



## Oponentský posudek disertační práce

### “Control of Time Delay Systems – An Algebraic Approach”

**Autor: Ing. Libor Pekař**

Disertační práce má 324 stran a skládá se z osmi kapitol. Je napsána v anglickém jazyce. V práci je použito 55 obrázků, 21 tabulek. Počet referencí, na které se práce odkazuje, je 208.

#### 1. Definované cíle a jejich splnění

Cíle práce jsou definovány ve třetí kapitole (na stránce 103). Primární cíl práce je zaměřen na využití algebraické teorie v syntéze řízení systémů s dopravním zpožděním. Dále jsou v práci definovány cíle doplňkové, konkrétně využití optimalizačních metod v parametrizaci regulátorů systémů se zpožděním, identifikace systémů se zpožděním pomocí relé ve zpětné vazbě a provedení laboratorních testů navržených algoritmů a postupů syntézy řízení. Konkrétní dílčí cíle jsou uvedeny v následující části posudku a to spolu se stručnými souhrny řešené problematiky a zhodnocujícími komentáři.

**Cíl 1** *Popis a klasifikace systémů se zpožděním, otázky stability, úvod do algebraické teorie řízení systémů se zpožděním, obecný úvod v oblasti využití reléových regulátorů v identifikaci parametrů, úvod do robustní analýzy a problematiky diskretizace systémů se zpožděním.*

**Souhrn řešení:** Tento cíl je splněn ve druhé kapitole. V rozsahu 70 stran je proveden úvod a důkladný rozbor teoretických aspektů řešené problematiky analýzy a syntézy systémů s dopravním zpožděním. Nejprve jsou uvedeny jednotlivé možnosti popisu systémů se zpožděním. Poté jsou analyzovány spektrální vlastnosti systémů a je diskutována stabilita a to jak pro systémy retardované, tak i neutrální. Následně je proveden detailní rozbor využití algebraických metod k popisu, analýze a syntéze řízení systémů se zpožděním, a to jak pro systémy se soudělnými zpožděními, tak i pro obecný případ nesoudělných zpoždění. Následně jsou definovány dva různé typy regulačních obvodů, a to 1DoF v klasické řídicí smyčce a TFC v řídicí smyčce se dvěma stupni volnosti. Tyto definované obvody jsou následně využity v dalších částech práce. Dále jsou uvedeny možnosti syntézy řízení systémů se zpožděním. Rozsáhlá část je věnována syntéze ve spektrální oblasti s využitím různých metod umístění pólů. Též jsou uvedeny metody pro dosažení a posouzení robustnosti řízení těchto systémů. Dalším nosným tématem je identifikace parametrů systému se zpožděním a to jak pomocí klasického relé tak i jeho různých modifikací. Tato část práce je uzavřena přehledem metodiky pro diskretizaci systémů a regulátorů s dopravním zpožděním.

**Komentář:** Rozbor dané problematiky je velmi detailní a je proveden na vysoké úrovni. Autor v dané části práce prokazuje výjimečné znalosti v oboru a schopnost tyto znalosti zobecnit, vhodně a názorně popsat, a následně aplikovat. O kvalitě rozboru svědčí i vysoký počet citovaných prací.

**Cíl 2** *Analýza a popis lineárních časově invariantních systémů v okruhu  $R_{MS}$  a stanovení typických algebraických operací v tomto okruhu.*

**Souhrn řešení:** Stanovený cíl je řešen v první části kapitoly 4, jmenovitě v podkapitole 4.1, kde je nejprve provedena revize okruhu meromorfních funkcí, navržená Prof. Zítkem a Prof. Kučerou [199]. Práce poukazuje na chybu v definici okruhu, která spočívá zejména v jeho omezení na retardované systémy. Po zobecnění problematiky na neutrální systémy je revidovaný okruh popsán v definici 4.1. Následně jsou detailně analyzovány vlastnosti revidovaného okruhu a jsou definovány jeho typické algebraické operace. Je analyzována i problematika tzv. silné stability, která může být při algebraické syntéze řízení porušena.



Všechny výsledky jsou přehledně dokumentovány ve formě definic, lemmat, a výsledných teorémů, které jsou vždy doplněny detailními důkazy.

**Komentář:** Tato část je bezesporu největším přínosem práce. Výsledky pozoruhodným způsobem rozšiřují a doplňují metodiku navrženou v práci [199]. Autor prokazuje výjimečnou teoretickou zdatnost v oblasti algebraické teorie řízení, kterou vhodně aplikuje v revidovaném okruhu meromorfních funkcí.

