

Oponentský posudek disertační práce Ing. Jana Mareše

## „Nelineární model tepelné soustavy a GPC regulátor“

### *1. Charakteristika práce*

Disertační práce Ing. Jana Mareše se věnuje problematice prediktivního řízení s modelem v aplikaci na řízení konkrétního technologického procesu, kterým je reaktorová pec pro měření vlastností katalyzátorů při různých teplotách. Jde o nelineární systém, k jehož řízení je nutné používat pokročilé metody řízení. Jednou takovou metodou je i metoda prediktivního řízení s modelem.

Disertace je vhodně strukturována do šesti kapitol. Po úvodní obecné kapitole je popsána reaktorová pec a požadavky na její řízení. Z nich se pak ve 3. kapitole vychází při formulaci explicitních cílů práce. V navazující teoretické části práce se autor věnuje obecně metodám získání modelu systému a podrobně zobecněné metodě prediktivního řízení s modelem (Generalized Predictive Control), kterou autor dále v práci aplikuje. V experimentální části (kapitola 5) je popsáno postupné řešení daného problému od realizace řídicího systému pece technickými prostředky firmy National Instruments přes sestavení nelineárního modelu pece pomocí matematicko-fyzikální analýzy a určení jeho parametrů z dat měřených na soustavě, až po návrh prediktivního regulátoru pracujícího s po částech linearizovaným modelem a po jeho simulační ověření v různých konfiguracích. Závěrečná 6. kapitola pak shrnuje dosažené výsledky.

Seznam literatury obsahuje 31 číslovaných položek aktivně v práci citovaných. Téměř polovina citací jsou odkazy na knižní monografie z oboru řízení, není však uveden žádný odkaz na současný stav aplikací prediktivního řízení pecí. Publikovaných prací autora je v seznamu uvedeno 8. Dosažené výsledky byly prezentovány vesměs na mezinárodních konferencích v Čechách a na Slovensku, jeden článek je v tisku.

### *2. Aktuálnost a cíle disertační práce*

Zvolené téma disertační práce je aktuální z výzkumného i praktického hlediska. Metody prediktivního řízení s modelem se stále více uplatňují v realizacích řídicích systémů, zejména nelineárních a vícerozměrných.

Cíle práce jsou uvedeny ve 3. kapitole na stranách 17 a 18. Jde o dílčí úlohy nutné pro realizaci řídicího systému reaktorové pícky, využívajícího zvolené metody prediktivního řízení s po částech linearizovaným modelem. Formulace cílů je přiměřená, splnění cílů je snadno kontrolovatelné. Po prostudování práce lze konstatovat, že cíl práce a jeho jednotlivé podcíle byly splněny.

### **3. Zvolené metody zpracování**

V teoretické části práce se autor zaměřil na metody, které jsou později uplatněny při řešení problému, jde o metodu zobecněného prediktivního řízení a o různé metody získání predikčního modelu.

Jádro vlastní disertace představuje realizace řídicího systému reaktorové pece v 5. kapitole, kde jsou postupně detailně popsány jednotlivé kroky řešení. Vzhledem k charakteristice systému, který je nelineární, jsou zvolené metody určení jeho matematického modelu a řídicího algoritmu vhodné. To dokumentují i v práci uvedené simulační výsledky a srovnání s regulací pece klasickým PID regulátorem. Je škoda, že autor zůstal jen u simulačního ověření, i když v rámci práce vytvořil řídicí systém a s jeho pomocí provedl několik měření na reálné píce při určení parametrů modelu, jak uvádí v kapitole 5.4.2.

### **4. Hlavní dosažené výsledky a přínosy práce**

Za hlavní dosažené výsledky lze považovat:

- Vytvoření nelineárního modelu reaktorové pece matematicko-fyzikální analýzou a určení jeho parametrů pomocí experimentálně naměřených dat na soustavě.
- Rozpracování a simulační ověření konkrétního pokročilého způsobu řízení nelineárního systému – reaktorové pece metodou zobecněného prediktivního řízení pracující s jejím po částech linearizovaným modelem.
- Realizaci řídicího systému reaktorové pece jak po technické tak programové stránce, který s navrženou a implementovanou metodou GPC dosahuje požadovaných parametrů regulace jinak nedosažitelných.

Přínosem práce je bezpochyby původní aplikace jedné z metod pokročilého řízení na řízení konkrétního nelineárního technologického procesu.

