

## I. IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE

Název práce:	Řízení pohonu elektrického vozidla Formula Student
Jméno autora:	Bc. Miroslav Rýzek
Typ práce:	diplomová
Fakulta/ústav:	Fakulta elektrotechnická (FEL)
Katedra/ústav:	Katedra měření
Oponent práce:	Ing. Pavel Pošta, Ph.D.
Pracoviště oponenta práce:	Škoda Electric a.s.

## II. HODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH KRITÉRIÍ

Zadání	náročnější
<i>Hodnocení náročnosti zadání závěrečné práce.</i>	
<p>Vozidlo Formula Student je projekt probíhající na mezinárodní úrovni a studenti tak mají možnost porovnat výsledky práce s prací na jiných univerzitách. Tento fakt je již sám o sobě atraktivní. Práce na tomto projektu vyžaduje pokrytí široké oblasti znalostí. Neméně důležitou součástí je správná koordinace práce v týmu, bez níž by nebylo možné připravit vozidlo na závody. Zadání pokrývá oblast od teoretického zpracování řídicích strategií synchronního motoru, přes volbu regulační strategie a tvorbu modelu pohonu, až po realizaci HW části měniče dle vlastního návrhu včetně příslušných SW bloků. Zadání je komplexní a jeho vyšší náročnost odpovídá nárokům na celý projekt.</p>	

Splnění zadání	splněno s většími 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>	
<p>1) Provedte rešerši řídicích strategií synchronních motorů s PM. Autor na začátku své práce ve stručnosti představuje synchronní motor s permanentními magnety. Uvádí jednotlivé typy těchto strojů a popisuje jejich konstrukční řešení. Rozsah této části je přiměřený pro objasnění rozdílů v magnetickém poli jednotlivých druhů strojů, na něž se odvolává následující část zabývající se řídicími strategiemi. Řídicí strategie jsou logicky rozčleněny podle tvaru magnetického pole motoru na lichoběžníkové a sinusové. Autor uvádí několik řídicích strategií pro každou z těchto podskupin. Vzhledem k tomu, že těžiště rešerše mělo ležet v této oblasti, měla být tato část obsáhlejší. Popis řídicích strategií je uveden pouze formou psaného textu. Vhodnější by bylo doplnit tento strohý text graficky např. pomocí blokových schémat regulační strategie (v textu se uvádí, zda metody vyžaduje či nevyžaduje regulátory proudu, nebo že využívá transformaci Clarkové či Parkovy) či průběhů veličin např. když se hovoří o zvlnění momentu či proudu. V této části by bylo vhodné doplnit odkaz na literaturu, již autor považuje za vhodnou pro podrobnější seznámení s danou regulační strategií.</p> <p>2) V návaznosti na projekt Formula Student vytvořte simulační model pohonu s PMSM a zvolené řídicí strategie. Autor v této části konstatuje, že ani při znalosti všech parametrů stroje není možné sestavit model odpovídající realitě, nebo určit jeho přesné chování a reálné výstupy regulátoru. S tímto tvrzením není možné souhlasit. Dobře sestavený model pohonu umožňuje zkrátit testovací fázi a provést dobré seznámení s regulovanou soustavou. Nastavení regulátorů z modelu je možné přenést do reálného řídicího systému a využít přinejmenším v počáteční fázi práce s reálným HW. Autor v práci uvádí popis pouze pro zjednodušený model PMSM a triviální způsob jakým spočítat parametry modelu z parametrů uváděných výrobcem. Automaticky je předpokládáno, že indukované napětí bude sinusové. V závěru autor uvádí, že takovýto model je pro vývoj HW části dostatečný. Pravdou je, že tento model stroje je často uvažován pro simulaci pohonu včetně měniče. Dále se o modelu autor ve dvou větách zmiňuje v kapitole 3.3.3. Zde se pouze odkazuje na model přiložený na CD. Vzhledem k tomu, že bylo požadováno modelovat zvolenou řídicí strategii, tak by bylo na místě uvést blokové schéma regulační struktury a výsledky simulace jako průběh fázových proudů motoru, proud odebíraný měničem a moment generovaný pohonem včetně vyhodnocení zvlnění proudů a momentu. V tab. 3.3 je rozpor mezi maximálním a jmenovitou rychlostí pohonu.</p> <p>3) Při volbě řídicí strategie berte v potaz požadovanou dynamiku a účinnost pohonu vzhledem k aplikaci na vozidlo Formula Student. Autor uvádí volbu řídicí strategie poněkud nelogicky v kapitole 4 Návrh frekvenčního měniče. S volbou FOC lze jen souhlasit. Ve stávající fázi projektu je potřeba nasadit spolehlivou řídicí strategii. Strategii DTC by bylo možno doplnit později a</p>	

