

Oponentský posudok dizertačnej práce

Názov: **Robust Control of Systems with Parametric Uncertainty: An Algebraic Approach**

Autor: **Ing. Radek Matušů**

Charakteristika práce

Predložená dizertačná práca sa zaoberá robustným riadením jednorozmerových systémov s parametrickými neurčitostami. Po obsahovej stránke práca najprv v 2. kapitole podáva prehľad súčasného stavu problematiky robustnej analýzy a syntézy systémov s neurčitostami a aj syntézy riadiacich systémov. Jadro teoretickej časti práce zameranej na systémy s parametrickými neurčitostami vo 4. kapitole tvorí dôkladný rozbor analýzy robustnej stability systémov s jednoparametrovými, intervalovými, afinnými lineárnymi a multilineárnymi neurčitostami. Ďalšou teoretickou časťou práce je 5. kapitola, ktorá rozpracúva syntézu založenú na riešení diofantických rovníc v okruhu rýdzich a stabilných racionálnych funkcií pre účely návrhu robustných regulátorov pre systémy 1. a 2. rádu v regulačnom obvode s 1 a s 2 stupňami voľnosti. V 6. kapitole je prezentovaný autorom vytvorený program pre návrh robustných regulátorov, analýzu robustnej stability a simuláciu riadenia v softvéri MATLAB. Teoretické výsledky sú verifikované simulačne a laboratórnymi experimentami. Simulačné výsledky sú prezentované priebežne a dokumentujú správnosť teoretických záverov. Experimentálnym výsledkom je venovaná 8. kapitola práce, kde sú prezentované experimentálne výsledky riadenia teploty žiarovky a prietoku vzduchu v teplovzdušnom tuneli.

Práca, ktorá má 168 strán, je napísaná v anglickom jazyku, a to veľmi dobre. Po formálnej stránke je členená do súhrnu v českom a anglickom jazyku, obsahu, zoznamu obrázkov, zoznamu tabuliek, zoznamu použitých symbolov a skratiek, 10 kapitol, zoznamu použitej literatúry, zoznamu publikačných a výskumných aktivít autora a je doplnená životopisom autora. Členenie práce je logické a umožňuje dobre sa orientovať v skúmanej problematike. Text, tabuľky a obrázky sú spracované po formálnej stránke na veľmi dobrej úrovni.

Aktuálnosť zvolenej témy

Téma predkladanej dizertačnej práce je aktuálna a atraktívna vzhľadom na potrebu riešenia problémov riadenia systémov s neurčitostami v praxi. Aktuálne je najmä využitie syntézy riadenia založenej na riešení diofantických rovníc v okruhu rýdzich a stabilných racionálnych funkcií pre syntézu robustných regulátorov.

Splnenie cieľov práce a metódy zvolené na ich plnenie

Vytýčené ciele dizertačnej práce uvedené v 3. kapitole boli splnené v celom rozsahu, zvolené metódy spracovania sú v súlade s najnovšími poznatkami v uvedenej oblasti výskumu a dosiahnuté výsledky potvrdzujú správnosť zvoleného prístupu aj v oblasti teoretickej aj praktickej.

Prínos dizertačnej práce

Predkladanú dizertačnú prácu považujem za prínos pre rozvoj vednej oblasti teória riadenia, a to v oblasti robustného riadenia systémov s parametrickými neurčitostami. Prínosom práce v teoretickej oblasti je dôkladné systematické spracovanie riešenia problému analýzy robustnej stability systémov s jednoparametrovými, intervalovými, afinnými lineárnymi a multilineárnymi neurčitostami. Za hlavný prínos v teoretickej oblasti považujem syntézu robustných regulátorov pre systémy 1. a 2. rádu v regulačnom obvode s 1 a s 2 stupňami voľnosti. Významným praktickým výsledkom je autorom vytvorený program pre syntézu robustných regulátorov, analýzu robustnej stability a simuláciu riadenia. V súčasnosti vidím hlavné možnosti jeho využitia pre pedagogické a vedeckovýskumné účely.

