

## Oponentský posudok dizertačnej práce

Meno doktoranda: *Ing. Tomáš Barot*

Názov dizertačnej práce: **Prediktivní řízení procesů  
s rychlou dynamikou**

Predložená dizertačná práca v rozsahu 140 strán textu, obrázkov a príloh sa venuje prediktívnemu riadeniu procesov s rýchlou dynamikou vyžadujúcich si veľmi krátke periódy vzorkovania. Ide v súčasnosti o veľmi aktuálnu problematiku, ktorá je už dlhšie vo svete predmetom veľmi intenzívneho výskumu a štúdia, či už ide o výkonné optimalizačné postupy zamerané na použitie v reálnom čase, alebo o rôzne výpočtovo efektívnejšie formulácie vlastnej úlohy prediktívneho riadenia určené či už pre lineárne, alebo nelineárne aplikácie. Práca sa snaží v tomto smere zmapovať súčasný stav a priniesť niektoré nové riešenia vhodné pre zníženie výpočtovej zložitosti v úlohe kvadratického programovania, najčastejšie uvažovanej pri prediktívnom riadení s obmedzeniami, pri súčasnej aplikácii vstupno-výstupnej reprezentácie dynamiky procesu. Z pohľadu súčasných vývojových trendov v oblasti prediktívneho riadenia ide dnes už o tradičnú formuláciu úlohy. Prezentované návrhy riešení a dosiahnuté výsledky sú v práci ilustrované a overované simulačne, na vybraných testovacích príkladoch jednorozmerných (SISO) i dvojrozmerných (TITO) procesoch s rýchlou dynamikou.

Predložená práca pozostáva z ôsmich kapitol a svojou štruktúrou je rozdelená na teoretickú (kap. 2 až 5) a experimentálnu časť (kap. 6). Prvá časť práce sa venuje prehľadu súčasného stavu v riešenej problematike a zavedeniu nevyhnutných pojmov a formulácii, tvoriacich matematické základy, z ktorých vychádzajú v práci navrhované riešenia. V tejto časti práce v druhej kapitole dizertantom predložené hodnotenie súčasného stavu je však veľmi obmedzené a stručné, čím dosť nepriemerane vystihuje dnes používané metódy a prístupy pri riešení úloh prediktívneho riadenia veľmi rýchlych dynamických systémov. Dizertand tu čerpá väčšinou zo starších literárnych odkazov z oblasti teórie optimalizácie a sústreďuje sa na vstupno-výstupné reprezentácie. Len okrajovo venuje pozornosť novším stavovým prístupom a explicitným riešeniam optimalizačných úloh v prediktívnom riadení. Štvrtá kapitola formuluje dizertantom postupne vysvetľované prístupy použité pri predkladaných riešeniach a ich navrhované modifikácie. Piata kapitola predkladá hlavné analytické výsledky práce, z ktorých významným prínosom práce je dôkaz javu výskytu voľného extrémum v riešení neklasickú úlohu na viazaný extrém a jeho využitie v prediktívnom riadení. Trochu nezvyklo v tejto kapitole niektoré teoretické poznatky (rozbor analytického riešenia kvadratického programovania) objasňuje

numericke štúdiu na experimentálne zvolenom praktickom príklade. Druhá - experimentálna časť práce, kap. 6, je potom venovaná verifikácii navrhnutých optimalizačných metód na vybraných simulačných príkladoch rýchlych SISO a TITO diskretných lineárnych systémoch. Dizertand tu opisuje metodiku použitú na stanovenie výpočtovej náročnosti výsledných algoritmov a pre posudzovanie kvality riadenia, podrobne a systematicky analyzuje výpočtovú náročnosť navrhovaných riešení. Prezentované výstupy vo forme tabuliek tu deklarujú dosiahnuté prínosy pri znižovaní výpočtovej náročnosti, schopnosť dodržať stanovenú periódu vzorkovania a udržať požadovanú kvalitu riadenia.

### Aktuálnosť zvolenej témy

Zvolená téma je v oblasti prediktívneho riadenia procesov s rýchlou dynamikou nepochybne veľmi aktuálna. Spadá do súčasného prúdu mnohých vedeckých i odborných pojednaní usilujúcich sa význame priblížiť technickej praxi vyspelé algoritmy prediktívneho riadenia a umožniť ich ekonomicky efektívnu aplikáciu i na triede procesov s veľmi rýchlou dynamikou a s veľmi krátkymi periódami vzorkovania. Z tohto hľadiska je téma práce nepochybne prínosom a svojimi pôvodnými výsledkami prispieva k hľadaniu nových účinných riešení v tejto oblasti.