### **Cíl 3 Formulace a návrh metod algebraické syntézy SISO systémů v definovaném okruhu $R_{MS}$ .**

**Souhrn řešení:** Daný cíl je řešen v kapitole 4, jmenovitě podkapitolách 4.2 až 4.4. Je provedena důkladná syntéza v daném okruhu a to pro případy regulačních obvodů 1DoF a TFC. Podrobně je provedena analýza jak pro sledování řídicí veličiny tak i potlačení poruch řízení. Je též posouzena výsledná povaha spekter systému, které je vždy konečné v přenosech obvodů z řídicí na regulovanou veličinu. Navržené algoritmy algebraické analýzy a syntézy jsou poté vhodně demonstrovány na řadě příkladů v podkapitole 4.7.

**Komentář:** Při algebraické syntéze řízení jsou vhodně aplikovány operace definované pro okruh meromorfních funkcí. Pro oba případy jsou detailně definovány postupy syntézy a jsou navrženy vztahy pro množiny stabilizujících regulátorů systémů se zpožděním. Provedené analýzy vlastností pro problémy sledování řídicí veličiny a potlačení poruchové veličiny a dále pak analýzy spektrálních vlastností jsou též velmi zdařilé.

### **Cíl 4 Stanovení podmínek stability pro vybrané kvazi-polynomy v závislosti na jednom z parametrů, a to za účelem provedení faktorizace a parametrizace navrženého regulátoru. Dále pak návrh zobecněného Nyquistova kritéria pro robustní syntézu řízení.**

**Souhrn řešení:** Čtvrtý cíl práce je řešen v posledních částech kapitoly 4, jmenovitě v podkapitolách 4.5 a 4.6. Nejprve je analyzována stabilita jednoduchých kvazi-polynomů prvního řádu s jedním a dvěma zpožděními. Cílem je určit povahu stability vzhledem k jednomu z použitých parametrů. K danému účelu je použita frekvenční analýza s využitím Michajlovovy křivky. Následně je provedena důkladná analýza využitelnosti Nyquistova kritéria pro posouzení robustnosti stability obou zmiňovaných typů regulačních smyček.

**Komentář:** V obou případech využití analýzy ve frekvenční oblasti bylo dosaženo zajímavých původních výsledků. Zejména analýza vlastností kvazipolynomů pomocí Michajlovova kritéria je detailností svého provedení unikátní a to i přesto, že je provedena pouze pro velmi jednoduché typy kvazipolynomů.

### **Cíl 5 Návrh sub-optimální a optimální metodiky umístění pólů systému nekonečného řádu a implementace navržených iteračních algoritmů**

**Souhrn řešení:** Pátý cíl práce je řešen v páté kapitole. Jako kritérium optimality je nejprve zvolen požadovaný překmit přechodové odezvy, ze kterého vyplývá požadovaná poloha pólů. Dále jsou analyzovány metody optimální a suboptimální spektrální parametrizace. Nejprve je modifikována metoda 'continuous pole placement'. Dále jsou aplikovány metody 'Self-organizing migration algorithm' a 'Nelder-Mead iterative optimization algorithm'. Pro jednotlivé metody jsou vždy uvedeny jejich principy a jsou navrženy algoritmy pro jejich nasazení v úlohách spektrální optimalizace. Všechny uvedené metody jsou dále numericky testovány na typovém příkladu.

**Komentář:** Tato část práce je spíše implementačně orientovaná. Autor se zaměřuje zejména na praktické aspekty nasazení jednotlivých metod. Vzhledem k tomu, že se jedná pouze o doplňkový cíl, je matematický popis dané problematiky poměrně stručný a je provedena pouze ideová analýza



konvergenčních a dalších vlastností daných metod. Nasazení metod na typovém příkladu vhodně demonstuje praktické aspekty numerické realizace optimalizačních algoritmů pro dané úkoly spektrální syntézy. Dotažení daných metod do funkční podoby demonstuje výborné schopnosti autora i v oblasti počítačové implementace navržených optimalizačních algoritmů. Zejména využití a implementace algoritmu SOMA je velmi zdařilé a to zejména s ohledem na možnost prohledání definované oblasti v prostoru parametrů s možností nalezení absolutního minima dané kriteriální funkce.

**Cíl 6** *Návrh metodiky pro identifikaci parametrů systému se zpožděním pomocí reléového experimentu a to se zaměřením na využitím saturovaného relé. Stanovení více bodů frekvenční charakteristiky, a to jak v časové tak i frekvenční oblasti.*

**Souhrn řešení:** Problematika praktického nasazení metod identifikace parametrů systémů se zpožděním je řešena v šesté kapitole s odkazy na podkapitolu 2.8. V souladu se stanoveným cílem je metodika navržena jak ve frekvenční tak i v časové oblasti. Navržené algoritmy jsou poté testovány v kapitole 7.