Publikačná činnosť doktoranda

Z prehľadu publikačných a výskumných aktivít autora je zrejmá jeho bohatá publikačná činnosť. Ing. Matušů je autorom alebo spoluautorom 1 učebnice, 2 časopiseckých publikácií a 28 príspevkov prevažne na medzinárodných konferenciách. Zároveň predniesol 4 prednášky na partnerských pracoviskách v ČR a v zahraničí.

Otázky k práci

K vecnej náplni mám okrem už uvedenej analýzy nasledovné otázky.

- Autor na potvrdenie svojich teoretických výsledkov prebral viaceré príklady z literatúry, napr. str. 44 polynóm (4.15), str. 47 polynóm (4.27), str. 62 príklad 4.8, str. 63 príklad 4.9. Bolo to nevyhnutné a prečo autor neprezentoval výsledky na vlastných príkladoch?
- Nie je využitie autorom vytvoreného programu obmedzené (MATLAB 6.5.1, Polynomial Toolbox 2.5)? Ako by to bolo s jeho adaptáciou pre vyššie verzie MATLAB?
- Čo reprezentuje veličina 25% $u_1(t)$ na vertikálnej osi v grafoch na obr. 8.7, 8.8, 8.9 a niektorých ďalších?

Záverečné konštatovanie

Autor preukázal svojou prácou spôsobilosť tvorivo vedecky pracovať. Predložená dizertačná práca spĺňa po stránke obsahovej, odbornej i formálnej požiadavky kladené na práce tohto druhu. Ciele dizertačnej práce považujem za splnené. Dizertačnú prácu hodnotím kladne a odporúčam ju k obhajobe.

V Bratislave 9.10.2007



**The review of Ph.D thesis entitled
“Robust control of Systems with Parametric Uncertainty:
An Algebraic Approach”
by Ing. Radek Matusu**

1. The subject and main goals

In the process of designing of a control systems one can consider two main problems:

- analysis problem: having a regulator, determine if the system signals like outputs, errors etc. satisfy the desired and expected properties in the presence of noises, disturbances and model uncertainties,
- synthesis problem: design a controller so that the specified signals satisfy the desired properties for planned or anticipated work conditions and model uncertainties.

In my opinion the candidate for doctor's degree concentrate his work rather on the second problem, than the first one.

The words „model uncertainties” mean, that the real object to be controlled in the future can differ from the model used for computation of the regulator. There are several origins of mentioned differences:

- there are always parameters in the linear models which are known only approximately or vary due to different work conditions and/or nonlinearities of the object,
- at high frequencies the structure and the model order are almost always unknown,
- the actuators have limited resolution and measurement devices are not ideally accurate so, they cause rise of the model uncertainty.

Author focused his effort on the first kind of uncertainties and he neglected rather remained phenomena.

All, presented above, uncertainty sources allow to group them into two main classes:

- parametric uncertainties, when the structure of the model is known,
- and nonparametric ones related to the neglected and unmodelled dynamics.

Parametric uncertainty is sometimes called the structured one. But one can be careful about using this terms, because nonparametric uncertainty (called often unstructured) can be however structured especially in MIMO systems when they are related to the particular channels. Therefore uncertainty partition presented on pages 32 and 40 are not proper.

The candidate for doctor's degree formulates the principal goal of the thesis as (page 37): „*utilization proposed and improved robust control laws achieved through the general solutions of Diophantine equations in R_{PS} for system affected by parametric uncertainty*”. This subject of the work is defined suitably and it corresponds with the content. It also can be expressed as a design of new control strategy which provide - via a certain parameter denoted „m” and called „tuning knob”

– a convenient interface between control system and engineer. Presented system is „user- friendly” thanks to the GUI described in the chapter 6.

Such formulated research problem needs knowledge, competence and last but not least a lot of time and it is, in my opinion, important and timely. The thesis is written transparent and clear manner in an excellent language.

2. The composition of the thesis

The work consists of 10 chapters. The short descriptions of every part of the thesis are presented on pages the 28 and 29, therefore I omit it in my review. Bibliography contain 82 publications with 4 of them, where the candidate was one of co-authors.

