

## Oponentský posudek disertační práce

**Název práce:** Adaptivní metody pro řízení hydraulických systémů  
**Autor:** Ing. Martin Veselý  
**Pracoviště:** Ústav přístrojové a řídící techniky, Fakulta strojní, ČVUT Praha  
**Studijní program:** Strojní inženýrství  
**Studijní obor:** Technická kybernetika  
**Školitel:** doc. Ing. Ivo Bukovský, Ph.D.

**Oponent:** doc. Ing. František Dušek, CSc.  
**Pracoviště:** Katedra řízení procesů, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Univerzita Pardubice

Oponentský posudek byl vypracován na základě jmenovacího dopisu prof. Ing. T. Jirouta, Ph.D., proděkana Fakulty strojní Českého vysokého technického Praha ze dne 18.4.2021.

Disertační práce Ing. Veselého obsahuje 101 číslovaných stran a nemá žádné přílohy. Kromě seznamu použité literatury je v práci uveden seznam 6 prací, kde je disertant uveden jako první autor, a 4 prací kde je spoluautorem. Tyto práce tvoří dvě kapitoly v knize, jeden článek v časopise, dva příspěvky na mezinárodních a pět na národních konferencích. Práce neobsahuje nosič s programy ani v práci není uveden odkaz umožňující je získat. Oponentský posudek vychází pouze z informací uvedených v textu práce.

### Shrnutí obsahu předložené práce

Disertant se v práci zabýval SW řešením řízení hydraulických strojů, které nevyžaduje použití předřadných elektronik pro kompenzaci typických nelinearit – mrtvý chod, proměnné zesílení a hystereze proporcionálních ventilů. Tuto úlohu rozšířil o požadavek na automatické přizpůsobování měnícím se parametrum těchto nelinearit. Jako základní strategii zvolil adaptivní řízení s referenčním modelem (MRAC) využívající polynomiální neuronové jednotky HONU. Vzhledem k charakteru řízeného systému řešil i problematiku zrychljeného algoritmu učení. Navrhovaný řídící systém byl určen pro zkušební hydraulický stand (lis) ve firmě FMV-Design Trutnov. S využitím matematického modelu tohoto zařízení provedl disertant simulační ověření dílčích částí řešení. Na tomto zařízení provedl i experimentální řízení.

Práce je logicky uspořádána a tvoří ji 7 kapitol včetně úvodu, cíle práce a závěru. V rešerši v kapitole druhé se na 23 stranách disertant zabývá vlastnostmi a adaptivním řízením hydraulických systémů, polynomiálními jednotkami HONU, adaptivním řízením s referenčním modelem, řízením využívajícím neuronové sítě a přístupy k vyšetřování stability. Rešeršní část je s ohledem na zaměření práce dostačně podrobně provedená s využitím přes 50 odkazů. U několika, na první pohled převzatých, obrázků chybí uvedení zdroje.

V nejrozsáhlejší kapitole čtvrté se na 31 stránkách disertant věnuje teoretickým záležitostem – zejména popisu modelů HONU včetně jejich učení a strategií MRAC s HONU modelem. Dvě krátké části jsou věnované strategii MPC (Model Predictive Control) a ISS (Input to State Stability) stabilitě.

Část práce vztahující se k řešení cíle práce začíná krátkou (5 stran) kapitolou pátou, která je věnována sestavení nelineárního dynamického matematického modelu hydraulického zařízení. Model byl sestaven tak, aby chováním odpovídal hydraulickému standu a je využíván v simulacích.

Kapitola šestá – Experimentální část – se na 20 stranách zabývá simulačním testováním dílčích řešení popsaných v teoretické části – rozšíření kritéria, schopnost učení a schopnost identifikace různých variant HONU modelů. Simulační experimenty jsou ukončeny konstatováním „Ze simulace vyplývá, že

nemá smysl používat složitějších modelů schopných lépe approximovat chování hydraulického systému a k nim příslušných regulátorů, protože regulace nebyla v ničem lepší než řízení s lineárním regulátorem.“ Kapitola končí třemi stránkami věnovanými jedinému experimentu na reálném řízení.

