

I. IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE

Název práce:	Algorithms for advanced motion control using permanent magnet synchronous motors and brushless DC motors
Jméno autora:	Lukáš Černý
Typ práce:	diplomová
Fakulta/ústav:	Fakulta elektrotechnická (FEL)
Katedra/ústav:	Katedra řídicí techniky
Vedoucí práce:	Doc. Ing. Zdeněk Hurák, Ph.D.
Pracoviště vedoucího práce:	Katedra řídicí techniky FEL ČVUT v Praze

II. HODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH KRITÉRIÍ

Zadání	náročnější
<i>Hodnocení náročnosti zadání závěrečné práce.</i>	
Zadání bylo poměrně náročné, a to zejména pro požadovanou šíři záběru – kromě detailního porozumění fyzikálním a konstrukčním principům synchronních motorů a zvládnutí poměrně pokročilých matematických metod pro prediktivní řízení musel student kvůli požadovaným experimentům prokázat i praktické kompetence v oblasti elektroniky používané pro řízení tohoto typu motorů.	

Splnění zadání	splněno s menšími výhradami
<i>Posudte, zda předložená závěrečná práce splňuje zadání. V komentáři případně uveďte body zadání, které nebyly zcela splněny, nebo zda je práce oproti zadání rozšířena. Nebylo-li zadání zcela splněno, pokuste se posoudit závažnost, dopady a případně i příčiny jednotlivých nedostatků.</i>	
Z celkových 6 bodů zadání student splnil prvních 5, avšak bod šestý – předvedení funkčnosti navrženého pokročilejšího regulátoru formou laboratorního experimentu – splněn nebyl. Znemožnění přístupu do laboratoře po velkou část semestru v důsledku koronavirových omezení je jistě tím hlavním a uznatelným důvodem, avšak ne jediným.	

Aktivita a samostatnost při zpracování práce	B - velmi dobře
<i>Posudte, zda byl student během řešení aktivní, zda dodržoval dohodnuté termíny, jestli své řešení průběžně konzultoval a zda byl na konzultace dostatečně připraven. Posudte schopnost studenta samostatně tvůrčí práce.</i>	
Student po celou dobu práce na svém diplomovém projektu pracoval naprosto samostatně. Pracoval rovněž velmi aktivně a intenzivně (před příchodem koronavirových omezení i po jejich uvolnění pracoval ve školní laboratoři téměř každý den). Je to zároveň ale moje hlavní výhrada v celém tomto hodnocení, že si zjevně nedokázal identifikovat prioritní dílčí i celkové cíle a rozvrhnout si podle toho svůj čas. Snad je to snaha o perfekcionalismus, které ho vede k optimalizaci každého dílčího kroku, přičemž by ale na místě spíše bylo spěchat k celkové funkčnosti a k optimalizaci se vracet až později, pokud se vůbec ukáže potřebná. Podobně při psaní textu diplomové práce musel student zjevně investovat obrovské úsilí do sepsání úvodních kapitol, které čtenáře zasvěčují do problematiky, a to téměř na úrovni kvalitní učebnice, až mu zjevně nezůstal čas na důkladnější rozepsání (a pár revizí) té druhé a důležitější části textu, ve které popisuje vlastní práci.	

Odborná úroveň	A - výborně
<i>Posudte úroveň odbornosti závěrečné práce, využití znalostí získaných studiem a z odborné literatury, využití podkladů a dat získaných z praxe.</i>	
Problematika zpětnovazebního řízení synchronních motorů s permanentním magnetem založeného na numerické optimalizaci je skutečně na vrcholu složitosti v branži řízení elektrických motorů a student předvedl zvládnutí netriviálních fundamentálních ale i pokročilých (třebas i jen pár let starých) postupů. Jednotlivé dílčí kroky předvedené v práci jednoznačně prokazují vysokou odbornou úroveň studenta.	

Formální a jazyková úroveň, rozsah práce	B - velmi dobře
<i>Posudte správnost používání formálních zápisů obsažených v práci. Posudte typografickou a jazykovou stránku.</i>	
Práce je psána velmi dobrou angličtinou. I po typografické stránce působí práce velmi solidně (vysázena v systému LaTeX s dodržemím i méně známých doporučení a konvencí). Student prokazatelně dosáhl schopnosti psané prezentace na velmi	

vysoké úrovni. Nicméně i tak by text práce měl velký užitek z jedné nebo dvou revizí – je poměrně dobře znát, že zejména jeho druhá polovina byla sepisována na poslední chvíli (a coby vedoucí práce jsem ji ve finální formě dokonce viděl až po odevzdání do systému).