**Komentář:** Jedná se o doplňkový cíl, který podtrhuje celkovou komplexnost pojetí řešení dané problematiky řízení systémů se zpožděním. Navržená metodika je vhodně a zdařile implementována jak na modelech, tak i na reálné laboratorní soustavě.

**Cíl 7** *Ověření a implementace navržených algoritmů identifikace a řízení laboratorní soustavy s uzavřeným tepelným okruhem, a to s využitím robustní analýzy a zjednodušením výsledných regulátorů do vhodné implementační struktury.*

**Souhrn řešení:** Tento cíl je vyčerpávajícím způsobem řešen v kapitole 7 a to na 80 stranách. Nejprve, na základě matematicko-fyzikální analýzy, je detailně odvozen model laboratorní tepelné soustavy. Výsledný linearizovaný model je třetího řádu se čtyřmi nezávislými zpožděními a se třemi vstupy. Následuje identifikace parametrů modelu, která je provedena kombinací fyzikálně podložených výpočtů a experimentálních metod. Vysoká kvalita vytvořeného modelu je demonstrována na přechodové odezvě soustavy, kde simulované veličiny se téměř kryjí s veličinami naměřenými. V další části je provedena algebraická syntéza řízení v okruhu meromorfních funkcí a to pro vybraný SISO přenos soustavy, který je ve formě anisochronního přenosu třetího řádu. Jsou navrženy regulátory pro oba uvažované typy obvodů 1DoF a TFC. Následně je s využitím navržených reléových experimentů daný model soustavy aproximován jednodušším pětiparametrovým modelem, pro který je též provedena meromorfní syntéza řízení v obou uvažovaných typech obvodů. Vzhledem ke složitosti navržených regulátorů jsou dále navrženy postupy pro jejich aproximaci jednak na základě zachování dominantních pólů a nul a jednak s využitím Maclaurinova (Taylorova) rozvoje. Dále je provedena důkladná analýza robustnosti řízení pro regulátory navržené pro nominální přenosovou funkci systému. Následuje série simulačních a experimentálních testů pro vybrané varianty navržených regulátorů. Též je analyzována a demonstrována problematika diskretizace složitých algebraických regulátorů.

**Komentář:** Preciznost s jakou byl odvozen model laboratorní soustavy a byly provedeny jak simulační tak i experimentální testy navržené syntézy řízení je obdivuhodná. Jak je patrné z prezentovaných výsledků a jak je obecně známo, hlavním problémem algebraické teorie řízení aplikované na systémy se zpožděním je zpravidla komplikovaná struktura výsledných regulátorů. Autor si tento fakt uvědomuje a snaží se daný problém řešit několika způsoby. Nejprve aproximuje odvozený model pětiparametrovým anizochronním přenosem. K náhradě je použita metodika reléových experimentů a to jak ve frekvenční tak i časové oblasti. Dle mého názoru, tento způsob aproximace není optimálním řešením daného problému. Na základě znalosti modelu je možná přímá aproximace např. metodou nejmenších čtverců aplikovaná na body vybraného úseku frekvenční charakteristiky, či na body přechodové odezvy. Tento postup by byl též vhodnější pro aproximaci přenosových funkcí regulátorů. Navržená aproximace vycházející ze zachování dominantních pólů a nul nemusí vždy vést k uspokojivému řešení. Dynamika systémů se zpožděním je





často složitá. Zdánlivě nedominantní póly a nuly mohou být ve výsledné dynamice významné. Využití Taylorova rozvoje je lepší volbou, která má ale také svá úskalí, např. konvergenci řešení a volbu hodnoty veličiny  $s$  pro kterou je provedena. Kapitola 7.8, kde je demonstrována diskretizace nominálních regulátorů vzešlých z aplikace algebraických metod, také demonsturuje obtížnost jejich přímého nasazení v praktických aplikacích. Meromorfní syntézu řízení je možné chápat jako prostředek pro stanovení požadovaných frekvenčních a přechodových charakteristik, které jsou následně využity při parametrizaci jednodušších regulátorů, např. typu PID se zpožděnou integrací.

**Závěr:** Disertační práce je výjimečná jak svým rozsahem, tak i kvalitou prezentovaných výsledků. **Všechny stanovené cíle jsou bezesporu splněny a to na velmi vysoké odborné úrovni.** Všechny výsledky jsou též vzorně popsány a vhodně doplněny příklady.

## 2. Formální úroveň práce

Po formální stránce je práce též velmi zdařilá. Strukturování do kapitol je vhodně zvoleno. Cíle práce jsou jasně a zřetelně definovány. Rovnice, obrázky a tabulky jsou přehledné a jsou vhodně číslovány. Hlavní dosažené výsledky práce jsou stručně shrnuty v závěrečné kapitole.

