

prof. Ing. Vladimír Bobál, CSc.

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta aplikované informatiky

Ústav řízení procesů

Nad Stráněmi 4511, 760 05 Zlín 5

Tel.: 57 603 5197, Fax: 57 603 5279

E-mail: bobal@fai.utb.cz

Oponentní posudek doktorské disertační práce

Disertant: **Ing. Libor Havlíček**

Pracoviště: **Univerzita Pardubice, Fakulta chemicko-technologická**

Název disertační práce: **Modelování a řízení vícerozměrové soustavy**

Obsah disertační práce

Náplní předložené disertační práce je sestavení matematického dynamického modelu laboratorního upoutaného vrtulníku a návrh jeho řídicího systému. Vlastní laboratorní model včetně jeho připojení k číslicovému počítači byl navržen a realizován na pracovišti disertanta. Jedná se o tzv. TITO (two inputs – two outputs), tj. dvourozměrový systém s nelineárním chováním. Akčními veličinami v tomto případě jsou změny rychlosti jednotlivých rotorů vrtulníku, výstupními veličinami jsou úhlové rychlosti otáčení hřídelů stejnosměrných elektromotorů. Matematický model byl sestaven na základě matematicko-fyzikální analýzy, přičemž některé parametry modelu byly určeny experimentálně. Navržený matematický model byl ověřen v simulačních podmínkách v programovém prostředí MATLAB/SIMULINK. V závěru práce bylo navrženo decentralizované řízení laboratorního TITO modelu automaticky se nastavujícím PID regulátorem a regulátorem založeném na principu IMC (Internal Model Control), tj. řízení s využitím interního modelu.

Disertační práce má 89 stran včetně 48 odkazů na použitou literaturu, seznam použitých zkratk a symbolů a seznamu obrázků a tabulek. Dá se říci, že je standardně strukturována do šesti kapitol včetně Úvodu a Závěru. Ve druhé kapitole je shrnut současný stav problematiky (jsou uvedeny některé obdobné komerčně dodávané laboratorní modely, rovněž je pojednáno o několika publikacích, jejichž náplní je modelování a řízení vrtulníků). Ve třetí kapitole jsou vytýčeny cíle disertační práce. Obsahem čtvrté teoretické části je stručný přehled teoretických přístupů, které jsou potřebné pro řešení deklarovaných cílů disertační práce. Stěžejní kapitolou je kapitola pátá, jejíž náplní je popis experimentálních činností (návrh a realizace laboratorního modelu, sestavení jeho matematického modelu, verifikace modelu a návrh jeho řízení). V poslední šesté závěrečné části je shrnutí dosažených výsledků disertační práce a návrh budoucích vývojových prací v řešené problematice.

Aktuálnost disertační práce

Je zřejmé, že velká část průmyslových procesů obsahuje více vstupních a výstupních veličin, navíc vykazuje nelineární a stochastické chování, které prostřednictvím regulátorů s pevně nastavenými parametry nelze uspokojivě regulovat v celém pracovním rozsahu. Jednou z možností zvýšení kvality regulace takových technologických procesů je možnost použití moderních metod řízení (robustní, adaptivní, prediktivní, využití prvků umělé inteligence). Obsahem této disertační práce je sestavení matematického nelineárního laboratorního modelu vrtulníku a návrh včetně praktické implementace adaptivního decentralizovaného TITO regulátoru.

Proto téma předložené disertační práce z hlediska současného stavu vědy považuji za vysoce aktuální a to jak z hlediska teoretického, tak i aplikačního. Obsah disertační práce svým zaměřením plně odpovídá studijnímu oboru Technická kybernetika.

Vědecký přínos práce

Řešené téma disertační práce je velmi náročné. Je nutno si uvědomit, že vrtulník je velmi komplikované zařízení z hlediska jeho řízení. Co se týká jeho dynamických vlastností, jedná se o značně nelineární dvourozměrový systém se silnými interakcemi mezi jeho jednotlivými veličinami a se sklonem k nestabilnímu chování.

Přínos práce spočívá jak v oblasti teoretické, tak hlavně aplikační. Podle mého názoru jsou v teoretické části uvedeny pouze základní principy použité teorie a proto čtenář, který bedlivě neprostudoval část experimentální, by mohl konstatovat, že teoretická část práce nepřináší nové poznatky. Já si velmi cením výsledků, které jsou popsány v experimentální části v článku **5.2 Matematický model**, který má charakter teoreticko-experimentální a snad některé poznatky z tohoto článku mohly být zařazeny do teoretické části.

