

# NÁVRH A PRAKTICKÉ OVĚŘENÍ ENERGETICKY ÚSPORNÝCH ŘÍDICÍCH ALGORITMŮ HYDRAULICKÉHO POHONU V PROSTŘEDÍ MATLAB

KOŇAŘÍK Petr

Katedra automatizační techniky a řízení  
Fakulta strojní  
VŠB–TU Ostrava

## Abstrakt

Příspěvek představuje užití kmenového programu MATLAB, simulačního prostředí Simulink a Real Time Tollboxu při návrhu, simulaci, praktickém ověření a porovnání nových řídicích algoritmů na systému elektrohydraulického pohonu.

Jedná se jak o řídicí algoritmy nerobustní, tak o řídicí algoritmy robustní, které jsou vhodné pro řízení složitějších nelineárních časově variantních systémů vyšších řádů u nichž je stanovení časově přesného matematického modelu příliš komplikované, obsáhlé, či nedosažitelné.

Řízený nelineární systém je tvořen čtyřcestným průtokovým servoventilem a hydromotorem s jednostrannou pístnicí na níž současně působí proměnlivé silové zatížení. Systém je možné společně řídit pouze jednou vstupní akční veličinou  $u$  působící na servoventil, přičemž požadovaných výstupních stavových proměnných může být více. Navržené řídicí algoritmy jsou schopny zmíněné stavové proměnné sledovat tzv. optimálním a rovněž nepřímo i energeticky úsporným řízením, které v případě robustního řízení umožní v reálném čase jejich splnění bez přímé znalosti přesného matematického modelu regulované soustavy.

**Klíčová slova:** hydraulický pohon, robustní řízení, agregace stavových proměnných

## Použité značení

### Proměnné:

<b>A</b>	Stavová matice dynamiky uzavřeného systému řízení	<b>T</b>	Matice časových konstant, dimenze $(m,m)$
<b>D</b>	Agregační matice	<b>u</b>	Vektor řídicích proměnných, dimenze $m$
<b>D<sub>z</sub></b>	Základní nezáporná agregační matice	$u_j^+, u_j^-$	Horní a dolní limit $j$ -té řídicí hodnoty $m$
<b>e</b>	Vektor odchylek	<b>u*</b>	Vektor řídicích hodnot nerobustního řízení
<b>f</b>	Spojité vektorové funkce, dimenze $n$	<b>u<sup>r</sup></b>	Vektor řídicích hodnot robustního řízení
<b>f<sub>z</sub></b>	Agregovaná vektorová funkce <b>f</b>	<b>v</b>	Vektor poruchových proměnných dim. $p$
<b>F<sub>z</sub></b>	Působící zátěžná síla	<b>x</b>	Vektor stavových proměnných, dimenze $n$
<b>G</b>	Matice spojitých funkcí $g_{ij}$ a $\Delta g_{ij}$ typu $(n,m)$	<b>⊕</b>	Čtvercová regulární matice
<b>G<sub>z</sub></b>	Agregovaná matice <b>G</b>	$\alpha$	Obecná časová funkce nebo konstanta
<b>m</b>	Počet řídicích proměnných	<b>Indexy</b>	
<b>n</b>	Počet stavových proměnných (řád nelineárního subsystému)	<b>0</b>	Počáteční hodnota
<b>r</b>	Rozdíl řádů mezi reálným subsystémem a jeho předpokládaným modelem	<b>i</b>	Řádkový index
		<b>j</b>	Sub-řád $n$ nebo pomocný index $r$
		<b>hm</b>	Hydromotor
		<b>SV</b>	Servoventil

## 1 ÚVOD

Současné řízení elektrohydraulického pohonu, který je tvořen tlakovým zdrojem, čtyřcestným průtokovým servoventilem a hydromotorem s jednostrannou pístnicí sebou nese celou řadu mnohdy neočekávaných problémů v podobě nesplnění některých požadavků na něj kladených. Jedná se zejména o mnohdy zásadní požadavek regulace přechodového děje bez překmitu, či současné řízení několika stavových proměnných dohromady.

Klasické konvenční regulace a jejich parametry jsou v tomto ohledu zpravidla fixně nastaveny a umějí tak zacházet pouze s linearizovanými, časově invariantními modely či stavovými modely regulovaných soustav. Chování reálného elektrohydraulického systému je však determinováno zpravidla jeho proměnnými vlastnostmi a tím i potřebou nalezení algoritmů, které jeho proměnné vlastnosti, nelinearity, zohlední. Pro nalezení takového zpravidla nelineárního a zároveň nerobustního algoritmu řízení je pak třeba najít matematický model řízeného systému v tzv. standardním tvaru, viz dále v textu. Zásadní nevýhodou takového algoritmu je jeho nerobustnost, tedy jeho závislost na matematickém modelu řízeného systému a jeho citlivost na případné změny, či poruchy systému. V takovém případě může být uzavřený systém řízení nestabilní.

Je-li možné z nerobustního algoritmu vyloučit jeho závislost na matematickém modelu řízeného systému získáme, tzv. algoritmus robustní, který není závislý na matematickém modelu řízeného systému a který je schopen reagovat na možné nelinearity a náhodné poruchové proměnné bez samotné znalosti matematického modelu řízeného systému. Takový algoritmus je možné nalézt v podobě průběžné, numerické optimalizace zpětnovazebního řízení. Toto řešení, jak bude dále ukázáno má v konečném důsledku za následek výhodné řešení v němž vystupuje požadovaný model uzavřeného systému řízení, u nějž vystačíme pouze se znalostí řádu a očekávaným chováním soustavy. Model řízeného nelineárního systému pak vystupuje v řídicím algoritmu pouze nepřímo prostřednictvím stavových proměnných.

K syntéze zmíněných řídicích algoritmů bude využita metoda agregace stavových proměnných vyvinutá na naší katedře automatizační techniky a řízení [Víteček, A., Vítečková, M. 1999].

## 2 ŘÍDICÍ ALGORITMY A JEJICH NÁVRH

Programové řízení na základě metody agregace stavových proměnných a zněj vzešlé robustní řídicí algoritmy vycházejí z myšlenky minimalizace účelového funkcionálu ve tvaru

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{e}^T \mathbf{Q} \mathbf{e} + \dot{\mathbf{e}}^T \mathbf{Q}_0 \dot{\mathbf{e}}) dt, \quad (1)$$

kde  $\mathbf{Q}, \mathbf{Q}_0$  jsou symetrické kladně definitní, resp. kladně semidefinitní váhové matice řádu  $n$ , které prostřednictvím váhových koeficientů přiřazují váhu jednotlivým složkám vektorů odchylek  $\mathbf{e}$  a  $\dot{\mathbf{e}}$ .