#### Poznámky k formální stránce disertační práce

Předkládaná práce obsahuje neobvyklé množství formálních chyb. Od překlepů, přes gramatické a stylistické chyby, nesprávné uvedení názvů (Siemens Symatic či Tecomat Foxtroth) až po velmi časté používání pojmu „reálný čas“ v nesprávném významu. Další chyby se vyskytují v zápisech rovnic, např. na str. 36 rovnice (4.7) je uvedeno že jde o Gausovu funkci, ale exponent není v kvadrátu a je kladný

$$\beta_i = e^{\sum_{p=1}^P (z_{(p)} - S_{(i,p)}) \sigma^{-2}} \quad \beta_i = e^{-\sum_{p=1}^P (z_{(i,p)} - S_{(i,p)})^2 \sigma_i^{-2}}. \quad (4.7)$$

Chyby v neuvedení indexů ( $z_{(i,p)}$ ,  $\sigma_i^{-2}$  v 4.7,  $\mu_{(k)}$  v 4.20) mohou měnit význam parametru i celého vztahu.

Samotný algoritmus NGD má následující má pro učení vah následující podobu [26]:

$$\mathbf{w}_{(k)} = \mathbf{w}_{(k-1)} - \mu_{(k)} \cdot \frac{\partial Q_{(k)}}{\partial \mathbf{w}_{(k-1)}} \quad (4.17)$$

V každém diskrétním čase  $k$  je vektor vah modelu  $\mathbf{w}$  upraven proti směru gradientu kriteriální funkce  $Q$ . O velikosti změny velikosti vah rozhoduje součinitel rychlosti učení  $\mu$ . Hodnota  $\mu_{(k)}$  může být stanovena tak, aby kriteriální funkce (4.16) po úpravě vah  $\tilde{Q}_{(k)}$  byla minimální.  $\mu_{(k)}$  lze pak spočítat metodou nejmenších následující podmínkou [52]:

$$\frac{\partial \tilde{Q}_{(k)}}{\partial \mu_{(k)}} = 0 \quad (4.18)$$

##### 4.2.1 Učení modelů soustavy metodou NGD

Jelikož výsledný zápis pro HONU (4.2) a pro T-S HONU modely (4.8) jsou stejné z pohledu vah, platí pro ně stejně odvození učení metodou NGD.

Dosazením rovnice HONU (4.2) do kriteriální funkce (4.16) se dostane:

$$Q_{(k)} = \frac{1}{2} e_{(k)}^2 = \frac{1}{2} (y_{ref(k)} - \mathbf{w}_{(k)} \cdot \text{colx}_{(k)})^2 \quad (4.19)$$

Následným dosazením (4.19) do (4.17) a výpočtem gradientu se dostane rovnice pro učení vah:

$$\mathbf{w}_{(k+1)} = \mathbf{w}_{(k)} + \mu \cdot e_{(k)} \cdot \text{colx}_{(k)}^T \quad (4.20)$$

Na ukázce ze str. 39 lze demonstrovat hned několik chyb současně – stylistickou chybu (chybějící slovo), nekorektní či nesprávný zápis matematických výrazů (4.17) a (4.18), různé označení symbolů ( $Q$  v 4.17 a 4.18,  $\tilde{Q}$  v 4.18), vynechání indexu (4.20), nejasná formulace způsobu řešení – není mi jasné, jak se metodou nejmenších (zřejmě čtverců) řeší rovnice (4.18).

#### Vyhádření k obsahu disertační práci

Disertant vypracoval dobrou rešeršní část o vlastnostech a řízení hydraulických strojů. Také začátek teoretické části zabývající se modely HONU a optimalizační metodou NGD je na standardní úrovni. To už se, podle mého názoru, ale nedá říct o dalších částech práce zabývající se návrhem a implementací adaptivního řízení hydraulického lisu.

Další poznámky jsou rozvedeny v otázkách k obhajobě. Nenašel jsem základní popis použité strategie řízení. Z textu lze vydedukovat že disertant použil modifikaci regulátoru MRAC (pravděpodobně dle Obr. 13 v rešeršní části, ale je to jen moje domněnka). Neuvedení základní strategie návrhu řízení velmi ztěžuje orientaci v textu i rozpoznání přínosu disertanta. Chybí mi zdůvodnění, proč je použitá strategie včetně modifikací vhodná pro řízení příslušného typu systémů. Tohoto se týká první skupina otázek k

obhajobě. Chybí mi i zmínka o způsobu řešení známého problému adaptivního řízení – řízení při nedostatku informace v datech. Tohoto problému se týká druhá otázka.