The comprehensive overview of the literature is presented in the chapters 2, 4 and 5 and author shows very good knowledge of the scientific area.

I think that the arrangement of the work is not adequate enough as it can be. There are too many chapters. Approximately the first three chapters can be collected together and the same concerns the last three. Chapter 4 seems to be very good appendix. I consider that the chapters 6, 7, partially 8 and subsection 5.5.3 form the main part of the thesis and they show that the author solved problems formulated in the chapter 3.

Unfortunately, the last part of the work related to the discussion about results, final remarks and further works are definitely too short. I have an impression that author treads figures with outputs and control signals as sufficient confirmation of the control process quality (see chapter 7).

3. The main achievements of the work

The most important contributions of the author I regard:

- classification of the mathematical models affected by different parametric uncertainties with creation of the overview of typical tools for robust stability analysis,
- introduction of the new robust control strategy for SISO objects with only one „tuning knob”,
- verification of proposed control systems via simulation runs and steering of the simple object in real-time experiments,
- elaboration of appropriate GUI for further users (e.g. students).

It is worth noticing that many results shown in the thesis were described in publications presented and verified on international conferences.

4. Weaknesses and drawbacks of the thesis

I have a few main objections to the contents of the thesis and some minor. The main remarks are as follow:

- I. Objects presented in chapters 7 and 8 are steered only by proposed algorithm and no another regulators were used to compare. Author knows robust controllers minimized H_∞ norm and structured singular value μ (see page34) and it would be very instructive to show if proposed regulator is better or no. Finally even properly adjusted PID regulator would enable to judge the quality of presented controller. At present situation the reader doesn't know if the proposed regulator is really needed.
- II. No disturbances are taken into account when the synthesis process is performed, albeit those phenomena occur in the object controlled in

chapter 8. The traces of noises one can see in figures 8.10, 8.11, 8.16 – 8.18 in both signals.

- III. The quality of the steering is analysed only for real object (chapter 8) and only for control error (formula 8.32). It is not sufficient. The minimum range of appreciation should include also values of control signals. Words „less or more aggressive control signals” are completely inadequate.
- IV. The important innovation of presented algorithm is the tuning parameter „m”. It is not clear for me what is the idea of proper adjustment of its value. The way „trials and errors” is poor and difficult to use when the real nonlinear object is to control, though it is very didactic for e.g. student laboratory. The adaptive regulators or robust controllers based on μ -minimalization have constant structure and values of parameters and therefore don't need any adjustment performed by the users.

There are also few, not such important remarks and questions. They as follows:

- a) There are much more types of uncertainties than stated on page 32. Besides general additive and multiplicative ones, one can recognize (mainly in MIMO systems) input and output uncertainties and also the feedback ones.
- b) It is not clearly explained why such kind of simple objects were chosen to research in chapter 7. It would be more instructive to apply described controller to more complicated ones to show the power of proposed solution.
- c) The part of the sentence „... the parameters of nominal transfer function are known” from page 96 is not exactly true. For real object we can often only estimate the range of coefficient values and not the nominal values.
- d) It is not clear if formulas 5.46 – 5.51 are related to H_{inf} norm or to any matrix norms.
- e) The formulation of control quality criterions from page 99 is not clear. Undershoot and overshoot can be quality criterions if we first define what should be their values e.g. overshooting less than 5%. Additionally we know many different criterions like the regulation time and author didn't explain why he choose such quantities.
- f) There is lack of the control signals runs related to the figures 6.10 – 6.12 therefore the sentence „... the costs for faster regulation are much more aggressive control signals” from page 114 is unjustified.
- g) Tables 8.2, 8.3 and 8.4. show parameters values from identification experiments. Why ranges of uncertainties in formulas 8.7, 8.8 and 8.24 are bigger? What was the reason of such impediments for controller?
- h) What does mean the sentence „margins have to be narrowed....” from page 134. How this operation is related to the results from identification?
- i) What type of the method of the order reduction was implemented to the object, mentioned on page 135? It is quite important because well-known methods like truncation or residualization are not equivalent and give different characteristics (e.g in frequency domain) of the reduced object.
- j) There is a very alarming phenomenon related to the control signal in figures 8.10 and 8.11. I mean large peaks in time 600 and 1200 s leading to the actuators saturation in the real systems and consequently to the decreasing of the control quality. No comments in the text on this subject.

