

## Oponentský posudek disertační práce

**Jméno disertanta:** Ing. Pavel Škrabánek

**Název disertační práce:** Prediktivní řízení vícerozměrové soustavy

**Oponent:** prof. Ing. Petr Dostál, CSc.

Disertační práce se zabývá návrhem prediktivního regulátoru pro řízení nelineárního mnohazměrového systému reprezentovaného reálným pneumaticko-hydraulickým zařízením.

Téma práce je aktuální a zajímavé z hlediska teoretického i aplikačního. I když principy prediktivního řízení jsou známé již několik desetiletí, nejsou stále možnosti jeho dalšího rozvoje a vylepšování vyčerpány. To platí zejména pro řízení nelineárních procesů a v případech, kdy model procesu lze těžko odvodit nebo odpovídá realitě s větší nepřesností.

Práce je rozčleněna do deseti kapitol včetně úvodu a závěru, je doplněna několika předepsanými seznamy a přílohami.

Po první, úvodní části, jsou cíle práce definovány v kapitole druhé. Tyto cíle jsou v zásadě dva, prvním je nalezení vhodného prediktivního regulátoru zajišťujícího úlohu sledování s omezeními stavů i vstupů, druhým je získání dostatečně přesného analytického nelineárního modelu procesu. Uvedené cíle odpovídají standardnímu postupu a požadavkům při realizaci prediktivního řízení.

Třetí kapitolu tvoří přehled současného stavu. Tento přehled je dle mého názoru až příliš stručný, chybí mi zde hlubší pohled na jednotlivé v historicky vyvíjené metody prediktivního řízení, jejich přednosti a možnosti ve srovnání s metodami předcházejícími.

Teoretickým přehledem prediktivního řízení je kapitola čtvrtá. Je zde postupně popsáno lineární a nelineární MPC, řízení s omezeními a kvadratické programování, včetně typů lineárních i nelineárních modelů procesů potřebných pro aplikaci jednotlivých metod. Celá kapitola má 19 stran. Obsahuje řadu podkapitol a pojmů, vyskytujících se v souvislosti s prediktivním řízením. Některé části jsou ovšem příliš stručné a některé pojmy by rozhodně měly být popsány podrobněji. Některé nedostatky v tomto smyslu uvedu v konkrétních připomínkách.

V páté kapitole disertant popisuje řízený proces a uvádí jeho nelineární model. Vzhledem k tomu, že se jedná o kombinaci pneumatického a hydraulického procesu, je výsledný model dosti složitý, což je nutné, má-li vystihovat chování procesu s dostatečnou přesností a tedy být kvalitní součástí algoritmu řízení.

Šestá kapitola úzce navazuje na kapitolu pátou. Vzhledem k tomu, že některé parametry nelineárního modelu lze těžko dohledat metodami jinými než experimentálními, je zde uveden postup umožňující experimentální cestou dohledat jeho parametry, což ovšem vyžaduje množství předběžných úprav modelu, sdružování parametrů apod. Postup uvedený disertantem lze pokládat za správný, i když by asi mohly nalezeny postupy vedoucí k ještě většímu zjednodušení modelu.

V sedmé kapitole je uveden linearizovaný model řízeného procesu, potřebný pro návrh prediktivního regulátoru. Postup při jeho odvození je založen na standardní metodě aproximace nelineární funkce více proměnných prvními dvěma členy Taylorova rozvoje v okolí pracovního bodu. Byla testována shoda odezvy stavových veličin z linearizovaného modelu a reálného zařízení na skokové vstupní signály v okolí pracovního bodu.

Kapitola osm je věnována návrhu prediktivních regulátorů pro řízení konkrétního procesu. Jsou zde odvozeny regulátory pro lineární i nelineární prediktivní řízení za přítomnosti omezení jak na stavové tak vstupní signály. Kapitola je napsána přehledně a popis postupu je

postačující.

V deváté kapitole byly oba způsoby řízení ověřeny simulacemi na nelineárním modelu procesu i na reálném zařízení. a porovnány na základě zvoleného kritéria kvality (suma absolutních hodnot regulačních odchylek). Zatímco při simulaci je rozdíl ve kvalitě řízení výrazný, při řízení reálného objektu je takřka zanedbatelný.