Výběr zdrojů, korektnost citací

A - výborně

Vyjádřete se k aktivitě studenta při získávání a využívání studijních materiálů k řešení závěrečné práce. Charakterizujte výběr pramenů. Posuďte, zda student využil všechny relevantní zdroje. Ověřte, zda jsou všechny převzaté prvky řádně odlišeny od vlastních výsledků a úvah, zda nedošlo k porušení citační etiky a zda jsou bibliografické citace úplné a v souladu s citačními zvyklostmi a normami.

Poměrně silnou stránkou práce je velmi důkladná rešeršní příprava – v diplomové práci student cituje kromě 3 monografií zadaných vedoucím ještě dalších téměř 30 zdrojů – převážně odborných článků z mezinárodních časopisů a další kvalitní a relevantní monografie. Není to možná ani v samotném textu práce poznat, ale to množství nových informací, které musel student nastudovat, bylo značné.

Další komentáře a hodnocení

Vyjádřete se k úrovni dosažených hlavních výsledků závěrečné práce, např. k úrovni teoretických výsledků, nebo k úrovni a funkčnosti technického nebo programového vytvořeného řešení, publikačním výstupům, experimentální zručnosti apod.

III. CELKOVÉ HODNOCENÍ A NÁVRH KLASIFIKACE

Shrňte aspekty závěrečné práce, které nejvíce ovlivnily Vaše celkové hodnocení.

Splněno – třebaže s výhradou – bylo poměrně **náročné zadání** vyžadující jít do šířky (fyzika, praktická elektronika, programování, numerická optimalizace) i do hloubky (netriviální fundamentální principy i nejnovější pokročilé výsledky z odborné zahraniční literatury). Už jen za toto hodnotím studentův výkon velmi vysoce.

I s uznáním **objektivních překážek** – v důsledku koronavirových omezení byl studentovi znemožněn přístup do laboratoře po část semestru – však nelze přehlédnout **slabší schopnost rozvrhnout si dobře práci**. Zejména se zjevně nedařilo průběžně **identifikovat opravdu podstatné dílčí úkoly** vedoucí k předvedení celkové funkčnosti a odlišit je od méně důležitých. O takových, ke kterým by jistě bývalo vhodné se vrátit, ale až právě po tom předvedení základní funkčnosti.

Celkově velmi kvalitní práce, kvůli nepředvedení byť i jen základní funkčnosti formou laboratorního experimentu, jak bylo požadováno v zadání, však nemůžu hodnotit nejvyšším stupněm.

Předloženou závěrečnou práci hodnotím klasifikačním stupněm **B - velmi dobře**.

Datum: 3.9.2020

Podpis:

I. IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE

Název práce:	Algorithms for Advanced Motion Control Using Permanent Magnet Synchronous Motors and Brushless DC Motors
Jméno autora:	Lukáš Černý
Typ práce:	diplomová
Fakulta/ústav:	Fakulta elektrotechnická (FEL)
Katedra/ústav:	Department of Control Engineering
Oponent práce:	Doc. Ing. Michal Kvasnica, PhD.
Pracoviště oponenta práce:	Slovenská technická univerzita v Bratislave, Slovensko

II. HODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH KRITÉRIÍ

Zadání	náročnější
<i>Hodnocení náročnosti zadání závěrečné práce.</i>	
Cílem práce je návrh a implementace prediktivního řízení pro DC motory. Zadané pozostává z 6 bodů: popis a matematické modelování PMSM motorů, vysvětlení hlavních konceptů řízení takovýchto motorů, přehled prediktivních přístupů k řízení motorů, výběr, implementace a simulační ověření prediktivního řízení, volba hardvérové platformy a experimentální ověření. Ide o zadání z kategorie náročnějších, protože si vyžaduje zvládnutí technik modelování, simulace, optimalizace a hardvérové implementace.	

Splnění zadání	splněno s menšími výhradami
<i>Posuďte, zda předložená závěrečná práce splňuje zadání. V komentáři případně uveďte body zadání, které nebyly zcela splněny, nebo zda je práce oproti zadání rozšířena. Nebylo-li zadání zcela splněno, pokuste se posoudit závažnost, dopady a případně i příčiny jednotlivých nedostatků.</i>	
Z 6 bodů zadání práce splnila 5, přičemž nesplněný (zřejmě aj jako důsledek situace způsobené virem COVID-19) zůstal poslední bod – experimentálně ověření prediktivního řízení. Důvody student podrobně specifikuje v kapitole 5, ať mohla být tato kapitola obsáhlejší a student v ní mohl analyzovat problém více do hloubky. Ostatní body zadání byly splněny. Popis a matematické modelování synchronních motorů je detailně rozobraný v kapitole 2 a příloze A, kde jsou detailně rozobrané všechny nuance vrátane reportování exaktních matematických vztahů. Přehled dostupných řídicích přístupů (PI regulátory a dva typy prediktivních regulátorů) jsou podrobně popsány v kapitole 3 a příloze B. Tu mi však chybí obsáhlejší diskuse výhod/nevýhod CCS a FCS přístupů k prediktivnímu řízení. Simulačnímu ověření regulátorů je věnována kapitola 4.	

Zvolení postup řešení	vynikající
<i>Posuďte, zda student zvolil správný postup nebo metody řešení.</i>	
Na syntézu prediktivních regulátorů student použil dva přístupy – tzv. Continuous-Control-Set (CCS) přístup a metodu Finite-Control-Set (FCS). CCS přístup má výhodu v tom, že vedí na konvexní optimalizační problém, který má potenciál být řešitelný v reálném čase. FCS přístup vyžaduje použití vetvení při řešení optimalizačního problému, což zvyšuje časovou náročnost řešení. Je třeba poznamenat, že oba přístupy jsou dobře dokumentovány ve světové literatuře. Ich využití na konkrétní případ PMSM motorů je tedy adekvátní. V práci však chybí detailnější analýza výpočtového času potřebného na řešení CCS a FCS problémů, především jako funkce délky prediktivního horizontu. Po technické a matematické stránce je zvolený postup řešení správný.	

Odborná úroveň	A - výborně
<i>Posuďte úroveň odbornosti závěrečné práce, využití znalostí získaných studiem a z odborné literatury, využití podkladů a dat získaných z praxe.</i>	
Práce je po odborné stránce na dobré úrovni, matematické vztahy jsou správně zapsány, záměry autora jsou jasné formulované a tedy pro čtenáře pochopitelné.	

Formální a jazyková úroveň, rozsah práce

B - velmi dobře

Posuďte správnost používání formálních zápisů obsažených v práci. Posuďte typografickou a jazykovou stránku.

Práce je po formální stránce na vysokej úrovni. Kladne hodnotím, že je napísaná v angličtine. To umožní, aby bola nápomocná aj iným študentom mimo ČVUT. Obrázkom by však prospela lepšia grafická úprava, keďže sú často príliš malé a popisky na osiach ťažko čitateľné. Práca obsahuje zopár preklepov a nepresných anglických formulácií (napr. aj chýbajúce členy, predovšetkým neurčité), čo je však pochopiteľné, keďže angličtina nie je autorovým materinským jazykom.

Výběr zdrojů, korektnost citací

A - výborně

Vyjádřete se k aktivitě studenta při získávání a využívání studijních materiálů k řešení závěrečné práce. Charakterizujte výběr pramenů. Posuďte, zda student využil všechny relevantní zdroje. Ověřte, zda jsou všechny převzaté prvky řádně odlišeny od vlastních výsledků a úvah, zda nedošlo k porušení citační etiky a zda jsou bibliografické citace úplné a v souladu s citačními zvyklostmi a normami.

Práca sa odkazuje na 20 zdrojov, ktoré boli vhodne zvolené, sú aktuálne a sú správne citované.

Další komentáře a hodnocení

Vyjádřete se k úrovni dosažených hlavních výsledků závěrečné práce, např. k úrovni teoretických výsledků, nebo k úrovni a funkčnosti technického nebo programového vytvořeného řešení, publikačním výstupům, experimentální zručnosti apod.

Hodnotu práce vidím predovšetkým v detailnom vysvetlení modelovania synchronných motorov a prehľade dostupných metód prediktívneho riadenia pre tieto systémy. Simulačné výsledky ukazujú, že metódy riadenia boli vhodne zvolené, aj keď mi chýba detailnejšia analýza vplyvu laditeľných parametrov na kvalitu riadenia (predovšetkým na redukciu oscilácií v okolí žiadanej hodnoty). Hardvérová implementácia a experimentálne overenie bohužiaľ absentujú, zrejme z dôvodov spojených s coronakrízou. Študent však mohol aspoň analyzovať výpočtovú náročnosť jednotlivých metód prediktívneho riadenia na zvolenej hardvérovej platforme.

III. CELKOVÉ HODNOCENÍ, OTÁZKY K OBHAJOBĚ, NÁVRH KLASIFIKACE

Shrňte aspekty závěrečné práce, které nejvíce ovlivnily Vaše celkové hodnocení. Uvedte případné otázky, které by měl student zodpovědět při obhajobě závěrečné práce před komisí.

Predložená diplomová práca je na dobrej technickej úrovni. Poskytuje ucelený a detailný prehľad modelovania synchronných motorov ako i rôznych prístupov k syntéze prediktívnych regulátorov. Jednotlivé matematické formulácie sú jasné a presné. Simulačné overenie demonštruje efektivitu zvoleného prístupu. Jediným negatívom práce je absencia hardvérovej implementácie a experimentálneho overenia jednotlivých regulátorov.

Otázky:

- V kapitole 2.6 spomínate možnosť využitia Eulerovej diskretizácie. Tá však niekedy môže viesť k nestabilnému priebehu. Aké iné, relatívne jednoduché, prístupy k diskretizácii by ste vedeli aplikovať?
- V kapitole 2.8 sú podrobne rozoberané ohraničenia, avšak v kapitole 4 nie je jasné, akým spôsobom si s týmito ohraničeniami poradil PI regulátor. Išlo iba o použitie obvyčajnej saturácie akčných zásahov? Navyiac takáto saturácia sa dá použiť iba na vynútenie vstupných ohraničení, ale nie stavových. Prosím o vysvetlenie, akým spôsobom boli vynútené/dodržané stavové ohraničenia v simuláciách.
- Pripomienka: vo vzťahu (3.11) je zbytočné uvádzať premennú „z“, keďže tá v rovniciach nevystupuje a objavuje sa až v (3.12). To isté platí pre rovnice (3.18).
- Sú pri reálnej implementácii k dispozícii merania všetkých stavových premenných? Ak nie, akým spôsobom by ste ich odhadovali?
- Pri reálnej implementácii bude potrebné uvažovať s odchýlkou medzi predikčným modelom a reálnym správaním motora. Preto by bolo vhodné v predikčných rovniciach (3.11b), (3.11c), (3.18b) a (3.18c) uvažovať s dodatečnou poruchou, ktorú je navyiac potrebné vhodne odhadovať. Môžete sa vyjadriť

k tomuto konceptu, ktorý je v komunite prediktívneho riadenia známy pod názvom „disturbance modeling“?

- Pripomienka: v rovniciach (3.11) a (3.18) chýba označenie, aké hodnoty nadobúda premenná „k“ (malo by to tam byť ako v rovniciach (3.12f) a (3.20g))
- Môžete okomentovať časovú náročnosť riešenia CCS a FCS problémov počas simulácií, predovšetkým vzhľadom k zvolenému vzorkovaniu, ktoré je 25 kHz resp. 500 kHz?
- Prečo je v CCS prístupe (kap. 4.1.2) zvolená vzorkovacia frekvencia 25 kHz, ale v FCS metóde (kap. 4.1.3) je to až 500 kHz?
- Na obrázku 4.1 (b) je pekne vidieť, že prediktívny regulátor začína reagovať ešte pred zmenou referencie, keďže uvažujeme, že poznáme jej budúci priebeh (ide teda o tzv. „trajectory preview“). Na obrázku 4.1 (c) sa však zdá, že žiaden „preview“ nebol použitý. Prosím o vysvetlenie.
- Aký solver ste použili na riešenie FCS problému, ktorý si vzhľadom na diskretný tvar množiny „U“ v (3.19) vyžaduje vetvenie?

Predloženou záverečnou prácou hodnotím klasifikačným stupňom **B - veľmi dobre**.

Datum: 28.8.2020

Podpis: