

Prof. Ing. Milan Hofreiter, CSc.
ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav přístrojové a řídicí techniky
Technická 4, 166 07 Praha 6

OPONENTSKÝ POSUDEK DISERTAČNÍ PRÁCE

Název disertační práce: Identifikace a číslicové řízení procesů s dopravním zpožděním

Autor disertační práce: Ing. Stanislav TALAŠ

Studijní program: Inženýrská informatika

Studijní obor: Automatické řízení a informatika

Školící pracoviště: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky

Školitel: Prof. Ing. Vladimír BOBÁL, CSc.

Oponentský posudek byl zpracován na základě pověření doc. Mgr. Milan Adámka, Ph. D., děkana Fakulty aplikované informatiky, Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Předložená disertační práce obsahující 67 stran byla doplněna seznamem publikací autora.

a) Aktuálnost zvoleného tématu a dosažení stanoveného cíle

Předložená disertační práce se zabývá velmi náročnou oblastí teorie automatického řízení, a to je identifikace a řízení systémů s dopravními zpožděními, která mohou vystupovat jak v řídicích, tak i stavových proměnných. Systémy s dopravním zpožděním patří mezi obtížně říditelné systémy. V průmyslové praxi se často setkáváme s procesy, které mohou být modelovány jako dynamické systémy s dopravními zpožděními. Na řadě zahraničních ale i tuzemských pracovištích je proto věnována těmto systémům velká pozornost a existuje mnoho publikací s tímto zaměřením. Zvolené téma je proto vysoce aktuální.

Cíle disertační práce nejsou již tak ambiciózní, jak by se dalo usuzovat z názvu práce, neboť se práce omezuje pouze na zjištění dopravního zpoždění při znalosti jak struktury modelu, tak i ostatních parametrů lineárního časově invariantního modelu procesu. Následně pak disertační práce je zaměřena na implementaci navržené metody zpřesňující odhad dopravního zpoždění při prediktivním řízení systémů s dopravním zpožděním. Tyto stanovené cíle byly dosaženy.

b) Rozbor dosaženého stavu

Rozboru současného stavu je věnována 1. kapitola. V níh disertant uvedl stručný výběr metod používaných pro identifikaci a řízení systémů s dopravním zpožděním

související s řešenou problematikou. V této části chybí alespoň zmínka o pracích související s danou problematikou, jež byly řešeny na tuzemských pracovištích.

c) Zvolené metody zpracování

Těžiště práce spočívá v návrhu metody pro určení dopravního zpoždění, jestliže je znám lineární model procesu včetně hodnot jeho parametrů s výjimkou znalosti dopravního zpoždění. Pomocí kvadratického kritéria vyhodnocující odchylky simulovaných výstupů od změřených výstupů v závislosti na zvoleném dopravním zpoždění je získán odhad dopravního zpoždění. Navržený postup autor testoval jak v simulačním prostředí, tak i na laboratorní úloze v otevřené i uzavřené regulační smyčce s využitím zobecněného prediktivního řízení i využitím Smithova prediktoru. V předposlední kapitole je uvedeno porovnání a zhodnocení přínosu navržené metody oproti použití funkce *fminsearch* z prostředí Matlab. Výsledky jsou dokumentovány časovými průběhy sledovaných veličin.

Celkově lze říci, že disertant dosáhl stanovený cíl, což dokumentují dosažené simulační a laboratorní výsledky.

d) Teoretický a praktický přínos

Disertační práce je odrazem řešených výzkumných projektů, které disertant řešil ve spolupráci s dalšími spoluautory. Autor ve své práci uvádí původní metodu pro odhad dopravního zpoždění s přesností na zlomky vzorkovací periody. Metoda je však vázána na znalost ostatních parametrů časově invariantního modelu procesu, což je silně omezující podmínka pro praktické použití.

e) Připomínky k obsahu práce

Chybí podrobnější rešerše k metodám zaměřených na odhad dopravního zpoždění využitím frekvenčních vlastností, zdůvodnění volby periody vzorkování a možného rozsahu dopravního zpoždění, rozlišení identifikace procesu v otevřené smyčce resp. v uzavřeném regulačním obvodu, podrobnější diskuse k uvažovaným předpokladům požadovaných pro použití navrhované metody.