### **5. Poznámky k obsahu práce**

- Úvodní kapitola práce obsahuje jen elementární pojmy z oblasti řízení a je tedy v tomto pojetí zbytečná. Mohla by být věnována například rozlišení jednotlivých metod prediktivního řízení a zdůvodnění proč byla pro další práci vybrána právě zobecněná metoda.
- Postrádám rešerši na téma práce, tj. aplikace metod prediktivního řízení v chemii či konkrétněji přímo pro řízení pecí.
- V práci citelně schází seznam symbolů, zejména když se jedno označení používá s různými významy (např.  $e$  na str. 11 a na str. 26), nebo stejná veličina má různá označení (např.  $E$  a  $u$ ).
- Vybraný způsob řešení je uveden bez zdůvodnění na str. 16 ještě před specifikací cílů práce.

- Práce je napsána srozumitelně s minimem nepodstatných nepřesností, jen pozor např. na definici pozitivně semidefinitních matic a kladného  $\lambda$  na str. 24 a na jednotky u S na str. 36.
- Závěrečné porovnání kvality regulačních pochodů jednotlivých regulátorů podle kritérií lineární a kvadratické regulační plochy porovnává regulátory jen mezi sebou, nevypovídá však dostatečně o jejich absolutní vhodnosti pro daný účel řízení reaktorové pece.


#### 6. Dotazy

- Jak rychlý je požadovaný lineární nárůst teploty pece na 800 °C? Je to implicitně uvažovaný 1 °C za sekundu, nebo to může být i jinak? Dotaz souvisí s tím, že všechny simulace řízení pece byly provedeny jen pro jeden průběh žádané teploty.
- Jak rychlá je (jakou časovou konstantu má) reakce katalyzátoru s vodíkem v reaktoru pece? Jde o řádovou odlišnost vzhledem k dynamice ohřevu pece?
- Jaké statistické vlastnosti měl náhodný signál příkonu použitý pro vybuzení soustavy? Jak se na nich projevila i náhodnost délky konstantního příkonu? Podle jakých pravidel byly měněny konstanty PI regulátoru během experimentu?
- Proč nebyl model verifikován pro úplně jiný vstupní signál, než pro ty použité při identifikaci parametrů?
- Který nebo které způsoby řízení reaktorové pece zkoumané v práci se nakonec ukázaly jako vhodné z hlediska požadavků na její řízení?

#### 7. Závěr

Ing. Mareš svou prací jednoznačně prokázal, že disponuje potřebnými teoretickými vědomostmi i praktickými zkušenostmi k úspěšnému tvůrčímu a systémovému řešení rozsáhlého syntetického úkolu obsahujícího jak ryze výzkumnou tak experimentální a implementační část. Tím splnil podmínky Zákona o vysokých školách č. 111/98 Sb, § 47, odst. 4. pro doktorské disertační práce, a proto i přes uvedené dílčí výhrady **předloženou práci doporučuji k obhajobě.**

V Praze 7.6.2010

  
prof. Ing. Jan Náhlík, CSc.

doc. Ing. Josef J a n e č e k , CSc.  
Technická univerzita v Liberci, FM, MTI  
Studentská 2  
461 17 Liberec 1

OPONENTSKÝ POSUDEK DISERTAČNÍ PRÁCE  
Ing. Jana M A R E Š E

**Nelineární model tepelné soustavy a GPC regulátoru**

Oponentský posudek je vypracován na základě dopisu předsedy komise pro obhajobu disertační práce ve studijním programu P2807 Univerzity Pardubice prof. Ing. Ivana Taufera, DrSc., ze dne 19.4.2010.

Disertační práce Ing. Jana Mareše obsahuje 79 stran textu, obrázků a příloh. V seznamu literatury je uvedeno 31 citovaných literárních odkazů a 8 publikací (z toho 4 dosud pouze v tisku), ve kterých je disertant spoluautorem. Práce vznikla na Katedře řízení procesů Fakulty elektrotechniky a informatiky Univerzity Pardubice pod vedením doc. Ing. Františka Duška, CSc. Práce je napsaná v jazyce českém.