Práce je napsána velmi pečlivě. Vzhledem ke svému rozsahu obsahuje velmi málo překlepů a drobných chyb, např. waere (str. 2), can be expresses (str. 47), Fig. 2.8 duplicitně v textu, (4.74 namísto (4.75) v Teorému 4.3., there in no (str. 153), poles nad zeros (str. 201), chybějící odkaz (str. 203), chybějící exp v rovn. (6.1), speed affect (str. 216).

## 3. Doporučení

Disertační práce je výjimečná jak šířkou řešené problematiky, tak i hloubkou a komplexností, se kterou byly stanovené cíle řešeny. Práce má celou řadu znaků autorské monografie a svou kvalitou dosahuje úroveň nejlepších doktorských prací v oboru a to ve světovém měřítku. Nejvýznamnějším a v dané oblasti průlomovým výsledkem je revize a doplnění teorie algebraické analýzy a syntézy v okruhu meromorfních funkcí. Práce je přínosná též z pohledu aplikované teorie řízení, jelikož obsahuje celou řadu původních výsledků v oblastech parametrizace a implementace řízení systémů s dopravním zpožděním. Je nutné též ocenit množství provedených numerických, simulačních a experimentálních testů teoreticky navržených postupů. Výjimečné znalosti a schopnosti autora v daných oblastech teorie řízení též dokumentuje množství kvalitních odborných publikací (16 publikací v časopisech a 51 konferenčních publikací), u kterých je autorem či spoluautorem.

Tato disertace bezesporu splňuje všechny zákonné požadavky, a proto ji **doporučuji** k obhajobě. Vzhledem k významnosti prezentovaných výsledků pro obor systémů s dopravním zpožděním, a vzhledem k množství a kvalitě publikačních a dalších výsledků autora, doporučuji, aby po úspěšné obhajobě bylo s autorem zahájeno habilitační řízení.

## 4. Poznámky, otázky k obhajobě

**Cíl 1** Poznámka: Tvrzení, že klasický popis systémů se zpožděním je uvažován obvykle se zpožděními pouze na vstupech a výstupech není zcela správné (první odstavec kapitoly 2.1). Ve většině monografií jsou uvažována zpoždění i mezi stavy. Anisochronní systém byl Prof. Zítkem zaveden jako podtřída těchto systémů, právě pro uvedený případ.

**Cíl 2** V rámci plnění druhého cíle došlo k opravě definice okruhu meromorfních funkcí. Do jaké míry původně chybně definovaný okruh ohrožuje syntézu řízení? Je odhalená chyba zásadního či spíše formálního charakteru?





**Cíl 3** Jaká jsou úskalí meromorfní syntézy řízení při aplikaci na rozvětvené systémy řízení? Byl daný postup aplikován i na jiné typy regulačních obvodů než na uvedené 1DoF a TFC?

**Cíl 4** Proč byly pro analýzu vybrány pouze takto jednoduché kvazipolynomy? Jsou dané postupy přenositelné na analýzu složitějších kvazipolynomů?

Poznámka: Analýzu daných kvazipolynomů by bylo možné zjednodušit normalizací časového měřítka, např. vzhledem k dopravnímu zpoždění.

**Cíl 5** Praktická realizace metod spektrální optimalizace je poměrně náročný výpočetní problém. Náročnost dané problematiky by bylo při obhajobě vhodné programově/algorithmicky demonstrovat, například na využití algoritmu SOMA.

Poznámka: Problematika analogická k řešení syntézy předepsání pólů k dosažení požadovaného překmitu byla řešena v práci [97] jako tzv. ‘Quasi-direct pole placement’, kde byl využit optimalizační algoritmus HANSO. V následném výzkumu by bylo zajímavé dané metody spektrální syntézy porovnat právě s využitím optimalizačních algoritmů HANSO a SOMA.

**Cíl 6** Proč byl zvolen pětiparametrový model (6.1)? Jaké jsou jeho výhody vzhledem k modelu čtyřparametrovému (např. při  $a_0 = 0$ )?

Poznámka: Dle mého názoru, i v souladu s textem v kapitole 2.82, není využití asymetrického relé pro stanovení statické citlivosti vhodné pro nasazení v reálných aplikacích. Totéž platí o stanovení zpoždění na vstupu, viz. obr. 2.10.

**Cíl 7** Jaký byl hlavní důvod pro aplikaci metodiky reléové parametrizace při aproximaci přenosové funkce tepelné soustavy? Proč nebyla využita přímá aproximace např. metodou nejmenších čtverců aplikovaná na vybrané body frekvenční charakteristiky či přechodové odezvy? Přímá aproximace důležitých frekvenčních pásem by též byla vhodnějším způsobem aproximace složitých meromorfních regulátorů. Byly testovány i jiné než uvedené možnosti aproximace regulátorů, tj. pomocí zachování dominantních pólů a nul, či s využitím Taylorova rozvoje?