Třetí skupina otázek se vztahuje ke splnění cílů práce. Domnívám se, že v práci nejsou uvedeny informace potvrzující, že disertant vytvořil nový a zrychlený algoritmus učení. Očekávám, že to disertant vysvětlí při obhajobě. S cílem sestavit regulátor souvisí i stabilita URO. Z příslušné části práce jsem nevyrozuměl, zda URO je nebo není stabilní případně za jakých podmínek.

Poslední skupina otázek souvisí s cílem sestavit regulátor pro řízení hydraulického lisu a týká se implementace navržených algoritmů a realizace řízení. Celý návrh řízení byl navržen jako diskrétní a adaptivní, tj. základním parametrem je interval vzorkování. V práci není informace o použitém intervalu vzorkování uvedena ani u simulací ani u reálného experimentu. Uveden je pouze záznam jednoho reálného experimentu – 120 sec průběhu žádané a měřené polohy pístnice a akční veličiny. Experiment není porovnatelný s žádným ze simulačních experimentů a není uveden průběh s originálním řízením. Vyhodnocení experimentu je jedinou větou, cituji „*Velikost překmitu a přesnost dosažení žádané hodnoty je obvykle 0,1 mm při řízení s proporcionálními ventily, a této přesnosti bylo i dosaženo*“

Otzázkы k obhajobě.

- 1) Volba strategie řízení v souvislosti s vlastnostmi hydraulických systémů
  - a. Může disertant shrnout, nejlépe ve formě blokového schéma, jím použitou strategii řízení hydraulického lisu?
  - b. Byly při návrhu strategie řízení nějak využity informace o řízeném systému se známým typem nelineární statické charakteristiky? Proč je referenční model ve tvaru lineární diferenční rovnice? Jak si disertant vysvětluje, že pro řízení systému s nelineární statickou charakteristikou se ukázal jako nejvhodnější lineární řídicí systém?
  - c. V Kap. 6.2.2 na str. 79 jsou u Obr.36 „Statická charakteristika HONU“ (kde chybí popis os) uvedeny závěry ohledně schopnosti modelu T-S LNU akceptovat/reflektovat mimo jiné hysterezi a mrtvé pásmo hydraulického systému. Pojmy akceptovat/reflektovat je myšleno, že statická charakteristika T-S LNU případně CNU modelu odpovídá statické charakteristice nelineárního systému, na jehož datech byl naučen? Pokud ano, prosím o uvedení základních informací o těchto modelech (interval vzorkování a strukturu modelu) a vztah pro výpočet zesílení modelu.
- 2) V případě hydraulického lisu (systém s integračním charakterem) se domnívám že jakékoli (konstantní) polohy pístnice je dosaženo při libovolné hodnotě akční v mrtvém pásmu ventilu. Jak probíhalo adaptivní učení parametrů HONU (model) v situaci, kdy bylo po delší dobu dosaženo žádané hodnoty?
- 3) Jako cíl 1 byl stanoven „*Vytvoření nového zrychleného algoritmu učení ...*“, cíl 2 „*Vytvoření postupu adaptace řízení, sestavení korektního učícího algoritmu pro HONU*“ a cíl 3 „*Sestavení regulátoru se zvýšenou rychlosí učení ...*“.
  - a. Jakého zrychlení učení bylo dosaženo? Lze rychlosť učení nějak konkretizovat a jaká byla referenční rychlosť učení vůči které bylo zrychlení uvažováno?
  - b. V Kap. 4.2 „Optimalizační metoda Normalizovaný Gradient Descent“ je tato iterační metoda použita pro určení vektoru vah  $\mathbf{w}$  HONU (regulátor). Pokud je úloha nalezení vektoru vah  $\mathbf{w}$  funkce, která je vzhledem k témtoto parametrům lineární, formulována jako model HONU
$$y(k) = \mathbf{w} \cdot \mathbf{colx}(k) \quad (4.2)$$

kritérium

$$Q(k) = \frac{1}{2} [y_{ref}(k) - y(k)]^2 \quad (4.16)$$

potom úloha

$$\mathbf{w}^* = \arg \min_{\mathbf{w}} Q(k)$$

je lineární s explicitním řešením

$$\mathbf{w}^* = y_{ref}(k) \mathbf{colx}^T(k) \cdot [\mathbf{colx}(k) \cdot \mathbf{colx}^T(k)]^{-1}$$

Proč je potřeba u lineárního problému iterační výpočet  $\mathbf{w}(k)$  dle rovnice (4.20)? Je to nová metoda?