- Na str. 16 ve vztahu (1.7b) je vynecháno $y(k)$.
- Na str. 34 ve vztahu (3.5) místo $w(k)-y(k)$ mělo být $y_{odh}(k)-y_{real}(k)$
- Na str. 35 model (3.6) je odvozen z (3.3).
- Na str. 43 obr. 3.13 místo „řídící signál“ mělo být „akční signál“.
- Na str. 45 vztah (4.1) je přenos a nejde o přechodovou funkci, jak je uvedeno na str. 44.

d) Návrh otázek k obhajobě

- 1) Byl zkoumán vliv odchylek parametrů modelu od jejich předpokládaných hodnot na odhad dopravního zpoždění?
- 2) Jak je potřeba volit interval vzorkování a možný rozsah dopravního zpoždění při použití navrhované metody?

- 3) Jak rychlé dynamické systémy je možné řídit při využití průběžné identifikace dopravního zpoždění?
- 4) Jaký je přínos použité metody před přímým určením dopravního zpoždění z odhadu jednoho bodu frekvenční charakteristiky procesu při znalosti ostatních parametrů modelu?

e) Závěrečné hodnocení

Publikační činnost doktoranda je bohatá, zahrnuje 22 článků, kde v 8 případech je prvním autorem. Kromě vlastní diplomové práce zaměřené na prediktivní řízení s dopravním zpožděním, jde o příspěvky na mezinárodní konference a ve 3 případech pak jsou to články publikované v zahraničních odborných časopisech. Ve vlastní disertační práci autor splnil stanovené cíle a prokázal znalost pokročilých optimalizačních metod i programátorskou dovednost. Lze konstatovat, že Ing. Stanislav Talaš je připravený k samostatné činnosti v oblasti výzkumu a vývoje. Disertační práce splňuje podmínky § 47 Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb., a proto ji doporučuji k obhajobě.

V Praze dne 28. 9. 2017



Prof. Ing. Milan Hofreiter, CSc.

doc. Ing Petr Blaha, Ph.D.
Vysoké učení technické v Brně
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav automatizace a měřicí techniky
Technická 12
616 00, Brno
Tel.: +420 54114 9821
E-mail: blahap@feec.vutbr.cz

OPONENTSKÝ POSUDEK

doktorské disertační práce Ing. Stanislava Talaše:
„Identifikace a číslicové řízení procesů s dopravním zpožděním“

Aktuálnost tématu disertační práce

Předložená doktorská disertační práce Ing. Stanislava Talaše, studenta oboru Inženýrská informatika na Fakultě aplikované informatiky University Tomáše Bati ve Zlíně, se zabývá identifikací a číslicovým řízením systémů s dopravním zpožděním. Dopravní zpoždění se vyskytuje v mnoha různých technických systémech jako jsou pneumatické, hydraulické, chemické a další. Často je vyvoláno použitím potrubních systémů, kde výsledné zpoždění odpovídá délce potrubí a rychlosti proudění média. Dále se s ním můžeme setkat při aproximaci procesu vzorkování, nebo jako s následkem konečné doby výpočtu řídicího algoritmu. Z hlediska řízení je jeho přítomnost nežádoucí, protože zhoršuje fázi, což má destabilizující účinky. Přestože je tento problém znám již velmi dlouho a existují metody pro řízení systémů s dopravním, případně pro jeho kompenzaci, je neustále aktuální, protože neexistuje jeho uspokojivé řešení. Pokud například zadáme v databázi ieeexplore.ieee.org vyhledávat výraz „time delay control“ mezi roky 2016 a 2017, získáme bezmála 4 200 publikací.