V Praze 30. 3. 2013

Prof. Ing. Tomáš Vyhliđal, Ph.D.

Ústav přístrojové a řídicí techniky  
Fakulta strojní, ČVUT v Praze  
Technická 4, 166 07, Praha 6





## Oponentský posudok dizertačnej práce

Autor: Ing. Libor Pekař  
Názov práce: Control of Time Delay Systems – An Algebraic Approach  
Školiteľ: prof. Ing. Roman Prokop, PhD.  
Študijný odbor: Technická kybernetika

Dizertačná práca Ing. L. Pekařa „Control of Time Delay Systems – An Algebraic Approach“ (Riadenie systémov s oneskorením – Algebraický prístup) predstavuje príspevok k rozvoju algebraických metód riadenia jednorozmerových lineárnych dynamických systémov s oneskoreniami, ich využitiu v autotuningu a nastavovaní parametrov anizochrónnych regulátorov.

### Aktuálnosť témy dizertačnej práce

Napriek šesťdesiatročnej histórii výskumu v oblasti systémov s oneskoreniami a dobrej rozpracovanosti matematickej teórie diferenciálnych rovníc s oneskorením sa táto oblasť dynamicky rozvíja vďaka novým výzvam z inžinierskej praxe súvisiacich najmä so zložitou (napr. časové oneskorenia v sieťových riadiacich systémoch, rozľahlých prepojených systémoch a pod.). Príslušné aplikácie opísané modelmi vysokej zložitosti si vyžadujú rozvoj nových teórií (napr. riešenie problémov stabilizácie a robustnej stability), matematických nástrojov a numerických algoritmov pre riadenie v reálnom čase. Existujú dva základné prístupy k štúdiu vlastností systémov s oneskoreniami z hľadiska možnosti využitia zovšeobecnených výsledkov klasickej teórie, a to prístup na báze funkcionálnej analýzy a algebraický prístup. Predložená dizertačná práca využíva algebraické metódy a vzhľadom na uvedené skutočnosti je jej téma vysoko aktuálna.

### Splnenie cieľov stanovených v dizertačnej práci

Hlavným cieľom dizertačnej práce bolo využitie algebraických zákonov riadenia získaných na báze všeobecného riešenia Bézoutovej rovnosti v okruhu špeciálnych meromorfných funkcií  $R_{MS}$  pre systémy s oneskoreniami. Popri teoretických aspektoch rozšíreného okruhu  $R_{MS}$  a návrhu algebraických regulátorov sa práca zaoberala vybranými metódami nastavovania ich parametrov (konkrétne spojením posúvaním pólov uzavretého regulačného obvodu, suboptimálnym rozmiestňovaním dominantných pólov a rozložením spektra pri špecifikovanej kvalite riadenia), analýzou stability, modifikáciou reléového testu na ich identifikáciu a v neposlednom rade aj praktickou aplikáciou navrhnutých regulátorov na laboratórnom procese. Uvedené úlohy boli špecifikované ako konkrétne ciele DP v 3. kapitole.

Z predložených postupov, riešení a dosiahnutých a publikovaných výsledkov je možné konštatovať, že stanovené ciele dizertačnej práce boli splnené.

### Postupy riešenia, výsledky dizertačnej práce, konkrétne prínosy a ich význam

V predloženej dizertačnej práci sú rozpracované a overené vybrané teoretické poznatky algebraickej teórie riadenia spojitého SISO lineárnych dynamických systémov s oneskoreniami.

Použité postupy vychádzajú z opisu systémov so vstupno-výstupným a vnútorným oneskorením, návrh štruktúry regulátorov je založený na využití revidovaného a rozšíreného okruhu stabilných a rýdzich kvázipolynomiálnych meromorfných funkcií. Množina všetkých stabilizujúcich regulátorov je určená riešením lineárnej diofantickej rovnice (Bézoutovej rovnosti) spolu s Youla-Kučerovou parametrizáciou v uvedenom okruhu. Postup umožňuje zabezpečiť vnútornú stabilitu regulačného obvodu, asymptotické sledovanie referenčnej premennej a kompenzáciu poruchy na vstupe riadeného systému. Zároveň možné použitím netriviálneho uzavretého regulačného obvodu dosiahnuť konečné spektrum niektorých prenosových funkcií. Metóda je doplnená odvodením podmienok stability pre vybrané kvázipolynómy a zovšeobecného Nyquistovho kritéria pre systémy s oneskorením a špeciálnu štruktúru riadenia.

