

doc. Ing. Petr Blaha, Ph.D.

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Technická 3082/12

616 00 Brno

Česká republika

E-mail: petr.blaha@ceitec.vutbr.cz

Tel: +420 541 141 6427

Oponentní posudek doktorské disertační práce

Disertant: Ing. Marek Fehér

Pracoviště: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, Katedra kybernetiky

Název disertační práce: **Aproximativní přístup k prediktivnímu řízení systémů s dynamikou dvojitého integrátoru**

a) zhodnocení významu disertační práce pro obor

Předložená disertační práce se zabývá problematikou prediktivního řízení dynamických systémů. Problematika je již delší dobu známá, spadá do oblasti moderní teorie řízení a poskytuje nástroj pro nalezení v nějakém smyslu optimálního řešení. Optimální vyřešení problému je v praxi chtěné a velmi žádoucí. Je často cílem automatického řízení, a proto nepřekvapuje, že se metody prediktivního řízení dostávají do praxe. Pro své vysoké výpočetní nároky si zatím našly svoji cestu k řízení spíše pomalých procesů. Narůstající výpočetní výkon dostupné výpočetní techniky a vývoj v oblasti optimalizací hledání správných akčních zásahů umožňuje aplikaci prediktivního řízení i v systémech s kratší a kratší periodou vzorkování. Těmito systémy jsou bezpochyby elektrické motory, na které cílí i přeložená práce. Snahu využít prediktivní řízení v této oblasti je možné pozorovat v množství článků publikovaných na toto téma v posledních deseti letech. Vedle přístupů, které hledají sub optimální řešení nahrazením otáčkové, případně polohové smyčky kaskádní struktury se začínají objevovat řešení, která nahrazují celou kaskádní strukturu, včetně proudové smyčky. Velmi krátké periody vzorkování odvozené od periody pulsně šířkové modulace používané při řízení elektrických motorů jsou pro aplikaci prediktivního řízení opravdovou výzvou. Jsou doprovázené poměrně razantními



optimalizacemi výpočtu aktuálního akčního zásahu. Jsou to přesně ta témata, která zatím nejsou dostatečně vyřešena a kterými se předložená práce zabývá. **Práci proto považuji za vysoce aktuální s výrazným aplikačním potenciálem.**

b) vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění určeného cíle

Disertační práce má 100 stran plus asi 15 stran příloh. Čerpá náměty z 93 literárních pramenů. Je přehledně rozdělena do 8 kapitol. Po úvodní kapitole následují dvě kapitoly popisující teoretický úvod. Je v nich popsáno prediktivní řízení jako takové a je zde představen systém se dvěma integrátory. Ve čtvrté kapitole jsou vytyčeny tři hlavní cíle disertační práce, které jsou řešeny v navazujících kapitolách 5, 6 a 7. Osmá kapitola poskytuje shrnutí dosažených výsledků a nastiňuje možnosti jejich dalšího rozšíření. Členění práce považuji za vyvážené.

Práce si vytyčila tři hlavní cíle, které souvisí s analýzou a návrhem MPC pro systém se dvěma integrátory a aplikací tohoto přístupu na mechanické a elektromechanické systémy. Všechny tři cíle je možné považovat za splněné.

Prvním cílem práce bylo nalezení vhodné aproximace dlouhého horizontu MPC kritéria, který v řadě případů znemožňuje jeho použití z důvodu velké časové náročnosti výpočtu akčního zásahu. Disertant navrhl terminální ztrátovou funkci pro systém se dvěma integrátory s omezeními. Ta vychází z časově optimálního řízení, doplňuje kritérium na jedнокrokovém horizontu a zajišťuje srovnatelné výsledky řízení jako MPC na dlouhém časovém horizontu. Toto zjištění je využito při řešení druhého cíle, kterým byla implementace MPC na řízení PMSM a jeho praktické ověření na reálném PMSM. Byly navrženy a odzkoušeny dva přístupy, jeden využívající konečnou množinu akčních zásahů, které jsou nabízené klasickým třífázovým střídačem a druhý využívající spojitou množinu akčních zásahů s relaxovaným kritériem. Z provedeného simulačního srovnání a zejména na základě experimentů s reálným motorem lze konstatovat, že i tento cíl je možné považovat za splněný. Zajímavé by bylo vyzkoušet funkčnost navrženého algoritmu i na případech, které aproximace dvojitým integrátorem nebere v potaz, tedy kdy je motor zatížen. Teprve toto ověření by ukázalo připravenost algoritmu pro reálné průmyslové aplikace. Třetím cílem bylo provést zobecnění návrhu prediktivního řízení pro nesymetrická omezení. Jedná se o důležitý krok, který umožňuje nejen činnost pohonu v režimu odbuzování, ale řeší i dříve uvedený problém se zatěžovacím momentem. Simulační experimenty prezentované v práci opět potvrzují splnění vytyčeného cíle a ukazují zajímavé výsledky.

