

Oponentský posudek disertační práce

Autor disertační práce: **Ing. Jaroslav Bušek, ČVUT v Praze, Fakulta strojní**

Téma práce: **"Saturation effect and anti-windup schemes for time-delay systems"**

Oponent: Doc. Ing. Jan Cvejn, Ph.D., Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky

Disertační práce Ing. Jaroslava Buška je v převážné míře zaměřena na otázku omezení vlivu reálných limitů rozsahu hodnot akční veličiny na kvalitu řízení systémů s časovými zpožděními, zejm. potlačení tzv. windup-efektu, který je v literatuře často diskutován v souvislosti s chováním integrační složky PID regulátoru. Zde je tento problém uvažován v obecnější podobě jako situace, kdy vnitřní stav regulátoru neodpovídá aktuální hodnotě akční veličiny vlivem omezení. Vedlejším tématem je studium vlivu saturace akční veličiny v případě potlačení oscilací u řízení systémů s pružnými elementy pomocí tvarovacích filtrů využívajících zpoždění.

Práce má celkem 135 stran a je rozdělena na 5 hlavních částí: 1) přehled současného stavu problematiky, 2) analýza astatismu IMC regulátoru pro systémy s dopravním zpožděním, 3) návrh regulátorů typu PI a IMC s potlačením windup-efektu pro systémy prvního a druhého řádu s dopravním zpožděním, 4) návrh windup-kompensátoru pro obecné systémy se zpožděními na straně vstupu i stavu ("Observer-based anti-windup compensator with anisochronic feedback"), a 5) studium vlivu saturace akční veličiny v případě využití inverzního tvarovacího filtru pro potlačení oscilací při zpětnovazebním řízení. Dále práce obsahuje seznam celkem 160 referencí a seznam publikací autora čítající 12 položek, v nichž nechybí přední časopisy v oboru (zejm. [B9]), u 5 publikací je autor práce uveden jako první autor.

V části ad 1), zaměřené na rozbor současného stavu problematiky, jsou popsány především základní souvislosti týkající se systémů s časovými zpožděními a nejčastěji diskutované principy jejich řízení, metoda návrhu inverzního tvarovače pro potlačení vibrací a dále jsou zde stručně zmíněny přístupy pro potlačení windup-efektu popsané v literatuře, převážně s využitím odkazů. Vzhledem k celkovému zaměření práce tato partie mohla být zpracována podrobněji, aby bylo možné provést porovnání jednotlivých metod v literatuře a přístupů popsaných v práci. Jsou zde některé nedostatky, např. rovnice (2.27) na str. 13 platí pouze v případě, že $\tilde{I}_m \dots p(-\tau s)$. V pojem "essential observability" využitý v teorému 2.3.3 není definován. Symbol $w(t)$ v r. (2.28) má zřejmě jiný význam než na obr. 2.4. Jinak je tato část zpracována v rozsahu dostatečném pro pochopení souvislostí popsaných dále a rozlišení přínosů práce.

Výsledky části ad 2), zabývající analýzou astatismu IMC regulátorů pro systémy s dopravním zpožděním mají patrně být určitým dílčím teoretickým základem pro části ad 3) a 4), zabývající se potlačením windup-efektu při využití tohoto typu regulátoru. Je poukázáno na fakt, že v případě tvaru přenosu regulátoru dle r. (4.3) pro vyšetření ustáleného stavu nelze využít větu o konečné hodnotě Laplaceovy transformace. Provedená analýza má ukázat, že

regulátor má integrační charakter. Zdá se však, že tu jsou podstatné chyby, zejm. ve vztazích na str. 41 je pracováno s limitou periodické funkce (např. $g_K(t)$, r. (4.9)) pro $t \rightarrow \infty$, která však neexistuje. Integrací $g_K(t)$ (4.9) není získána funkce s přenosem (4.15). Nerovnost $0 < \exp(-s\tau) < 1$ v důkazu věty 4.2.1. rovněž není v pořádku, ačkoliv tento problém je snadno odstranitelný. Dále je zde formulována podmínka astatismu pro případ vyššího řádu charakteristického quasi-polynomu regulátoru. Je rovněž diskutována otázka aproximace členu $\exp(-s\tau)$ Taylorovým a Padého rozvojem vyššího řádu. Nepravdivá je však formulace na str. 44, že koeficienty Padého rozvoje jsou určeny tak, že "prvních $(m+n+1)$ členů v Maclaurinově řadě funkce $\exp(-s\tau)$ zmizí".

V části ad 3) jsou navrženy metody optimálního potlačení windup-efektu pro systémy prvního a druhého řádu s dopravním zpožděním, založené na měření míry saturace akční veličiny a přídavné zpětné vazbě. Pro analýzu je využito metody "back-calculation" citované v literatuře. Výsledky této části byly prezentovány v publikacích [B2] a [B6]. Dynamika systému je uvažována v normalizovaném tvaru dle [157], což umožňuje redukovat počet volitelných parametrů modelu. Pro dané nastavení regulátoru je cílem nalézt zesílení přídavné zpětné vazby $1/T_i$ minimalizující integrál absolutní regulační odchylky (IAE) pro různé hodnoty parametrů modelu a různou míru omezení akční veličiny. Na str. 73 je však uvedeno, že vhodnějším kritériem pro tyto účely je integrál kvadratické regulační odchylky (ISE), se kterým se pracuje v části ad 5).

Na základě mnoha provedených experimentů s přímou numerickou minimalizací kritériální funkce byly učiněny poměrně jednoduché závěry ohledně optimální volby parametru T_i , které jsou využitelné v praxi. V případě systému 2. řádu, kdy bylo využito nastavení regulátoru metodou IMC, byl rovněž problém uvažován ve zobecněné podobě, tzv. "observer-based anti-windup", kdy jsou optimalizována 2 zesílení přídavné zpětné vazby. V popisu metody na str. 60 se ale zdají být určité nesrovnalosti. R. (5.19), vzhledem k (2.12) zřejmě popisuje dynamiku saturovaného regulátoru. Hovoří se zde o odhadu stavu regulátoru \hat{x} , avšak stav regulátoru se zdá být známý. Znamená to, že některé složky stavu regulátoru jsou odhadované? U výsledků na str. 62-63 není uvedena hodnota uvažovaného omezení akční veličiny. Jsou výsledky na obr. 5.5. na hodnotě omezení nezávislé?

V případě regulátorů IMC byl rovněž navržen alternativní přístup, tzv. "dynamic AWC tuning", které spočívá v přidání členů se zpožděním do přídavné zpětné vazby tak, aby charakteristický mnohočlen regulátoru se saturací měl konečný počet pólů. Metoda je demonstrována pro řízení systému 1. řádu s dopravním zpožděním. Zdá se však, že zde touto úpravou nedochází k redukci počtu optimalizovaných parametrů, výhody jsou patrné až v následující části pro řízení systému vyššího řádu. Pro uvažovanou třídu systémů chybí podrobnější porovnání vlastností obou přístupů včetně výsledků s PI regulátorem. Jaký je vztah funkcí $w(s)$ v r. (5.31) a $w(\mathcal{G})$ v integrálu v r. (5.30)?

V části ad 4), která se zdá být určitým vrcholem práce, je druhý z přístupů výše využit pro návrh řízení systémů vyššího řádu se zpožděními na straně stavových proměnných a vstupu metodou IMC. Metoda je aplikována na návrh řízení tepelného procesu s výměníkem. Optimální nastavení dle minima indexu R_{ISE} definovaného rovnicí (6.31) závisí na 3 parametrech, ukazuje se však, že jeden z parametrů lze určit jednorozměrovou minimalizací.

Závisí pak pouze na volbě parametru filtru IMC regulátoru a míře saturace, charakterizované tzv. relativní saturační mezí (6.29). Tento závěr se však patrně vztahuje pouze ke konkrétní aplikaci a nemusí platit obecně, na rozdíl od předchozí části, kde byla snaha závěry formulovat v obecné podobě pro určitou třídu procesů.

V části ad 5) je studován vliv saturace akční veličiny v případě využití inverzního tvarovacího filtru ve zpětné vazbě pro potlačení oscilací při řízení pružných soustav. Tato část popisuje především experimentálně získané výsledky pro konkrétní laboratorní modely v souvislosti s účastí autora na projektech GAČR "Time delay compensators for flexible systems" a INTER-ACTION "Time-delay control laws for innovative transportation UAV systems". Získané výsledky naznačují, že inverzní tvarovač je v mnoha případech schopen účinně potlačit vibrace i v případě omezení akční veličiny.

Je možné učinit následující závěry: práce vychází z aktuálního stavu řešené problematiky. Náročnost a komplexnost řešeného problému vyhovuje standardům disertační práce. Pro řešení byly zvoleny vhodné metody. Výsledky byly prezentovány vhodnou formou, s několika výhradami uvedenými výše. Autor prokázal odpovídající znalosti v řešené oblasti. V části zabývající se analýzou astatismu IMC regulátorů pro systémy s dopravním zpožděním se zdají být podstatnější nedostatky, které však nemají vliv na správnost ostatních částí práce. Teoretický přínos práce se zdá být především v návrhu metod pro potlačení windup-efektu u systémů s časovými zpožděními na základě integrálních kritérií a studiu jejich vlastností. Tyto výsledky mohou mít praktický význam, i když k jednoduchým závěrům, atraktivním z praktického hlediska, se podařilo dospět v pouze některých případech. Význam má rovněž prezentované experimentální vyšetření vlastností inverzního tvarovacího filtru v případě omezení akční veličiny. Reálné příklady řešené v kapitolách 6 a 7 jsou velmi zajímavé a přínosné. Formální úroveň práce je velmi dobrá, i když některé formulace v anglicky psaném textu by pravděpodobně bylo možné po stránce jazykové vylepšit.

Práci doporučuji k obhajobě.

V Pardubicích 14.7.2019

Doc. Ing. Jan Cvejn, Ph.D.