

POSUDEK Oponenta DISERTAČNÍ PRÁCE

Assessment of the Doctoral Thesis

Titul, jméno a příjmení studenta:

Title, name, surname of student

Ing. Jan Laksar

Doktorský studijní program:

Doctoral study programme

Elektrotechnika a informatika

Studijní obor:

Study branch

Elektrotechnika

Téma disertační práce:

Topic of the dissertation

**Metody pro analýzu vlastností speciálních typů
vinutí elektrických strojů točivých**

Školitel:

Supervisor

doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.

Oponent:

Opponent

doc. Ing. Radoslav Cipín, Ph.D.

Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Evaluation of the importance of the dissertation for the field

Prezentovaný způsob popisu magnetického pole ve vzduchové mezeře na základě geometrie stroje, z kterého je možné snadno a rychle určit základní eklektické a mechanické parametry stroje, jako jsou indukované napětí, indukčnosti vinutí, mechanický moment apod. zcela jistě najde své uplatnění jako podpora při automatizovaných návrzích synchronních strojů s permanentními magnety na povrchu rotoru.

Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění určeného cíle

Evaluation of the problem-solving process, the methods used and the goal to be met

Na základě rešeršní studie se student ve své disertační práci zaměřil na analýzu magnetického pole ve vzduchové mezeře synchronních strojů s permanentními magnety umístěnými na povrchu rotoru a se zubovým vinutím. Z textu disertační práce je zřejmé, že se student důkladně seznámil se současnou odbornou literaturou a taktéž, že sám na základě získaných znalostí a aktivního přístupu při řešení zvolené problematiky úspěšně publikoval dosažené výsledky na konferencích a v časopisech.

Stanovených cílů disertační práce, tj. popis magnetického pole ve vzduchové mezeře a výpočet elektrických parametrů stroje, je studentem dosaženo.

Stanovisko k výsledkům disertační práce a

k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele disertační práce

Statement to the results of the dissertation and on the original contribution of the submitter of the dissertation

Výsledkem první teoretické části práce je ucelený pohled na analýzu magnetického pole synchronního stroje ve vzduchové mezeře a výpočet rozptylových indukčností drážek. V druhé praktické části práce autor aplikuje získané poznatky a vědomosti na návrh dvou synchronních strojů s permanentními magnety umístěnými na povrchu rotoru. Následně jsou porovnány teoretické předpoklady s reálně změřenými hodnotami. Za původní přínos autora při řešení zvolené problematiky je možné považovat využití Schwarz-Christoffelovy transformace pro určení magnetického pole ve vzduchové mezeře stroje.

Vyjádření k systematice, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni disertační práce

Statement to the systematics, clarity, formal adaptation and language level of the dissertation

Po formální stránce je práce zpracována na velmi vysoké úrovni. Ovšem je nutné upozornit na často používané nesprávné názvosloví: „souřadná soustava“ místo „souřadnicová soustava“ a „Clarkova transformace“ místo „Clarkové transformace“.
Z pohledu samostatné disertační práce je možné konstatovat, že je práce po obsahové stránce členěna logicky a přehledně.

Vyjádření k publikacím studenta

Statement to student's publications

Na základě předloženého seznamu autorových publikací na tuzemských a zahraničních konferencích jako i v časopisech, je možné konstatovat, že vlastní jádro disertační práce je v dostatečné míře publikováno.

Celkové zhodnocení a otázky k obhajobě

Total evaluation and questions for defence

Otázky a připomínky k disertační práci:

Str. 26 – Můžete okomentovat vztah (2.1) a říci za jakých podmínek je platný vztah?

Str. 41 – Na Obr. 2.8 jsou zobrazeny průběhy magnetické indukce vypočtené analyticky v rámci jedné drážky. Jaký je rozdíl mezi takto analyticky spočtenými průběhy a průběhy vypočtenými např. v ANSYSu?

Str. 43 – Pro aproximaci magnetizační charakteristiky je uvažována funkce (2.46) s podmínkami (2.47). Nebylo by však účelnější zařadit taktéž podmínku zohledňující pokles relativní permeability k jedničce při intenzitě magnetického pole jdoucí k nekonečnu?

Str. 44 – Můžete objasnit fyzikální význam vztahů (2.50) a (2.51)?

Str. 60 – Při výpočtu rozptylové indukčnosti drážky uvažujete nekonečnou permeabilitu, resp. relativní permeabilitu rovnou 3000. Jaký vliv na rozptyl drážky a celkovou rozptylovou indukčnost má syčení feromagnetického jádra obklopující drážku?

Str. 100 – Můžete okomentovat velikosti satorové indukčnosti (4.64) skládající se z rozptylové (4.63) a hlavní indukčnosti (4.57)?

Str. 102 – Vztahy (4.70) a (4.71) pro výpočet ztrát v železe jsou očividně chybné, můžete ukázat jakým způsobem byly odvozeny a jaký je jejich korektní tvar?

Str. 103 – Píšete, že „K vytvoření ztrát v permanentních magnetech dochází převážně vlivem napájení stroje z PWM“, můžete okomentovat jakým způsobem jste na tento závěr došel a jaké ztráty v PM mají Vaše dva navrhované stroje?

Str. 122 – Proč při ověřování dosažených výsledků nebylo využito odpovídajícího laboratorního vybavení, a to zejména proudových sond tak, aby mohly být vyvozeny patřičné závěry?

I přes výše uvedené výhrady, disertační práci „Metody pro analýzu vlastností speciálních typů vinutí elektrických strojů točivých“ studenta Ing. Jana Laksara doporučuji k obhajobě.

Doporučuji disertační práci k obhajobě

I recommend the dissertation for the defence

ano yes	x	ne no
------------	---	----------------------

Datum

Date

25. 7. 2019

Podpis oponenta:

Signature of opponent



Oponentní posudek na disertační práci doktoranda Ing. Jana Laksara :

Metody pro analýzu vlastností speciálních typů vinutí elektrických strojů točivých

Disertační práce sleduje současné trendy v návrhu, konstrukci a technologickém zpracování relativně malých strojů a je zcela jistě přínosem pro obecné řešení pohonů širokého spektra použití. Elektromobilita a robotizace jsou oborem vyžadujícím netradiční aplikace elektrických strojů ve spojení s napájením a řízením. Výroba velkých sérií strojů vyžaduje, z hlediska minimalizace nákladů, optimalizaci a automatizaci celého výrobního procesu. V úvodu autor zmiňuje výstavu CWIEME v Berlíně, jako ukázkou, kam směřuje vývoj v této oblasti. Jedná se např. o vinutí zubová několikvrstevová ($s < q < 1$), sponková (hairpin), vícefázová, bezdrážková, koncentrická (pro stroje s axiálním tokem), s použitím PM na bázi Nd-Fe-B. Důkazem zájmu široké veřejnosti o toto aktuální téma je velké množství článků a příspěvků na konferencích, avšak knižní zpracování v češtině stále chybí. Posledními knihami jsou překlady Kopylova, Petrova a starší od Kučery, Hapla, Cigánka, Bašty, Chládky, Nováka,... Použití závěrů práce pro výuku předmětů Teorie elektrických strojů, Stavba elektrických a strojů a Vinutí elektrických strojů a měření na vyrobených prototypch lze jen s potěšením kvitovat.

V úvodu práce je popsán současný stav a schéma disertační práce na obr.1.8. str.20., včetně Tingleyho schéma, fázorové hvězdice a Görgesova diagramu a činitelů vinutí, kroku a rozlohy, pro potlačení jednotlivých harmonických. Druhá kapitola je věnována magnetickému poli ve vzduchové mezeře, Carterovu činiteli, zploštění průběhu $B\delta$ a průběhu indukce pod pólovou roztečí. Pro uspořádání PM na povrchu rotoru s různými směry magnetizace určeny radiální a tangenciální složky indukce a porovnány výsledky z magnetického napětí dle Görgesova diagramu a výpočtem MKP ve 2D. Určen matematický model PMSM v ustáleném stavu v souřadných systémech $\alpha - \beta$ a $d - q$, ve stavu naprázdno a při zatížení jako generátor. Ve třetí kapitole jsou určeny rozptylové indukčnosti různých typů drážek

Čtvrtá kapitola obsahuje návrh a stavbu PMSM generátoru. Výsledkem jsou dva statory o $Q = 12$ drážek, navinuté pro $2p = 8$ a 10 , $m = 3$, potom $q = \frac{1}{2}$ a $\frac{2}{5}$, v obou případech $n = 1000 \text{ min}^{-1}$. Jádru statoru je z plechů M800-50A s vnitřním průměrem 38,5 mm délkou 40 mm. Rotor je složen z plechů o tloušťce 3mm a axiální délce 42 mm. Použity magnety Nd-Fe-B typu N45 a to pro osmipólovou variantu 16 magnetů (2 ks pro každý pól) a desetipólovou 50 magnetů (5 ks pro každý pól). Zmagnetované magnety jsou k pólům lepeny. Přípravky pro montáž tisknuty na 3D tiskárně. Vinutí statoru s $q = \frac{1}{2}$ je navinuto jako dvojvrstevové s 56 závitů v každé cívce. Vinutí s $q = \frac{2}{5}$ je navinuto jako třívrstevové s 52 závitů v cívce uprostřed drážky a s 30 závitů po stranách. Výpočet ztrát je uveden v kapitole 4.4. od str.102. Tabulka indukci ve středu zubu, pro výpočet ztrát je uvedena v tab.18. pro frekvence 66,7 a 83,3 Hz odpovídající 1000 min^{-1} .

V páté kapitole jsou porovnány výsledky výpočtů a měření. Na str. 107 až 131 jsou uvedena formou grafů a tabulek srovnání jednotlivých parametrů. Většina rozdílů jednotlivých veličin dle různých výpočtů je menší než 10%.

Závěrečné porovnání je v tab.27. a 28. na str. 133. a 134. a odtud je zdánlivý výkon strojů obou variant cca 45 VA při 31 V a 0,82 A při 1000 min^{-1} . Lze konstatovat, že v práci byly určeny parametry stroje pro vytvoření přesného matematického modelu jako základu pro

regulaci pohonu za základě výpočtu polohy rotoru. Odpadá tak senzor pro určení polohy rotoru.

Lze konstatovat, že cíle uvedené práce byly splněny.

Práce v celkovém rozsahu 170 stran psaného textu, tabulek, obrázků, schémat, grafů a příloh je gramaticky, graficky i logicky na odpovídající úrovni. V seznamu literatury a zdrojů je uvedeno celkem 61 položek, 19 publikací doktoranda vztahujících se přímo k disertaci a dalších 12 ostatních.

V rámci diskuse by bylo vhodné, aby se doktorand vyjádřil k připomínkám uvedeným v posudku.

**Disertační práci doktoranda Ing. Jana Laksara doporučuji,
(dle zákona č.111/1998 Sb. § 47), k obhajobě.**

V Plzni 10.8.2019

Ing.Petr Rada, CSc /

V rámci obhajoby mám následující otázky:

1. Je výhledově uvažován výpočet PMSM s vnějším rotorem ?
2. Počítal jste s tepelnou závislostí PM ?
3. Jak se provádí magnetizace PM?
4. Řešení pohonu jako optimalizace elektrického stroje, napájení a řízení ?

POSUDEK OPONENTA DISERTAČNÍ PRÁCE

Assessment of the Doctoral Thesis

Titul, jméno a příjmení studenta:

Title, name, surname of student

Ing. Jan Laksar

Doktorský studijní program:

Doctoral study programme

Elektrotechnika a informatika

Studijní obor:

Study branch

Elektrotechnika

Téma disertační práce:

Topic of the dissertation

Metody pro analýzu vlastností speciálních typů
vinutí elektrických strojů točivých

Školitel:

Supervisor

doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.

Oponent:

Opponent

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Evaluation of the importance of the dissertation for the field

Návrh elektrických strojů je dnes obvykle prováděn pomocí analytických postupů a následně je takovýto výchozí návrh upřesněn a ověřen výpočtem metodou konečných prvků. Optimalizační algoritmy jsou pak často navázány na konečněprvkové modely strojů, neboť analytické modely nedosahují potřebné přesnosti a jen omezeně respektují třeba i jevy plynoucí ze skutečného rozložení magnetického pole ve vzduchové mezeře. Řešení modelů metodou konečných prvků je ale časově náročné. Právě ve snaze co nejpřesněji popsat magnetické pole ve vzduchové mezeře stroje s důrazem na rychlost výpočtu a výsledky aplikovat do matematického modelu řešených generátorů spatřuji hlavní význam této disertační práce pro obor.

Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění určeného cíle

Evaluation of the problem-solving process, the methods used and the goal to be met

Autor postupoval při řešení problému logicky, jednotlivé části práce na sebe vhodně navazují. Zabýval se matematickým popisem magnetického pole ve vzduchové mezeře, přičemž tento popis postupně upřeshňoval s ohledem na skutečnou geometrii stroje. Pojednal o matematickém modelu PMSG. Následně se zabýval výpočtem rozptylových indukčností. Provedl návrh dvou vybraných PMSG, sestavil jejich matematické modely. Výsledky průběžně srovnával s modely MKP a na závěr také s měřením. Tímto byl splněn stanovený cíl disertační práce – popsat magnetické pole ve vzduchové mezeře pro získání vlastností stroje a to s důrazem na rychlost výpočtu.