K práci mám mimo už uvede poznámky k přílišné stručnosti některých částí několik dalších:

Popis (26) prozatím není popisem v přenosových funkcích, ale v polynomiálních maticích. Na str. 33<sup>5</sup> pak nerozumím poznámce "není potřeba velké množství parametrů ...". Vždyť zde jsou parametry všechny prvky matic (27), (28), kterých může být velký počet. Navíc,  $A$  a  $B$  jsou přece matice, takže relace (29) musí být ve tvaru levého nebo pravého maticového zlomku ( $A_L^{-1} B_L$  resp.  $B_R A_R^{-1}$ ).

Str. 33, k rov. (30): Pokud byly uvedeny rozměry matic v předchozím, měly být uvedeny i u stavového modelu.

Str. 37: Jak je definována  $G$  v rovnici (48)?

Str. 83, rov. (189): Přepočítání matic ve spojitém stavovém modelu na diskrétní ovšem předpokládá i volbu periody vzorkování.

Str. 88: Nevím, zda lze při pohledu na obr. 15 konstatovat, že " dynamika LM odpovídá pro potřeby řízení dostatečně měření".

Str. 108, 109: Obrázky jsou velmi nezřetelné, průběhy žádaných hodnot jsou téměř neviditelné.

Str. 110, 111: V tabulce 22 jsou hodnoty kritéria pro určitým způsobem nastavené regulátory. Pak bylo nalezeno "'vhodnější" nastavení. Týkalo se pouze NMPC nebo i LMPC? Na str. 111 jsou průběhy řízení pomocí "vhodnějšího" NMPC, výsledky kritéria však už nejsou uvedeny. Dále, bylo by zajímavé, kdyby bylo zvoleno kritérium hodnotící i akční zásahy (suma absolutních hodnot resp. kvadrátů). Je to někdy důležité při praktickém řízení.

Str. 113: Je zajímavé, že při řízení reálného procesu byly při aplikaci LMPC i NMPC velmi podobné výsledky. Má to znamenat, že lineární a nelineární model procesu jsou přibližně stejně vzdáleny od reality?

*Pozn.: Je to možná dáno tím, že odmocninové nelinearity jsou "slabé" a nerzhoršují vlastnosti procesu z hlediska konvergence při vzdalování se od pracovního bodu.*


Str. 112, 113. I zde jsou obrázky značně nezřetelné.

I přes určité výhrady ke stručnosti některých částí a výše uvedené připomínky pokládám práci za zdařilý přínos v oblasti řízení reálných procesů pomocí prediktivního řízení. Za její hlavní přínos považuji vytvoření algoritmu NMPC pro dané reálné laboratorní zařízení včetně sestavení jeho poměrně složitého nelineárního modelu, identifikace jeho parametrů a sestavení linearizovaného modelu.

Práce je logicky členěna, jazyková úroveň je až na malé výjimky slušná. Disertant ovšem mohl věnovat větší pozornost grafickému vyhodnocování experimentů.

**Práci doporučuji k obhajobě.**

Ve Zlíně 24.7. 2010

  
prof. Ing. Petr Dostál, CSc.

Oponentský posudek doktorské disertační práce  
p. Ing. Pavla Škrabánka  
na téma

Prediktivní řízení vícerozměrné soustavy

Předložená disertační práce se zabývá návrhem prediktivního regulátoru pro řízení reálné, pneumaticko –hydraulické soustavy. Jedná se o nelineární systém, kde přibližný lineární popis by zaručeně nevedl k rozumným, realizovatelným výsledkům.

Práce je rozvržena do devíti kapitol. V prvních dvou kapitolách uvádí autor cíle práce, třetí kapitola obsahuje stručný přehled současného stavu v oblasti zkoumané problematiky, týkající se průmyslově realizovaných prediktivních regulátorů. Teoretická část je uvedena ve čtvrté kapitole, kde jsou popsány principy lineárního i nelineárního prediktivního řízení. Tato část je vzhledem k problematice velmi stručná a zasloužila by si podrobněji rozvést. V páté a šesté kapitole je popsán řízený proces jako nelineární model, jehož parametry vzhledem ke složitosti modelu jsou stanoveny experimentálně. V další, sedmé kapitole, je uveden linearizovaný model řízené soustavy, ze kterého vyplývá návrh prediktivního regulátoru (kap. osmá) založený na lineární aproximaci matematického modelu Taylorovým rozvojem v okolí „pracovního bodu“. Tato kapitola je velmi cenná, protože je dokladovaná i experimentálně. Závěr obsahuje zdůvodnění použitých principů a samozřejmě shrnutí výsledků. Z hlediska čitelnosti práce je velmi rozumné zařazení příloh, ve kterých jsou uvedeny vztahy pro výpočet koeficientů linearizovaného modelu, simulační schémata v prostředí SIMULINKU a výpočty funkcí v prostředí MATLABu.

