



## Oponentní posudek disertační práce

Autor: Ing. Mgr. Jan Huspeka

Název: Řízení systémů s více binárními vstupy a jedním výstupem

Školitel: Prof. Ing. Miloš Schlegel, CSc.

Pan Ing. Mgr. Jan Huspeka (dále jen autor) již od prvních řádek disertační práce dokazuje hlubokou znalost systémů s proměnnou strukturou, počínaje reléovou zpětnou vazbou a konče fuzzy adaptivním řízením. Tematicky z oblasti systémů s proměnnou strukturou se autor zaměřuje na klouzavé řízení či řízení v klouzavém režimu, které je nosným tématem disertační práce. Především problematika stability řízení v klouzavém režimu je uvedena a vysvětlena příkladným způsobem a to doslova, tj. demonstrací na příkladech bojleru pro ohřev vody a plastového extruderu pro lisování plastových výrobků.

Ke splnění vytyčených cílů disertační práce se autor dostává systematicky postupnými kroky, kdy po úvodních motivačních příkladech uskutečňuje návrh dvoustavového regulátoru pracujícího zcela či po částech v klouzavém režimu tak, jak to naznačil v úvodních kapitolách. Poté je návrh dvoustavového regulátoru rozšířen o algoritmus přepínání mezi více dvoustavovými regulátory, které vyplývají dispozičně z více binárních vstupů řízeného systému. Předností vytyčených cílů disertační práce je nesporná možnost dosažení energetické úspory v nákladech na řízení dostupnými akčními členy a taktéž možnost zálohovat vybrané akční členy, tj. fixovat je do nepracovního stavu, a tím zvýšit spolehlivost řízení v případě technického výpadku ostatních akčních členů. Zároveň navržené dvoustavové regulátory včetně algoritmu přepínání mezi nimi jsou schopny nejen řídit na požadovanou hodnotu výstupu nýbrž také sledovat rampovou funkci žádané veličiny. Určitou nevýhodou navržených dvoustavových regulátorů pracujících převážně v klouzavém režimu je jejich obvyklá nepoužitelnost na nedostatečně tlumené či nestabilní systémy. Proto např. pro účely řízení inverzního kyvadla, které autor úspěšně řídil standardním regulátorem v klouzavém režimu, viz publikace [8], je návrh dvoustavového regulátoru pracujícího v klouzavém režimu obtížně aplikovatelný.

K samotnému řešení vytyčených cílů disertační práce je několik **nikoli** závažných připomínek:

- Na str. 46 vlastní číslo  $\lambda = -3/5$  lze vnímat nejen jako neřiditelnou dynamiku, nýbrž také v případě návrhu rekonstruktoru jako nepozorovatelnou dynamiku.
- V Příkladech 4.2 a 4.3 na str. 67 a 71 jsou pro výpočet koeficientů matice nadplochy předepsána vlastní čísla totožná s čísly původního řízeného systému. Zato, že nebyly předepsány vlastní čísla umístěné v komplexní rovině více nalevo od původních čísel, může v PŘ. 4.3 neřiditelná dynamika, která je pomalejší, než zbývající vlastní čísla původního systému. Pokud neřiditelná dynamika v systému neexistuje, viz PŘ. 4.2, a je např. aplikováno řízení v klouzavém režimu tzv. plného řádu<sup>1</sup>, je možné předepsat teoreticky libovolná vlastní čísla. Aplikoval autor řízení dvoustavovými regulátory s předepsáním mnohem rychlejší dynamiky, než je dynamika řízeného systému? Zvláště u kmitavých systémů je změna dynamiky žádoucí.

<sup>1</sup> Ackermann, J., and Utkin, V. (1998). Sliding mode control design based on Ackermann's formula. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 43(2), 234-237.

- Obecně sledování (stavové) trajektorie je jedním z úkolů optimálního návrhu řízení v klouzavém režimu, proto by také stálo zato zhodnotit sledování referenční trajektorie dvoustavovými regulátory ve smyslu kvadraticky optimálního řízení v klouzavém režimu<sup>2</sup>.