Za prínosy autora v teoretickej oblasti považujem:

- odvodenie a analýzu nových poznatkov z oblasti návrhu algebraického regulátora, konkrétne rozšírenie okruhu  $R_{MS}$  o neutrálne systémy s oneskorením, dôkazy niektorých základných vlastností špeciálnych meromorfných funkcií v okruhu  $R_{MS}$ , odvodenie metodiky návrhu regulátora, rozpracovanie metodiky rozloženia kvázikonečného spektra, analýzu stability vybraných oneskorených kvázipolynómov, odvodenie



- pôvodného algoritmu optimálneho ladenia regulátorov typu pole-placement, zovšeobecnenie Nyquistovho kritéria a podmienok robustnej stability a kvality riadenia;
- inovatívne použitie relé typu nasýtenie v kombinácii s anizochrónnym modelom riadeného systému spolu s netradičným vyhodnotením údajov oscilačného testu za účelom experimentálnej identifikácie parametrov modelu riadeného systému;

Za prínosy autora v aplikačnej oblasti považujem:

- analýzu možnosti diskretizácie a zjednodušenia navrhnutých anizochrónnych regulátorov za účelom ich implementácie na reálnom laboratórnom procese;
- riešenie ilustračných príkladov so simuláciami výsledkov v prostredí Matlab-Simulink (didaktický príspevok)
- podrobnú analýzu výsledkov reálnych experimentov na laboratórnom modeli zaokruhovaného tepelného systému vykazujúcom výrazné vnútorné oneskorenia, najmä z hľadiska robustnej stability a kvality riadenia.

Dizertačná práca predstavuje komplexný príspevok k riešeniu predmetnej problematiky. Jej rozsah a prínosy v teoretickej aj aplikačnej oblasti sú vyvážené, hĺbka spracovania a schopnosť prehľadne prezentovať výsledky poukazujú na dizertantovu systematickú prácu a hlbokú znalosť danej problematiky.

#### **Formálna úprava dizertačnej práce a jej jazyková úroveň**

Práca má 324 strán vrátane zoznamu použitej literatúry, vlastných publikácií autora a jeho odborného životopisu. Obsah práce má tri vyvážené časti (prehľadovú, teoretickú a aplikačnú), pričom posledné dve predstavujú vlastný prínos autora. Text je rozčlenený do 9 logicky nadväzujúcich kapitol. Dizertačná práca je napísaná v angličtine len s občasnými preklepmi a drobnými gramatickými chybami, ktoré neznižujú jej dobrú čitateľnosť (napr. s. 97: easyhandling – easy-to-handle; s.150: likable – likely; s. 184: by analogously – analogously; s. 240: criterial results – criteria evaluation results; leg – lag; letter – latter, ...). Obrázky a grafické priebehy sú kvalitne zobrazené, číslovanie obrázkov a tabuliek je napriek ich veľkému počtu (97 obrázkov a 21 tabuliek) dôsledné, s výnimkou obrázku 2.8, ktorý je uvedený dvakrát).

#### **Publikačná činnosť doktoranda**

Dosiahnuté čiastkové výsledky autor systematicky publikoval na významných domácich a zahraničných konferenciách ako aj v uznávaných časopisoch. V zozname vlastných publikácií je uvedených 69 prác, z toho 58 súvisiacich s problematikou dizertačnej práce (2 kapitoly publikované v zahraničných monografiách, 16 časopiseckých publikácií - z toho 12 zahraničných, 40 konferenčných príspevkov – z toho 22 v zborníkoch významných medzinárodných konferencií). V citačných databázach ISI je uvedených spolu 40 prác (Web of Knowledge – 8, Scopus – 32). V absolútnej väčšine prác súvisiacich s témou dizertačnej práce je dizertant uvedený ako prvý autor.

#### **Pripomienky a otázky**

1. Na str. 51 je nepresne uvedený vzťah pre Taylorov rozvoj funkcie komplexnej premennej v bode  $z_0$ .
2. Na str. 81 uvádzate, že odstránením prekmitu citlivostnej funkcie je možné zlepšiť kvalitu riadenia. Simulačné výsledky na obr. 7.18 a 7.19 však výskyt prekmitu potvrdzujú. Vysvetlite, prosím, čo prekmit citlivostnej funkcie indikuje a či je možné ho potlačiť.
3. Pri implementácii na laboratórnom tepelnom procese ste navrhnuté regulátory diskretizovali s periódou vzorkovania  $T=1s$ . Z dynamiky procesu (napr. obr. 7.11) však vyplýva, že perióda vzorkovania by mohla byť rádovo vyššia. Zdôvodnite, prosím, Vašu voľbu periódy vzorkovania.
4. Uvažovali ste nad využitím odvodenej metodiky návrhu algebraického regulátora aj pre viacrozmerové systémy s oneskoreniami? Aké hlavné problémy by bolo potrebné riešiť v takom prípade?