Stanovisko k výsledkům disertační práce a

k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele disertační práce

Statement to the results of the dissertation and on the original contribution of the submitter of the dissertation

Pozitivně hodnotím, že autor pečlivě matematicky analyzuje magnetické pole ve vzduchové mezeře. Namísto obvyklého 1D přechází ke 2D popisu magnetického pole, což je zejména u strojů s větší vzduchovou mezerou opodstatněné. Také v případě vlivu drážkování využívá netradiční Schwarz-Christofferovu transformaci a výsledky porovnává s obvyklým postupem pomocí Carterova činitele. Při popisu pole permanentních magnetů je rovněž uvažována nejen radiální, ale také tečná složka indukce. Na prezentovaném srovnání průběhů magnetické indukce v mezeře, vypočtených pomocí MKP a pomocí redukované SC transformace, je pak patrná velmi dobrá shoda. Tímto je naplňován cíl disertační práce – co nejpřesněji popsat magnetické pole ve vzduchové mezeře s ohledem na rychlost výpočtu.

Autor revidoval v literatuře popsané rovnice pro výpočet rozptylových indukčností drážky, porovnal je s výsledky pomocí MKP a navrhl některé úpravy, i s ohledem na uspořádání dnes moderních zubových vinutí.

Získané výsledky a postupy jsou využity v matematických modelech dvou zvolených typů PMSG (jeden z nich má poměrně originální třívrstvé vinutí), zejména co se týká výpočtu magnetického pole ve vzduchové mezeře, průběhů indukovaných napětí a fázových proudů. Modely umožňují výpočet pouze v režimu generátoru s odporovou zátěží.

Bylo provedeno experimentální ověření dosažených výsledků, které prokázalo velmi dobrou shodu s výpočty, především v případě časových průběhů napětí a proudů. Experimentální část práce by mohla být rozsáhlejší.

Vyjádření k systematické, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni disertační práce

Statement to the systematics, clarity, formal adaptation and language level of the dissertation

Po formální i jazykové stránce je práce zpracována velmi dobře, je přehledná. Obsahuje spíše menší množství překlepů a nepřesností.

Např. spojení „PMSM generátor“ je nevhodné, neboť PMSM je zkratka pro synchronní motor s PM. Mělo tedy být užito zkratky PMSG.

Měřené stroje pravděpodobně nejsou prototypy.

Závislost momentu na zátěžném úhlu by neměla být nazývána momentovou charakteristikou.

Vyjádření k publikacím studenta

Statement to student's publications

Podle přiloženého seznamu publikací a výsledků je student hlavním autorem minimálně devíti konferenčních a časopiseckých článků zaměřených na problematiku disertace, což považují za dostatečné.

Celkové zhodnocení a otázky k obhajobě

Total evaluation and questions for defence

Otázky a připomínky k disertaci:

Str.26 – V rov.2.2 chybí počet závitů cívky.

Str.28 – Je skutečně úprava činitele rozlohy pro jednovrstvé vinutí nutná?

Pro pracovní harmonickou proved'te prosím příklad výpočtu činitele rozlohy a celkového činitele vinutí pro jednovrstvé vinutí $Q_s=24$, $2p=4$, $m=3$, $q=2$ s použitím rovnice 2.8 a rovnice 2.13. Stejně vinutí ($Q_s=24$, $2p=4$, $m=3$, $q=2$) uvažujte jako dvouvrstvé s nezkráceným krokem a proved'te výpočet činitele rozlohy podle rovnice 2.13. Výsledky diskutujte.

Str.98 – Počet závitů vinutí v sérii by měl být vypočten z požadovaného indukovaného napětí od PM. Zvolený obrácený postup nepovažuji za příliš vhodný.

Str.102 – Předpoklad stejného (obdobného) průběhu magnetické indukce ve jhu a ve vzduchové mezeře nepovažuji za správný.

Str.125 – Byly v kap.5.4 měřeny odpory vinutí pomocí ohmmetru nebo RLC metru vždy před zatížením a po zatížení? V jakém rozsahu se, alespoň orientačně, měnila teplota vinutí?

Str.127 – Jak byly měřeny zátěžné úhly a krouticí momenty v Tab.26? Jaký byl zátěžný úhel při měřeních v kap. 5.4.2?

Přes výše uvedené připomínky považuji předloženou disertační práci celkově za velmi dobrou a doporučuji ji k obhajobě.

Doporučuji disertační práci k obhajobě
I recommend the dissertation for the defence

ano yes	<input checked="" type="checkbox"/>	ne no
------------	-------------------------------------	----------

Datum
Date

2.9.2019

Podpis oponenta:
Signature of opponent

