Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Doc. Ing. Libor Pekař, Ph.D.
Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav automatizace a řídicí techniky
Nad Stráněmi 4511, 76005 Zlín
e-mail: pekar@utb.cz

OPONENTSKÝ POSUDEK DISERTAČNÍ PRÁCE

Název práce:	**Saturation effect and anti-windup schemes for time-delay systems**
Autor (disertant):	**Ing. Jaroslav Bušek**
Studijní program:	**Strojní inženýrství**
Studijní obor:	**Technická kybernetika**

Oponentský posudek je vypracován na základě dopisu prof. Ing. Tomáše Jirouta, Ph.D., proděkana pro vědeckou a výzkumnou činnost Fakulty strojní Českého vysokého učení technického v Praze, ze dne 17. 6. 2019.

Disertační práce má formu monografie a obsahuje původní a uveřejněné výsledky a taktéž výsledky přijaté k uveřejnění, s významným mentálním podílem autora, v souladu s § 47 odst. (4) zákona č. 111/1998 (zákon o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů).

Předložená práce v úvodu obsahuje abstrakt, seznamy tabulek, obrázků a použitých zkratek a její obsah. Samotný text práce má 115 stran, následuje 1 strana s přílohou a 17 stran autorových vlastních i cizích referencí. Postrádám autorův odborný životopis.

Práce je členěná do 8 kapitol. Jednotlivé kapitoly disertační práce na sebe logicky navazují a dostatečně dobře uvádějí přínos kolektivu autora a jeho spolupracovníků pro řešení dané problematiky. Po úvodním slově v kapitole 1 následuje kapitola 2 obsahující přehled problematiky a současný stav jejího řešení z oblastí popisu, stability a řízení systémů se zpožděním, signálových tvarovačů a anti-windup strategií. Kapitola 3 definuje vytčené cíle disertační práce, které jsou podrobně rozebrány a řešeny v dalších kapitolách. Kapitola 4 se zabývá analýzou astatických vlastností zpětné vazby se zpožděním. V kapitole 5 čtenář nalezne souhrn studentova přínosu k optimálnímu ladění anti-windup kompenzační smyčky pro různá typy systémů se zpožděním nízkého řádu v kombinaci s různými zákony jejich řízení. Na tuto kapitolu navazuje kapitola 6, které přináší originální návrh anti-windup kompenzátoru s anizochronní zpětnou vazbou a pozorovatelem stavů regulátoru. Teoretické výsledky z kapitol 5 a 6 jsou dále rozšířeny v kapitole 7 o studium vlivu saturace na kvalitu potlačení kmitavých módů u flexibilních systémů pomocí zpožděných tvarovačů signálu. Zde je velký důraz kladen na simulační i experimentální ověření. Konečně, shrnutí celé disertační práce a dosažených výsledků vzhledem k vytčeným cílům je provedeno v kapitole 8.

Nyní podrobněji k obsahu a především faktické i formální kvalitě kapitol 2 až 7.

Kapitola 2 má po formální stránce velmi vysokou kvalitu. Jen výjimečně se vyskytují gramatické nedostatky (např. „concepts… has“ na str. 20), chybně nebo nevhodně použitá či zavádějící slova (např. „associative“ u (2.10), „i.e.“ na str. 20), chybějící či naopak přebytečná větná interpunkce, chybně uvedená indexace (např. τ_M na str. 8, $\hat{\mathbf{A}}_0(s)$ za (2.41)). Toto rámcové hodnocení formálních náležitostí je de facto platné pro celou práci. Dále bych vytknul to, že Obr. 2.1 není v textu uvozen; značení konstant v Obr. 2.7 neodpovídá jejich značení v doprovodném textu.

Co se týče výkladové stránky, podle mého názoru by bylo např. vhodné uvést matici pozorovatelnosti (2.44) již dříve než na str. 21. nebo uvést, že vztah (2.33) se vztahuje k (2.29). Zkratka „IMC“ není v textu práce (u jejího prvního výskytu) definována – to se týká i některých jiných zkratek uvedených v celé práci. Za nepříliš vhodné považuji značit shodným písmenem (*n*) počet stavových veličin řízeného systému i regulátoru. Diskutabilní taktéž je, zda definovat značení vektorů stavu a vstupů až za (2.2), když už se vyskytují v (2.1) – naopak za (2.5) už znovu být uvedeny nemusí. U vztahu (2.3) doporučuji uvést, že uvedená transformace se týká *soustředných* zpoždění. Na str. 7 jsou zmíněny regulátory popsané zpožděnými *diferenciálními* rovnicemi a označeny jako třída tzv. „descriptor systems“ – ovšem již ve vztahu (2.9) na str. 5 jsou tyto systémy definovány pomocí zpožděných *algebro-diferenciálních* rovnic. V textu bezprostředně před (2.20) se uvádí, že metody přiřazení konečného spektra (FSA) lze použít i pro vnitřní (*stavová*) zpoždění, ale vztah (2.20) se používá pouze pro *vstupní* zpoždění. V podkapitole o anti-windup schématu založeného na

pozorovateli stavu na str. 28 a 29 bych uvítal vztah analogický s (6.2) pro lepší pochopení problematiky.

Po faktické stránce se jedná o dosti podrobný a zdařilý přehled současného stavu řešené problematiky. Přesto jsou zde drobné nedostatky. Vztahy (2.5) - (2.7) obecně připouští i $\mathbf{E}_j \neq \mathbf{0}$, proto ve (2.8) musí být horní mez indexu *i* rovna *n* (nikoliv *n*–1). Na str. 6 je v úvodu podkapitoly 2.1.1 uvedena podmínka *asymptotické* stability systémů se zpožděním – ovšem tato platí jako ekvivalence pro pojem *exponenciální* stability (asymptoticky stabilní systém se zpožděním může mít vlastní čísla ležící i na imaginární ose). Na téže straně je uvedeno, že vztah (2.10) uvádí asociovanou diferenční rovnici (associated difference equation) – avšak tento vztah je ve skutečnosti až její Laplaceova transformace.

V **kapitole 3** jsou definovány 4 cíle disertační práce:

Cíl 1 – Analýza astatismu regulátorů vyplývajících z aplikace principů řízení s vnitřním modelem (IMC) pro systémy se zpožděním, a to jak v časové, tak i frekvenční oblasti.

Cíl 2 – Analýza a návrh schémat pro potlačení wind-up efektu pro systémy nízkého řádu se vstupně-výstupním zpožděním.

Cíl 3 – Zobecnění výsledků z Cíle 2 pro návrh anti-windup schémat pro systémy vyšších řádů i se zpožděními ve stavech při využití principů IMC.

Cíl 4 – Studium vlivu saturace na kvalitu potlačení kmitavých módů pomocí tvarovačů signálů se zpožděním ve zpětné vazbě.

Vytčené cíle jsou definovány srozumitelně a logicky na sebe navazují. Z formálního hlediska jsou v této kapitole pouze velmi drobné nedostatky (např. dvojitá pomlčka či „prof.“ na místo „Prof.“ na str. 34).

Záměrem **kapitoly 4** je poukázat na nutnost zaobírat se zpožděními při výskytu saturace v řídicí smyčce na základě skutečnosti, že kompenzační regulátory se zpožděním vykazují integrační efekt. Tato autorova úvodní studie byla nedávno prezentována na mezinárodní konferenci (viz publikace [B11]). Jmenovitě je provedena analýza astatismu zpožďujících regulátorů, počáteční hodnoty a asymptoty sklonu jejich přechodových charakteristik, spolu s možným využitím aproximace zpožďujících členů.

Text kapitoly má po všech stránkách velmi vysokou úroveň. Zvlášť oceňuji zajímavý výsledek uvedený jako Teorém 4.2.1. V podkapitole věnované aproximaci zpoždění však postrádám využití konečně-rozměrné aproximace celého zákona řízení, nikoliv pouze jednotlivých zpožďujících členů, či alespoň zmínku o této možnosti. K této kapitole mám 3 otázky:

Otázka 1: Jaký význam má znalost asymptoty průběhu přechodové charakteristiky kompenzačního regulátoru se zpožděním v souvislosti s návrhem anti-windup algoritmů?

Otázka 2: Je možné na místo Teorému 4.2.2 a vztahů (4.11), (4.12) použít pro odvození výsledku (4.13) obecné znalosti, že Laplaceův obraz Diracovy delta funkce je roven 1, a limity částečných součtů geometrické řady, která je využita na konci důkazu Teorému 4.2.1? Pokud ne, proč?

Otázka 3: Je možné na místo vztahu (4.11) použít pro odvození výsledku (4.15) standardní větu o koncové hodnotě v kombinaci s L'Hôspitalovým pravidlem (jak je naznačeno ve vztahu na str. 43)? Pokud ne, proč?