Předložená disertační práce se zabývá problematikou řízení elektrické vyhřívací pece chemického reaktoru. Dynamika tohoto systému je popsána soustavou nelineárních diferenciálních rovnic. Je uveden způsob iterační identifikace jeho neznámých parametrů a metodika lineární aproximace relativně složité dynamiky. Pro řízení procesu je uvažován diskrétní prediktivní regulátor v režimu „gain scheduling“ s programovým přepínáním sady jeho parametrů podle momentální teploty reaktoru. Klasický návrh regulátoru je odvozen od linearizace nelineárního systému alternativně ve třech resp. pěti pracovních bodech a v každém regulačním kroku upřesňován podle aktuální teploty reaktoru interpolací ze dvou sousedních lineárních odhadů. Chování regulačního obvodu a jeho funkčnost byla ověřena v simulačním prostředí Matlab-Simulink.

Svým způsobem unikátní řešení má širší aplikační záběr do různých technických oborů. **Pokládám proto téma disertace za dobře vybrané a aktuální.**

Disertant si stanovil ve své práci pět hlavních cílů :

- Analyzovat reálnou soustavu a sestavit její matematický model
- Vytvořit programové vybavení pro řídicí jednotku CompactRIO pro ovládání a měření dat na regulované soustavě
- Navrhnout metodiku a realizovat experimentální identifikaci parametrů modelu
- Navrhnout adaptivní prediktivní regulaci s přepínáním parametrů podle aktuálního pracovního bodu
- Simulační ověření a vyhodnocení návrhu

Z předložených výsledků práce vyplývá, že **stanovené cíle byly v plném rozsahu splněny.**

Rozbor současného stavu řešené problematiky je uveden pouze zevrubně, v teoretické části je řada chyb a nepřesností. Nicméně je zřejmé, že netriviální problematiku řízení dynamických systémů i tepelných procesů musel disertant pečlivě prostudovat a zvládnout. Kvalita textu a jeho srozumitelnost je v experimentální části práce výrazně lepší.

Celková úroveň práce a uvedených výsledků podle mého názoru dostatečně naplňují kritéria a požadavky na kvalitní disertační práci. Aplikace teoretických přístupů dovedená až do experimentálního výstupu představuje **nesporný teoretický i praktický přínos**.

K práci nemám žádné podstatné věcné připomínky. Její kvalitě by jistě prospěla větší pečlivost a ediční důslednost autora při psaní textu. Při čtení jsem se nemohl ubránit dojmu, že je práce sestavena ve chvatu a poněkud „horkou jehlou“. V zásadě bych proti tomu nic nenamítal, pokud by se autor vyvaroval řady formálních a edičních chyb a množství gramatických a stylizačních prohřešků, kterým bylo možno zabránit snadno pouhým pečlivým pročtením finálního textu. Tyto mé výtky míří pouze do formálního zpracování práce, nikoliv do jejího obsahu, o jehož kvalitě jsem přesvědčen.

**Poznámky, náměty k diskuzi** (pořadí neodpovídá závažnosti, vznikaly chronologicky v průběhu čtení práce)

str.10, ř.14]

Překlep  $m \setminus n$  ... (podobné formální chyby a překlapy jsou časté v celém textu).

str.13, ř.2]

„... kritérium ...“ (i jinde v celém textu).

str.17, ř.16-21] Cíle práce, bod c) , podobně i dále na str.21

„Pro potřeby řízení ... budeme pracovat při vlastní regulaci.“ Tvrzení nerozumím, prosím vysvětlit.

str.24, ř.8]

„... matice  $\mathbf{R}$  a  $\mathbf{Q}$  pozitivně semidefinitní ...“. Váhové matice kvadratických forem volíme pozitivně definitní, v případě pozitivně semidefinitních matic by docházelo k problémům s nejednoznačností optimalizace.

str.24, ř.7,6] a jinde

„... vnucená resp. volná odezva ...“. Lépe označovat v matematice obvyklým „partikulárním“ resp. „homogenním“ řešením.

str.25, ř.4]

„... ,  $\mathbf{z} \rightarrow \mathbf{y}$  je budoucí výstup ...“. (zřejmě ediční chyba)

str.25, vztah mezi (10) a (11) / neoznačeno ! /

$J(\mathbf{u}) = (\mathbf{w}^T \mathbf{u}^T \mathbf{G}^T - \mathbf{h}^T \mathbf{F}^T)(*) + \dots$  v dalších úpravách již OK.

str.25, ř.3]

„ ... za předpokladu, že matice  $\mathbf{H}$  je symetrická ... “. Matice  $\mathbf{H}$  je vždy symetrická svým zavedením podle (11), chybí spíše předpoklad regularity  $\mathbf{H}$ , ale ten je pro  $\lambda \neq 0$  splněn také. V opačném případě by úprava na úplný čtverec podle (12) nebyla možná. Rušivě působí změna symbolu  $\mathbf{j} \rightarrow \mathbf{J}$  (zřejmě ediční chyba). Ve vztahu (12) chybí transpozice.

str.25, ř.4]

„ ... vektor  $\mathbf{K}$  je první řádek matice ... “. Vektorem se obvykle rozumí sloupcová matice.

str.27, ř.6]

„ Výraz  $\frac{1}{A}$  lze převést na rovnici (20), kde se jedná ... “. Nechápu, prosím vysvětlit.  $\frac{1}{A} = E_j + z^{-j} F_j \frac{1}{A}$ ,  $A, E_j, F_j$  ... polynomy

Výkladu kapitoly 4.3.4 nerozumím, zřejmě lze podrobnější popis nalézt v uvedeném odkazu na lit. [8], predikci dynamického systému ve tvaru podle (25) však přirozeně vyjádřit lze.

str.29, vztah (26)

Chyba v indexu veličiny  $u$  resp.  $y$  u koeficientu  $b_{n+1}$  resp.  $a_{m+1}$  pro  $y(k+N)$ , má být  $k+N-n-1$  resp.  $k+N-m-1$ .

Nesouhlasí znaménka koeficientů  $a_i$  v rovnici (26) a maticích  $\mathbf{A}, \tilde{\mathbf{A}}$  ve vztahu (27).

str.32, vztah (34)

Překlep:  $\Delta y(k) \rightarrow \Delta y(k)$

Formální poznámka:

Zpětnou diferenci značit raději operátorem „nabla“  $y(k) - y(k-1) = \nabla y(k)$  (zcela běžné v čistě matematických publikacích). Laplaceovým operátorem se naopak označuje diference dopředná  $y(k+1) - y(k) = \Delta y(k)$ .

str.33, vztah (36)

Pro v této práci uvažované pouze SISO systémy nejsou v maticích  $\mathbf{M}, \mathbf{N}, \mathbf{Q}$  uvedené submatice  $\mathbf{I}$  resp.  $\mathbf{0}$  matice jednotkové resp. nulová matice, ale prosté skalární jedničky resp. nula.

str.37, ř.8,7] (i jinde v textu)

Fyzikální rozměr příslušné veličiny je obvyklé uvádět v hranatých závorkách.

str.46, Obrázky 14, 15

- Termín „vybuzující signál“ je vhodné nahradit obvyklým „akční veličina“ (i jinde v textu).
- Jsou měřítka svislé osy v Obrázku 14 pro oba průběhy shodná?
- Co se rozumí „vektorem“ žádané hodnoty?
- V předloženém textu nejsou rozlišeny průběhy jako „tmavá“ / „světlá“ křivka, ale jako „modrá“ / „červená“. V obrázku není jinak rozlišeno, lze usuzovat pouze z charakteru PID regulátoru.

str.50, ř.4]

Popsanému identifikačnímu experimentu simplexovou metodou (fminsearch) příliš nerozumím. Každý iterační krok trval 7000 resp. 9000 sec. (ca 2 hod.) ? Kolik bylo provedeno iteračních kroků ? Jak bylo definováno optimum účelové funkce ? Byl iterační experiment ukončen po proběhnutí nastaveného maximálního počtu kroků nebo při splnění kritériální podmínky ? Byla hodnota kritéria, podle kterého byla posuzována kvalita identifikace, určena se stejným kritériálním horizontem ? Byly všechny iterace ukončeny po stejném počtu kroků ? Nemusela se ošetřit stabilita iterace při nepřesném počátečním odhadu sady koeficientů ? Jaké jsou praktické zkušenosti s aplikací této experimentálně – simulační metody ? Tak zásadní část Vaší disertace by se velmi slušelo lépe popsat a podrobněji vysvětlit.

str.51, Tabulka 1

Jak si vysvětlujete (někde téměř řádově) velké rozdíly mezi některými identifikovanými koeficienty v různých pokusech ? Např.  $S_I$ ,  $P_D$ ,  $\alpha_{BC}$ ,  $\alpha_{CD}$ . Pokládáte identifikaci za důvěryhodnou ?

str.61, Obrázek 26

Postrádám legendu popisu pěti v obrázku uvedených průběhů.

str.64, kap. 5.6.3

- V kapitole je popsán návrh spojitého PID regulátoru. Jak jste přešel na diskrétní verzi ?
- Je použita velmi jednoduchá metodika, která vede k přijatelné kvalitě regulačního pochodu jen díky dlouhým časovým konstantám regulované soustavy bez vlastních frekvencí. Neověřoval jste i sofistikovanější metody ?

str.71, 72

Uvedené průběhy s „konstantním“ modelem – v jakém pracovním bodu byl linearizován ?

Poznámky obecného charakteru :

- Práce takového významu, jakou disertační práce rozhodně je, by si podle mého soudu zasloužila větší autorskou preciznost a ediční pečlivost.
- Ne příliš rozsáhlá publikační činnost autora na víceméně domácích konferencích je kumulována prakticky pouze do roku 2009. Pokud se nepletu, tak jsem příspěvek na téma řízení temperovací pece zaregistroval již v roce 1997 na konferenci v Tatranských Matliarech. Byla práce na této problematice přerušena ?

### Náměty k diskuzi :

- Práce na realizaci řídicího systému reaktorové pece byla zřejmě týmová. Můžete krátce specifikovat svůj podíl na této práci ?
- Byl matematický popis reaktorové pece popsán v kap.5.1 kompletně prací disertanta ?
- Návrh regulačního obvodu v simulačním prostředí je vždy jen „prvním nástřelem“ skutečné realizace. Proč nebyla navržená regulace ověřena na reálné peci ? Reálná aplikace by bezesporu posunula úroveň práce kvalitativně výš.

### **Přednosti předložené práce a disertanta**

- ◆ dobře volené aktuální téma
- ◆ technická práce na dobré odborné úrovni
- ◆ zvládnutí netriviální problematiky
- ◆ praktický výstup práce dovedený až do simulačního ověření

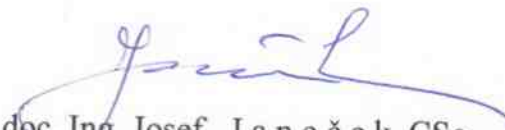
Konstatuji, že žádná z mých připomínek není zásadního charakteru a významně nesnižuje kvalitu disertační práce.

### **Závěrečné hodnocení**

Souhrnně konstatuji, že Ing. Jan Mareš ve své disertaci splnil cíle, které si stanovil. Vhodně zvolené použité metody dovedené až do realizačního závěru prokazují jeho schopnost tvůrčím způsobem aplikovat teoretický aparát na praktické problémy. Po pečlivém prostudování jeho práce jsem dospěl k názoru, že splňuje náročné požadavky kladené na disertační práci a proto ji

**doporučuji k obhajobě.**

V Liberci dne 17.6.2010

  
doc. Ing. Josef Janeček, CSc.



## Posudek oponenta disertační práce

Název práce: **Nelineární model tepelné soustavy a GPC regulátor**

Autor: **Ing. Jan Mareš**

Oponent: **doc. Ing. Jaromír Kukal, Ph.D.**

Předkládaná práce si klade za cíl ukázat reálné možnosti prediktivního řízení v podobě regulátoru typu GPC při řízení nelineárních systémů. Metodika je demonstrována na modelu tepelné soustavy, který je zkomplikován přenosem tepla sáláním. Výběr tématu považuji za aktuální, neboť právě kombinace sofistikovaných metod diskrétního řízení a nelineárního modelu s uvedenou nelinearitou není jednoduchou záležitostí.

První tři kapitoly nás seznamují se základními pojmy, stávajícím stavem zařízení, požadavky na řízení a cíli práce. Zde oceňuji stručnost a srozumitelnost textu, který vhodným způsobem uvádí do řešené problematiky.

Následující čtvrtá kapitola obsahuje teoretickou část práce jako pojednání o matematickém modelování, identifikaci dynamických systémů a prediktivním řízení. Jejím těžištěm je popis konkrétní predikční metody GPC (General Predictive Control). Autor zde především prokázal, že umí pracovat s odbornou literaturou, lineární algebrou a typografií matematického textu. Výklad obecných partií je srozumitelný a jasný.

Pokud lze práci něco vytknout, tak pouze dílčí typografickou nedůslednost. Např. schémata by měla být exportována ve vektorovém formátu včetně proměnných kurzivou. Dále by naopak symbol diferenciálu nebo zkratky v indexech neměly být kurzivou. Zlovykem je rovněž používání desetinné tečky a počítačově orientovaného exponenciálního tvaru. Konečně matice a vektory je běžné psát bez patek. Uvedené nedostatky mírně narušují celkový dojem z práce, ale nevedou k víceznačnosti výkladu.

Za praktickou část práce lze považovat pátou kapitolu, která začíná sestavením příslušného nelineárního modelu ve tvaru soustavy čtyř obyčejných diferenciálních rovnic. K modelování jednotlivých subsystémů byl využit program MATLAB Simulink a možnost realizace blokových struktur. Paralelně k simulačním výpočtům bylo prováděno měření i řízení reaktorové pece s využitím programovatelné řídicí jednotky CompactRIO doplněné o hardware umožňující ovládání příkonu topení pece pomocí šířkové modulace. Následně byly jak reálná soustava, tak její model, podrobeny sérii experimentů, jejímž cílem bylo připravit prostor pro následnou identifikaci parametrů soustavy. Celkem bylo hledáno 15 neznámých parametrů s využitím dat ze čtyř nezávislých pokusů. Počáteční hodnoty parametrů byly

získány chemicko-inženýrským odhadem. Přitom bylo využito spojení matlabovské funkce `fmincon` a modelu v Simulinku, což se autorovi osvědčilo. Tabulka na str. 51 obsahuje velmi cenné realistické výsledky identifikace. Vhodnější by však bylo uvažovat sloupce: veličina, jednotka, pokus č. 1 – 4, statistické charakteristiky (průměr, směr. odch. ...). Velmi oceňuji, že se autor zabýval křížovou verifikací modelu a vizualizací rozdílů v chování modelu a reálného systému. Dále zde provádí linearizaci právě identifikovaného modelu v různých ustálených stavech, která hledá řešením soustavy nelineárních rovnic metodou prosté iterace. Na linearizovaný model pak navazuje standardní návrh regulátoru typu GPC a konkurenčního PID navrženého metodou T-sum. V poslední části práce autor provádí simulační výpočty zahrnující různý počet pracovních bodů linearizace a různé strategie řízení. Jako kritéria kvality jsou uvažovány lineární a kvadratická regulační plocha. Nejlepších výsledků bylo dosaženo integračním GPC s pětibodovou linearizací. Nejhorší výsledky poskytuje konstantní, tedy jednobodová linearizace v kombinaci s PID regulátorem nebo neintegračním GPC. V tabulce na str. 75 podle mého názoru chybí ještě některé kombinace např. pětibodová linearizace s pěti PID nastavenými metodou T-sum. Bez těchto informací vzniká pouze dojem, že čím více vhodně rozmístěných pracovních bodů, tím lépe pro GPC s integrací, zatímco bez ní je to vždy horší. Při jednobodové linearizaci je PID (tj. klasika s integrací) určitým kompromisem mezi GPC s integrací a bez ní. Je rovněž zajímavé, že při výběru nejlepšího nastavení nezáleží na volbě kritéria kvality regulačního pochodu.

Původnost práce vidím ve zdařilé kombinaci modelu sálání, jeho identifikace, vícebodové linearizaci a v elegantním využití regulátoru GPC s integrací. V rámci obhajoby navrhuji diskutovat o následujících tématech:

- vliv linearizace na stabilitu a kvalitu regulačního pochodu
- vliv přepínání mezi linearizovanými modely a příslušnými regulátory na stabilitu a kvalitu regulačního pochodu
- rozdíly mezi hodnotami parametrů modelu z různých pokusů

Závěrem konstatuji, že práce splnila zadání, má dostatečnou rešeršní a teoretickou část, je realizována ve velmi názorné formě, vhodně doplněné matematickým popisem, a grafickými vyobrazeními. Publikační činnost autora ve vztahu k tématu práce je dostatečná.

Práci považuji přínosnou a doporučuji ji k obhajobě. Po obhájení doporučuji udělit titul Ph.D.

V Praze dne 3. 6. 2010

doc. Ing. Jaromír Kukul, Ph.D.