### Splnenie cieľov dizertačnej práce

Ciele a zámery dizertačnej práce sú podrobne a jasne stanovené v tretej kapitole dizertačnej práce. Ich spoločným znakom je overiť či v práci navrhované postupy pri riešení úlohy prediktívneho riadenia skutočne znižujú výpočtovú náročnosť riadiaceho algoritmu, meranú počtom aritmeticko-logických operácií predložených algoritmov a časom ich trvania, a sú účinne pri zachovaní kvality riadenia v rámci danej periódy vzorkovania. Možno jednoznačne konštatovať, že postavené ciele a zámery práce boli dizertantom v postačujúcej miere naplnené a v potrebnom rozsahu na zvolených testovacích príkladoch SISO a TITO procesoch aj simulačne overené.

### Zvolené metódy spracovania

Pri plnení stanovených cieľov práce si dizertand vybral dnes už klasické postupy a metódy v oblasti riešenia optimalizačných úloh využívajúce niektoré prednosti duálnej formulácie pôvodného primárneho problému, s dôrazom na úpravy zvyšujúce rýchlosť riešenia, znižujúce výpočtovú náročnosť a urýchľujúce konvergenciu v reálnom čase. Použité prístupy zodpovedajú zámerom a postaveným cieľom práce a je možné ich považovať za primerané a postačujúce.

### Výsledky dizertačnej práce a prínosy pre ďalší rozvoj vedy a techniky

Výsledkom práce je návrh a overenie pôvodného riešenia ako redukovať počet operácií v algoritmoch prediktívneho riadenia rýchlych procesov pri ich vstupno-výstupnej reprezentácii tak, aby sa daný algoritmus dal realizovať v rámci deklarovanej periódy vzorkovania i v takých prípadoch keď doterajšie metódy to nedokážu. K tomu sa v práci najviac využíva metóda eliminácie obmedzení a myšlienka pre-

vodu východiskovej neklasickéj úlohy na viazaný extrém na úlohu s menším počtom obmedzení. Konkrétne prínosy práce možno formulovať nasledovne:

- návrh pôvodného postupu pre elimináciu obmedzení v úlohe kvadratického programovania prediktívneho riadenia na báze duálnej formulácie úlohy a návrh pôvodnej techniky korekcie vzniknutých medzivýsledkov vedúcej k správne- nemu riešeniu úlohy pri prijateľnom zhoršení kvality riadenia v deklarovanej perióde vzorkovania,
- návrh algoritmu pre analytické riešenia úlohy kvadratického programovania a jeho využitie pri prevode neklasickéj úlohy na viazaný extrém na úlohu voľného extrému,
- návrh a realizácia softvérového prostredia pre komplexnú verifikáciu a analýzu výpočtovej náročnosti navrhnutých prístupov a pre simulačné testovanie diskretných MPC zadaných vo vstupno-výstupnej reprezentácii pre SISO i TITO systémy.

#### Poznámky, pripomienky a otázky k práci

Práca po formálnej a grafickej stránke je spracovaná na dobrej úrovni. Vyznačuje sa jasným a logickým výkladom, občas sa vyskytujúce formálne chyby a omyly neznižujú vcelku jej dobrú čitateľnosť. K práci mám nasledujúce pripomienky, resp. otázky:

- strana 21, vysvetlite odvodenie vzťahov (4.40) a (4.41) duálnej úlohy kvadratického programovania a kedy v úlohe prediktívneho riadenia výrazne ubudne počet obmedzujúcich podmienok?
- aký majú tvar predikčné rovnice na stranách 29 a 34 pre prípad, že  $N_1 > 1$ ?
- v celej práci (pozri formulácie použitých účelových funkcií riadenia na stranách 31, 36 a 38) nie je uvažovaný vplyv faktorov nutných pre garanciu stability prediktívneho riadenia v uzatvorenej slučke na možnú výpočtovú zložitosť posudzovaných algoritmov, ako posudzujete zabezpečenie garancie stability z pohľadu znižovania výpočtovej náročnosti algoritmov pri riešení problému MPC?

Výsledky prezentované v predloženej doktorandskej dizertačnej práci Ing. Tomáša Barota, ako i rozsah a kvalita jeho publikačnej činnosti, potvrdzujú jeho veľmi dobrú odbornú a vedeckú úroveň. Konštatujem, že predložená doktorandská dizertačná práca spĺňa všetky požiadavky kladené na tieto práce a prináša niektoré nové poznatky v oblasti pokročilých metód prediktívneho riadenia určených pre procesy s rýchlou dynamikou.

Odporúčam, aby predložená dizertačná práca bola prijatá k obhajobe v štúdiom programe doktorandského štúdia *P3902 Inžénierská informatika*, študijný odbor 3902V037 Automatické řízení a informatika a po úspešnom priebehu obhajoby bola Ing. Tomášovi Barotovi udelená vedecko-akademická hodnosť Ph.D.

V Bratislave 29. 09. 2016

Prof. Ing. B. Rohal-Ilkiv, CSc.



# Oponentní posudek disertační práce Ing. Tomáš Barota „Prediktivní řízení procesů s rychlou dynamikou“

Prediktivní řízení patří mezi partie teorie řízení s aplikacemi jak v technických úlohách, tak i oblastech netechnických, např. finančnictví (odhad vývoje cen akcií a kurzů měn a z toho vyplývající strategie chování na finančním trhu). I když se omezíme na aplikace technické, i zde najdeme značně odlišné úlohy, související s řízenými systémy. Příkladem je predikce odběru tepla (a právě ta má ve Zlíně tradici), která vychází z meteorologických předpovědí, v tomto případě jde systémy s pomalými změnami hodnot řízených veličin a navíc zatížené dopravním zpožděním při distribuci tepla, v předložené disertaci Ing. Tomáš Barot však právě naopak zkoumá systémy s rychlou dynamikou, jejichž časové konstanty jsou v řádu milisekund. To s sebou také nese nutnost volit „velmi krátkou“ periodu vzorkování, a tím i velké nároky na odpovídající reakci prediktivního regulátoru v konfiguraci prediktor – optimalizátor v strategii pohyblivého horizontu.

Hlavním cílem autora je v systémech s rychlou dynamikou snížit výpočetní náročnost optimalizátoru. Metody nelineární optimalizace jsou však výpočetně náročné, a proto tento cíl je netriviální a při jeho splnění **práce je disertabilní**, přínosná pro oblast teorie řízení a samotné **téma práce je aktuální**.

V úvodních kapitolách autor shrnuje současný stav řešené problematiky (kap. 2) a podrobněji se zabývá optimalizačními metodami s důrazem na nelineární optimalizaci, které jsou podstatné pro návrh regulátoru. Rozebírá úlohu na vázaný extrém, která s využitím Lagrangeových multiplikátorů v kombinaci s levými stranami omezujících podmínek převedených na tvar s nulovou pravou stranou se dá převést na úlohu s volným extrémem, a zkoumá její řešitelnost v závislosti na splnění Kuhn-Tuckerových podmínek. Na případu úlohy kvadratického programování ukazuje, že duální úloha může být výpočetně jednodušší než jí příslušející primární úloha.

Důležitým výsledkem je poznatek na str. 43, že vždy alespoň jedna z proměnných v součinu (5.31) nabývá hodnoty nula a pak je možné soustavu rovnic s nelineární částí přepsat na jednodušší soustavu lineárních rovnic. Další postup pak spočívá ve vytváření různých kombinací nulových hodnot těchto proměnných a ověřování splnění všech podmínek Kuhn-Tuckerovy věty, aby bylo možné určit, zda stacionární bod je extrémem (zde minimem účelové funkce), a tedy řešením úlohy.

Z uvedených zjištění vychází algoritmus analytického řešení úlohy kvadratického programování, na optimalizační úlohu je nahlíženo jako na programový modul, který je také implementován, zde konkrétně v programovém kódu prostředí MATLAB.

V 6.2 kapitoly 6 se doktorand zabývá pro cíle disertační práce podstatným odhadem výpočetní náročnosti prostředky teorie složitosti, konkrétně tzv. „*Big O notation*“, která určuje horní odhad počtu operací na hypotetickém počítači v závislosti na počtu vstupních dat.

Funkčnosti navržených algoritmů je pak ověřena na simulačních modelech s jedním vstupem a jedním výstupem, setrvačností druhého řádu s krátkými časovými konstantami a nulovým bodem.

Po formální stránce je práce na velmi dobré prezentační a jazykové úrovni. Lze namítnout jen to, že:

- Odkazy na literaturu by neměly být uváděny za koncem věty, ale před tečkou, protože jsou její součástí.

- Z hlediska české gramatiky věta nemůže být tvořena jen vedlejší větou – to autor někdy porušuje, např. na str. 106: „Přičemž při návrzích zlepšení ... navazuje na dosavadní praxi v dané oblasti.“ a „S čímž se dokáže naopak vypořádat Hildrethova metoda.“
- Charakteristika stacionárních bodů jako bodů „podezřelých z extrému“ (např. na str. 15) je hovorová, v odborném textu by bylo vhodnější hovořit o bodech, v nichž funkce mohou nabýt extrémy (a rozhodnou o tom další podmínky).
- Vztahy (4.11) a (4.12) vyjadřují totéž (jen jinými prostředky).

Nepřesnosti v textu jsou výjimkou:

- Na str. 14 jsou nevhodně odděleny dvě věty - místo „... *globální extrém funkce* ...“, pokud platí (4.2). Pak je tento bod minimem ...“ má být „... *globální extrém funkce* ... Pokud platí (4.2), pak je tento bod minimem ...“, protože jinak by úvodní věta nebyla obecně platná, extrémem je minimum i maximum.
- Na str. 15 ve vztahu (4.10) místo relačního operátoru  $\leq$  by měl být obecný vektor relačních operátorů, protože v úlohách matematického programování (speciálně lineárního programování) se kromě  $\leq$  mohou vyskytovat i relace  $=$  a  $\geq$  (např. v modelech řezného problému a nutričního problému), simplexová metoda má pak dvě fáze výpočtu, kdy v první se hledá minimum pomocné účelové funkce, vytvořené součtem pomocných proměnných, které je nutné v kanonickém tvaru soustavy začlenit do vztahů odpovídajících omezujícím podmínkám s relací  $=$  a  $\geq$ , aby zde splnily roli bázičkových proměnných výchozího řešení.
- Na str. 16 je uvedeno, že Hessova matice je *pozitivně definitní*, když „všechny subdeterminanty této matice budou mít kladná znaménka“. Tvrzení není přesné, nejedná se o všechny subdeterminanty, ale hlavní minory. Pro obecné tvrzení podle Sylvesterova kritéria je ale navíc potřebné, aby matice byla symetrická, to však u Hessovy matice při předpokladech uvedených v práci splněno je.
- Na str. 18 je uvedeno, že lineární nezávislost gradientů (4.22) se dá vyjádřit také podmínkou nenulovosti determinantu Jacobiho matice (4.24). Determinant je však definován jen pro čtvercové matice, přitom počet omezujících podmínek  $m$  se nemusí rovnat dimenzi prostoru  $n$ . (Vyjadřovat lineární nezávislost vektorů pomocí regularity matice má význam např. u řešitelnosti soustavy  $n$  lineárních rovnic o  $n$  neznámých Cramerovým pravidlem, zde jen v případě  $m=n$ .)

#### Dotaz na disertanta:

1. Na str. 84 uvádíte odhady počtu operací příkazů MATLABu, které obsahují výpočty inverzní matice. Jak jste dospěl k složitým výrazům, které přiřazujete do proměnné flopy a které vyjadřují teoretickou časovou složitost?
2. Ověření navržených algoritmů v kapitole 6 je provedeno na modelech zadaných přenosy (6.1) a (6.2) na str. 68. Časové konstanty zde jsou v desítkách milisekund. Daly by se navržené metody použít i pro systémy s časovými konstantami velikosti jednotek msec?
3. Můžete uvést příklady konkrétních systémů či procesů s „velmi malými“ hodnotami časových konstant, které lze označit jako systémy (procesy) s rychlou dynamikou?

## **Závěr:**

Lze konstatovat, že Ing. Tomáš Barot prokázal schopnost a připravenost k samostatné činnosti v oblasti výzkumu a vývoje, kde využil teoretické znalosti pokročilých optimalizačních metod i programátorské dovednosti. Práce přináší nové vědecké poznatky, výsledkem je také programový modul, je možné ji tedy využít i v praxi. Publikační činnost doktoranda je bohatá, k datu odevzdání disertace zahrnuje 11 článků, včetně takových, které jsou registrovány v prestižních databázích vědeckých publikací Web of Science a SCOPUS. Disertační práce splňuje podmínky § 47 Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb., a proto ji

### **doporučuji k obhajobě**

před komisí doktorského studijního oboru Automatické řízení a informatika

V Brně dne 3. října 2016



Prof. RNDr. Ing. Miloš Šeda, Ph.D.  
Ústav automatizace a informatiky  
Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně

## Oponentský posudek disertační práce

**Autor:** Ing. Tomáš Barot

**Název:** Prediktivní řízení procesů s rychlou dynamikou

**Obor:** 3902V037 Automatické řízení a informatika

**Pracoviště:** Fakulta aplikované informatiky, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

**Oponent:** doc. Ing. Renata Wagnerová, Ph.D.

**Pracoviště:** Fakulta strojní, VŠB – Technická univerzita Ostrava

---

### Aktuálnost zvoleného tématu

Předložená disertační práce se zabývá návrhem prediktivního řízení pro systémy s rychlou dynamikou, což je téma velmi aktuální a náročné. Vzhledem k neustále rostoucímu výkonu výpočetní techniky a vývojem novým výkonných numerických metod je prediktivní řízení stále častěji implementováno v průmyslové praxi.

### Splnění cílů disertační práce

Cílem disertační práce je snížit výpočetní náročnost algoritmu online MPC při řízení procesů s rychlou dynamikou a to i při snížení vzorkovací periody, navýšení počtu omezujících podmínek v MPC, navyšování hodnoty horizontů. Dále návrh a ověření vlastní optimalizační metody, která řeší úlohu kvadratického programování.

Po stručném úvodu, přehledu současného stavu dané problematiky autor definuje cíle disertační práce. V rámci teoretického rámce popisuje základy optimalizačních technik a přístupy k řešení neklasické úlohy na vázaný extrém a v závěru popisuje prediktivní řízení pro systémy s rychlou dynamikou jak pro jednorozměrové, tak i dvourozměrové systémy.

Stěžejní části předložené disertační práce jsou kapitoly 5 a 6, které se zabývají analytickým řešením kvadratického programování a experimentálním řešením popsané problematiky. Experimentální část popisuje implementované softwarové řešení realizace prediktivního řízení s GUI rozhraním pro prostředí MATLAB 6.5, volbu systémů s rychlou dynamikou a simulaci prediktivního řízení zvolených procesů. Dále definuje aparát pro stanovení výpočetní náročnosti algoritmů a dosažené kvality řízení. V závěru popisuje výpočetní náročnost navrhovaných řešení v MPC.

Po stručném zhodnocení přínosu pro vědu a praxi a dosažených výsledků následuje seznam použité literatury, obrázků, tabulek, použitých symbolů a zkratk, publikace autora a jeho stručný životopis.

Lze konstatovat, že disertační práce splnila vytýčené cíle.

## Zvolené metody zpracování a postup řešení

Disertant navázal na současný stav poznání v oblasti prediktivního řízení, seznámil se s optimalizačními metodami a navrhl vlastní řešení i s verifikací dosažených výsledků. Metody a postupy odpovídají problematice a cílům disertační práce, jsou vhodně využity známé metody a přístupy pro nová řešení.

## Význam pro praxi nebo rozvoj vědního oboru

Vědeckým přínosem disertační práce je snížení výpočetní náročnosti optimalizačních postupů v MPC, což je z hlediska jejich implementace a zavedení do praxe nezbytné. Praktickým výstupem je i softwarové prostředí pro simulaci disktrétního MPC a analýzu výpočetní náročnosti vybraných přístupů k řešení algoritmu MPC. Výsledky práce mohou mít uplatnění nejen v pedagogickém procesu, ale i v technické praxi.

## Formální úprava disertační práce a jazyková úroveň

Disertační práce je napsána přehledně, jednotlivé kapitoly na sebe logicky navazují, svým obsahem jsou vyvážené. K formální stránce nemám připomínky, text je psán srozumitelně, bez překlepů nebo gramatických chyb a je vhodně doplněn obrázky.

## Publikační aktivita disertanta

V seznamu publikací autora je uvedeno deset publikací a dva autorizované softwary, na kterých se disertant podílel jako spoluautor, z toho 3 konferenční články v citační databázi Web of Science, 2 konferenční články v citační databázi Scopus, 2 články v recenzovaných časopisech, 3 články v odborných časopisech. To je nadstandardní publikační aktivita.

## Připomínky k disertační práci


Doporučuji, aby autor v rámci obhajoby odpověděl následující otázky:

1. Vámi vytvořená aplikace je funkční v prostředí Matlab verze 6.5. Zkoušel jste její funkčnost ve vyšších verzích? Popř. jak by bylo složité ji upravit i pro vyšší verze MATLABu.
2. Zkoušel jste implementovat Vámi navržený optimalizační algoritmus do PLC standardně používaném pro řízení technologického procesu. Pokud ano, s jakými problémy jste se setkal.

## Závěrečné zhodnocení

Lze konstatovat, že práce splňuje požadavky po formální i věcné stránce a předloženou disertační práci **doporučuji** k obhajobě a po úspěšné obhajobě **doporučuji** Ing. Barotovi udělit titul Ph.D.

V Ostravě 29. 9. 2016

  
.....  
doc. Ing. Renata Wagnerová, Ph.D.