Kapitola 5 se zabývá laděním zpětnovazebních anti-windup schémat s cílem minimalizovat kritérium absolutní regulační plochy (IAE). Řízený systém je modelován standardními modely 1. a 2. řádu se zpožděním ve vazbě vstup-výstup, avšak tyto jsou následně upraveny do bezrozměrných tvarů, což umožňuje jejich využití pro širokou třídu systémů. Přitom jsou použity klasický (bezrozměrný) PI regulátor a zpožděný kompenzační regulátor na základě IMC principů, pro který je navržena funkcionální anti-windup zpětná vazby.

Kapitola svým obsahem rozšiřuje dvě práce dříve publikované jako kapitola v knize ([B2]), kde je student uveden jako spoluautor, a jako konferenční příspěvek ([B6]), jehož je student hlavním autorem. Návrh funkcionální zpětné vazby však představuje úvodní, dosud nepublikovanou, studii.

Ačkoliv autorem v práci uvedené myšlenky zavedení bezrozměrných modelů je zřejmě prof. Zítek, je nutné ocenit studentovu schopnost aplikace těchto modelů na problém návrhu anti-windup zpětné vazby. K této podkapitole lze vznést pouze drobné formální výtky – např. v (5.4) je statické zesílení označeno symbolem k, kdežto bezprostředně za tímto vztahem je použito K. Co se týče studie optimalizace statické zpětné vazby pro potlačení wind-up efektu, považuji za vhodnější zahrnout do účelové funkce (5.8) i rychlost změn hodnot nesaturované akční veličiny. Chyba saturace je v textu práce definována dvakrát (str. 52 a 61). Celkově se však jedná o podrobnou a zdařilou studii.

Podle mého názoru nejzajímavější podkapitolou je ladění dynamické anti-windup zpětné vazby. Přináší myšlenku zavedení členu s rozloženými zpožděními do této zpětné vazby pro získání konečně-rozměrného zákona řízení. Z důvodu lepší srozumitelnosti výkladu bych doporučil ke vztahům (5.30) a (5.31) uvést obecný tvar Laplaceova obrazu členu vyjádřeného v časové oblasti Stieltjesovým integrálem. Z formálního hlediska lze drobně vytknout i nedůsledné ohraničení Tabulek 5.1 a 5.2.

Kapitola 6 rozšiřuje výsledky získané v předešlé kapitole o anizochronní pozorovatel stavu pro systémy vyšších řádů. Cílem je získat několik málo ladicích parametrů anti-windup zpětné vazby, které se vhodně nastaví užitím kritéria minima kvadratické regulační plochy. Poměrně stručný teoretický výsledek je ověřen na obsáhlém simulačním příkladu řízení laboratorního tepelného modelu se vstupně-výstupními i stavovými zpožděními. Obsah kapitoly tvoří podstatnou část příspěvku [B10] zaslaného k posouzení do prestižního časopisu *ISA Transactions* (WoS: Q1, Q1, Q1), u nějž je student uveden jako hlavní autor.

V této kapitole je zdařile spojena myšlenka klasické anti-windup zpětné vazby a stavového pozorovatele v kombinaci s funkcionální (anizochronní) stavovou zpětnou vazbou, která se nalezne řešením Ackermannovy formule pro konečný počet předepsaných vlastních čísel regulátoru.

Z faktického hlediska bych upozornil na nejasnou formulaci ve vztahu (6.3) a v textu pod ním. V (6.3) je σ uvedeno ve smyslu *záporně* vzatého násobného reálného pólu, kdežto v textu se hovoří o pólu samotném. Potom podmínka $\Re(\sigma) > 0$ je korektní vzhledem k (6.3) (resp. (6.1)), avšak nekonzistentní s okolním textem. Dále je na první pohled poněkud matoucí definice $\delta(u_{\max})$ podle (6.29), kde $u(t)$ je uvažováno bez saturačního omezení (tzv. lineární), kdežto v Obr. 6.7, 6.10 a 6.11 je tato veličina označena $u_{\text{lin}}(t)$, přičemž $u(t)$ značí vypočtený výstup regulátoru před omezujícím nelineárním členem. Drobná formální výtka je směřována ke vztahu (6.15), kde na místo exponentu r má být uvedeno N_F.

Otázka 4: Objasněte význam lokálně optimálních hodnot σ v Obr. 6.8. Např. pro $T_f = 1$ s je toto optimum vyjádřeno čárkovaně s hodnotami (přibližně) $\sigma = 1, 3.4, 3.6$, což však nekoresponduje s Obr. 6.9, kde zřejmě $\sigma \approx 0 - 0.2$.

Otázka 5: Bylo uvažováno o využití jiného dolnopropustného filtru ve vztahu (6.15), než je zde uvedený? Např. s kmitavými módy jako v (5.13) nebo s optimalizovanou strukturou, jak je naznačeno na str. 13 podle [55]. Pokud ne, proč?

V simulačně a experimentálně zaměřené **kapitole 7** se student souhrnně zaobírá vlivem saturačního omezení akční veličiny pro zpětnovazební zpožděné signálové tvarovače navržené za účelem potlačení vlastních frekvencí kmitů flexibilních částí mechanických systémů. Přitom je posuzován jeho vliv nejen na kvalitu kompenzace vibrací, ale i celé zpětnovazební regulační smyčky. Prezentovány jsou podrobně dva experimenty; jmenovitě se jedná o simulační i laboratorní ověření vlivu saturace akční veličiny na potlačení kmitů a řízení pohybu kyvadla zavěšeného na vozíku a o simulační ověření vlivu saturace a klasické anti-windup zpětné vazby na řízení náklonu a horizontální rychlosti bezpilotní kvadroptéry

nesoucí náklad. Přitom je použit zpětnovazební signálový tvarovač pro potlačení kyvů nákladu.

První z uvedených experimentů byl prezentován na dvou významných mezinárodních konferencích (práce [B3] a [B5]). Nelineární saturační člen je zde chápán jako porucha a kompenzace jeho vlivu na potlačení kmitů je dobře simulačně i experimentálně prokázána. Výsledky simulací řízení bezpilotní kvadroptéry byly publikovány taktéž na dvou významných mezinárodních konferencích (práce [B7] a [B8]). V návrhu řízení je využita klasická kaskádová struktura a inverzní tvarovač signálů ve zpětné vazbě. Navíc byla využita metoda dekompozice flexibilního módu pro jeho určení. V primární zpětnovazební řídicí smyčce je použito jednoduché anti-windup schéma s proporcionálním zpětnovazebním členem. Jedná se o velmi náročnou úlohu řízení vícehmotového systému, která vede na nekonečně-rozměrný systém řízení. Opět je ukázáno potlačení vlivu saturace na regulační pochod. Student stručně zmiňuje taktéž alternativní přístup publikovaný v práci [B9], u níž je uveden jako spoluautor.

V této kapitole se vyskytují pouze drobné formální a výkladové nedostatky. Např. rovnice (7.13) je nevhodně rozdělena do dvou řádků na různých stranách. Taktéž na první pohled není zřejmé, proč se na str. 109 autor zmiňuje o pohybu v osách x i y, když samotný návrh řízení je proveden toliko pro horizontální osu.

Otázka 6: V čem se principiálně liší algoritmus pro potlačení kmitů nákladu pomocí vertikálních pohybů prezentovaný v práci [B12]?

Celkově lze konstatovat, že **odborná úroveň** předložené disertační práce, jakož i její **teoretický** i **praktický přínos** a **vhodnost použitých metod řešení** jsou na vysoké úrovni. Všechny vytčené cíle byly splněny. Oceňuji i téměř precizní **formální úroveň** práce (pro úplnost bych jen marginálně vytknul překlepy v referencích [B4] a [34]).

Postrádám však podrobnější komentář konkrétního studentova přínosu u některých výsledků, na kterých se podílel širší kolektiv spoluautorů. Jedná se především o práce publikované v prestižních časopisech evidovaných v databázi Clarivate Analytics: SCIE, tj. [B4] (*IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, WoS: Q1, Q1, Q1, Q1) a [B9] (*Systems & Control Letters*, WoS: Q2, Q2). Žádám tímto studenta, aby se v rámci rozpravy při obhajobě k této poznámce vyjádřil.

Ač není studentův H-index nijak vysoký (WoS i Scopus: 1), podílel se jako hlavní autor i spoluautor na mnoha významných publikacích. Taktéž prokázal schopnost týmové spolupráce v rámci projektů GAČR a INTER-ACTION, a to i na mezinárodní úrovni. Je s podivem, že dosud nepublikoval jako hlavní autor v některém z prestižních časopisů, neboť

považuji v disertační práci uvedené výsledky za vysoce kvalitní a snesoucí nejpřísnější kritéria.

Vzhledem k výše uvedenému konstatuji, že předložená disertační práce splňuje všechny zákonné požadavky, a proto ji **doporučuji** k obhajobě.

Ve Zlíně 15. 7. 2019