Posudek doktorské dizertační práce

Autor: Ing. Štěpán Janouš

Téma: Approximate predictive control of AC electric drives

Oponent: Prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
VŠB-Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra elektroniky
17. listopadu 15, 708 33 Ostrava-Poruba
tel.: +420 597 325 933, e-mail: pavel.brandstetter@vsb.cz

Doktorská dizertační práce Ing. Štěpána Janouše představuje svým řešením velice zajímavou úlohu z oblasti řízení střídavých elektrických pohonů. Podle doporučení pro zpracování oponentských posudků doktorských dizertačních prací předkládám následující hodnocení.

1. Význam dizertační práce pro obor a aktuálnost tématu

Téma doktorské dizertační práce je velice aktuální, neboť přispívá k řešení problematiky perspektivních elektrických regulovaných pohonů, mezi které patří střídavé regulované pohony se synchronními motory s permanentními magnety (SMPM). Tyto pohony velkou měrou přispívají k velkým úsporám elektrické energie.

O aktuálnosti tématu svědčí rozsáhlý přehled domácí a zahraniční literatury, ze které doktorand čerpal a vytvořil kvalitní úvodní rešerši řešené problematiky.

2. Postup řešení problému, použité metody a splnění určeného cíle

Doktorská dizertační práce je členěna do 7 kapitol. Teoretickou část tvoří kapitoly 1 a 3. V kapitole 1 je popsán současný stav poznání řešené problematiky. Kapitola 2 uvádí teoretické základy prediktivního řízení, které je pak aplikováno do tří úloh popsaných v kapitolách 4 až 6. Kapitola 3 se zabývá teorií řízení synchronního motoru s permanentními magnety s uvedením problémů a možností aplikace prediktivního řízení. Kapitoly 4 až 6 obsahují

také simulační a experimentální výsledky týkající se řešených problémů. Kapitola 7 shrnuje přínosy dizertační práce a naznačuje perspektivní směry budoucího výzkumu v dané problematice. Použitá literatura zahrnuje 95 titulů.

Zvolené metody zpracování zahrnují analýzu a teoretický rozbor řešené problematiky, návrh řídicích technik a struktur, simulace vybraných problémů pomocí programu Matlab-Simulink, realizaci experimentálního pracoviště se střídavým regulovaným pohonem a experimentální ověření zkoumaných problémů.

Zvolený postup prací Ing. Štěpána Janouše je tvořen výzkumnou linií „teorie - simulace - experimentální ověření - aplikační možnosti". Dosažené výsledky potvrzují správnost zvoleného přístupu.

Ing. Štěpán Janouš si stanovil náročný cíl týkající se prediktivního řízení střídavého regulovaného pohonu s uvažováním dlouhého predikčního horizontu, jehož výpočetní nároky jsou srovnatelné s klasickými metodami řízení. Hlavní cíl dizertační práce je naplněn spojením celé řady dílčích cílů. Navrhované algoritmy prediktivního řízení byly ověřeny ve třech praktických aplikacích:

1) Regulace rychlosti pohonu s SMPM a PWM bez kaskádní struktury regulátorů.
2) Prediktivní řízení SMPM s realizací přímého výběru vektoru statorového napětí.
3) Zvýšení stability trakčního pohonu s SMPM napájeného ze stejnosměrné troleje přes vstupní filtr.

Pro ověření zkoumaných problémů doktorand provedl velké množství simulací pomocí moderních simulačních programů a experimentálních měření, která jsou zajímavá pro technickou praxi. Mohu konstatovat, že hlavní cíl dizertační práce byl jednoznačně splněn.

3. Výsledky a přínos dizertační práce

Mezi nové vědecké poznatky patří: detailní analýza současného stavu poznání a teorie prediktivního řízení pro aplikace v oblasti elektrických regulovaných pohonů, definice hlavních problémů v této oblasti, ověření teoretických

poznatků ve třech praktických úlohách. Význam doktorské dizertační práce pro technickou praxi spočívá především ve využití experimentálních poznatků a realizovaných řídicích algoritmů pomocí moderního signálového procesoru. Zpětná vazba potvrzuje, že získané teoretické poznatky jsou realizovatelné a využitelné v technické praxi.

4) Formální úprava, jazyková, terminologická a grafická úroveň práce

Celkovou úroveň zpracování dizertační hodnotím kladně. Dizertační práce je logicky členěna a srozumitelně formulována. Textové a grafické zpracování má velmi dobrou úroveň. Obrázky a schémata vhodně doprovázejí text, i když čitelnost obrázků s experimentálními výsledky je někdy obtížná. Ke kvalitní úrovni dizertační práce přispívají rovněž přiložené fotografie z experimentálního pracoviště. Úroveň práce zvyšuje také skutečnost, že je napsána v anglickém jazyce.

5. Přehled publikovaných prací

Přehled publikací Ing. Štěpána Janouše zahrnuje 23 položek (1 publikovaný článek a 1 článek v oponentním řízení v prestižním impaktovaném časopise, 8 příspěvků ve sbornících mezinárodních konferencí, 5 příspěvků ve sbornících tuzemských konferencí, 8 výzkumných zpráv), ve kterých je uveden jako autor nebo spoluautor. K dnešnímu dni je na Web of Science uvedeno 9 titulů (8 citací bez autocitací, H-index=1), z toho je 1 článek v prestižním impaktovaném časopise v Q1. V databázi Scopus je uvedeno 10 titulů (10 citací bez autocitací, H-index=2), z toho jsou 2 články v časopisech se SNIP a SJR. Výsledky aplikovaného výzkumu zahrnují 4 funkční vzorky a software. Publikační aktivitu doktoranda lze hodnotit jako vynikající. Tato aktivita mnohonásobně převyšuje požadavky kladené na publikační výstupy doktorandů.

6. Připomínky a poznámky k dizertační práci

V práci jsem nenalezl žádné závažné nedostatky.

7. Otázky k řešené problematice

Dotazy, které uvádím, nesnižují excelentní úroveň dizertační práce. Jsou určeny k diskusi při vlastní obhajobě.

- Bylo provedeno porovnání dynamických vlastností střídavého pohonu s SMPM s klasickou kaskádní strukturou a se strukturou využívající prediktivní řízení?
- Je opravdu uvedená struktura řízení rychlosti SMPM nezávislá na změnách parametrů SMPM? Jestliže ano, jak to bylo ověřováno?
- Klasický střídač napětí může generovat 8 napěťových vektorů (6 aktivních a 2 nulové). Na str. 49 je uvažováno jen 7 napěťových vektorů. Prosím o komentář.
- Co je to průměrná spínací frekvence a proč je tento termín použit?

8. Celkové zhodnocení

Ing. Štěpán Janouš splnil stanovený cíl doktorské dizertační práce. Tvořivý přínos této práce a její využití v praxi je dán body 2 a 3 uvedenými v posudku. Doktorand vykonal velké množství realizační a experimentální práce. Mohu také konstatovat, že jádro doktorské dizertační práce bylo na patřičné úrovni publikováno.

Doktorskou dizertační práci **doporučuji** k obhajobě před komisí pro obhajoby v oboru Elektronika. Po úspěšné obhajobě této dizertační práce doporučuji udělit Ing. Štěpánu Janoušovi akademický titul "philosophiae doctor", ve zkratce "PhD.".

V Ostravě, dne 6. 6. 2017

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY
Technická 12, 616 00 Brno

Oponentský posudek disertační práce

Název: ***Approximate Predictive Control of AC Electric Drives***

Autor: ***Ing. Štěpán Janouš***

Školitel: ***Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.***

Oponent: ***Prof. Ing. Pavel Václavek, Ph.D.***
Ústav automatizace a měřicí techniky
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Vysoké učení technické v Brně
Technická 12, 616 00 Brno
Tel 541 146 413 e-mail vaclavek@feec.vutbr.cz

Oponovaná disertační práce se zabývá problematikou algoritmů prediktivního řízení synchronních motorů s permanentními magnety. Algoritmy prediktivního řízení jako takové nejsou novou oblastí, vysoce aktuální je však jejich adaptace a nasazení při řízení systémů s velmi rychlou dynamikou jako jsou elektrické pohony. Disertační práce míří na velmi důležitou otázku redukce výpočetní náročnosti algoritmů prediktivního řízení tak, aby je bylo možné prakticky nasadit alespoň v laboratorních podmínkách. Je třeba říci, že práce doktoranda spadá do poměrně omezeného okruhu úspěšného laboratorního ověření MPC pro malé pohony jak v národním, tak i mezinárodním měřítku. Realizované výzkumné téma je náročné z hlediska teorie i praktické realizace a lze očekávat značný aplikační potenciál v budoucnosti.

Pomineme-li členění práce na kapitoly, lze v ní spatřovat dva logické celky. První část tvořená kapitolami 1 – 3 se věnuje popisu existujících metod modelování a řízení synchronních motorů včetně základních otázek optimálního a prediktivního řízení. Doktorand zde používá klasického přístupu založeného na aproximaci nelineárního systému LPV systémem, přičemž členy, které nebylo možné linearizovat, lze nahradit měřenými poruchami. Z teorie nelineárních systémů je známo, že taková aproximace je většinou dobrá v případě, kdy dochází k relativně pomalým změnám parametru. V daném případě toto splňují otáčky rotoru, ne však statorové proudy, na základě, kterých je matice systému rovněž parametrizovaná. Bylo by tedy vhodné provést hlubší analýzu dynamických vlastností použité LPV náhrady zejména s ohledem na návaznou diskretizaci.

Druhá část tvořená kapitolami 4 – 6 je zaměřena na vývoj, implementaci a ověření vlastních algoritmů prediktivního řízení. Doktorand zde demonstruje dva typické postupy návrhu prediktivního řízení pohonů založené na spojité a konečné množině hodnot řízení. Zatímco využití kombinace jednokrokové predikce s omezením s řešením neomezené LQR úlohy je známé, za zajímavý přínos práce považuji zejména metodou řešení omezení na základě projekcí. Práce rovněž v kapitol 6 jasně ukazuje potenciál MPC pro řešení ne zcela klasických úloh z oblasti řízení. Je třeba ocenit, že se doktorand zaměřil na algoritmy plně nahrazující kaskádní regulaci. V literatuře lze nalézt řadu algoritmů uváděných jako prediktivní

řízení pohonů, kdy je nasazen třeba jen prediktivní regulátor proudu, přičemž je zachována zbývající část klasické kaskádní regulace. Takový přístup však nemůže principiálně vést k zásadnímu zvýšení kvality regulace. Naopak oblast MPC regulátorů, na které je práce zaměřena, může vést ke skutečné kvalitativní změně. Přínosem je i experimentální ověření navržených algoritmů v laboratorních podmínkách.

I když práce celkově působí uceleným dojmem, lze v ní najít řadu nejasností a drobných nesouladů mezi jednotlivými kroky řešení. Během obhajoby by měl doktorand vyjasnit zejména následující oblasti:

1. Pro odhad stavu je použit lineární Kalmanův filtr. Není zcela zřejmé, zda je tento algoritmus použit primárně za účelem dynamické filtrace, jak naznačuje text práce, nebo odhadu veličin, které nejsou přímo měřeny. Hlavní otázkou však je, proč byl použit lineární Kalmanův filtr aplikovaný na LPV systém parametrizovaný stavem systému místo standardního použití rozšířeného Kalmanova filtru na prvotní nelineární model. Jeho implementace nepředstavuje významnější výpočetní problém. Byly vlastnosti použitého řešení alespoň porovnány s EKF? Jak byly navrženy parametry Kalmanova filtru, byly využity nějakým způsobem dostupné statistické vlastnosti měřených signálů?
2. Není zcela zřejmé, jak je řešena kompenzace zátěžného momentu. Ze tvaru modelu použitého pro MPC se zdá, že je zátěžný moment považován za měřenou poruchu. Byl tedy měřen, nebo odhadován Kalmanovým filtrem? V případě odhadu vzniká pak silná závislost na přesné znalosti jak elektrických, tak i mechanických (moment setrvačnosti) parametrech pohonu. Lze v regulační struktuře s využitím MPC nějakým způsobem potlačit vliv chyby v měření/odhadu zátěžného momentu?
3. V kapitole 5.2.2 je diskutován vliv délky horizontu na kvalitu řízení, přičemž předložené závěry jsou dosaženy spíše na základě simulačních experimentů. Lze najít nějaké vodítko pro odhad vhodné délky horizontu přímo z modelu řízeného systému?

Předložená disertační práce dokumentuje, že cílů stanovených pro dané téma bylo dosaženo. Práce obsahuje i jádro, které je výsledkem vlastní činnosti doktoranda. Po stránce obsahové i formální práce splňuje požadavky na disertační práci. Vytknout lze snad jen poměrně velký počet drobných nepřesností (chyby v indexech, chybějící odkazy na rovnice,...), které však nemají celkově významnější dopad na přínos disertační práce. Výsledky práce doktoranda byly dostatečně publikovány na národní i mezinárodní úrovni.

Závěrem konstatuji, že předložená disertační práce svědčí o schopnostech studenta řešit komplikované úlohy v oblasti výzkumu a vývoje a přenášet dosažené výsledky k praktickému využití. Disertační práci proto ***doporučuji k obhajobě***.

V Brně 20. července 2017

Prof. Ing. Pavel Václavek, Ph.D.

Oponentský posudek doktorské disertační práce

Ing. Štěpána Janouše

„Approximate predictive control of AC electric drives“

Aktuálnost tématu a splnění cílů práce

Problematika různých variant prediktivního řízení v oblasti výkonové elektroniky, elektrických pohonů a obecně silnoproudé elektrotechniky je v celém světě v posledních deseti letech intenzívně rozvíjena. K zajímavým poznatkům přispívá i předložená disertační práce.

Na rozdíl od jiných oblastí jde v uvedených oborech o řízení procesů s krátkými časovými konstantami (v řádu milisekund). I při výrazném růstu výpočetní kapacity řídicích procesů v posledních letech narážíme v uvedených oborech na časové limity, zvláště pokud usilujeme o delší časové horizonty řízení a zde nezbytná omezení řídicích i jiných veličin. Proto se hledají různé přibližné metody, jak uvedené charakteristiky řízení alespoň přibližně respektovat a tím docílit přijatelných dostatečně krátkých intervalů vzorkování.

Předložená disertační práce taková řešení navrhuje, včetně jejich experimentálního ověření. Cíle práce, deklarované v úvodní prvé kapitole, jsou v souladu s dále uváděnými výsledky.

Metodika a postup řešení

Doktorská disertační práce je psána v anglickém jazyce a má celkový rozsah 99 stran.

Po úvodu, který výstižně rekapituluje dosavadní publikované strategie prediktivního řízení v oblasti pohonů v posledních letech a shrnuje cíle práce, jsou v kapitole druhé stručně představeny principy prediktivního řízení s orientací na ty metody, které jsou využívány v následujících kapitolách. Následující kapitola tři představuje model PMSM pohonu, hlavní jeho cíle prediktivního řízení a základní úvahy o nutném zahrnutí vhodných omezení do modelu pohonu (dosažení maximálního momentu pro limitovaný proud, práce v oblasti odbuzování). Je rovněž demonstrováno použití metodiky SDRE (řešení stavově závislé Riccatiho rovnice) na linearizovaný model PMSM a Kalmanova filtru a jeho ladění pro rekonstrukci stavového vektoru systému pohonu. Kapitoly 4, 5 a 6 představují jádro předkládané disertační práce. V kapitole čtyři je představena strategie CCS – MPC řízení PMSM (MPC řízení s neomezeným počtem možných akčních zásahů) za podmínek dříve uvedených dvou omeze-

ní. V kapitole páté je naopak analyzována strategie FCS – MPC (Finite Control Set MPC), kde počet vstupních hodnot je omezen na 8 možných poloh vektoru napájecího napětí. V kapitole šesté je řešena originální úloha stabilizace stejnosměrného napětí vstupního filtru trakčního PMSM pohonu. Řídicí algoritmus pracuje jako regulátor s kaskádním uspořádáním s LQR (lineárním kvadratickým regulátorem) a následnou FCS – MPC regulací momentu synchronního motoru. Ve všech těchto třech kapitolách jsou uvedeny výsledky experimentálního ověření vyvinutých řídicích strategií. V poslední sedmé kapitole je uvedeno stručné shrnutí dosažených výsledků i perspektivy dalšího výzkumu.

Originální nové poznatky

Originální zajímavé poznatky jsou uvedeny v kap. 4, 5 a 6. Představené varianty MPC řízení PMSM jsou charakterizovány rozdělením úlohy do dvou etap (prováděných postupně off-line a on-line): řešení MPC pro linearizovaný model PMSM (nebo LC obvodů filtru v kap. 6) s dlouhým časovým horizontem a ve druhé etapě využití tohoto řešení pro MPC s omezeními a horizontem jednoho kroku. Tímto způsobem je dosaženo významného zkrácení výpočetních časů algoritmu běžícího on-line, srovnatelných s časy pro klasické varianty kaskádně řazených regulátorů typu PID, přičemž dle provedených simulací je dosaženo dobrých výsledků v přechodných dějích i ustálených stavech, dosažených i díky uvažování aproximací ztrátových funkcí na dlouhých horizontech. V kapitole šesté bylo přitom docíleno stabilního řízení PMSM i při značných změnách trakčního napájecího napětí troleje.

Formální a jazyková úprava práce

Teoretické otázky MPC řízení jsou přehledně soustředěny v kap. 2, což dává dobrý předpoklad pro lepší orientaci v pojmech a metodách, využívaných v dalších klíčových kapitolách práce.

Vzhledem k rozsahu řešené problematiky (3 samostatné řešené úlohy MPC) je však text kapitoly 4, 5 a 6, byť srozumitelně komponovaný, dosti koncentrovaný a omezený jen na podstatné informace, data a ilustrace. Prospěšná by byla i větší diskuse k uváděným oscilogramům. Je zřejmé, že celá práce je přednostně orientována na prezentované techniky MPC, uplatněné na určitý objekt (zde PMSM), nikoli na hloubkovou analýzu chování takto řízených pohonů v širším rozsahu provozních podmínek.

V disertační práci jsem nalezl nemalý počet gramatických a zejména tiskových chyb:

9^4 – místo is má být are,

12, před rovnicí (2.9) – místo than má být then,

16^2 – u argumentu x_{t+n} chybí tilda,

20^6, 20_{10}, 32^3 – ponechané pochybnosti: (??),

40_{13} – chybí odkaz na rovnici: ( ).

Na mnoha místech je špatná nebo chybějící interpunkce. Tyto drobné nesrovnalosti nicméně ovlivňují dojem z obsahově velmi kvalitní doktorské disertační práce.

Publikační aktivita autora

Autor uvádí 2 publikace v impaktovaných časopisech, 8 příspěvků na významných mezinárodních konferencích, 5 příspěvků na českých konferencích, 8 výzkumných zpráv a 4 funkční prototypy a SW; s výjimkou 3 příspěvků na interních studentských konferencích se jedná o spoluautorství.

Celkově lze tedy autorovu publikační aktivitu pokládat za velmi dobrou, zejména s ohledem na její kvalitu.

Poznámky a náměty do diskuse při obhajobě doktorské disertační práce

- bylo by zajímavé konkretizovat poznámku[1] na str. 10;
- Fig 3.3 by si dle mne zasloužil více komentáře;
- str. 34 – lze očekávat, že uvedené současně neřešené problémy mohou být řešitelné a jak?
- jak si vysvětlit rovnici (5.4)?
- není Remark 5 na str. 5 v rozporu s předchozím textem?
- proč autor nazývá rovnice (6.1) – (6.3) jako torque control?

Závěr

Předkládaná doktorská disertační práce Ing. Štěpána Janouše je věnována aktuální problematice a přináší řadu nových vědeckých poznatků, formálně byla zpracována na dobré úrovni a její základní části již byly dostatečně publikovány. Domnívám se, že práce splňuje požadavky kladené na úroveň disertačních prací podle 111/1998 Sb.§47 a **doporučuji** ji tudíž k obhajobě.

V Praze 20. 6. 2017

prof. Ing. Viktor Valouch, CSc.