Splnění cílů stanovených v disertační práci

Popis cílů disertační práce je náplní kapitoly 2. Je zde možné najít dva hlavní cíle. Prvním je návrh a ověření identifikační metody pro odhad dopravního zpoždění, které je necelistvým násobkem počtu period vzorkování. Druhým je návrh a ověření postupu pro nastavení číslicového regulátoru pro systémy s takovýmto zpožděním. Dalším dílčím cílem je jejich srovnání s existujícími metodami a zhodnocení dosažených výsledků. Vytyčené cíle je možné považovat za splněné. Připomínky k postupu řešení jsou popsány v dalším textu.

Postup řešení problému, výsledky disertační práce a přínos doktoranda

Disertační práce je rozdělena do pěti kapitol. První se věnuje současnému stavu problematiky. Zejména část o existujících metodách identifikace dopravního zpoždění by si zasloužila větší pozornost a rozsah. Popsaná metoda nejmenších čtverců se spíše věnuje zjištění parametrů modelu s dopředu známou hodnotou dopravního zpoždění. V literatuře je možné nalézt modifikace této metody, které umožňují zjistit přibližnou velikost dopravního zpoždění z jedné její realizace. Tyto v práci nejsou zmíněny. Na straně 22 je popsán návrh regulátoru založený na minimalizaci kvadratického kritéria. Jeho cílem je tedy určení polynomů P, Q a R. O návrhu polynomu R se však v popisu nemluví. Na straně 28 je sice napsán výsledek, ale není uvedeno, jak se k němu došlo.

Ve druhé kapitole jsou přehledně vypsány cíle disertační práce. Třetí kapitola popisuje zvolené metody zpracování. Nejprve se vypočítá odhad parametrů modelu metodou nejmenších čtverců pro různé hodnoty dopravního zpoždění. Následně se vyberou dvě nejpravděpodobnější hodnoty dopravního zpoždění, mezi kterými se pro identifikaci použije model s několikrát nižší periodou vzorkování. Postup identifikace parametrů modelu se opět vyzkouší pro hodnoty zpoždění ve dříve nalezeném časovém rozsahu. Vybere se model s nejlepší shodou. Tím je získána velikost dopravního zpoždění v jemnějším dělení, než je počet period vzorkování. Zjištěné dopravní zpoždění je do modelu vneseno pomocí modifikované Z-transformace. Po jejím použití jsou v čitateli diskrétního přenosového operátoru tři koeficienty. Identifikační metoda je propojena s návrhem prediktivního regulátoru pro systémy s dopravním zpožděním. Z práce úplně nevyplývá požadavek na přesnou znalost dopravního zpoždění. Pro použití metod prediktivního řízení je postačující znát pouze přesný (nebo co nejpřesnější) model, což není totéž.

Čtvrtá kapitola se věnuje ověření navržených metod na laboratorním přípravku, kde je možné změnou rychlosti proudění tekutiny v potrubí měnit velikost dopravního zpoždění. Nově navržený adaptivní regulátor je porovnáván s tradičním GPC a se Smithovým prediktorem. Při srovnání vychází zvláštní průběhy na obrázku 4.18, kde je vidět výrazné kolísání odhadu dopravního zpoždění. Nepodložené je vysvětlení, že tento jev je způsoben výkyvy teploty v místnosti. Teplota v místnosti se dala měřit a pak by se dala hledat korelace u obou průběhů. V závěru jsou stručně shrnuty výsledky srovnání. Vysvětlení skutečnosti, že v reálné regulaci je dosažené zlepšení nově vyvinutou metodou vyšší, než v simulaci není uspokojivé. Asi se daly upravit podmínky simulace tak, aby byly experimenty srovnatelné. Také by se měla tato skutečnost analyzovat podrobněji, aby byl poskytnut lepší obrázek o přínosu práce.

Protože se disertant věnoval problematice dopravního zpoždění již při řešení své diplomové práce na téma „Prediktivní řízení procesů s dopravním zpožděním“, bylo by vhodné, kdyby v úvodu zmínil, kam se v rámci jejího řešení posunul, kde byl startovací bod pro řešení disertační práce.