#### **Záverčné hodnotenie**

Dizertačná práca Ing. Libora Pekača je ucelenou štúdiou zaoberajúcou sa riadením jednorozmerných systémov s oneskoreniami algebraickými metódami v okruhu špeciálnych meromorfných funkcií. Svojím rozsahom, obsahom, riešenými príkladmi a prípadovou štúdiou predstavuje vysoko prínosnú vedeckú prácu v predmetnej oblasti, ktorá preukazuje schopnosť a pripravenosť autora na samostatnú činnosť v oblasti výskumu a vývoja.

Predložená práca spĺňa všetky formálne aj obsahové požiadavky na dizertačnú prácu v zmysle Zákona č. 111/1998 Sb. a Úplného znenia študijného a skúšobného poriadku UTB v Zlíne, preto ju odporúčam prijať k obhajobe v študijnom odbore Technická kybernetika a po úspešnom obhájení udeliť Ing. Liborovi Pekačovi akademický titul „doktor“ (Ph.D.).

V Bratislave 25. 03. 2013

Prof. Ing. Antonín Víteček, CSc., Dr.h.c.  
katedra automatizační techniky a řízení  
Fakulta strojní VŠB-TU Ostrava  
ul. 17. listopadu 15  
708 33 Ostrava - Poruba  
tel.: 596 993 485, 597 323 485  
e-mail: [antonin.vitecek@vsb.cz](mailto:antonin.vitecek@vsb.cz)

## **Oponentský posudek**

### disertační práce

**Autor: Ing. Libor Pekař**

**Téma: Control of Time Delay Systems – An Algebraic Approach**

Oponentský posudek je vypracován na základě dopisu děkana Fakulty aplikované informatiky UTB ve Zlíně pana prof. Ing. Vladimíra Vaška, CSc. ze dne 5. 2. 2013.

Disertační práce Ing. Libora Pekaře „Control of Time Delay Systems – An Algebraic Approach“ obsahuje 324 stran textu. V seznamu použité literatury je uvedeno 208 pramenů a v seznamu vlastních publikací 69 položek.

### **1. Aktuálnost zvoleného tématu a splnění stanoveného cíle**

Předložená disertační práce se zabývá teoreticky i prakticky velmi náročnou problematikou, jakou je řízení systémů se zpožděními při využití algebraického přístupu. Problematika systémů, u kterých vystupuje zpoždění ve stavových proměnných, případně i v jejich derivacích je velmi složitá a vyžaduje kvalitní znalost pokročilé matematiky. Existuje jen relativně málo pracovišť, která se takovými systémy zabývají. Vzhledem k tomu, že s reálnými procesy obsahujícími nejrůznější zpoždění se setkáváme velmi často a vzniká potřeba je řídit, zvolené téma je vysoce aktuální a významné jak pro hlubší poznání vlastností systémů se zpožděními, tak i pro jejich kvalitnější řízení.

Hlavním cílem disertační práce bylo řízení dynamických systémů se zpožděními na základě využití algebraického přístupu v okruhu speciálních meromorfních funkcí. Doktorand tento hlavní cíl podrobněji rozčlenil na sedm dílčích cílů.

Z disertační práce jednoznačně vyplývá, že ačkoliv stanovené cíle byly velmi náročné, a to jak z hlediska teoretického, tak i časového, tyto cíle byly v celém rozsahu splněny a v disertační práci dosažené výsledky ukazují na velmi vysokou odbornou úroveň doktoranda i školicího pracoviště.