Many of remarks presented above have deliberative character and candidate for doctor's degree couldn't agree with them. Even more, he should convince the participants of the public discussion that he is able to defend his work. It will be very profitable for all participants to know the author answers to the remarks and objections stated above.

5. Conclusion

The thesis for doctor's degree should describe the original solution of the stated scientific problem, to demonstrate the global knowledge of the candidate for doctor's degree in appropriate field and to prove his ability to perform scientific researches individually. All this conditions are fulfilled by ing. Radek Matusu.

Therefore I judge the thesis positively and I recommended it for public discussion in the Faculty of Applied Informatics, Tomas Bata University in Zlin.

Witold Gierusz

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Witold Gierusz', written in a cursive style.

Oponent: Prof. Ing. Pavel Zítek, DrSc.
ČVUT v Praze, Fakulta strojní,
Ústav přístrojové a řídicí techniky

Oponentský posudek
disertační práce *Ing. Radka Matušů* na téma
**„Robust Control of Systems with Parametric Uncertainty:
Parametric Approach“**

Charakteristika disertace a aktuálnost tématu

Předložená disertační práce o 168 stranách je napsána v angličtině a zabývá se významným aspektem syntézy řízení spojité soustavy s jedním vstupem a jedním výstupem – respektování neurčitosti modelů k této syntéze použitých. Nejdříve je problematika neurčitosti nastolena obecněji, v řešení disertace je však její reprezentace uvažována především jako intervalová neurčitost koeficientů charakteristického polynomu. K ověření dopadu neurčitosti na stabilitu řízení je využíván Charitonovův teorém v kombinaci s Michajlovovým kritériem stability. Návrh řízení je založen na Youlově-Kučerově parametrizaci stabilizujících regulátorů a splněním podmínek návrhu pro libovolné kombinace neurčitostí je dosaženo definované robustnosti tohoto řízení. Metodika návrhu pomocí parametrizace je propracována pro soustavy prvního a druhého řádu a pro regulátory s jedním a dvěma stupni volnosti s použitím jednoho volitelného parametru rychlosti odezvy regulační smyčky. K implementaci metody návrhu byl vyvinut softwarový produkt v prostředí MATLAB.

Zvolené metody zpracování a teoretický přínos

K tématu disertace autor přistupuje na základě dostatečně reprezentativní kritické rešerše pramenů v pojednávané tématické oblasti modelů s neurčitostí a robustního řízení zpracované nejen v kap. „State of the Art“ ale v úvodních kapitolách dalších. Problematika reprezentace neurčitosti parametrů modelu je zpracována dostatečně důkladně a hlavně využití Charitonovova teorému pro ověřování vlivu neurčitosti na stabilitu je zdařilým přínosem disertace. Spojením návrhu stabilizujících regulátorů metodou afinní parametrizace s modely neurčitosti umožňuje zajistit tomuto návrhu zajistit robustnost vůči neurčitostem použitého modelu, s nimiž je nevyhnutelně každá aplikace spojena. Parametrizace je uvažována vzhledem k reprezentativní časové konstantě výsledné přechodové charakteristiky řízení.