Velkým přínosem práce je návrh, konstrukce a realizace laboratorního modelu vrtulníku a jeho připojení k číslicovému počítači. Z textu disertační práce nemohu posoudit, jakou mírou na těchto pracích se podílel disertant.

Poněvadž IMC regulátory se v adaptivních decentralizovaných verzích běžně nepoužívají, postrádám v článku 5.4.2 základní algoritmickou strukturu navrženého řídicího systému (např. vyjádřenou prostým blokovým schématem decentralizovaných IMC regulátorů). Jsem si vědom, že v uvedeném článku jsou zobrazena simulační schémata všech subsystémů řídicího systému, ale jednoduché blokové schéma by přispělo k lepšímu pochopení navržené řídicí strategie.

Velmi oceňuji univerzální znalosti a praktické dovednosti disertanta, který při matematickém modelování musel aplikovat znalosti nejen z elektrotechniky, ale i technické mechaniky, a samozřejmě musel použít programátorskou zručnost pro práci v programovém prostředí MATLAB/SIMULINK (včetně ověřování sestaveného matematického modelu a jeho řízení v reálném čase).

Publikace základních částí práce

Disertant je samostatným autorem nebo spoluautorem čtyř příspěvků na mezinárodních konferencích konaných v České republice. Dále spoluautorem jedné české časopisecké publikace (Automatizace) a dvou příspěvků ve sbornících Univerzity Pardubice. Výsledky publikační činnosti považuji za uspokojivé, přesto doporučuji, aby disertant se pokusil připravit výsledky své disertační práce pro publikaci na prestižních mezinárodních konferencích pořádaných např. IFAC, IEEE aj. Rovněž stojí za úvahu připravit příspěvek pro publikaci v některém impaktovaném mezinárodním časopise, což není, samozřejmě, věcí jednoduchou. Z výsledků práce je zřejmá rovněž ta skutečnost, že disertant má všechny předpoklady pro další vědecko-výzkumnou práci a pro publikaci jejích výsledků.

Další vyjádření k práci

Disertační práce má dobrou úroveň, včetně grafické úpravy. Práce je napsána přehledně a stručně, a až na malé výjimky jsou jednotlivé části práce logicky provázány. V práci jsem našel několik gramatických a logických chyb, které však zásadně nesnižují kvalitu disertační práce.

Připomínky:

- ◆ Poněvadž se jedná o vysoce nelineární dynamický systém, bylo by zajímavé proměřit statické charakteristiky hlavní i ocasní rotorové části.
- ◆ Funkční závislosti zobrazené na obr. 7, 8, 9 (str. 35 – 36) byly určeny podle vztahů (57), (66), (90), které jsou uvedeny až na str. 62 – 90, což poněkud působí těžkostí při studiu disertační práce.

- ◆ V článku 5.3.1 by bylo zajímavé uvést porovnání přechodových změn u matematických modelů a reálného systému hlavního rotoru, tak jak je to uvedeno u ocasního rotoru (viz obr. 46).
- ◆ U obr. 47 – 49 by bylo vhodné provést více skokových změn referenčního signálu w . Rovněž by byly zajímavé průběhy jednotlivých akčních veličin při takto navrženém decentralizovaném řízení.
- ◆ Na str. 84 je nesprávný odkaz na citaci [39].
- ◆ Na str. 88 je neúplná citace [29] a není odsazen druhý řádek u citace [34].
- ◆ Str. 87 – 89 nejsou zarovnány do bloku.
- ◆ Zásadní připomínku mám k článku 5.4.2, který považuji za jeden ze stěžejních částí disertační práce. Jednu poznámku k tomuto článku jsem již uvedl ve třetím odstavci posudku. V článku jsou uvedena podrobná simulační schémata jednotlivých částí adaptivního číslicového IMC regulátoru. V tomto článku však postrádám řídicí algoritmus pro výpočet akčních zásahů, který využívá průběžné odhady parametrů modelu soustavy. Na začátku článku 5.4.3 je však uvedeno, že adaptivní IMC regulátor byl použit pouze pro regulaci vertikálního úhlu. Jedná se tedy o adaptivní **decentralizované** řízení použitím IMC strategie?

Tyto připomínky nejsou zásadní, ale spíše by měly pomoci disertantovi v jeho další výzkumné a publikační činnosti.

Dotazy pro disertanta:

1. Zaujmout stanovisko k poslední připomínce.
2. Podle mně dostupných literárních pramenů je metoda IMC navržena pro implementaci spojitých regulátorů. Naznačte stručně její využití pro návrh diskrétních verzí regulátorů včetně možnosti diskrétního řízení procesů s dopravním zpožděním.