## 2. Použité metody řešení

Disertační práce je napsána v anglickém jazyce a je velmi obsáhlá. Sestává z resumé v češtině a angličtině, seznamů obrázků, tabulek, symbolů a zkratk, devíti kapitol, seznamů použité literatury a vlastních publikací a odborného životopisu. První kapitola stručně zdůvodňuje zvolení tématu disertační práce a popisuje její obsah. Rozbor současného stavu v oblasti systémů se zpožděními je v disertační práci uveden ve druhé kapitole a je proveden na vysoké odborné úrovni a s hlubokou znalostí dané problematiky. Úctyhodný počet citovaných pramenů 208 ukazuje na náročnost, ale současně i zodpovědnost při zpracování této části, která může sloužit jako zdroj cenných informací dalším doktorandům i jiným výzkumným pracovníkům zabývajícím se systémy se zpožděními a jejich řízením. Třetí kapitola je věnována formulaci cílů disertace. Čtvrtá kapitola je jádrem disertační práce. Obsahuje podrobný popis algebraického přístupu k návrhu regulátorů v okruhu meromorfních funkcí. Jsou uvažovány dvě základní struktury regulátorů. Tato kapitola je zpracována velmi kvalitně a s mnoha ilustračními příklady, které usnadňují pochopení náročné problematiky a zároveň ukazují použití popisovaných přístupů. V páté kapitole jsou uvedeny některé vybrané metody pro seřizování anizochronních regulátorů. Šestá kapitola popisuje využití metody relé pro identifikaci systémů se zpožděními. Sedmá kapitola je věnována ověření popisovaných přístupů na reálném laboratorním modelu tepelné soustavy. Jsou zde uvedeny výsledky experimentální identifikace, linearizace, návrhu a implementace anizochronního regulátoru, včetně analýzy robustnosti a posouzení kvality získaných regulačních pochodů. Osmá kapitola shrnuje a hodnotí v disertační práci dosažené výsledky z hlediska přínosu pro rozvoj oboru i z hlediska praktického využití. Devátá kapitola je věnována závěru. Seznamy použité literatury i vlastních publikací ukazují na odborníka, který nejenom zná odbornou literaturu z řešené oblasti, ale který také sám v této oblasti publikuje a významně tak přispívá k jejímu rozvoji.

Disertační práce je zpracována na velmi vysoké odborné i formální úrovni. Kapitoly jsou přehledné, logicky na sebe navazují a tvoří souhrnné zpracování nesnadné problematiky analýzy a syntézy systémů se zpožděními. Disertace je velmi náročná z hlediska teoretického i pojmového, a proto velikým jejím kladem je, že obsahuje vhodně zvolené ilustrační příklady.

V disertační práci dosažené teoretické i praktické výsledky ukazují na teoretickou i praktickou erudici doktoranda a také, že navrhované přístupy a použité metody byly správně zvoleny i aplikovány.

## 3. Přínosy disertační práce

Analýza a syntéza dynamických systémů se zpožděními patří k velmi náročným problémům teorie automatického řízení. Je to dáno především povahou jejich matematických modelů, které v časové oblasti jsou vyjádřeny složitými funkcionálními a v oblasti komplexní proměnné transcendentními vztahy. Tato oblast není doposud soustavně zpracována na přístupnější úrovni. Proto disertační práce a její výsledky jsou významným teoretickým i praktickým přínosem v oblasti automatického řízení.

Za nejdůležitější výsledky doktoranda lze považovat:



- kvalitní zpracování a rozbor současného stavu v oblasti klasifikace, popisu a řízení systémů se zpožděními,
- revizi a rozšíření okruhu speciálních meromorfních funkcí pro návrh stabilizujících regulátorů,
- původní odvození podmínek stability pro vybrané kvazipolynomy,
- původní přístupy k seřizování anizochronních regulátorů,
- původní přístupy k experimentální identifikaci soustav se zpožděními pomocí relé typu nasycení,
- aplikace a ověření navrhovaných přístupů na reálné laboratorní tepelné soustavě.

Tyto výsledky představují významný teoretický i praktický přínos jak v oblasti aplikované teorie automatického řízení, tak i pro rozvoj oboru.

#### 4. Připomínky a dotazy

Disertační práce se mi líbí a považuji ji za velmi kvalitní. Svědčí o vysoké odbornosti i pečlivosti doktoranda. K práci mám jen několik nevýznamných připomínek a dotazů:

- str. 51<sup>9</sup> výraz s faktoriálem má být za znakem sumy,
  - str. 52<sup>12</sup> vloudil se výraz  $0\backslash$ ,
  - str. 151<sub>6</sub> u přenosu regulátoru chybí index R.
- Použití vztahu (2.155) pro diskretizaci přenosu regulátoru není vhodné. Mohl byste jeho použití zdůvodnit?
  - Algebraický přístup k návrhu regulátorů v okruhu meromorfních funkcí je velmi náročný na hluboké znalosti z matematiky a teorie automatického řízení. Jaký je Váš názor na jeho rozšíření a co je třeba pro to udělat?

#### Závěrečné hodnocení

Disertační práce Ing. Libora Pekaře je zpracována na velmi vysoké odborné i formální úrovni. Výrazným způsobem jak obsahem, tak i svým rozsahem převyšuje běžné disertační práce. Přináší nové teoretické i praktické poznatky, ukazuje na jeho kvalitní odborné a výzkumné schopnosti, velmi dobrou znalost problematiky dynamických systémů se zpožděními, automatického řízení a aplikované matematiky i na jeho způsobilost k samostatné tvůrčí vědecké práci. Splňuje všechny podmínky pro disertační práce, a proto ji **doporučuji** k obhajobě.