Připomínky ke zpracování

Pokud jde o dva základní pojmy textu, tj. neurčitost a robustnost, doporučil bych určité důslednější jejich rozlišování: parametry neurčitosti kvantifikují objektivní omezení stupně poznání reality, zatímco robustnost je důsledkem takového přístupu k návrhu regulátoru, aby se s neurčitostí úspěšně vyrovnal. Např. na str. 40 mi takové zřetelné rozlišení poněkud chybí, obě stránky problému se zde poněkud nejasně prolínají. Proto v tomto případě nepovažuji za šťastné, že stejným symbolem q jsou označeny jak intervalové neurčitosti tak i koeficienty čitatele přenosu regulátoru. Angličtina textu disertace je dobrá, pro časopiseckou publikaci však bude nutná jazyková korektura. Doporučil bych vyhnout se latinským slovům, např. videlicet, ergo, id est, supra, scilicet, apropos atd. a při použití příkladů jiných autorů bych nepoužíval termíny jako „is adopted, is borrowed“ apod., jednoduchá citace je vhodnější. Dále uvádím dílčí připomínky tak, jak jsem je při čtení zaznamenal.

Str. 39, 4_d – místo „truncation“ má být např. neglecting
Str. 40, 4_d – místo „robustness“ má být např. stability, jinak by vznikla tautologie.
Str. 42, 7^h – formulace, že „koule je při této normě kvádr“ asi není nejtřábnější.
Str. 47, 9_d – o vlastních hodnotách nelze předpokládat, že neexistují.
Str. 48 – místo „extreme points“ jde spíše o boundary polynomials.
Str. 51, rovn. (4.39) – o vlivu q_i na koeficienty se mlčky předpokládá, že je lineární, to je třeba uvést, příp. komentovat.
Str. 52, 12_d – citace [37] je v seznamu zkomolena, místo “Differential Uraven” mají být Diferencialnyje uravnenija.
Str. 55, 4^h – proč „however“, uvažovat Re i Im je snad samozřejmé. Spíše je nejasné proč je uvažováno $\omega_0 < 0$, když zobrazení $p(j\omega)$ je symetrické.
Str. 65, rovn. (4.74) – až do této str. se o regulátoru nemluví, zde se najednou bez vysvětlení objevuje ve speciálním odst. o afinní neurčitosti.
Str. 68, 5_d – místo “holds good” spíše holds true.
Str. 89, 3_d – „ F is free in R_{PS} “, je dost lakonické, zavést jako parametrizující funkci.
Str. 98, 10^h – citlivostní funkci by bylo vhodné specifikovat, jsou různé.

Otázka k obhajobě

V disertaci na str. 82 je pojednána také otázka robustního řízení soustavy se zpožděním, jehož hodnota vykazuje neurčitost. Pomocí Padého aproximace je tento problém převeden sice na racionální přenos, ale fakt, že Charitonovův teorém obecně neplatí pro systémy se zpožděním se přesto zůstává. Lze vyslovit nějakou podmínku, kdy Padého aproximace je spolehlivým prostředkem k řešení?

Výsledky a přínosy disertace

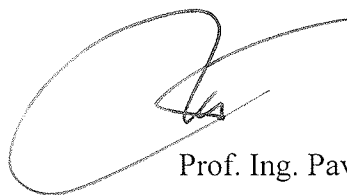
Jak patrně, uvedené připomínky se týkají pouze formálního podání disertace a nemají vliv na věcnou správnost výsledků disertace. Naopak je třeba vyzdvihnout, že výsledky disertace již byly 31 krát publikovány, dvě publikace jsou v českém a slovenském časopise, ostatní příspěvky jsou konferenční, až na čtyři české jsou všechny na mezinárodních konferencích v zahraničí.

Praktický přínos a závěr

Přes svou teoretickou povahu má předložená disertace zcela zřejmý vztah k praktickému využití v návrhu regulátorů pro praktické aplikace, kde neurčitost informací o řízeném objektu hraje téměř vždy rozhodující roli. Zcela mimořádný je rozsah publikací autora k tématu disertace.

Předložená disertace Ing. Matušů nepochybně naplňuje kritéria způsobilosti disertanta k samostatné tvůrčí vědecké práci a přináší původní a autorem pozoruhodně rozsáhle a mezinárodně publikované výsledky, čímž jsou jednoznačně splněny požadavky §47, zákona 111/98 Sb., a proto tuto **disertaci doporučuji** k obhajobě.

V Praze, dne 1. října 2007



Prof. Ing. Pavel Zítek, DrSc.