A nakonec jsou připojeny jen formální připomínky:

- Graf 1.2 je uveden pro 3 a nikoli 2 binární vstupy, jak je psáno v popisku k obrázku.
- Vztahy (2.162) a (2.163) vyžadují revizi kvůli chybějící závorce.
- V úvodu disertační práce jsou matice diskretního systému zavedeny s indexem  $d$ , který je ovšem v návrhu a analýze řízení diskretního systému vynechán. Toto indexování je zmatečné, protože z kontextu plyne, že se jedná o matice diskretního systému i bez indexu.
- V principu výběru regulátoru v kap. 5.1 se volí regulátor pokud možno s co nejnižší cenou řízení. Mluvme raději o nákladovosti řízení, protože smyslem navrženého řízení je minimalizace nákladové funkce (5.1).

Předkládaná disertační práce významně posouvá použití principu řízení v klouzavém režimu ve smyslu jednoduchosti návrhu řízení a aplikovatelnosti tohoto principu řízení na systémy s více vstupy, které postačují být jen jako *binární*. Výsledkem jednoduchosti návrhu dvoustavových regulátorů pracujících v klouzavém režimu je tedy jeho široká aplikovatelnost zesílená v důsledku schopnosti dvoustavových regulátorů s algoritmem přepínání sledovat referenční trajektorii s předepsaným sklonem. Zároveň z předkládané disertační práce je čitelný její potenciál pro rozšíření teorie návrhu dvoustavových regulátorů na návrh vícestavových regulátorů pracujících v klouzavém režimu. Dále vlastní publikační činnost autora považuji za přiměřenou pro obhajobu disertační práce a oceňuji, že je napsána srozumitelnou a gramaticky správnou češtinou.

Vzhledem k předložené disertační práci pana Ing. Mgr. Jan Huspeky a provedenému oponentnímu posudku

### doporučuji

disertační práci k obhajobě.

V Praze dne 2.12.2014

.....  
  
 Ing. Jaromír Fišer, PhD.

<sup>2</sup> Zítek, P. - Vítěček, A.: Návrh řízení podsystémů se zpožděními a nelinearitami. Monografie. Vyd. ČVUT Praha, 1999, str. 165



doc. Ing. Josef J a n e č e k, CSc.  
Ústav mechatroniky a technické informatiky  
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií  
Technická univerzita v Liberci  
Studentská 2  
461 17 Liberec 1

## Oponentský posudek disertační práce

Ing. Mgr. Jana H U S P E K Y

### **Řízení systémů s více binárními vstupy a jedním výstupem**

Oponentský posudek je vypracován na základě dopisu děkana Fakulty aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni doc. RNDr. Miroslava Lávičky, Ph.D. , č.j. ZCU 033458/2014/FAV-Ton ze dne 3.11.2014.

Disertační práce Ing. Mgr. Jana Huspeky na téma „Řízení systémů s více binárními vstupy a jedním výstupem“ obsahuje 110 stran textu. V seznamu literatury je uvedeno 56 publikací, na které se autor v textu obrací. Dále je uvedeno 9 publikací, na kterých se uchazeč podílí jako spoluautor, ve 4 případech dokonce jako autor jediný.

Předložená disertační práce se zabývá zajímavou problematikou řízení lineárních dynamických systémů obecně s více vstupy a jedním výstupem dvoustavovými regulátory v klouzavém režimu. V práci je předložena a rozpracována metodika návrhu přepínací strategie regulátorů založená na principu porovnání jednoduché skalární funkce se systémem podmínkových nerovnic vyjádřených ve stavovém prostoru tzv. přepínací nadplochou. Na jednoduchých příkladech byl ukázán princip a chování dynamického systému v klouzavém režimu. Navržená metodika syntézy regulačního obvodu byla dále rozšířena i na případy řízení systémů s neměřitelným stavem, sledování referenční trajektorie a optimalizace výběru z množiny několika možných strategií.

Disertační práci lze rozdělit do tří logických částí. V první části se autor zabývá rešeršním výkladem v současné době obvyklých přístupů k řešené problematice a analýzou jejich výhod a nedostatků. Konzistentnost a srozumitelnost výkladu s bohatými bibliografickými odkazy svědčí o jeho velice slušném přehledu současného stavu vědního oboru. S ohledem na další části práce se mi však zdá tato část poněkud příliš detailní a podrobná.