Tyto matice, které je obecně nutno hledat složitou cestou dynamické optimalizace jsou v rovnici (2) nahrazeny agregační maticí  $\mathbf{D}$  a maticí časových konstant  $\mathbf{T}$ . Řešení rovnice (1) a nalezení následujících řídicích algoritmů vychází z [Víteček, A., Vítečková, M. 1999; Zítek, A., Víteček, A., 1999].

$$\mathbf{Q} = \mathbf{D}^T \mathbf{D}, \quad \mathbf{Q}_0 = \mathbf{D}^T \mathbf{T}^2 \mathbf{D} \quad (2)$$

Optimální zpětnovazební, nerobustní řízení může být formulováno jako

$$\mathbf{u}^* = \{\mathbf{D}\mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{v}, t)\}^{-1} \cdot \{\mathbf{T}^{-1} \cdot \mathbf{D}\mathbf{e} + \mathbf{D}[\dot{\mathbf{x}}^w - \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{v}, t)]\}, \quad \mathbf{e}(0) = \mathbf{e}_0. \quad (3)$$

Rovnici (3), minimalizující původní účelový funkcionál (1) je možno dále upravit pro naše potřeby a účely na základě znalostí dynamického systému a jeho matematického modelu na programové řízení takové, které by sledovalo předem zadanou stavovou trajektorii  $\mathbf{x}^w(t)$  tak, aby uzavřený systém řízení byl popsán námi požadovaným matematickým modelem s požadovanými aperiodickými průběhy jako optimální zpětnovazební řízení (4).

$$\mathbf{u}^* = [\mathbf{G}_z(\mathbf{x}, \mathbf{v}, t)]^{-1}(\mathbf{x}, \mathbf{v}, t) \cdot \{\mathbf{D}_z[\dot{\mathbf{x}}^w - \mathbf{A}\mathbf{e}] - \mathbf{f}_z(\mathbf{x}, \mathbf{v}, t)\}, \text{ kde } \mathbf{G}_z = \mathbf{D}_z\mathbf{G}, \quad \mathbf{f}_z = \mathbf{D}_z\mathbf{f} \quad (4)$$

Použitím optimálního zpětnovazebního řízení (3) nebo (4) dostaneme lineární uzavřený systém řízení, který realizuje tzv. externí, zpětnovazební linearizaci (vstup - stav), která provádí kompenzaci všech systémových nelinearit včetně poruch dodáváním lineárních výrazů, které zajistí požadované lineární vlastnosti uzavřeného systému řízení.

$$\mathbf{u}^* = \Theta \left[ \mathbf{D}(\mathbf{e} - \mathbf{e}_0) + \mathbf{T}^{-1} \cdot \mathbf{D} \int_0^t \mathbf{e} d\tau \right] + \mathbf{u}_0 = \Theta \int_0^t \mathbf{m}^w d\tau + \mathbf{u}_0 \quad (5)$$

Výraz suboptimální (značený křížkem  $\times$ ) proto, protože řešení probíhá v takových časových intervalech, které musí zajistit splnění podmínek pomalu se měnících vektorů a matic  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{x}^w$ ,  $\mathbf{f}$ ,  $\mathbf{G}$ ,  $\Theta$ , kde  $\Theta$  je obecně čtvercová regulární matice. Na rozdíl od řídicího algoritmu (5), který je lineární, představuje řídicí algoritmus (6) díky obecně nelineárnímu  $\mathbf{f}_z^w$  nelineární robustní algoritmus řízení.

$$\mathbf{u}^* = \Theta \left[ \mathbf{D}_z(\mathbf{e} - \mathbf{e}_0) - \int_0^t \mathbf{f}_z^w(\mathbf{e}) d\tau \right] + \mathbf{u}_0 \quad (6)$$

Podíváme-li se na získané rovnice suboptimálních zpětnovazebních řízení (5) a (6), je zřejmé, že díky matici  $\Theta$  se jedná o řízení z vysokým zesílením. V praxi to má za následek generování velkých akčních hodnot do reálného systému, což je z praktického hlediska nepřijatelné. Z tohoto důvodu je možné dále uvažovat některé modifikace předchozích algoritmů robustního řízení ve tvarech uvedených v rovnici (7) či kombinaci robustního a nerobustního řízení dle rovnice (8), která umožní tzv. beznárazový start robustního algoritmu řízení.

$$\boxed{\mathbf{u}^{sl} = \mathbf{G}_z^{-1} \mathbf{U}^m \text{sgn}(\mathbf{m}) + \mathbf{u}_0 \quad \mathbf{u}^{sa} = \mathbf{G}_z^{-1} \mathbf{U}^m \text{sat}(\Theta^m \mathbf{m}) + \mathbf{u}_0 \quad \mathbf{u}^{tgh} = \mathbf{G}_z^{-1} \mathbf{U}^m \text{tgh}(\Theta^m \mathbf{m}) + \mathbf{u}_0} \quad (7)$$

Klouzavé řízení se  
znaménkovou funkcí  
signum

Spojité náhrada  
klouzavého řízení  
funkcí nasycení

Spojité náhrada klouzavého  
řízení funkcí hyperbolický  
tangent

kde

$$|u_j^m| = \max(|u_j^+|, |u_j^-|), \quad (\Theta_j^m m_j) = \begin{cases} \Theta_j^m m_j & \text{pro } |\Theta_j^m m_j| \leq 1 \\ \text{sgn}(\Theta_j^m m_j) & \text{pro } |\Theta_j^m m_j| > 1 \end{cases} \quad (8)$$

$$\mathbf{u}^c = \alpha \cdot \mathbf{u}^* + (1 - \alpha) \mathbf{u}^r, \quad \alpha \in \langle 0, 1 \rangle.$$

### 3. NEROBUSTNÍ A ROBUSTNÍ ŘÍDICÍ ALGORITMY HYDRAULICKÉHO POHONU

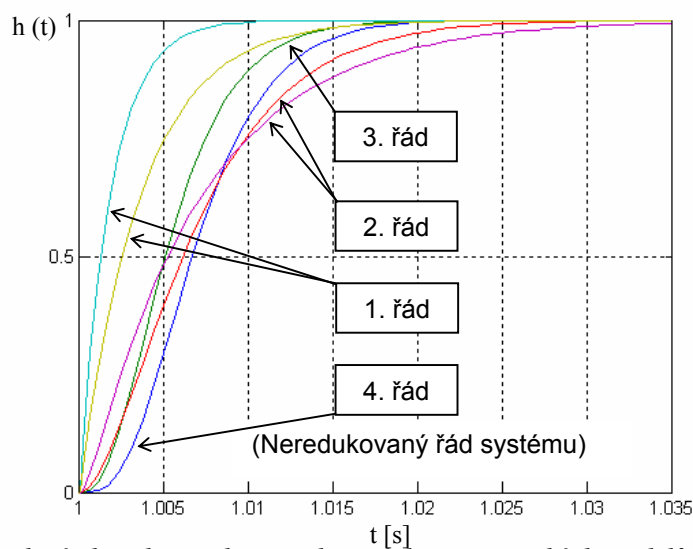
Pro návrh byla provedena volba agregační matice a matice časových konstant  $\mathbf{D}$  a  $\mathbf{T}$ . Tyto matice mají ze své podstaty přímý vliv na samotný průběh uzavřeného systému řízení, to znamená zda se jedná o průběh kmitavý či průběh aperiodický. Pro náš řízený systém s jednou řídicí veličinou,  $m = 1$  platí  $\mathbf{T} = T_1$ . Agregační matice  $\mathbf{D}$  je tvořena koeficienty charakteristického polynomu  $N(s)$ , rovnice (9), otevřeného regulačního obvodu se dvěma podsystémy setrvačnosti druhého řádu. Charakterický polynom uzavřeného systému řízení pak bude dán rovnicí (10).

$$N(s) = \quad (9)$$

$$s^4 + \left( \frac{2 \cdot \xi_{HM}}{T_{HM}} + \frac{2 \cdot \xi_{SV}}{T_{SV}} \right) \cdot s^3 + \left[ \frac{1}{T_{HM}^2} + \frac{4 \cdot \xi_{SV} \cdot \xi_{HM}}{(T_{SV} \cdot T_{HM})} + \frac{1}{T_{SV}^2} \right] \cdot s^2 + \left[ \frac{2 \cdot \xi_{SV}}{(T_{SV} \cdot T_{HM}^2)} + \frac{2 \cdot \xi_{HM}}{(T_{SV}^2 \cdot T_{HM})} \right] \cdot s + \frac{1}{(T_{SV}^2 \cdot T_{HM}^2)}$$

$$N^w(s) = N(s) \cdot \left( \frac{1}{T_1} + s \right) \quad (10)$$

Je zřejmé, že časová konstanta  $T_1$  zajistí a ovlivní požadované dynamické vlastnosti. Dále je zřejmé, že je možno požadovat charakteristický mnohočlen nižšího řádu a tím řídicí strukturu redukovat a zjednodušit, viz rovnice (11), (12), (13), (14).



Obr. 1 Přechodové charakteristiky požadovaných matematických modelů při redukcí řádu

$$\mathbf{D} = \mathbf{d}^T = [d_1 \quad d_2 \quad d_3 \quad d_4 \quad 1]^T - \text{Koeficienty systému 4.řádu} \quad (11)$$

$$\left[ \frac{1}{T_{SV}^2 \cdot T_{HM}^2} \quad \left( \frac{2 \cdot \xi_{SV}}{T_{SV} \cdot T_{HM}^2} + \frac{2 \cdot \xi_{HM}}{T_{SV}^2 \cdot T_{HM}} \right) \quad \left( \frac{1}{T_{HM}^2} + \frac{4 \cdot \xi_{SV} \cdot \xi_{HM}}{T_{SV} \cdot T_{HM}} + \frac{1}{T_{SV}^2} \right) \quad \left( \frac{2 \cdot \xi_{HM}}{T_{HM}} + \frac{2 \cdot \xi_{SV}}{T_{SV}} \right) \quad 1 \right]$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{d}^T = [d_1 \quad d_2 \quad d_3 \quad 1]^T - \text{Koeficienty systému 3.řádu}$$

$$\left[ \frac{1}{T_{SV} \cdot T_{HM}^2} \quad \left( \frac{1}{T_{HM}^2} + \frac{2 \cdot \xi_{HM}}{T_{SV} \cdot T_{HM}} \right) \quad \left( \frac{2 \cdot \xi_{HM}}{T_{HM}} + \frac{1}{T_{SV}} \right) \quad 1 \right], \text{ nebo } \dots \quad (12)$$

$\mathbf{D} = \mathbf{d}^T = [d_1 \quad d_2 \quad 1]^T$  - Koeficienty systému 2.řádu

$$\left[ \frac{1}{T_{SV} \cdot T_{HM}} \quad 2 \quad 1 \right], \text{ nebo } \left[ \frac{1}{(T_{SV} + T_{HM})^2} \quad \frac{(\xi_{HM} + \xi_{SV})}{T_{HM} + T_{SV}} \quad 1 \right], \text{ nebo } \dots \quad (13)$$

$\mathbf{D} = \mathbf{d}^T = [d_1 \quad 1]^T$  - Koeficienty systému 1.řádu

$$\left[ \frac{1}{(T_{SV} + T_{HM})/2} \quad 1 \right], \text{ nebo } \left[ \frac{1}{(T_{SV} + T_{HM})} \quad 1 \right], \text{ nebo } \dots \text{ jiné aproximace.} \quad (14)$$

Požadavkem na systém je rychlý nekmitavý, aperiodický průběh což lze snadno zajistit volbou konstant tlumení servoventilu a hydromotru  $\xi_{SV} = 1$  a  $\xi_{HM} = 1$ . Zbylé časové konstanty  $T_{SV}$  a  $T_{HM}$  jsou k dispozici na základě analytických vztahů definovaných v [Noskievič, 1999].

Z obrázku 1 je patrné, že vyhovujícím požadovaným matematickým modelem bude buďto neredukovaný model samotný nebo model redukovaný o jeden řád. Z toho je rovněž zřejmé, že neredukovaný 4 řád je možno použít na řízení systému 5.řádu.

Jelikož se jedná o požadovaný model, je možné do určité hranice dané časovými možnostmi soustavy požadovat rychlejší odezvu a řád dále snižovat. Obecně je možné řády více a přesněji redukovat čím je doba odezvy soustavy rychlejší, což u systémů hydraulických pohonů platí a proto je možné k řízení použít i řádu nejnižšího.

### 3.1. Nerobustní řídicí algoritmus

Dosažením agregační matice a matice časových konstant  $\mathbf{D}$  a  $\mathbf{T}$  do rovnice řízení (3) obdržíme optimální nerobustní zpětnovazební řízení (15), respektive (16).

$$u^* = \frac{1}{g_5} \cdot \left[ \dot{x}_5^w + \frac{d_1}{T_1} \cdot e_1 + \left( \frac{d_2}{T_1} + d_1 \right) \cdot e_2 + \left( \frac{d_3}{T_1} + d_2 \right) \cdot e_3 + \left( \frac{d_4}{T_1} + d_3 \right) \cdot e_4 + \left( \frac{1}{T_1} + d_4 \right) \cdot e_5 - f_5(\mathbf{x}, \mathbf{v}, t) \right] \quad (15)$$

$$u^* = \frac{1}{g_5} \cdot \left[ \dot{x}_5^w + a_0 \cdot e_1 + a_1 \cdot e_2 + a_2 \cdot e_3 + a_3 \cdot e_4 + a_4 \cdot e_5 - f_5(\mathbf{x}, \mathbf{v}, t) \right] \quad (16)$$

### 3.2. Robustní řídicí algoritmy

Suboptimální zpětnovazební robustní řízení s vysokým zesílením, rovnice (17) a (18) vznikne dosažením do rovnice (5). Toto řízení není z praktického hlediska vhodné z důvodu generování velkých akčních hodnot. Proto musíme užít robustních řídicích algoritmů vzešlých z rovnice (7), jejichž společným základem je maticová funkce  $\mathbf{m}$  uzavřeného systému řízení definovaná vztahem (19). Je-li to potřeba, může být požadován nelineární matematický model chování prostřednictvím  $\mathbf{f}_z^w(\mathbf{e})$  a řídicí algoritmus pak může být odvozen z rovnice (6).

$$u^* = \Theta \cdot \left[ \left( \frac{d_2}{T_1} + d_1 \right) \cdot e_1 + \left( \frac{d_3}{T_1} + d_2 \right) \cdot e_2 + \left( \frac{d_4}{T_1} + d_3 \right) \cdot e_3 + \left( \frac{1}{T_1} + d_4 \right) \cdot e_4 + e_5 + \frac{d_1}{T_1} \cdot \int_0^t e_1 d\tau \right] + u_0 \quad (17)$$

$$u^* = \Theta \cdot \left[ k_1 \cdot e_1 + k_2 \cdot e_2 + k_3 \cdot e_3 + k_4 \cdot e_4 + e_5 + k_0 \cdot \int_0^t e_1 d\tau \right] + u_0 \quad (18)$$

$$m = \left[ \left( \frac{d_2}{T_1} + d_1 \right) \cdot e_1 + \left( \frac{d_3}{T_1} + d_2 \right) \cdot e_2 + \left( \frac{d_4}{T_1} + d_3 \right) \cdot e_3 + \left( \frac{1}{T_1} + d_4 \right) \cdot e_4 + e_5 + \frac{d_1}{T_1} \cdot \int_0^t e_1 d\tau \right] \quad (19)$$

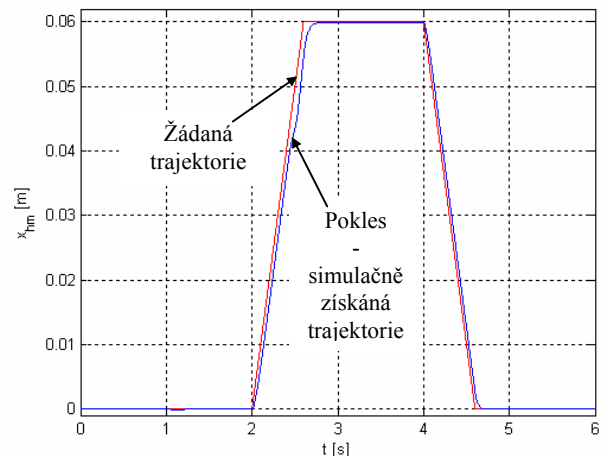
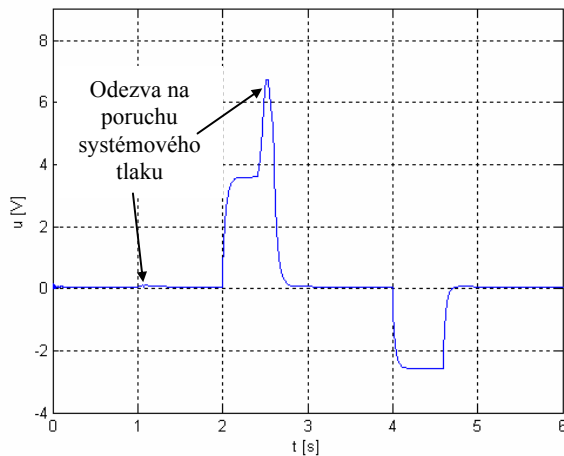
#### 4. SIMULACE A OVĚŘENÍ V PROSTŘEDÍ MATLAB/SIMULINK

Simulační model a ověření vybraných řídicích algoritmů je provedeno v programovém prostředí MATLAB/SIMULINK. Vybranými řídicími algoritmy byl nerobustní algoritmus řízení na základě znalosti matematického modelu a robustní algoritmus řízení se spojitou náhradou klouzavého řízení funkcí nasycení, (Obr.2). Obě simulace proběhly pro vysunutí pístnice do poloviny s uvažovanou zátěží 8000N a poruchou v podobě poklesu systémového tlaku v čase  $t = 1s$  a  $t = 2.5s$ . Z průběhu simulace vyplývá, že nejdůležitějším činitelem ovlivňujícím kvalitu řízení je časová konstanta  $T_1$ , jež se přímo podílí na řízení prostřednictvím agregační matice  $\mathbf{D}$ .

Z grafů je rovněž patrné, že reakce robustního algoritmu na vzniklou poruchu je účinnější než reakce algoritmu nerobustního řízení, což je dáno tím, že u robustního algoritmu není nutná znalost matematického modelu řízené soustavy, zatímco nerobustní algoritmus z něj přímo vychází a není tak schopen efektivně reagovat na vzniklou poruchu.

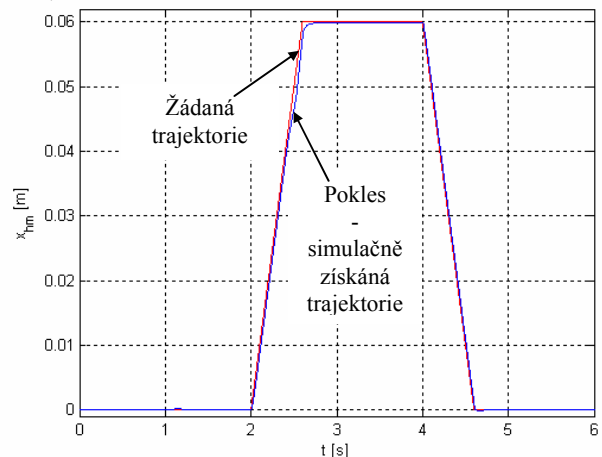
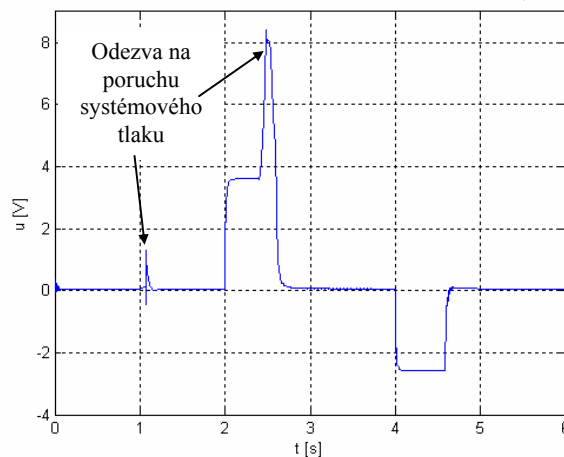
##### Nerobustní řízení

$$T_1 = 5e-5, \mathbf{G}_z = \mathbf{g}_z \cdot 5e7, F_z = 8000N$$



##### Robustní řízení

$$T_1 = 4e-4, \Theta = 1e-11, F_z = 8000N$$



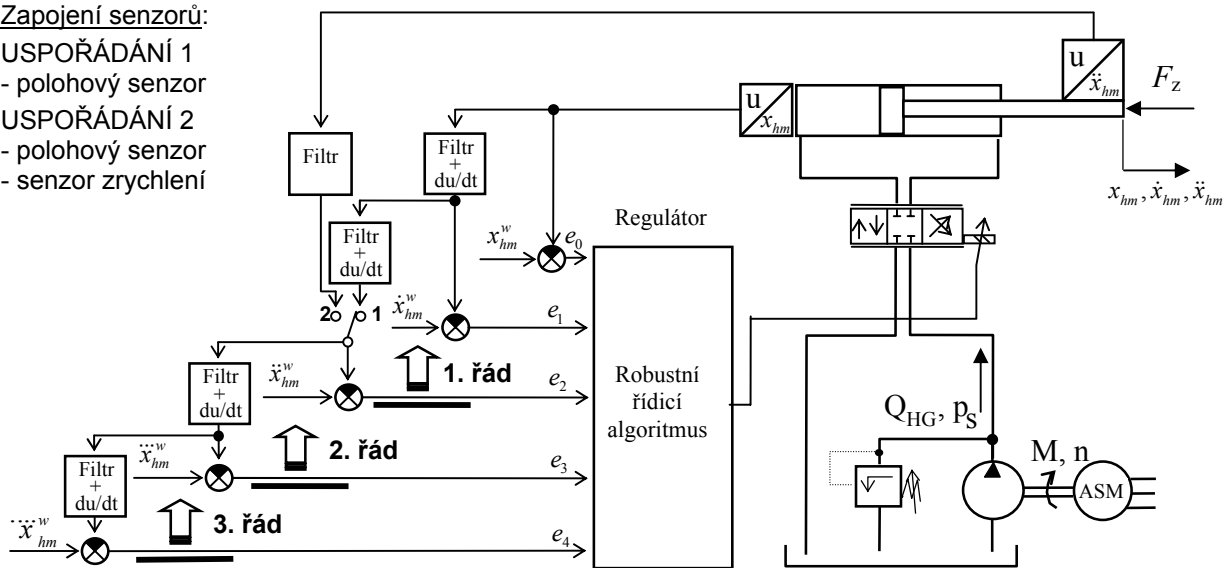
Obr.2 Průběh řídicí akční veličiny  $u$  (vlevo) a porovnání žádané a simulačně získané trajektorie stavu polohy pístnice hydromotoru (vpravo)

## 5. PRAKTICKÉ OVĚŘENÍ A POROVNÁNÍ ŘÍDICÍCH ALGORITMŮ

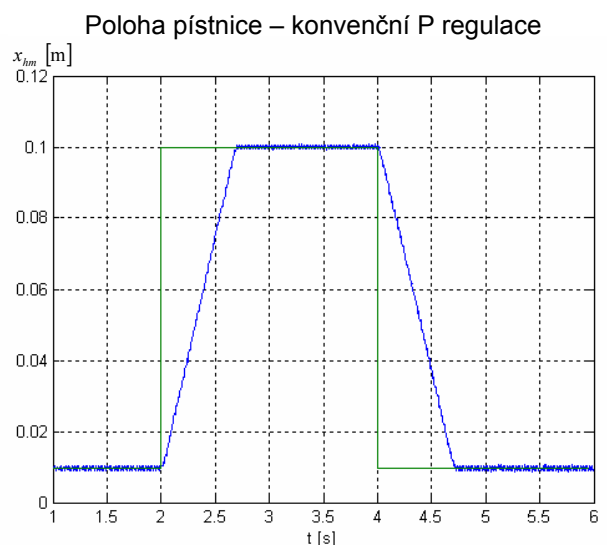
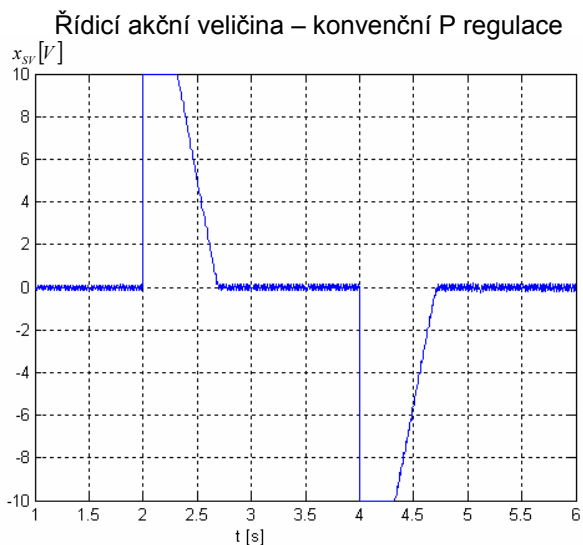
Porovnání a ověření řídicích algoritmů je provedeno na hydraulickém standu, tvořeným čtyřcestným servoventilem Bosch se jmenovitým průtokem  $Q_{jmen} = 40$  l/min a hydromotorem Manesmann Rexroth s jednostrannou pístnicí o rozměrech 63/45 -120 dle schématu na obrázku 3 s možností měření zpětné vazby polohy hydromotoru a zrychlení akceleračním senzorem firmy Brüel&Kjær v rozsahu  $\pm 10g$ . Pístnice je v průběhu měření zatěžována tlakem a tahem v řádech  $\pm 2250$  N. Signál je vždy z důvodu získání zřetěžených derivací před jednotlivými derivacemi filtrován a zpracováván s vzorkovací periodou 0.001s v simulačním programu MATLAB/Simulink. K řízení servoventilu a sběru dat je použit RealTime toolbox a hardwarová karta AD512 od firmy Humusoft s nastavenou periodou vzorkování 0.005s.

Zapojení senzorů:

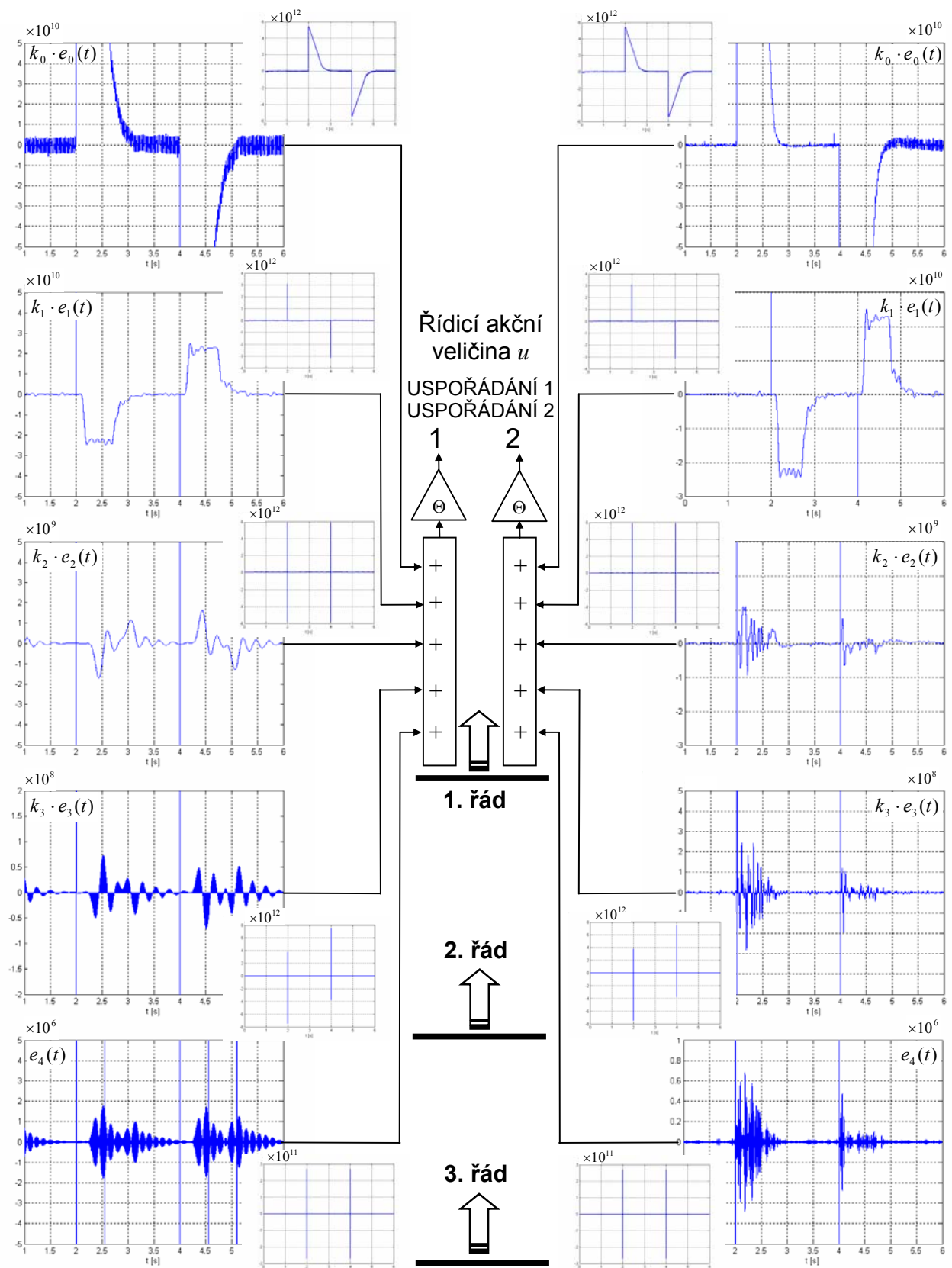
- USPOŘÁDÁNÍ 1  
- polohový senzor  
USPOŘÁDÁNÍ 2  
- polohový senzor  
- senzor zrychlení



Obr.3 Uspořádání měření pro jednotlivé řády požadovaného modelu systému



Obr.4 Naměřená řídicí akční veličina a poloha pístnice při užití klasického P regulátoru



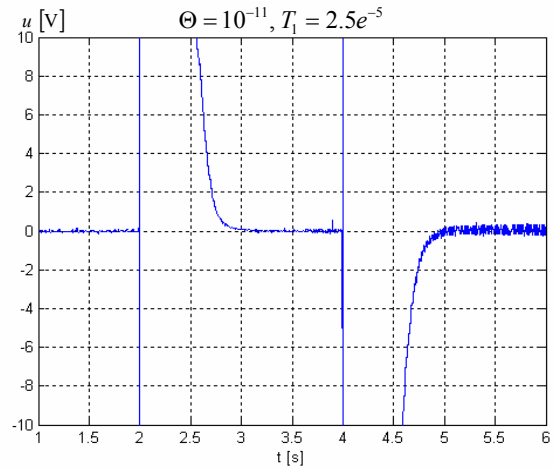
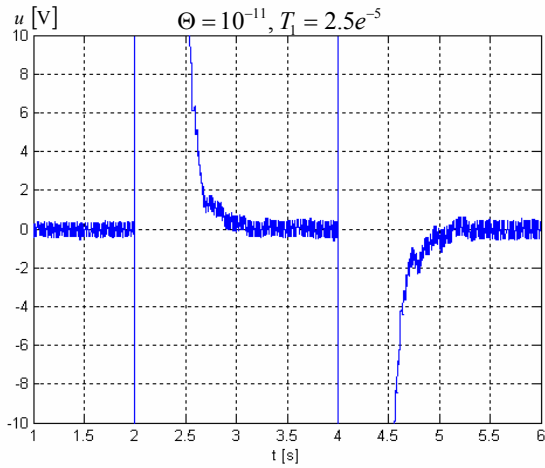
Obr.5 Vliv stavových proměnných na výslednou akční veličinu při uspořádání senzorů 1,2 a zvoleném řádu požadovaného modelu systému



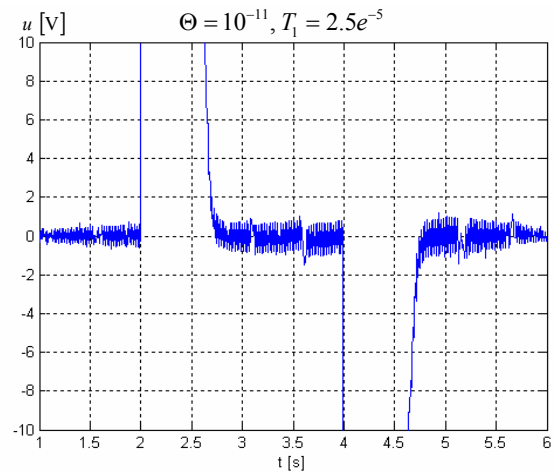
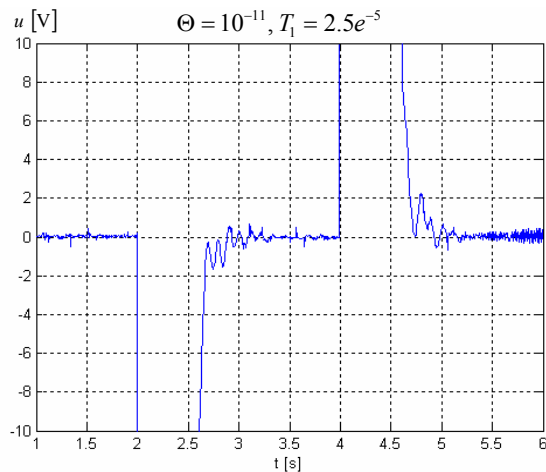
### Uspořádání 1

### Uspořádání 2

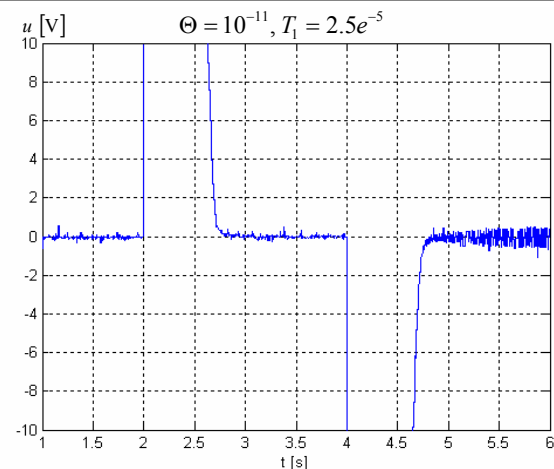
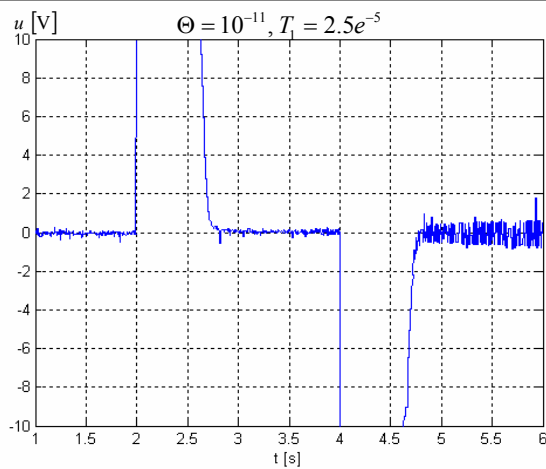
#### Řídicí akční veličina – 3. řád



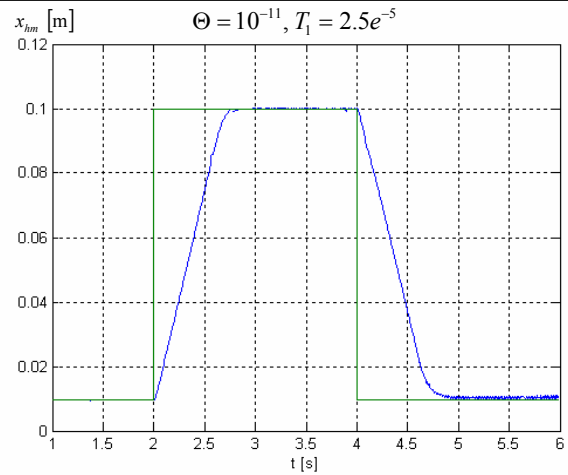
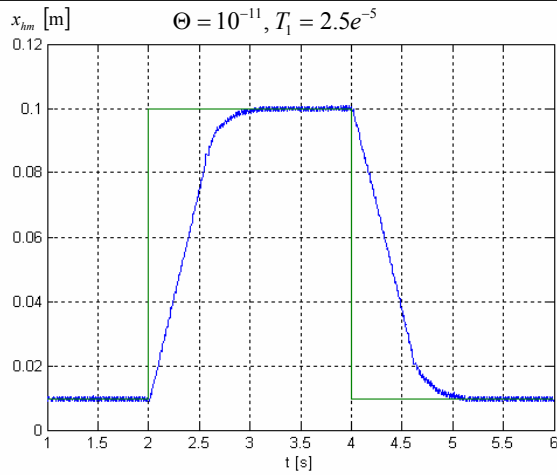
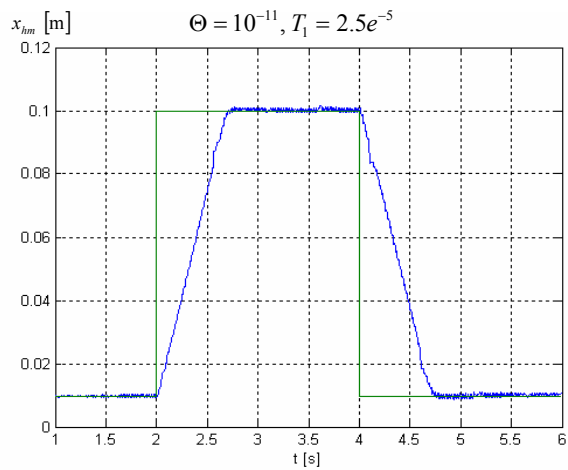
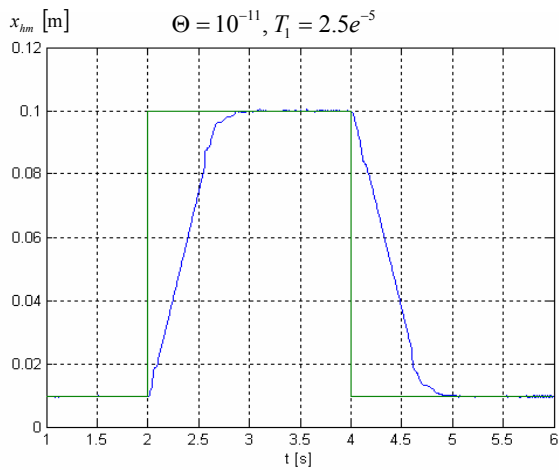
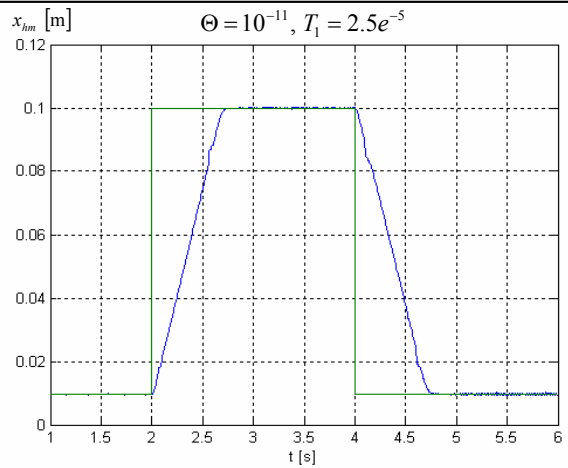
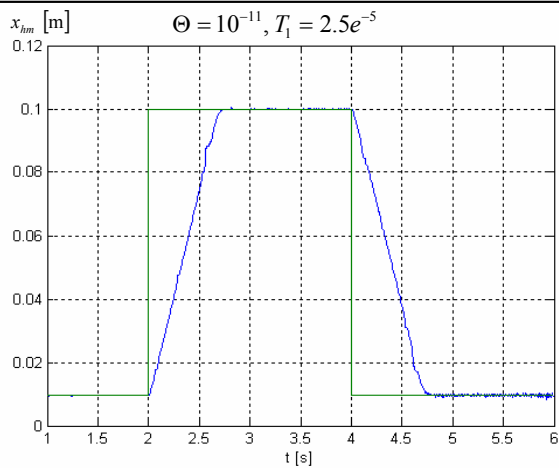
#### Řídicí akční veličina – 2. řád



#### Řídicí akční veličina – 1. řád



Obr.6 Řídicí akční veličina  $u$  při uspořádání senzorů 1,2 a pro všechny požadované řády modelu systému

**Uspořádání 1****Uspořádání 2****Poloha pístitnice – 3. řád****Poloha pístitnice – 2. řád****Poloha pístitnice – 1. řád**

Obr.7 Poloha pístitnice při uspořádání senzorů 1,2 a pro všechny požadované řády modelu systému

Z předchozích obrázků je patrné, že řídicí algoritmy všech řádů dosáhli žádané polohy bez překmitu a se stejnou časovou konstantou doby náběhu s přesností na tisíce. Podíváme-li se však na energetickou spotřebu prostřednictvím měřených tlaků a průtoků, můžeme dojít k následující tabulce energetické spotřeby regulačního pochodu pro jednotlivé typy řídicích algoritmů. Energetická úspora je dána nalezením optimálního řešení rovnice (1), která rovněž představuje nepřímé vyjádření energetické spotřeby.

Energetická spotřeba	Požadovaný model 1. řádu	Požadovaný model 2. řádu	Požadovaný model 3. řádu	Konvenční regulátor P
Uspořádání 1	86.2 %	90.9 %	91.1 %	100 %
Uspořádání 2	86.6 %	87.8 %	85.7 %	

Tab.1 Porovnání naměřené energetické spotřeby při užití různých druhů řídicích algoritmů

## 5. ZÁVĚR

V příspěvku byla nastíněna teoreticky shrnutá metoda agregace stavových proměnných a z ní plynoucí řídicí algoritmy nerobustního a robustního řízení.

Dále byla provedena aplikace řídicích algoritmů na elektrohydraulický systém a ověřena možnost redukce řádu požadovaného matematického modelu soustavy. Na obrázku 5 je možné vidět architekturu řízení, požadavky na měření zpětnovazebních signálů a jejich derivací a bezproblémovou možnost nastavování vysokých hodnot požadovaných proměnných, např. rychlý skok polohy v krátkém čase. Z tabulky 1 je zřejmá jedna z výhod robustního řízení v podobě minimalizace energetické spotřeby, která je ve všech případech při dosažení stejných požadavků nižší než u běžné P regulace. Příjemná je taky možnost obdržet tyto výsledky pouze se senzorem polohy bez nutnosti dalších investic do senzorů. Výrazná výhoda pak dle požadovaného modelu tkví v garanci přechodového děje bez překmitu. Jedinou nevýhodou u vyšších řádů zůstává problém zpětnovazebních signálů, které je nutné před jednotlivými derivacemi filtrovat. V případě užití akceleračního senzoru a požadovaného modelu 1. řádu pak není filtrace potřebná.

## LITERATURA

1. Brogan, W. L. *Modern Control Theory* – 3<sup>th</sup> ed. Prantice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1991, -653 s., ISBN 0-13-590415-3
2. Föllinger, O. *Nichtlineare Regelungen. I, Grundlagen und harmonische Balance - 5. Aufl.* - München : R. Oldenbourg, 1989. - 275 s. : il. ISBN 3-486-21457-8
3. Maňásek, R. *Energeticky úsporné koncepce elektrohydraulických systémů*. Disertační práce. FS VŠB-TU Ostrava, 2001.-113s.
4. Noskivič, P. *Modelování a identifikace systémů*. I. vyd.: Montanex a.s. Ostrava, 1999. -76s. ISBN 80-7225-030-2
5. Víteček, A., Vítečková, M. *Optimální systémy řízení*. 1. vyd. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 1999. 156 s. ISBN 80 - 7078 - 736 - 8.
6. Zítek, A., Víteček, A. *Návrh řízení podsystémů se zpožděními a nelinearitami*. I. vyd.: Vydavatelství ČVUT Praha, 1999, -165s. ISBN 80-01-01939-X

## Kontakt

Ing. Petr Koňářík, [konarik.petr@post.cz](mailto:konarik.petr@post.cz)

Katedra automatizační techniky a řízení, Fakulta strojní, VŠB-TU Ostrava,  
17.listopadu 15, 708 33 Ostrava - Poruba