Pro upřesnění některých nesrovnalostí uvádím následně několik poznámek:

Str. 33 rovnice (29) - podíl matic se nedefinuje.

Str. 44 rovnice (69) – jaký je význam symbolu 0 v rovnici  
pro reprezentaci zápisu podmínek ?

Str. 78<sup>1</sup> co je „poměrně velká“ relativní chyba ?

Str. 87<sub>2</sub> nastavení ventilu na hodnotě 0,2879 je nereálné.

Str. 88<sub>1</sub> z čeho vyplývá tvrzení, že dynamika lineárního modelu  
odpovídá vhodně i pro řízení původního nelineárního  
modelu.

Str.110 – 111

z čeho vyplývá „vhodnější nastavení parametrů regulátoru“?

Uvedené připomínky jsou spíše formálního charakteru a dle mého názoru nesnižují význam práce. Jedná se o řízení reálného objektu pomocí prediktivního řízení. Z toho vyplývá i aktuálnost tematiky, což může a doufám i bude zasahovat rovněž do pedagogického procesu. Autor svoji práci prokázal, že umí tvůrčím způsobem řešit technické problémy. Cíle dizertační práce byly splněny na velmi dobré úrovni a tudíž mohu konstatovat:

Disertační práci doporučuji k obhajobě.

V Praze 28. 8. 2010

  
Prof. Ing. Oskar Schmidt, CSc.

## Oponentský posudok dizertačnej práce

Názov: **Prediktivní řízení vícerozměrové soustavy**  
Autor: **Ing. Pavel Škrabánek**

### Charakteristika práce

Predložená dizertačná práca sa zaoberá návrhom prediktívnych regulátorov pre riadenie laboratórneho modelu mnohorozmerovej hydraulicko-pneumatickej sústavy. Po obsahovej stránke sú v práci po úvode v 2. kapitole sformulované ciele dizertačnej práce, ktorými sú vytvorenie spojitého nelineárneho modelu hydraulicko-pneumatickej sústavy a návrh a realizácia prediktívneho regulátora pre jej riadenie. V 3. kapitole je podaný veľmi stručný prehľad súčasného stavu skúmanej problematiky, kde autor síce podáva zaujímavý prehľad priemyselne realizovaných prediktívnych regulátorov, ale odvoláva sa len na 4 zdroje literatúry, z ktorých 2 sú jeho vlastné publikácie. 4. kapitola reprezentuje teoretickú časť práce. Sú v nej stručne a prehľadne opísané základné princípy lineárneho a nelineárneho prediktívneho riadenia, základné typy modelov procesov používaných v oboch typoch prediktívneho riadenia, základné typy obmedzení, ktoré možno zakomponovať do návrhu prediktívneho regulátora, a dve metódy riešenia úlohy kvadratického programovania. 5. kapitola opisuje riadenú hydraulicko-pneumatickú sústavu a 6. kapitola uvádza experimentálne výsledky práce, ktoré súvisia s identifikáciou neznámych parametrov riadenej sústavy. Hlavným výsledkom tejto časti práce je upravený a verifikovaný nelineárny model riadenej sústavy. 7. kapitola prezentuje získanie linearizovaného modelu riadenej sústavy. Najdôležitejšie experimentálne výsledky prezentuje 8. kapitola, ktorá opisuje návrh lineárneho a nelineárneho prediktívneho regulátora pre riadenie laboratórneho modelu hydraulicko-pneumatickej sústavy. Sú tu prezentované aj výsledky zamerané na porovnanie navrhnutých regulátorov, a to najskôr simulačné a potom aj experimentálne. V závere sú stručne zdôvodnené použité prístupy a zhrnuté hlavné získané výsledky. Práca má 3 prílohy. Prvá obsahuje vzťahy pre výpočet koeficientov linearizovaného modelu, druhá obsahuje používané simulačné schémy vytvorené v prostredí Simulink a tretia príloha obsahuje výpisy siedmich funkcií vytvorených v prostredí MATLAB.

Práca, ktorá má 118 strán a 3 prílohy, je po formálnej stránke členená do abstraktu v českom a anglickom jazyku, zoznamov skratiek, značiek, použitých symbolov, ilustrácií a tabuliek, 10 kapitol vrátane úvodu a záveru, zoznamu literatúry, ktorý zahŕňa celkovo 16 publikácií iných autorov a 8 publikácií autora súvisiacich s riešenou problematikou.

Členenie práce je logické a umožňuje dobre sa orientovať v skúmanej problematike. Text a tabuľky sú po formálnej stránke spracované na dobrej úrovni, v texte sa vyskytuje málo preklepov. Obrázky sú minimalizované, čo zhoršuje ich prehľadnosť.

### Aktuálnosť zvolenej témy

Téma predkladanej dizertačnej práce zameraná na návrh prediktívnych regulátorov pre mnohorozmernú sústavu je aktuálna a atraktívna vzhľadom na možnosti praktického uplatnenia prediktívnych regulátorov.

### Splnenie cieľov práce a metódy zvolené na ich plnenie

Vytýčené ciele dizertačnej práce uvedené v 2. kapitole boli splnené. Zvolené metódy spracovania sú v súlade s najnovšími poznatkami v uvedenej oblasti výskumu a dosiahnuté výsledky potvrdzujú správnosť zvoleného prístupu.

### Prínos dizertačnej práce

Prínosy dizertačnej práce sú najmä v experimentálnej časti práce a spočívajú v dotvorení detailného nelineárneho matematického modelu laboratórnej hydraulicko-pneumatickej sústavy a v návrhu a realizácii lineárneho a nelineárneho prediktívneho regulátora pre riadenie tejto sústavy.

### Publikačná činnosť doktoranda

Z publikácií autora súvisiacich s riešenou problematikou vyplýva, že Ing. Škrabánek je autorom 7 príspevkov na medzinárodných konferenciách v ČR a SR.

### Pripomienky a otázky k práci

K práci mám okrem už uvedenej analýzy niekoľko konkrétnych pripomienok a otázok.

- Str. 32<sup>12</sup> – uvedené vysvetlenie pojmu impulz je nezrozumiteľné.
- Str. 33, r. (29) – pre mnohorozmerné systémy by bolo matematicky korektné zapísať rovnosť pomocou inverznej matice namiesto podielu matíc.
- Str. 36<sub>6</sub> a r. (46) – aké funkcie sa dajú použiť v úlohe základných funkcií  $B_i$ ?
- Str. 44 r. (69) – vysvetlite význam symbolu  $\mathbf{0}$  ( $\mathbf{0}^T$ ) v rovnici, ktorá reprezentuje zápis podmienok monotónneho chovania.
- Str. 56 obr. 3 –  $u_{Xmax}$  je koniec pracovnej oblasti.
- Str. 57<sup>9</sup> – Aké zjednodušujúce predpoklady boli použité pri odvodení matematického modelu procesu? Bolo by vhodné uviesť ich v práci.
- Str. 78<sup>1-2</sup> – pojem „pomerně velká“ relatívna chyba niektorých stavových veličín nie je dostatočne konkrétny.
- Str. 87<sub>2-3</sub> – je možné v praxi nastaviť otvorenie ventilu presne na hodnotu 0,2879 (alebo 0,1579 alebo ďalšie uvedené hodnoty)?
- Str. 88<sub>1-3</sub> – ako konkrétne bolo posúdené, že dynamika linearizovaného modelu odpovedá pre potreby riadenia dostatočne dynamike modelu pôvodného?
- Str. 110<sup>2-3</sup> – ako autor dospel k názoru, že chovanie oboch regulátorov úplne neodpovedalo použitému kritériu?
- Str. 110<sub>1-2</sub> – podľa hodnoty kritéria kvality je NMPC regulátor navrhnutý pre váhové matice (281) – (283) horší ako predošlý NMPC regulátor. Prečo sa teda konštatuje, že tento regulátor odpovedá použitej účelovej funkcii, keď ten lepší neodpovedal, a prečo sa v opise obrázka 21 konštatuje, že ide o vhodnejšie nastavenie?
- Str. 109, 111 – chýba podrobnejší slovný komentár ohľadom porovnania NMPC regulátorov.
- Str. 112, 113 – ako boli zvolené matice váhových koeficientov v účelovej funkcii pre výpočet prediktívnych regulátorov pre riadenie reálneho procesu? Mali rovnaké hodnoty ako pri simulačných experimentoch?

### Záverečné konštatovanie

Autor preukázal svojou prácou spôsobilosť tvorivo vedecky pracovať. Predložená dizertačná práca spĺňa požiadavky kladené na práce tohto druhu. Ciele dizertačnej práce považujem za splnené. Dizertačnú prácu odporúčam na obhajobu.

V Bratislave 2.8.2010