c) stanovisko k výsledkům disertační práce a k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele disertační práce



Za přínos práce je možné považovat analýzu systému se dvěma integrátory, návrh několika typů MPC algoritmů na tento systém, jejich vzájemné srovnání a jejich aplikace na problém řízení vozíku, stejnosměrného motoru a synchronního motoru s permanentními magnety. Algoritmus řízení motorů je optimalizovaný na rychlé dosažení požadovaných otáček a z podstaty analogie se systémem se dvěma integrátory uvažuje zatížení motoru nulovým momentem. Tomuto stavu odpovídají i prezentované simulační a experimentální výsledky. Srovnání MPC algoritmů ukazuje, že je možné nahradit kritérium na dlouhém časovém intervalu z hlediska výpočetní náročnosti výrazně jednodušším kritériem, kde je predikce o jeden krok kombinovaná s navrženou terminální funkcí, případně jen terminální funkcí samotnou. **Za velmi důležitý krok a výsledek považují modifikaci MPC algoritmu a jeho rozšíření o nesymetrická omezení.** Ta posouvají možnosti řídicích algoritmů mnohem dál. Umožňují zahrnout vliv změny zatěžovacího momentu a schopnost pohonu pracovat v odbuzení a dosáhnout tak vyšších otáček.

d) vyjádření k systematice, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni disertační práce

Formální úprava disertační práce je na vysoké úrovni. Práce je prakticky prostá gramatických chyb. Je v ní možné nalézt jen malé množství překlepů, jako například „kde dokáže kvalitě kompenzovat“, „se při generování akčního zásahů“ na straně 81 a „třeba najít odpovědět na otázku“ na straně 98. Z hlediska grafického zpracování jí není co vytknout. Vzorečky, grafy i tabulky jsou připraveny s náležitou pečlivostí. Oceňují barevné odlišení průběhů a vložení detailů v místech, kde je snižená přehlednost.

e) vyjádření k publikacím studenta

Podle SCOPUS je disertant autorem šesti publikací, z nichž jedna je článek v časopise v European Journal of Control (2020), zbytek jsou konferenční příspěvky. Tématu disertace se věnuje 5 z nich. Za hodnotný považují citační ohlas. Na jeho publikace SCOPUS eviduje 26 citací a jeho h-index je 3. IEEEExplore indexuje 4 publikace disertanta a 9 citací.

V seznamu svých publikací disertant v práci uvádí další dvě publikace (oproti SCOPUS), z nichž jedna je časopisecký článek v recenzním řízení a druhá je konferenční příspěvek. **Publikační profil disertanta je velmi dobrý. V jeho publikacích jsou, dle mého názoru, opublikovány hlavní výsledky disertační práce.** Množství citací poukazuje na skutečnost, že popsané přístupy k MPC řízení elektrických motorů jsou pro ostatní výzkumníky inspirující a že dosažené výsledky jsou uznány světovou odbornou veřejností.

f) jednoznačné vyjádření oponenta, zda doporučuje či nedoporučuje disertační práci k obhajobě

Vzhledem k velmi kvalitně zpracované disertační práci, splnění stanovených cílů a hodnotným vědeckým výstupům považují práci Ing. Marka Fehéra za velmi zdařilou. Student bezpochyby prokázal schopnost

samostatné tvůrčí vědecké práce. Disertační práce obsahuje původní výsledky autora, které řádně opublikoval. Práce splňuje veškeré potřebné náležitosti stanovené v § 47, odst. 4 zákona č. 111/98 Sb. Předloženou disertační práci proto doporučuji k obhajobě před komisí pro udělení akademického titulu Ph.D. v oboru Kybernetika.

Otázky k obhajobě

1. Na straně 25 jsou v rovnici (3.1) konstanty K_1 a K_2 , které jsou označeny jako časové konstanty. Můžete přiblížit co je motivací pro toto označení?
2. V práci na straně 75 píšete, že napětí u_q je konstanta nezávislá na napětí u_d , z čehož plyne přirozená volba optimálního napětí $u_d^*=0$. Můžete to trochu víc rozvést?
3. Na straně 91 se píše, že je možné D-I model s afinní strukturou (7.7) převést pomocí substitucí (7.9) na model s lineární strukturou (3.1). Můžete naznačit jak a za jakých podmínek?

.....
doc. Ing. Petr Blaha, Ph.D.

Posudek disertační práce

Název práce: Aproximativní přístup k prediktivnímu řízení systémů s dynamikou dvojitého integrálu
Doktorand: Ing. Marek Fehér
Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, Katedra kybernetiky
Obor: Kybernetika
Školitel: doc. Ing. Ondřej Straka, Ph.D.
Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd
Oponent: doc. Ing. Marek Kubalčík, Ph.D.
Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky

Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Předložená disertační práce se zabývá návrhem prediktivního řízení pro systémy s dynamikou dvojitého integrálu. Řízení takových systémů vyžaduje velmi krátké periody vzorkování. Prediktivní řízení systémů s rychlou dynamikou je již delší dobu předmětem velmi intenzivního výzkumu a studia, ať už jde o výkonné optimalizační postupy, anebo o různé efektivnější formulace vlastní úlohy prediktivního řízení. Vzhledem k neustále rostoucímu výkonu výpočetní techniky a vývojem nových výkonných numerických metod je prediktivní řízení stále častěji implementováno v průmyslové praxi. Jedná se tedy o téma velmi aktuální. Práce přináší některá nová řešení v rámci prediktivního řízení systémů s dynamikou dvojitého integrálu.

Postup řešení problému, použité metody a splnění určeného cíle

Po zmapování současného stavu v oblasti prediktivního řízení systémů s dynamikou dvojitého integrálu si disertační práce klade tři hlavní dílčí cíle: nalezení vhodné aproximace dlouhého horizontu kritéria prediktivního řízení pro třídu systémů s dynamikou dvojitého integrátoru, návrh efektivního prediktivního řízení použitelného v praktických aplikacích, zobecnění návrhu prediktivního řízení pro nesymetrická omezení. Disertant navázal na současný stav poznání, navrhl vlastní řešení a dosažené výsledky verifikoval jak simulačně, tak při řízení reálné soustavy. Použité metody a postupy odpovídají dané problematice a cílům disertační práce. Je možno konstatovat, že stanovené cíle práce byly splněny.

Výsledky disertační práce a původní přínos předkladatele práce

Hlavními konkrétními původními přínosy disertanta jsou analýza vlivu predikčního horizontu na kvalitu řízení s ohledem na normu ve ztrátové funkci MPC kritéria, návrh terminální ztrátové funkce pro aproximaci dlouhého predikčního horizontu, návrh efektivního prediktivního řízení použitelného v praktických aplikacích řízení systémů s dynamikou dvojitého integrálu a zobecnění navrženého prediktivního řízení pro nesymetrická omezení. Závěr práce také obsahuje představu autora o rozvoji tématu disertační práce v dalším výzkumu.

Systematika, přehlednost, formální úprava a jazyková úroveň disertační práce

Disertační práce je psána přehledně a srozumitelně, jednotlivé kapitoly na sebe logicky navazují a svým obsahem jsou vyvážené. Formální úprava práce včetně vložených obrázků je na vysoké úrovni. Práce má velmi dobrou jazykovou úroveň. Pouze výjimečně se vyskytují drobné chyby a překlepy.

Publikace disertanta

V seznamu publikací disertanta je uvedeno celkem sedm publikací vztahujících se k tématu disertace a jedna publikace k tématu disertace se nevztahující. Kladně hodnotit lze zejména publikaci v prestižním impaktovaném časopise z oblasti řízení *European Journal of Control*. Příspěvek v tomto časopise prošel velmi přísným recenzním řízením, kde posuzovateli byli zřejmě světově uznávaní odborníci na danou problematiku. Tuto publikaci lze tedy rovněž považovat za jednoznačné potvrzení významu výsledků dosažených v disertační práci. Navíc další článek v tomto časopise má disertant v recenzním řízení. Další významnou časopiseckou publikací je příspěvek v *Journal of Physics: Conference Series*. Ostatní publikace jsou konferenční příspěvky. Publikační aktivity studenta jsou na velmi dobré úrovni.

Závěrečné zhodnocení

Výsledky prezentované v předložené disertační práci Ing. Marka Fehéra, jakož i rozsah a kvalita jeho publikační činnosti, potvrzují jeho velmi dobrou odbornou a vědeckou úroveň. Předložená disertační práce splňuje všechny požadavky kladené na tyto práce a přináší nové poznatky.

Disertační práci doporučuji k obhajobě a po úspěšné obhajobě doporučuji udělit Ing. Markovi Fehérovi titul Ph.D.

Ve Zlíně, 6. 12. 2021

doc. Ing. Marek Kubalčík, Ph.D.