porovnat její vlastnosti právě oproti FOC. Autor uvádí, že větší dynamika DTC by se vzhledem k mechanickým vlastnostem částí vozu neuplatnila. Zajímavým údajem by byla informace o maximální přípustné pulzaci momentu pohonu a vlastní rezonanční frekvenci mechanické části pohonů. Pokud by byly tyto parametry k dispozici, rovněž by bylo vhodné je zohlednit při volně řídicí strategii.

4) Navrhněte prototyp měniče, tak aby splňoval pravidla soutěže Formula Student a zároveň umožňoval realizaci zvolené řídicí strategie pro PMSM motor.

Autor v pravidlech vytypoval body, které považuje za omezující pro návrh měniče pohonu a jim přizpůsobil vyvíjený HW. Tento postup je logický a jak je uvedeno v závěru, dodržení pravidel bylo zkontrolováno během technické prohlídky před každým závodem. Toto dokládá správnost autorova postupu.

5) K měniči navrhněte obvody a bloky kódu pro vyhodnocení veličin potřebných pro realizaci zvolené řídicí strategie (otáčky, proud, napětí, ...).

Autor se tímto bodem zabývá podrobně a věnuje mu značnou část práce. Tato část je ucelená a obsahuje jak nutný teoretický základ k jednotlivým měřením tak odkazy na omezení vyplývající z pravidel pro konstrukci vozu. Jsou zde uvedeny rovnice, jež byly použity při vývoji HW a schémata zpracování vstupních signálů. Tyto schémata jsou rozčleněny do funkčních bloků, což zvyšuje jejich čitelnost. Pro obvody upravující měřené signály byly zpracovány frekvenční charakteristiky, což je zásadní pro určení frekvenčního rozsahu měření.

SW bloky jsou uvedeny v práci jako výpis ze zdrojového kódu. Toto není vhodný způsob jejich prezentace. Vhodnější by bylo pouze popsat jejich funkci rovnicí nebo vývojovým diagramem a samotné zdrojové kódy uvést jako přílohu. Pro posouzení funkčnosti, bylo by žádoucí v práci uvést porovnání s nezávislým měřením a vyhodnotit odchylku měření vyvinutého HW.

6) Ověřte funkčnost jednotlivých částí navrženého prototypu měniče.

V této části byl autor velmi stručný. Omezil se na konstatování, že zvolená řídicí strategie byla implementována do vyvinutého HW. Implementace do reálného HW nebyla zadána a tímto autor svoji práci rozšířil. Funkčnost bohužel dokládá jediným záznamem proudů, napětí, rychlosti a teploty. Opomeneme-li, že na ose x není uvedena veličina a jednotka a bude předpokládat, že jde o časovou osu, naprosto zde chybí podrobnější informace. Není zde uvedeno, zda jde o měření samotného pohonu, nebo průběhu testovací jízdy. Chybí informace, jakými prostředky byl záznam pořízen. Pokud jde o záznam z regulátoru, tak by měl rovněž obsahovat zadání a nezávislé měření fyzikálních veličin. V tomto případě není možné objektivně posoudit, jak se zařízení chová.