Závěr

Ve své disertační práci prokázal disertant schopnost samostatné tvůrčí vědecké práce. Předložená disertační práce obsahuje původní a autorem publikované výsledky vědecké práce. Disertační práce splňuje veškeré potřebné náležitosti stanovené v § 47, odst. 4 zákona č. 111/98 Sb.

Předloženou disertační práci Ing. Libora Havlíčka proto doporučuji k obhajobě pro udělení akademického titulu Ph.D.

Ve Zlíně 26. července 2010


 prof. Ing. Vladimír Bobál, CSc.

Oponentní posudek disertační práce

Ing. Libora Havlíčka

Modelování a řízení vícerozměrové soustavy

Disertant se ve své práci zabývá modelováním a řízením vícerozměrových soustav a jako příklad použil upoutanou helikoptéru. Autor ve své práci zvolil k popisu chování helikoptéry vícerozměrový adaptivní ICM regulátor.

Práce si klade za úkol vyřešit

- návrh laboratorního systému, včetně způsobu ovládání systému, způsob měření požadovaných veličin, připojení systému k počítači a komunikaci s programovým prostředím MATLAB-SIMULINK,
- matematický model systému, tedy popis dynamického chování systému nelineárními diferenciálními rovnicemi,
- simulace a verifikace matematického modelu. Cílem je realizace modelu v programovém prostředí MATLAB-SIMULINK,
- návrh řízení pro reálný laboratorní systém včetně realizace bloků identifikace, diskretního modelu regulovaného systému a diskretní IMC regulátoru.

Práce je rozdělena do šesti kapitol, kde v úvodní kapitole Ing.Libor Havlíček popisuje současný stav problematiky modelování a řízení vícerozměrových soustav. Další kapitola je věnována stanovením cílů disertační práce, včetně možnostem využití MATLABU. V kapitole Teoretická část je popsána možnost identifikace matematicko-fyzikální analýzou a experimentální identifikací. Dále je uvedena možnost řízení vícerozměrových soustav. V následující kapitole Experimentální část je uveden návrh a realizace laboratorního modelu. Nejdůležitější částí uvedené práce je kapitola 5.2 Matematický model. Zde je uvedeno blokové schéma systému, matematický model DC motoru, mechanické části motoru, nelineární a lineární model motoru, model aerodynamického chování rotoru atd. Kapitola Verifikace modelu porovnává lineární a nelineární model motoru hlavního a ocasního rotoru v prostředí MATLABU, v následujícím odstavci je provedeno porovnání chování modelu a reálného systému.

Dotazy:

- Str. 25 K vyhodnocení naměřených dat se používá nejčastěji metoda nejmenších čtverců....? –
- 1. U neparametrických modelů je nutné použít konvolutorní integrál (v časové oblasti) resp. FT (ve frekvenční oblasti). Jaký tvar modelu se v těchto případech použije?
- 2. Existují jiné modely, nežli je v práci použito. Viz. str. 29.
- Jak silně ovlivňuje rozdíl mezi helikoptérou a laboratorním systémem na přesnost pro reálný případ. Viz. str.33

Připomínky:

- Využívání čárek k rozdělení věty je poněkud nezvyklé, např. str.16¹³, str. 17⁷ atd.
- Řecká písmena se nezapisují kurzívou.

V práci jsem nenašel závažnější chyby, graficky je dobře zpracována a pan Ing. Libor Havlíček prokázal vypracovat disertační práci na požadované úrovni.

Z uvedených důvodů

doporučuji

práci k obhajobě.

Liberec 15.7.2010


Prof. Ing. Miroslav Olehla, CSc.

Oponentský posudek disertační práce

Autor: **Ing. Libor Havlíček**
Univerzita Pardubice, Fakulta chemicko-technologická

Téma: **Modelování a řízení vícerozměrové soustavy**
(Modelling and Control of Multivariable System)

Obor: Technická kybernetika

Školitel: Doc. Ing. Jiří Macháček, CSc.

Tématem práce je problematika automatického řízení laboratorního vícerozměrového systému, která je obecně dost obtížná a stále poskytuje prostor pro aplikaci nových přístupů vedoucích ke zvyšování kvality řízení procesu. Z tohoto důvodu a také vzhledem k použitelnosti ve výuce považují téma práce za aktuální.

Doktorand si stanovil tyto základní cíle práce:

- navrhnout a zkonstruovat laboratorní systém jako objekt řízení,
- vytvořit a ověřit matematický model tohoto systému,
- navrhnout a ověřit řízení systému.

V teoretické části práce autor uvádí principy matematického modelování a analyzuje vhodné teoretické přístupy ke způsobu řízení vícerozměrových soustav. Tato část je zpracována poměrně stručně (10 stran), ale zahrnuje podstatné informace se zřetelem k tématice práce.

Experimentální část práce je věnována řešení výše zmíněných cílů.

- V kap. 5.1 autor podrobně (16 stran) popisuje konstrukci laboratorního modelu, a to jak mechanickou stránku, tak měřicí a ovládací elektroniku. Popis je velmi názorný a je z něj patrný velký rozsah konstruktérské práce.
- V kap. 5.2 a 5.3 je detailně popsáno (27 stran) odvození matematického modelu systému a jeho verifikace. Analýza je provedena seriózně, předpoklady odvození jsou oprávněné a úvahy a postupy jsou logické. Výsledný model je poměrně složitý. Některé jeho části autor linearizuje, ale není patrné, které konkrétní rovnice nakonec byly při programování v Simulinku použity. Schéma programu (obr. 43, str. 73) by bylo vhodné doplnit čísly rovnic, aby bylo i pro nezasvěceného čitelné. Správnost výsledných rovnic jsem detailně nekontroloval, ale chyby v nich patrně nejsou, jak ukazují prezentované výsledky simulace a jejich ověření porovnáním s experimentálními daty.
- Kapitola 5.4 obsahuje návrh, realizaci a ověření řízení systému. Je dle mého názoru až příliš stručná (6 stran) a ne dost názorná v tom smyslu, že pokud by někdo chtěl postup podle tohoto popisu zopakovat, asi by se hodně zapotil. Výsledky ověřování jsou poměrně slušné, ale nemohu se zbavit pocitu, že decentralizované řízení s PID regulátory vypadá alespoň co do rychlosti zásahu lépe než to s vnitřním modelem, ač by se dal očekávat opak. Může to být způsobeno dlouhou periodou vzorkování, ale je škoda, že se autor omezil na konstatování této skutečnosti a nesnažil se situaci řešit např. naprogramováním algoritmů v rychlejším jazyce než je Simulink (i když chápu, že byl patrně tlačěn časem).

K formální stránce práce mám několik drobných připomínek:

- str. 27, kap. 4.3, první odrážka:
formulace „k popisu přenosů se používají matice, k popisu přenosů vektory“ je nějaká divná
- str. 31, obr. 6:
symbol d není vysvětlen; dopravní zpoždění, pro které je dříve použit (str. 29) to patrně není
- str. 31, rov. (17):
význam symbolu r není v textu vysvětlen, v seznamu symbolů je r poloměr vinutí cívky

- str. 38, tab. 3:

nerozumím vzájemné relaci údajů „poloměr ocasního rotoru 0,07 m“ a „délka vrtule ocasního rotoru 0,18 m“

Jinak musím konstatovat (jsem ovšem v tomto smyslu poněkud alergický), že sloh práce je poněkud kostrbatý a pravidla větné stavby jsou poměrně často porušována. Pokud tuto skutečnost pomínu, je práce napsaná docela přehledně a její členění je logické. Výsledky simulací jsou názorně graficky dokumentovány, srozumitelnosti některých obrázků by ale prospěl podrobnější popis.

Dále bych měl několik otázek a byl bych rád, kdyby na ně doktorand při obhajobě odpověděl:


1. Na str. 68 asi uprostřed se hovoří o „pružné síle“ – ke kterému konstrukčnímu prvku se vztahuje?
2. Na str. 69 u rovnice (87) se hovoří o „momentu síly pružiny“, v kap. 5.1.4 se o žádné pružině nemluví (asi to souvisí s mojí předchozí otázkou); co se tím míní? Je to z hlediska přesnosti modelu síla podstatná?
3. Řízení s PID regulátory dost kmitá (str. 77, obr. 47); nebylo by vhodnější zvolit jinou metodu nastavení regulátorů než Ziegler – Nicholsovu? Pokud ano, proč jste to nezkusil?
4. Systém má být použit ve studentských laboratořích; jaké konkrétní úkoly by na něm studenti měli řešit?

Jestliže mám v závěru posoudit práci jako celek, tak konstatuji:

- zadání je formulováno jako aplikační a práce tomu svým charakterem odpovídá,
- stanovené cíle byly splněny, i když by se ještě daly některé části vylepšit,
- množství práce, které muselo být vykonáno, je nadstandardní,
- doktorand prokázal, že je schopen samostatné odborné práce.

Předložená zpráva podle mého názoru splňuje požadavky kladené na disertační práci, proto doporučuji práci k obhajobě.

V Praze dne 10. srpna 2010.



doc. Ing. Miloš Kmínek, CSc.

Ústav počítačové a řídicí techniky VŠCHT Praha