Význam pro praxi a rozvoj vědního oboru

Disertant navrhl identifikační metodu dopravního zpoždění, která je použitelná v kombinaci s prediktivním řízením a tvoří adaptivní regulátor, který je použitelný pro systémy s proměnným dopravním zpožděním. Dosažené zvýšení přesnosti odhadu dopravního zpoždění umožňuje přesnější řídicí zásahy regulátoru a lepší kvalitu regulace procesu. Jedná se o metodu, která cílí na praktické použití. Přínosem je v tomto ohledu nejen simulační ověření navržených postupů, ale také jejich ověření na reálném laboratorním přípravku.

Formální úprava disertační práce a její jazyková úroveň

Jazyková a grafická úroveň předložené disertační práce je na velmi dobré úrovni. Formálně bych vytknul predefinování proměnné z z běžně používané Z-transformace na operátor posuvu. Běžně se v literatuře k tomuto účelu používá písmeno q , aby nedošlo k nedorozumění. Nepoužíval bych „přenos diskrétního tvaru systému“, ale spíše „diskrétní přenosový operátor“ (str. 14). Při definici celočíselného a neceločíselného zpoždění bych nejspíš vyšel z toho, jak se stejný problém formuluje u modifikované Z-transformace. V práci by to bylo jednotné a předešlo by to zavádějícímu vyjádření „neceločíselné zpoždění o velikosti $1 s$ “.

Publikační činnost disertanta

Disertant na konci disertační práce uvádí své publikační aktivity v počtu 21 publikací (v dodaném seznamu vytištěném zvlášť jich je 22). V seznamu použité literatury se disertant odkazuje pouze na tři. Domnívám se však, že tématu disertace se věnuje více jeho prací. Je škoda, že se na ně disertant neodvolal minimálně v závěru práce. Například jeho článek „DISCRETE METHOD FOR ESTIMATION OF TIME-DELAY OUTSIDE OF SAMPLING PERIOD“ publikovaný na konferenci ECMS 2016, který obsahuje popis jím vyvinuté metody identifikace velikosti dopravního zpoždění, které není celistvým násobkem počtu period vzorkování, dle mého názoru obsahuje jádro disertační práce a měl být citován. Na ScienceDirect jsem nenašel žádný jeho článek, na IEEEExplore jsem našel dva. Bylo by vhodné, aby se disertant v případném pokračování ve své vědecké dráze zaměřil na kvalitní impaktované publikace.

Připomínky a dotazy k disertační práci

1. V úvodu se na straně 12 píše, že pro identifikaci zpoždění ve frekvenční oblasti patří k běžným postupům vzájemná korelace. Můžete tuto možnost blíže vysvětlit?
2. Rovnice (1.23) popisuje obecný tvar polynomu D . Nemůže tento polynom vypadat obecně jinak? Jestliže ano, tak jak?
3. Rovnice (1.8) není s ohledem na následující dvě rovnice v pořádku. Uveďte proč?
4. Mělo by nějaký význam identifikovat metodou nejmenších čtverců jiný počet parametrů než 4 (dva v čitateli a dva ve jmenovateli diskrétního přenosového operátoru)? Diskutujte, k čemu by mohlo dojít?
5. Vysvětlíte, odkud plyne požadavek na to, aby měl filtr podobnou, nebo pomalejší dynamiku než identifikovaný systém (str. 45).

Závěr

Disertant Ing. Stanislav Talaš, student v oboru Inženýrská informatika University Tomáše Bati ve Zlíně, prokázal i přes výše uvedené připomínky schopnost samostatné činnosti v oblasti výzkumu a vývoje a své původní výsledky řádně uveřejnil. Splnil tím podmínky kladené na doktorskou disertační práci, a proto ji doporučuji k obhajobě.

V Brně 8.10.2017



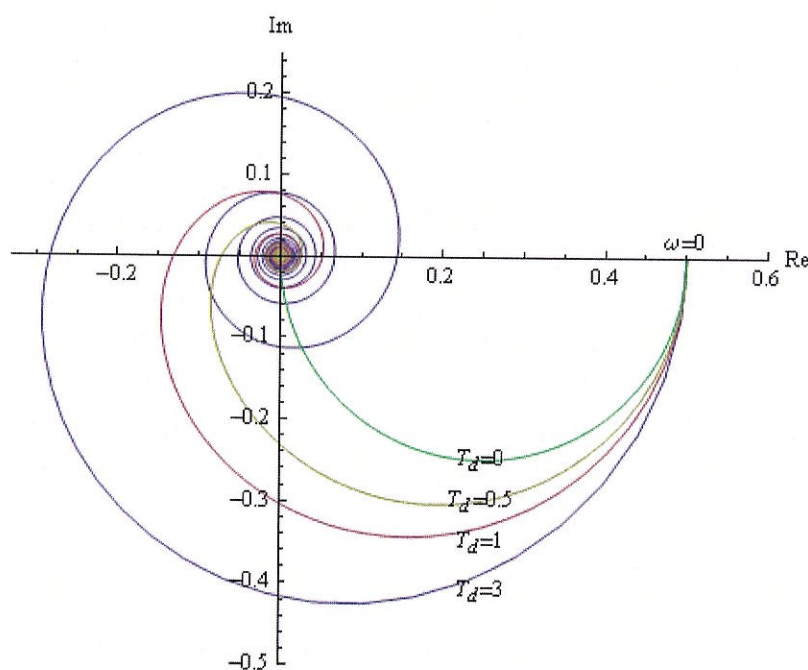
doc. Ing. Petr Blaha, Ph.D.

Oponentní posudek disertační práce Ing. Stanislava Talaše „Identifikace a číslicové řízení procesů s dopravním zpožděním“

Systémy, které vykazují dopravní zpoždění, se v praxi vyskytují zejména v technologiích s přepravou materiálu na větší vzdálenosti, ale také v situacích s opožděnou odezvou měřicích členů, při složitější konfiguraci sériově řazených dynamických členů apod.

Řízení systémů s dopravním zpožděním je problematické v tom, že regulační odchylka ve zpětnovazebním zapojení je vyhodnocena z aktuální žádané hodnoty a současně staré hodnoty regulované veličiny, což vede k výpočtu akčního zásahu, který neodpovídá tomu, co by regulovaná soustava na vstupu měla mít a vede to ke snížení kvality regulace. Autor to demonstruje na přechodové charakteristice na obrázku 1.3 na str. 19.

Navíc s rostoucí hodnotou dopravního zpoždění T_d se zhoršují stabilitní vlastnosti regulačního obvodu a dokonce i pro případ lineárního spojitého obvodu s jednoduchým přenosem proporcionálního členu se setrvačností 1. řádu pro otevřený obvod vlivem členu $\exp(-sT_d)$ při hodnotě T_d vyšší než jistá mez se obvod stane nestabilním, jak při rostoucím T_d vyplývá z posouvání průsečíku frekvenční charakteristiky s reálnou osou doleva a Nyquistova kritéria stability.



Z uvedeného je zřejmé, že je nutné vliv dopravního zpoždění potlačit, jednou z možností je predikovat hodnotu regulované veličiny, případně využít kompenzační přístupy.

Nutné je však s co největší přesností určit hodnotu dopravního zpoždění. Autor popisuje postup založený na měření skutečné hodnoty a její porovnání s predikovanou hodnotou pro dopravní zpoždění z rozsahu $\langle d_{min}, d_{max} \rangle$, kde lze dopravní očekávat a rekurzivní metodou nejmenších čtverců (RMNČ) se určí nejmenší chyba. Dalším (a méně přesným) přístupem je vyjít z časových úseků, kdy přechodová charakteristika nabývá specifických hodnot.

Jak autor poznamenává, prediktivní řízení je *optimalizační úlohou*, kdy akční zásah je vypočítán z kvality regulace (lze ji chápat jako účelovou funkci) a omezení veličin (omezující podmínky).

Vedle identifikace dopravního zpoždění si autor v práci klade další cíle, a sice ověřit navrženou identifikační metodu v simulačním prostředí, navrhnout číslicový řídicí algoritmus pro systémy s dopravním zpožděním, ověřit navržené metody na laboratorní úloze, zhodnotit výsledky a porovnat je s přístupy známými z literatury.

I když se autor zaměřuje na číslicovou variantu řízení, předkládá původní metodu, která umožňuje stanovit dopravní zpoždění jiné velikosti než jen násobek vzorkovací periody. Navíc na základě průběžně zpracovávaných dat lze identifikovat v čase proměnné zpoždění. Hodnoty regulované veličiny v oblastech mezi vzorky navrhuje určit pomocí modifikované Z-transformace a jejího parametru ε .

Pro ověření použitelnosti navrženého přístupu a srovnání získaných výsledků s výsledky známých metod autor zvolil laboratorní model tepelného výměníku. Dopravní zpoždění zde způsobuje přenos tepla ohřívanou kapalinou, která proudí 15 m dlouhou izolovanou trubkou, a v závislosti na zvolených otáčkách čerpadla ho lze měnit v rozsahu 100 až 250 s. Sběr dat a řízení je zajišťován přes multifunkční kartu a Real Time Toolbox MATLABu. Konfigurace byla rozšířena ještě o filtr pro eliminaci šumu.

Autor na testem prokázal, že odhady identifikace dopravního zpoždění se blížily skutečným hodnotám a největší odchylka odhadu byla 0,4 vzorkovací periody T_0 . Ověřena byla i schopnost adaptace na proměnlivé dopravní zpoždění jak při skokových změnách, tak i lineární změně.

Podstatným výsledkem je, že navržená metoda je v simulačním režimu výpočetně méně náročná, a tedy rychlejší než identifikace optimalizačním algoritmem (zkrácení z 13,6 s na 7,9 s). Optimalizační postup dává výsledky identifikace zpoždění jen v celočíselných hodnotách vzorkovací periody, kdežto navržená metoda i v jejích desetinných zlomcích. Kvalita regulace, vyhodnocovaná kritériem ISE (Integrated Square Error - součet druhých mocnin odchylky), byla u navržené metody rovněž výrazně lepší, viz tabulka 4.1 na str. 53. Ještě výraznější rozdíl ve prospěch navržené metody byl v porovnání se Smithovým prediktorem.

Disertační práce má vedle odborných kvalit i vysokou jazykovou a grafickou úroveň. Jen není jasné, jak by z rovnice (1.7a) měla vyplývat (1.7b). Aby to platilo, v (1.7b) by část v hranatých závorkách musela být násobena členem $y(k)$.

Dotaz na disertanta:

1. Jaká je horní hranice dopravního zpoždění, kde navržená metoda je použitelná?

Závěr:

Doktorand ve své disertační práci podstatně rozšířil výsledky, které prezentoval u doktorské zkoušky, její cíle splnil a prokázal tvůrčí schopnost navrhnout novou metodu, která jak v simulačním režimu, tak i na laboratorním modelu prokázala použitelnost a dávala i lepší výsledky než metody popsané v literatuře.

Jeho publikační aktivita je nadstandardní, doktorand své výsledky úspěšně uplatnil na prestižních fórech (např. European Conference on Modelling and Simulation) a získal uznání odbornou komunitou.

Předloženou disertační práci Ing. Stanislava Talaše proto
doporučuji k obhajobě
před komisí studijního oboru Automatické řízení a informatika

V Brně dne 16. října 2017

Handwritten signature of Miloš Šeda in blue ink.

Prof. RNDr. Ing. Miloš Šeda, Ph.D.
Ústav automatizace a informatiky
Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně