

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

V Praze, 8. června 2013

Posudek doktorské disertační práce
Doc. Ing. Iva Petráše, PhD.
**„Fractional-order Systems and Fractional Order Controllers :
Methods for their Modelling, Identification and Implementation“**

Tento posudek jsem vypracoval na žádost Slovenské komise pro vědecké hodnosti MŠVVaŠ SR, zastoupené předsedou komise pro obhajoby doktorských disertačních prací, č. 010102, Prof. Ing. Miroslavem Fikarem, DrSc. Při hodnocení osobnosti uchazeče jsem se řídil Vyhláškou SKVH č. 302/1990 Zb.

Disertační práce je zpracována jako komentovaný soubor publikovaných prací a celkově představuje poměrně rozsáhlý materiál o cca 350 stranách. Soubor se skládá z jedné 218 stránkové monografie s názvem „*Fractional-order Nonlinear Systems: Modelling, Analysis and Simulation*“, z osmi článků v mezinárodních recenzovaných časopisech a dvou příspěvků ve sbornících, komentář je přibližně třicetistránkový. Tyto publikace odrážejí zhruba patnáct posledních let výzkumné činnosti autora ve velmi aktuální oblasti tzv. systémů neceločíselného řádu a jejich aplikace v systémech řízení, kde dnes představují velmi slibnou alternativu inovace. Uvedené publikace autora byly již dříve důkladně recenzovány a také se již dočkaly mezinárodního ohlasu registrovaného v mezinárodních impaktních databázích.

Téma modelů neceločíselného řádu má mnohem delší historii než by odpovídalo jeho sporadickému zastoupení v literatuře automatického řízení. Existence derivací, jejichž řád je racionální číslo, byla předvídána již v době zakladatelů infinitesimálního počtu, teprve však ve druhé polovině 20. století, zejména díky vývoji počítačové techniky, nastaly podmínky k jejich důslednějšímu výzkumu a úspěšné aplikaci. Postupně se rozvíjely představy o smyslu derivací jiného než celočíselného řádu a hlavně v téže době, v některých oblastech fyziky, např. v teorii viskoelastických materiálů, v teorii elektrických vlastností polymerů anebo v popisu jevů v porézních materiálech, se objevila přirozená potřeba pracovat s diferenciálními rovnicemi jiného než celočíselného řádu. Ve spolupráci s prof. Podlubným uchazeč záhy rozpoznal veliký potenciál této nové oblasti matematiky a zaměřil se především na výzkum možností aplikace tohoto teoretického aparátu na nelineární dynamické jevy a na rozšíření teorie řízení o možnosti využití modelů neceločíselného řádu. Mezinárodní uznání přínosu uchazeče v této oblasti lze považovat za dostatečně prokázané.

Tématické spektrum výzkumu doc. Petráše je na jedné straně soustředěno na výzkum dynamických systémů neceločíselného řádu včetně nelineárních, na druhé straně je však také pozoruhodně široké tím, že výzkum této třídy systémů je současně veden v několika směrech jejich aplikace, zejména pak v těchto problémových okruzích:

1. Zcela specifický je jeho přínos do teorie nelineárních dynamických systémů neceločíselného řádu, včetně otázek jejich stability, speciálně pak generování tzv. deterministického chaosu těmito systémy.

2. Za velmi významný považuji ten směr výzkumu aplikací, které jsou založeny na využití řetězových zlomků a na ekvivalenci nekonečných „žebříkových“ analogových schémat s přenosovými funkcemi neceločíselného řádu.
3. Zásadního přínosu ovšem autor dosáhl v syntéze řízení systémů neceločíselného řádu a v návrhu regulátorů s integrační a derivační činností neceločíselného řádu.

Ve všech těchto okruzích výzkumu autor dosáhl významných původních přínosů. Do prvního z nich patří především jeho již zmíněná monografie „*Fractional-order Nonlinear Systems: Modelling, Analysis and Simulation*“, příloha P-1, kde mj. rozšířil obvyklé oscilátory pro generování chaotických signálů, Lorenzova, Rösslerova, Duffingova, popř. Van der Polova typu a předložil jejich zobecnění na systémy neceločíselného řádu (např. typ Chua-Podlubný) a vyšetřil podmínky vzniku chaotického chování. Za nové je třeba považovat i některé obraty v zobecnění stavového prostoru pro systémy neceločíselného řádu. Významné jsou výsledky dosažené v problematice metod identifikace parametrů systémů neceločíselného řádu, bez nichž je úspěšná aplikace nemyslitelná.

Pro digitální implementaci modelů a regulátorů neceločíselného řádu považuji za mimořádně významný výzkum tzv. „*domino ladders*“, tj. řetězovitých zapojení analogových prvků, jejichž přenosy s rostoucím počtem článků konvergují k některým funkcím neceločíselného řádu. Podle mne tyto analogie přinášejí technikům to, co jim zpravidla na modelech neceločíselného řádu nevyhovuje, totiž nedostatek bezprostřední představitelnosti jejich podstaty. Příklad integrace půltého řádu v příloze P-4 je v tomto směru velice přesvědčivý a také mimo jiné dobře ukazuje, jak zásadní je rozdíl mezi implementací obyčejné integrace (1. řádu) a integrace řádu půltého. Tím se již existujícím, ale jen zcela abstraktně chápaným definicím derivací neceločíselného řádu a z nich odvozených diferenciálních rovnicím, daří vtisknout inspirující fyzikální interpretaci a tím otevřít cestu k technické aplikaci.

Ve třetím z uvedených okruhů uchazeč dosáhl uznaného podstatného přínosu v praktickém využití regulátorů s integrační a derivační činností neceločíselného řádu zejména rozšířením metody umístování dominantních pólů na regulační smyčky s regulátorem s integrací, resp. derivací neceločíselného řádu. V těchto případech charakteristická rovnice regulačního obvodu je také neceločíselného řádu, když její levá strana je tzv. pseudopolynom. Předepsáním dominantních pólů vznikne tak zvláštní rovnice, jejímž řešením dostaneme právě neceločíselné řády λ, δ integrace resp. derivace regulátoru zobecněného typu $\mathbf{PI}^{\lambda}\mathbf{D}^{\delta}$, s nimiž jsou předepsané dominantní póly dosaženy. Tradiční varianty regulátorů **P**, **PI**, **PD** a **PID** se v tomto pohledu stávají zvláštními případy tohoto zobecněného pojetí, když za λ, δ zvolíme jedničku nebo nulu. Jak lze očekávat, pro soustavy, jejichž popis vede na diferenciální rovnice neceločíselného řádu, je možné regulátorem neceločíselného řádu $\mathbf{PI}^{\lambda}\mathbf{D}^{\delta}$ dosáhnout lepší kvality řízení, než se standardním **PID**. Je také třeba si uvědomit, že zatímco v nepřiliš vzdálené minulosti by myšlenka regulátoru $\mathbf{PI}^{\lambda}\mathbf{D}^{\delta}$ měla jen ryze akademický smysl, dnes její digitální implementace je naprosto reálná. A doc. Petráš, se velmi významným způsobem zasloužil o vytvoření těchto reálných podmínek pro úspěšnou implementaci a rozšíření těchto regulátorů v praktickém využití.

Pojetí disertace formou komentovaného souboru publikovaných prací mi poněkud usnadňuje mou oponentskou úlohu. Minimálně devět z jedenácti příloh jsou publikace, které prošly přísným recenzním řízením vedeným redakčními radami mezinárodních časopisů resp. nakladatelství. Proto jsem se soustředil hlavně na celkové uspořádání a výběr těchto publikací a na výstižnost a správnost shrnutí jejich celkové šíře na třiceti stranách komentáře. Soudím, že komentář dobře shrnuje autorovy hlavní výsledky, dokládá jejich původnost a v některých případech i připomíná mezinárodní ohlas.

V rámci obhajoby disertační práce bych rád autorovi položil otázky, které mi vyvstaly při čtení textu. Jsou to zejména tyto problémy:

1. Ideální derivační činnost ($\delta = 1$) regulátoru v klasickém řízení považujeme za fyzikálně neuskutečnitelnou operaci a proto její reálnou implementaci modifikujeme tak, aby se řády na obou stranách diferenciální rovnice regulátoru aspoň vyrovnaly. Jak je třeba se na tento problém dívat u derivace neceločíselného řádu?
2. Pokud jde o volbu délky vzorkovací periody T , připadá mi, že takové operace, jako např. „integrace půltého řádu“ $s^{-0.5}$, budou v diskrétní implementaci vyžadovat dosti krátkou periodu vzorkování k tomu, aby byl zachován charakter např. jejich přechodové charakteristiky. Je třeba nějak modifikovat obvyklé frekvenční podmínky volbě vzorkovací frekvence u přenosů neceločíselných řádů soustavy a regulátoru?
3. Jakou má autor zkušenost s volbou předepsaných dominantních pólů, má smysl také u systémů neceločíselného řádu využívat hodnoty kritické frekvence regulační smyčky? Mám na mysli možnost využití zavedeného experimentu s ideální reléovou smyčkou k volbě vhodné polohy předepsaných pólů při vyhledání exponentů λ, δ pro danou aplikaci.

Závěr

Doktorská disertační práce doc. Petráše přináší dostatečně široký a prestižní soubor významných původních výsledků dlouholetého výzkumu modelů dynamických soustav neceločíselného řádu. Skoro všechny podstatné výsledky shrnuté v disertaci prošly přísnou recenzí před uveřejněním v mezinárodním časopisu nebo lektorováním v případě monografie a větší část z nich se dočkala také kladného mezinárodního ohlasu. Autorovi bylo takto přiznáno prvenství v několika myšlenkách a výsledcích, které pomáhají k tomu, aby z původně abstraktního teoretického oboru matematiky se systémy neceločíselného řádu postupně staly odvětvím rychle se rozvíjejících a užitečných aplikací. Dospěl jsem k přesvědčení, že předložená disertace doc. Ing. Iva Petráše, PhD. svým původním přínosem splňuje kritéria stanovená § 2 odst. 1 Vyhlášky SKVH č. 302/1990 Zb. a proto zcela jednoznačně doporučuji, aby po úspěšné obhajobě byl autorovi přiznán titul DrSc. v oboru 020313 Riadenie procesov.

V Praze, 8. června 2013



Prof. Ing. Pavel Zítek, DrSc.