- c. V Kap. 4.7 „ISS stabilita uzavřeného regulačního obvodu“ je odvozena závislost matic vztahu (4.105) na vektorech parametrů  $\mathbf{v}$  (HONU jako model soustavy) a  $\mathbf{w}$  (LNU jako regulátor).

$$S = \|\hat{\mathbf{x}}_{(k)}\| - [\|\prod_{i=k_0}^{k-1} \hat{\mathbf{M}}_{(i)}\| \|\hat{\mathbf{x}}_{(k_0)}\| + \sum_{j=k_0}^{k-1} \|\prod_{i=k_0}^{k-1} \hat{\mathbf{M}}_{(i)} \hat{\mathbf{N}}_{(j)}\| \|\hat{\mathbf{u}}_{(j)}\|] \quad (4.105)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{(k)} = \hat{\mathbf{M}}_{(k-1)} \hat{\mathbf{x}}_{(k-1)} + \hat{\mathbf{N}}_? \hat{\mathbf{u}}_{(k-1)} ; y_{n(k)} = \hat{\mathbf{C}} \hat{\mathbf{x}}_{(k-1)} \quad (4.106)$$

Jako závěr je uvedeno „Výsledným dosazením (4.128), (4.129), (4.125), (4.121) do (4.105) v příslušných časech lze dopočítat stabilitu uzavřeného regulačního obvodu“. Může disertant konkretizovat, zda tedy je nebo není URO stabilní a případně za jakých podmínek? Je v odvození uvažován iterační výpočet obou vektorů parametrů s měnícím se koeficientem účení?

- 4) Simulace řízení i reálné řízení hydraulického standu bylo v prostředí MATLAB/SIMULINK. Může disertant uvést doplňující informace o experimentu na reálném zařízení
- Jaký je odhad dynamiky řízeného systému vyjádřený dobou do ustálení rychlosti pístnice, jaký je interval měření polohy pístnice a jaká je frekvence řídicího signálu PWM proudu proporcionalního ventilu (v rešeršní části uveden rozsah 40-450 Hz)?
  - Jaký byl interval výpočtu akční a jaká byla přibližně doba výpočtu? Jaká byla specifikace počítače, na kterém bylo řízení realizováno?
  - Byly parametry modelů převedeny? Pokud ano jak se převedení provádělo. Pokud ne jak vypadal průběh po zahájení reálného řízení?
  - Docházelo během experimentu ke změnám parametrů zařízení? Proč byla při reálném řízení jiná perioda (Obr. 47, 40 sec) průběhu žádané polohy pístnice oproti porovnatelným simulacím experimentům (Obr. 38-41, cca 15 sec) s modelem, jehož chování má odpovídat reálnému zařízení?
  - Jak vypadal průběh řízení se stejným průběhem žádané při použití originálního řídicího systému hydraulického standu?
  - Je OS Windows a prostředí MATLAB/SIMULINK vhodné pro implementaci řízení v reálném čase?
  - Může se disertant vyjádřit k použitelnosti navrženého řízení v PLC typu Siemens Simatic (pozadavek „nízké nároky na výpočetní výkon“ na str. 32)?

### Závěr

Vzhledem k tomu, že nejsem odborníkem v oblasti umělé inteligence nemohu odpovědně hodnotit disertantovi znalosti, přehled ani teoretický přínos práce v této oblasti. Z mého pohledu může být nové použití HONU jako speciální formy popisu vlastností modelu i regulátoru ve strategii řízení MRAC. Nicméně výsledky uvedené v práci žádný praktický přínos nenaznačují. Dle mého názoru mohl být potenciál HONU approximovat nelineární průběhy při využití znalosti o chování řízeného systému využit lépe.

Zdá se, že práce byla vytvořena ve spěchu což naznačuje i neobvyklé množství formálních chyb. Dle mého názoru je v práci hodně věcí nejasných a mnoho informací pro posouzení splnění cíle práce chybí. Za zcela nedostačující považuji uvedení pouze jednoho reálného experimentu navíc bez uvedení podmínek, za kterých byl proveden. Několik konkrétních výtek je uvedeno ve vyjádření k obsahu práce a formulováno ve formě otázek, aby měl disertant možnost chybějící informace při obhajobě doplnit a nejasnosti vysvětlit.

Disertační práci Ing. Veselého k obhajobě nedoporučuji.

v Pardubicích, 13. května 2021

.....  
*doc. Ing. František Dušek, CSc.*  
*Katedra řízení procesů, FEL Univerzita Pardubice*  
*nám. Čs. legií 365*  
*53210 Pardubice*