V druhé části své práce disertant vymezuje předmět a cíle své disertace - navrhnout a realizovat přepínací strategii regulátorů se sledováním referenční trajektorie

v klouzavém režimu, navrhnout algoritmus přepínání mezi jednotlivými dvoustavovými regulátory během řízení a optimalizovat výběr z několika možných strategií.

Třetí část je věnována především praktické aplikaci předložené metodiky na návrh regulační struktury dvou konkrétních systémů. Prvním z nich je zjednodušený model jedné zóny plastového extruderu, ve kterém je vytlačovaná tavenina zahřívána na technologicky požadovanou teplotu dvouhodnotovými regulátory topení a chlazení. Tento příklad je převzat z uvedené literatury [56], resp. [52, 53]. Druhým příkladem je model zásobníku vody vyhřívávaného třemi topnými tělesy různých příkonů. Ověřování bylo provedeno v simulačním prostředí Matlab/Simulink.

Přednosti disertační práce:

- Zvolené téma vyžadovalo od disertanta studium a zvládnutí teoreticky značně obtížné problematiky. To disertant ve své práci jednoznačně prokázal.
- Dobrá separace a formulace zvoleného problému.
- Vhodně volené metody řešení a simulační ověření výsledků.
- Srozumitelná formulace textu a výkladu s ilustračními příklady.

Nedostatky:

- Občasné gramatické chyby, stylizační a terminologické prohřešky a nepřesnosti. Numerické chyby.
- Nekonzistentnost a malá pečlivost značení. Chybí seznam použitých symbolů. Důslednější kontrola a větší ediční pečlivost by textu prospěla.
- Aplikace jsou uvedeny pouze pro virtuální modely extruderu (převzatého navíc z literatury) a bojleru pro ohřev vody. Kvalitě práce by jistě prospěla verifikace na reálném fyzikálním objektu (třeba i v laboratorních podmínkách).
- Chybí přiložené CD se simulačním schématem, resp. s příslušnými skripty používané v prostředí Matlab/Simulink pro možné ověření uvedených simulačních experimentů.
- Chybí mi finální diskuze omezení zpracované metodiky a jasné vymezení třídy vhodných, resp. nevhodných aplikací a doporučení.
- Ilustrativní příklady jsou voleny jako velmi bezproblémové systémy z hlediska regulace, pomalé a bez výrazných kmitavých složek. Ocenil bych ukázky použití metodiky pro návrh řízení dynamických systémů se složitější dynamikou (rychlejší, kmitavé, s neminimální fází, astatické, ...). Třeba i s negativními ukázkami problémů a omezení.
- Schází mi alespoň pokus o analýzu robustnosti návrhu vzhledem k nepřesnosti modelu, vlivu poruch a případným nelinearitám (alespoň v malém rozsahu).
- Chybí jakákoliv zmínka o známém negativním vlivu klouzavého režimu na namáhání a životnost akčních členů (což často dokonce vylučuje použití v některých technických aplikacích) a o možnosti technické aproximace klouzavých režimů.



K práci mám tyto vybrané připomínky a dotazy, pořadí neodpovídá závažnosti.  
(Podrobnější seznam mých výhrad jsem poskytl disertantovi k případné podrobnější diskuzi.)

- str.6, 8] Uvedený odkaz na práci [36] je v seznamu literatury neúplný.
- str.8, 5] V textu je uvedený odkaz na obr.č.2.2, v práci je však uveden pod označením Graf 2.2. Tato formální nekonzistentnost je v textu celé práce.
- str.8, vztah (2.6) Znaménko u proměnné  $y$  nesouhlasí s odkazovaným obrázkem Graf 2.2 .
- str.8, 9] „... řízení systému s relativním řádem  $r = 1 \dots$ “ Vysvětlete prosím jaký je rozdíl mezi „řádem“ a „relativním řádem“ systému. Nedostatečně zde vysvětlená terminologická nepřesnost vyskytující se v celém textu. (Byť pozorný a bystrý čtenář může v následujících kapitolách sám nahlédnout.)
- str.9, 5] Zde uvedený ilustrační příklad je interpretován jako spojitý regulační obvod s dvoupolohovým regulátorem. Co mám rozumět uvedenou periodou vzorkování  $T_s = 0,01$  s ? Logické vysvětlení nevyplývá ani z textu, ani z odkazovaného obrázku Graf 2.2. Tato nepřesnost se vyskytuje i na mnoha dalších místech v práci.
- str.9, Graf 2.3 Uvedený obrázek jistě neodpovídá popsanému experimentu. Byl průběh skutečně simulován za uvedených podmínek ?
- 1) Jak vysvětlíte 1. zlom červeného průběhu, zřejmě  $y(t)$ , v ca 0,5 sec.? Průběh by měl být podle mého názoru hladký.
  - 2) Rozkmit kmitavého průběhu neodpovídá uvedenému. V takto jednoduchém případě se dá rozkmit průběhu snadno analyticky určit. Při uvedené periodě vzorkování  $T_s = 0,2$  sec. očekávám (pokud tomu dobře rozumím) rozkmit  $\Delta y = 1 - e^{-0,2} \approx 0,18$ .

Stejná výhrada i ke Grafu 2.4 na str.10.

Dotazy k aplikační části práce:

- str.70, 5] „V tomto příkladu je zvolen  $\bar{s}_4 = -\frac{40}{21} \dots$ “ Proč byl tento parametr volen právě takto ? Lze ho volit jinak ? Jak by se to na dynamice klouzavého režimu projevilo ?
- str.87, vztah (6.1) V kapitole 6 je jako ilustrační příklad vhodně zvolena analýza chování bojleru pro ohřev užitkové vody se třemi topnými tělesy. Odkud je jeho stavový model podle (6.1) ? Jak byl určen řád tohoto systému a jeho koeficienty ? Byla provedena identifikace reálného fyzikálního objektu ?
- str.87, 5] Vlastní čísla matice systému modelu podle (6.1) popisujícího dynamiku bojleru pro ohřev vody jsou čtyři (po dvojicích komplexně sdružená), ostatních pět jsou reálná čísla. Dynamika modelu má tedy vlastní kmitavé složky (byť v celkové dynamice nevýznamné). Jak lze tuto dynamiku fyzikálně vysvětlit ?
- str.90, vztah (6.6) Jak byla učena transformační matice  $\mathbf{T}$  podle (6.6) právě v tomto tvaru ?

- str.91, 7] Jak byly voleny konkrétní hodnoty  $\lambda_i$  dynamiky estimačního procesu ? Pouze intuitivním odhadem ?
- str.91, 2] Odkud uvedená hodnota  $x_{0,r}$  ? Plyne z racionálního odhadu počátečního rozvážení ? Odhad počátečního stavu může významným způsobem ovlivnit průběh estimačního procesu.
- str.92, 3] „...systém obsahuje 6 nul...“ Vzhledem k tomu, že uvažovaný dynamický MIMO systém má tři vstupy a jeden výstup, existují tři skalární přenosové funkce. Pokud „nulou“ rozumíme kořen jejich čitatele, tak jedna přenosová funkce má v tomto případě 5, druhá 4 a třetí 6 nul. Kterou z nich uvažujete a proč ?

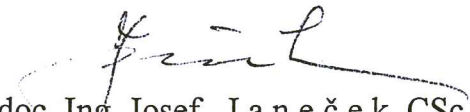
Konstatuji, že žádná z mých výhrad a připomínek zásadně nesnižuje kvalitu disertační práce, která přináší řadu zajímavých výsledků.

#### Závěrečné hodnocení

Souhrnně konstatuji, že Ing. Mgr. Jan Huspeka splnil ve své disertaci cíle, které byly stanoveny. Práce svědčí o hlubokých odborných znalostech disertanta a zvládnutí značně obtížné problematiky. Vhodně zvolené použité metody dovedené až do realizačního závěru prokazují jeho schopnost tvůrčím způsobem aplikovat teoretický aparát oboru na praktické problémy.

Disertační práci doporučuji k obhajobě.

V Liberci dne 11.12.2014

  
doc. Ing. Josef Janěček, CSc.