V případě, že je výsledkem práce HW, je zvykem přiložit jeho fotografii, aby bylo možné posoudit úroveň jeho zpracování.

## Zvolený postup řešení

správný

*Posuďte, zda student zvolil správný postup nebo metody řešení.*

Postup řešení HW části měniče byl logicky zvolen od sepsání omezujících podmínek na vyvíjené části měniče. Tyto části byly rozděleny do bloků, a následně vypočteny parametry součástí. Kontrola návrhu byla částečně provedena výpočtem frekvenčních charakteristik. Bohužel chybí srovnání výstupů vyvinutých částí s nezávislým měřením.

Vzhledem k absenci popisu simulačního modelu a jeho výstupů není možné posoudit správnost postupu řešení. Je třeba se omezit na konstatování, že autor model vytvořil. Rozšíření práce o nasazení řídicí strategie na reálné vozidlo naznačuje, že autor problematiku ovládá. Nasazení na reálný HW bylo učiněno pravděpodobně na úkor simulace a její prezentace v práci. Toto nesystematické řešení by měl autor vysvětlit.

## Odborná úroveň

D - uspokojivě

*Posuďte úroveň odbornosti závěrečné práce, využití znalostí získaných studiem a z odborné literatury, využití podkladů a dat získaných z praxe.*

Autor prokázal, že je schopen prakticky využívat teoretické znalosti. Musel se zorientovat v pravidlech pro vozy Formula Student a v souladu s nimi navrhnout HW měniče. Platnost jeho návrhu nejlépe prokazuje úspěšné absolvování technické kontroly vozu v rámci závodů. Oproti tomu je rešerše v úvodu velmi stručná a autor kladl malý důraz na praktické ověření dílčích částí návrhu a prezentaci výsledků. Závěr práce je stručný a měl by konkrétně shrnout výsledky autorovi práce. Konstatování, že navržené řešení z práce jsou použita na reálném vozidle, není dostačující.

## Formální a jazyková úroveň, rozsah práce

E - dostatečně

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

1) V práci chybí přehled použitých symbolů, seznam obrázků a tabulek.

2) Práce obsahuje velké množství anglických termínů, které mají ekvivalent ve slovenštině, v níž je práce vypracována.

Autor by měl používat angličtinu pro vysvětlení zkratk a v případě, že neexistuje ekvivalent v jazyce, v němž je práce napsána.

- 3) Uváděné grafy, bloková schémata a tabulky jsou popsány anglicky. Vhodnější by bylo je uvádět ve stejném jazyce, v němž je práce napsána.
- 4) Rovnice nejsou konzistentní stran značení. Napětí je někdy označováno písmenem V a jindy U. Příkladem toho je rovnice 4.23, kde je uvedeno  $V_{out}$ , které se v rovnici 4.24 změní na  $U_{out}$ . Zároveň se v těchto rovnicích změní VCC na  $U_{A+6V} \cdot V_{CC}$  je v textu nad rovnicí označeno s velkým C ( $V_{CC}$ ).
- 5) Práce je na více místech datována do ledna roku 2015. Zadání z konce listopadu 2014 naznačuje, že autor nebyl při závěrečných úpravách důsledný.
- 6) Autor v textu práce používá první osobu jednotného čísla, což v odborných člancích, diplomových nebo disertačních pracích nebývá zvykem.
- 7) Na straně 59 a 61 je v textu nelogicky vloženo odsazení textu.
- 8) Vkládání výpisu zdrojového kódu bývá zvykem např. u manuálu procesoru. V diplomové práci by bylo vhodnější prezentovat algoritmus vývojovým diagramem nebo rovnicí.
- 9) Na str. 11 autor hovoří o hustotě krouticího momentu, pravděpodobně byla myšlena výkonová hustota.
- 10) Na str. 11 došlo k záměně kompletně a komplexně.
- 11) Na str. 36 chybí odkaz na tabulku.
- 12) Na str. 50 je odkaz na rovnici 4.29, tento odkaz je evidentně na jinou rovnici než autor zamýšlel.
- 13) Text práce je místy neformální až hovorový. Formulace textu by měla být formální, jak je zvykem u odborné literatury.

## Výběr zdrojů, korektnost citací

## E - dostatečně

*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.*

Autor v seznamu zdrojů literatury uvádí osm zdrojů. Z toho šest spadá do kategorie manuálů. Zbylou literaturou je kniha (KRISHNAN, R. Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis, 2010, xxxv, 575 p. ISBN 0824753844) popisující stroje s permanentními magnety včetně jejich řízení a diplomová práce (D. Vindel Mužnoz. Design, Simulation and Implementation of a PMSM Drive System. Master Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg (SE).) týkající se simulace PMSM popisující připojení reálného měniče k systému dSpace. Literatura je zvolena vhodně a přímo se týká řešené problematiky. Vzhledem k tomu, že autor v úvodu práce psal rešerši, bylo by vhodné vycházet z více pramenů.

## 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.*

Na základě práce lze usuzovat, že autor je prakticky zaměřený a je schopný orientovat se v návrhu SW i HW. Práce splňuje kritéria dané pravidly soutěže a je použitelná ve vozidle Formula Student. Přesto, že autor dosáhl výsledků na atraktivním projektu a nad rámec zadání, jejich prezentace v hodnocené práci je podprůměrná anebo schází úplně. Bez spekulací o důvodech, proč autor důsledně neprezentoval dosažené výsledky, lze jen konstatovat, že tímto práce výrazně utrpěla na kvalitě.

## III. CELKOVÉ HODNOCENÍ, OTÁZKY K OBHAJOBĚ, NÁVRH KLASIFIKACE

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

Práce působí nedokončeným dojmem. Nebyla věnována dostatečná pozornost formátování, značení v rovnicích a především prezentaci dosažených výsledků. Práce by si zasloužila uvést porovnání simulace s reálnými průběhy. Porovnání zadání do řídicí strategie s měřenými veličinami v regulátoru a nezávislým měřením.

Jednoznačně pozitivně lze hodnotit to, že HW plní pravidla soutěže Formula Student, což bylo prokázáno během technické kontroly v rámci závodů.

Nasazení řídicí strategie na vozidlo nad rámec zadání práce je zajisté záslužné, ale předložená práce není zpracována na takové úrovni, kdy by autor měl zadání rozšiřovat.

Otázky:

- 1) Jedním z bodů zadání bylo „V návaznosti na projekt Formula Student vytvořte simulační model pohonu s PMSM a zvolené řídicí strategie.“. V práci se kromě informace, že simulaci nalezneme na přiloženém CD, prakticky nedozvíme nic o jejím sestavení a jaké poskytla výsledky. Zdůvodněte, proč jste nepopsal simulační model a neuvedl výsledky simulace.
- 2) V práci uvádíte, že vzorkování je synchronizované s modulátorem. Jakým způsobem jste zohlednil generování mrtvých dob?
- 3) Vzorkovací frekvence je 10kHz. Analogové obvody mají při této frekvenci útlum cca -10dB. Co bylo důvodem pro takto zvolenou filtraci?
- 4) Popište obr. 4.19.
- 5) Neuvažoval jste při návrhu použití vyšší vzorkovací frekvence než je spínací?
- 6) Jakým způsobem je nabíjena baterie vozidla, a je použit standardizovaný konektor?
- 7) V práci je uvedeno, že byl použit stejný výkonový modul pro přední i zadní pohon. Jsou použity různé chladiče, případně jaký je vliv na hmotnost?
- 8) Pokud se ohlédnete zpětně na měření teploty moturu, nebylo by vhodnější změnit měřicí proud čidla namísto paralelního zapojení odporu a doplnit SW korekci nelinearity?

Předloženou závěrečnou práci hodnotím klasifikačním stupněm **D - uspokojivě**.

Datum: 20.1.2016

Podpis: