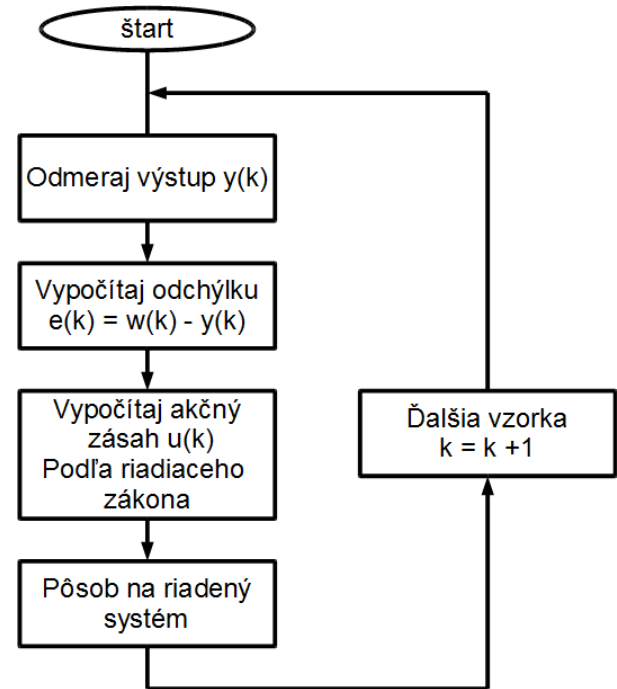


# D.1. SPÄTNO-VÄZOBNÉ RIADENIE METÓDOU UMIESTNENIA PÓLOV

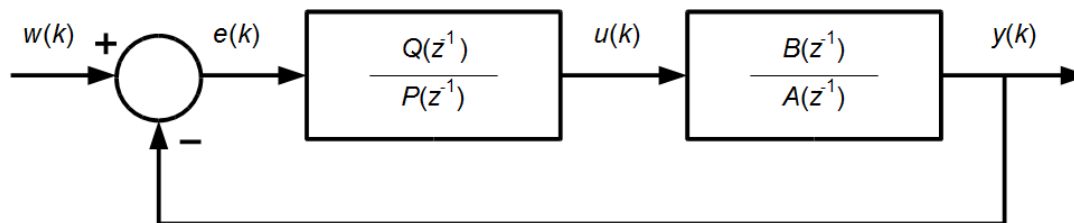
- Predpísanie vhodných pólov CHR URO, ktorá je vypočítaná z diskrétného prenosu aproximácie

$$A(z^{-1})P(z^{-1}) + B(z^{-1})Q(z^{-1}) = D(z^{-1})$$

$$G_R(z) = \frac{U(z^{-1})}{E(z^{-1})} = \frac{Q(z^{-1})}{P(z^{-1})} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{(1 + z^{-1})(1 + \gamma z^{-1})}$$



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

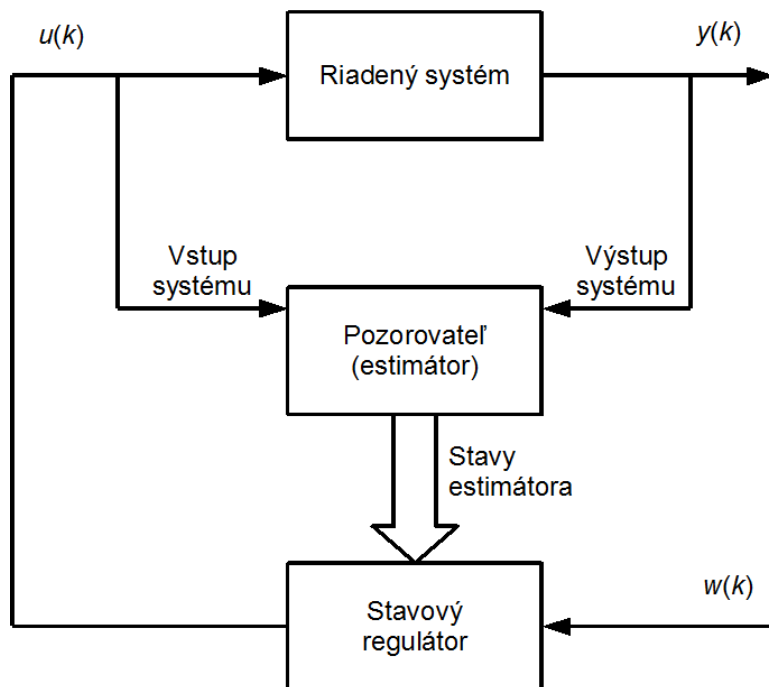


## D.2. STAVOVÉ LQ RIADENIE PODĽA KVADRATICKÉHO KRITÉRIA

- Minimalizácia funkcionálu kvality  $J$
- Problém diskrétného stavového opisu
- Luenbergerov pozorovateľ

$$J = \sum_{i=0}^{M-1} \left( x^T(i) \cdot Q \cdot x(i) + u^T(i) \cdot R \cdot u(i) \right) \quad (1)$$

$$u(i) = -k^T x(i) + Nw(i) \quad (2)$$

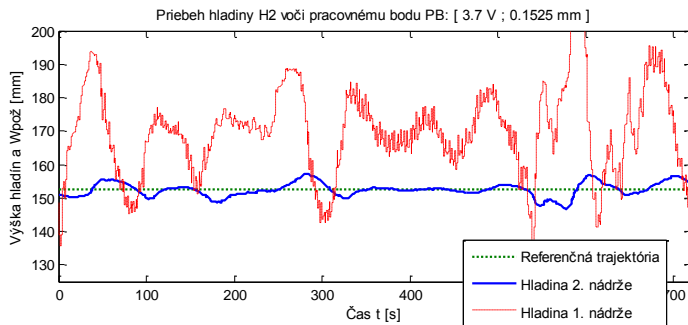


$$x_e(i+1) = F \cdot x_e(i) + G \cdot u(i) + j \cdot (y(i) - y_e(i))$$
$$y_e(i) = C \cdot x_e(i) \quad (3)$$

$$N = \frac{1}{C \cdot (I - (F - G \cdot k^T))^{-1} G} \quad (4)$$

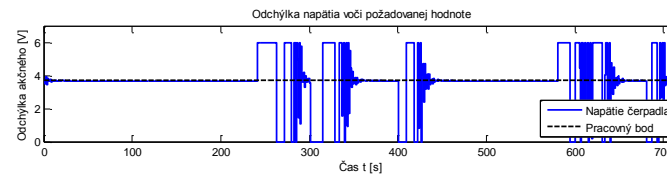
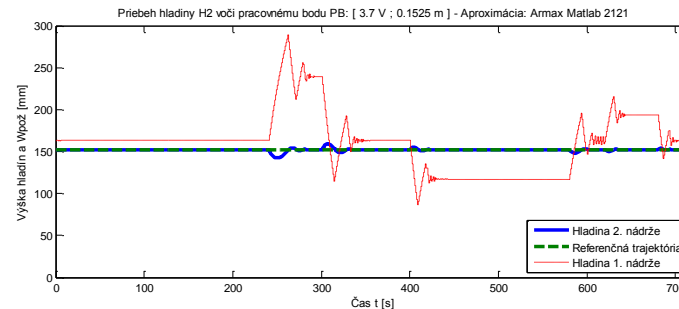
# D.3. POROVNANIE VÝSLEDKOV RIADENIA – POTLÁČANIE PORÚCH V ROVNOVÁŽNOM STAVE

## Pole-Placement



Laboratórny model

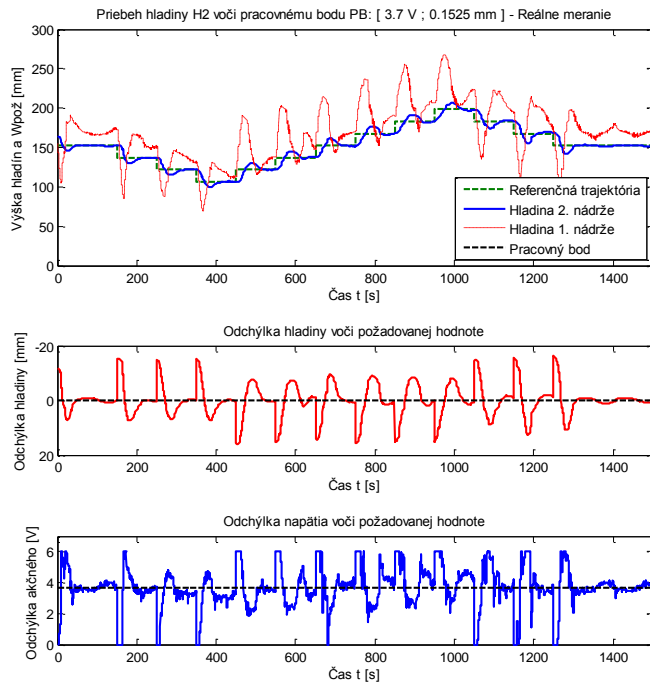
## LQ riadenie



Simulácia na nelineárnom modeli

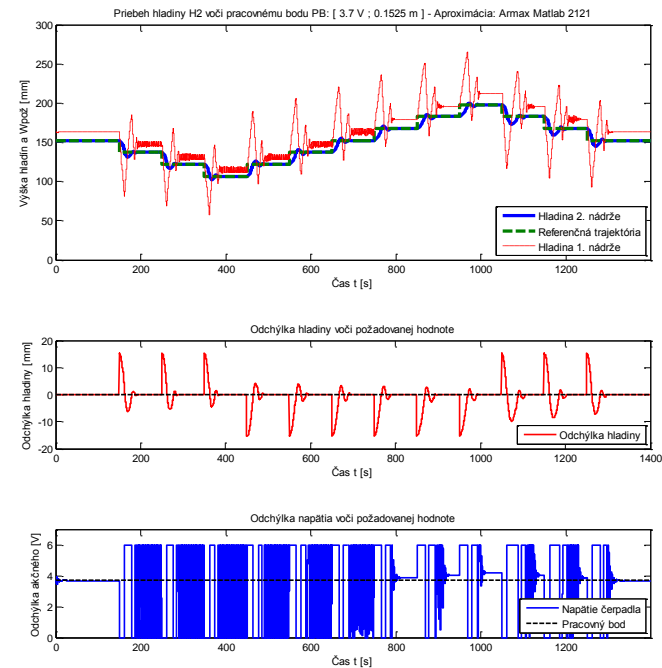
# D.3. POROVNANIE VÝSLEDKOV RIADENIA – RIADENIE NA USTÁLENÝ STAV

## Pole-Placement



Laboratórny model

## LQ riadenie



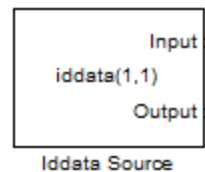
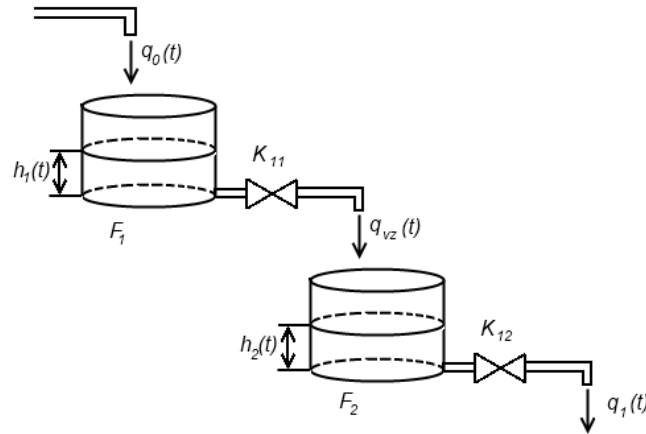
Simulácia na nelineárnom modeli

## E. VÝUKOVÉ A PROGRAMOVÉ MODULY

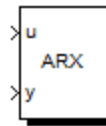
- Samostatné dokumenty a programové súbory
- Časti určené pre vyučujúcich a študentov
- Zverejnené na stránkach predmetov
- 3 moduly priložené k práci
  - Experimentálna identifikácia na simulačnej úrovni a využívanie prístupov práce v Matlab/Simulink – RaUI
  - Vzorce pre spojitú a diskretnú syntézu riadenia – RaUI
  - Stavové riadenie v čase a analytická identifikácia simulačného modelu – OaNS

# E.1. MODUL PRE EXPERIMENTÁLNU IDENTIFIKÁCIU

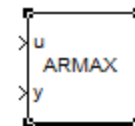
- Práca výhradne na simulačnom modeli
- Ilustrovaný postup experimentálnej identifikácie pre
  - Matlab
  - Simulink
  - IDENT tool
- Rozdelený na
  - Teoretickú časť - prednáška
  - Praktickú časť – úlohy pre študentov



Iddata Source



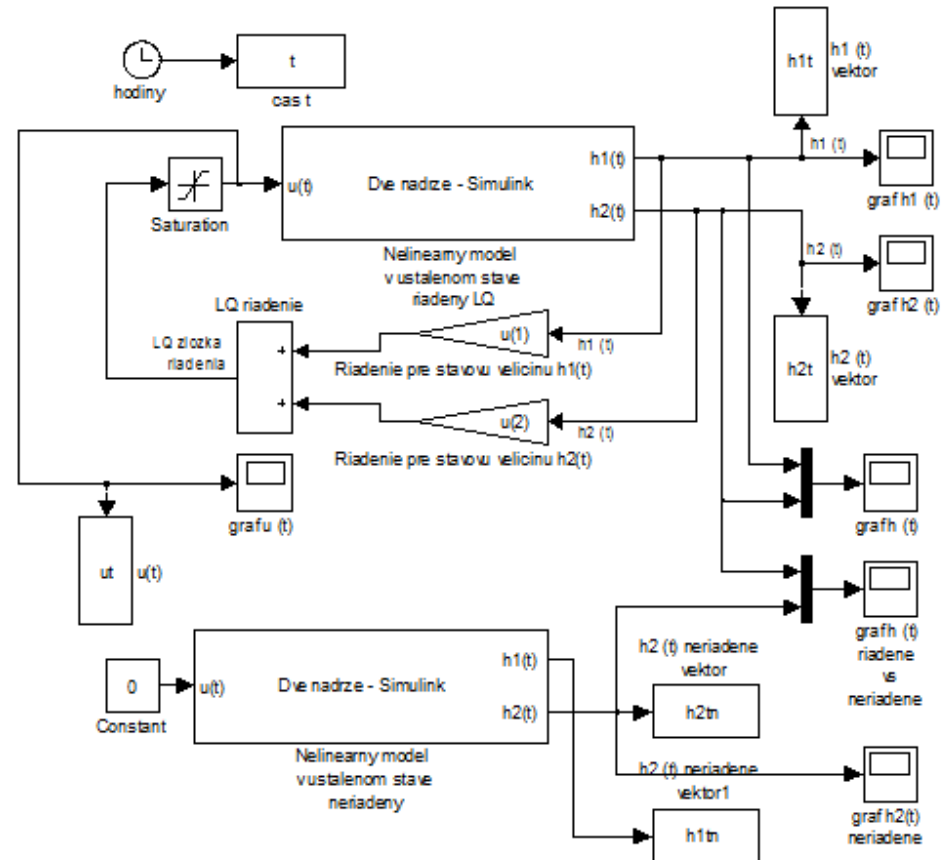
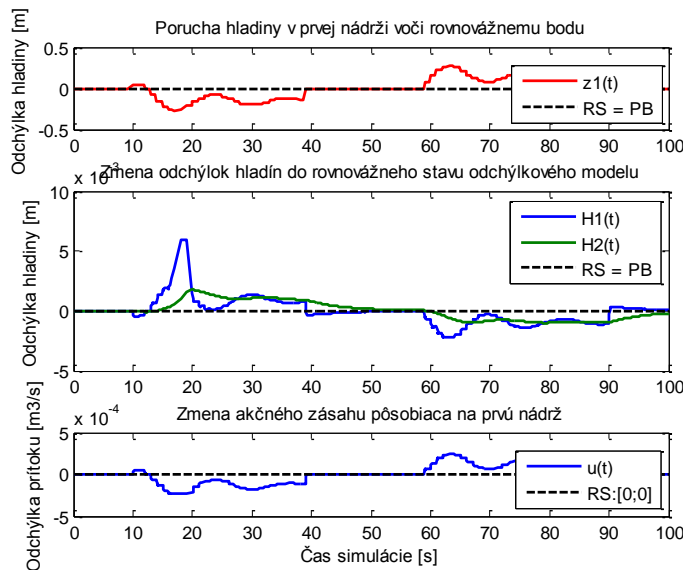
AutoRegressive with eXternal input model estimator



AutoRegressive Moving Average with eXternal input model estimator

# E.2. MODUL PRE STAVOVÉ LQ RIADENIE

- Vysvetlený postup analytickej identifikácie, linearizácie
- Úlohy – Nelineárny model
  - Riadenie do nulového stavu
  - Riadenie z nuly do ustáleného stavu
  - Zmena ustáleného stavu
- Úlohy – lineárny odchyľkový model
  - Riadenie do rovnovážneho stavu
  - Odstránenie poruchy v rovnovážnom stave
  - Zmena ustáleného stavu



**ĎAKUJEM ZA POZORNOST**