



POSUDEK OPONENTA DISERTAČNÍ PRÁCE

Assessment of the Dissertation

Titul, jméno a příjmení studenta:

Title, name, surname of student

Ing. Miroslav Blohmann

Doktorský studijní program:

Doctoral study programme

Elektrotechnika a informatika

Studijní obor:

Study branch

Elektrotechnika a informační technologie

Téma disertační práce:

Topic of the dissertation

Bezkartáčový motor s Halbachovým polem

Školitel:

Supervisor

prof. Ing. Pavel Karban, Ph.D.

Oponent:

Opponent

Ing. Pavel Dvořák, Ph.D.

Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Evaluation of the importance of the dissertation for the field

V současné době značného rozvoje elektromobility a masivního nasazení elektrických pohonů do osobní nebo průmyslové dopravy je téma disertační práce velmi aktuální. Doktorand se zabývá BLDC elektromotory mající speciální rotor s permanentními magnety. V práci je představena unikátní konstrukce rotoru BLDC motoru, jenž je opatřen uspořádáním permanentních magnetů do Halbachova pole přičemž jeho rotoru je vyrobeno z nemagnetického materiálu pomocí 3D tisku. Jedná se disertační práci, která je založena na experimentu. Výsledky experimentu a zejména srovnání navrženého řešení nového BLDC motoru s BLDC motorem klasické konstrukce jsou cenným přínosem pro technickou praxi.

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

Hlavním cílem disertační práce je návrh a výroba funkčního vzorku BLDC motoru s rotorem vyrobeným z nemagnetického materiálu a s permanentními magnety uspořádanými do Halbachova pole. Dále experimentálně ověřit navržené parametry elektromotoru a porovnat je s BLDC motorem s feromagnetickým rotorem a klasickým uspořádáním permanentních magnetů na rotoru. Ve 4. kapitole doktorand diskutuje návrh BLDC motoru o výkonu 2.5 kW se jmenovitými otáčkami 3150 ot./min napájeného z 72 V baterie. Motor je navržen s vnějším rotorem a má sloužit například jako pohon průmyslového dronu, či rozměrného modelu letadla. Samotný elektromagnetický návrh autor neuvádí. Uvádí pouze detailní parametry navrženého elektromotoru ve formě tabulky s výslednými parametry jak pro klasický rotor, tak i pro experimentální plastový rotor s Halbachovým uspořádáním permanentních magnetů (tab. 2 a 6). Pro návrh elektromotoru student použil klasickou návrhovou metodu využívající analytických vztahů. Návrh poté podrobil hlubší simulaci pomocí programu MotorAnalysis (viz Kap. 5). Doktorand v této kapitole uvádí poměrně rozsáhlou charakteristiku tohoto programu včetně popisu metod výpočtu, které při simulacích elektromotoru používal. Kapitola 6 se zabývá simulací elektromotoru s feromagnetickým rotorem a standardním uspořádáním permanentních magnetů. Simulace byly prováděny pro různé velikosti permanentních magnetů. Výsledek simulací posloužil k výběru optimální velikosti permanentních magnetů pro výrobu funkčního vzorku. V kapitole 7 se autor podrobně zabývá simulací elektromotoru s Halbachovým uspořádáním permanentních magnetů v neferomagnetickém rotoru. Stejně jako v kapitole 6 doktorand provedl analýzu několika variant velikostí permanentních magnetů a vybral z nich tu optimální s ohledem na cenu a dostupnost konstrukčních materiálů. Výčet simulovaných variant byl rozšířen o kombinace materiálu rotorového jha (viz Kap. 8). Jsou zde zkoumány varianty feromagnetického

i neferomagnetického materiálu. V závěru kapitoly autor uvádí dvě varianty elektromotoru, jejichž výsledné parametry následně experimentálně ověřil na funkčních vzorcích (viz Kap. 11), čímž doktorand splnil cíle, které si ve 2. kapitole stanovil.

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

Na základě navržených parametrů BLDC motoru byl postaven funkční vzorek, který tvoří jeden stator a dva typy rotorů (klasický s feromagnetickým magnetickým obvodem, experimentální plastový s Halbachovým uspořádáním permanentních magnetů). Na základě měření rozměrů postaveného funkčního vzorku byly upraveny (kalibrovány) vstupy do simulace a tyto zopakovány. Kalibrací bylo dosaženo snížení odchylky projektované hodnoty indukovaného napětí od měřené hodnoty o cca 14 % na výsledné 3 %. Další porovnání projektovaných parametrů s měřenými doktorand uvádí zřídka a výhradně zmiňuje porovnání naměřených hodnot obou dvou typů rotorů – klasický vs experimentální.

Vyjádření k systematické, přehlednosti, formální úpravě

a jazykové úrovni disertační práce

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

Disertační práce má celkem 126 stran a z hlediska formální úpravy splňuje všechny náležitosti (anotaci, seznam zkratk, tabulek a obrázků, stanovení a naplnění cílů a citace). Ačkoliv se jedná o práci, která je založena na experimentu, je psána srozumitelně a přehledně s minimem gramatických chyb. Autor na cca 100 stranách práci rozčlenil do celkem 12 kapitol, které na sebe tematicky a logicky navazují. Doktorand se v úvodu práce formou literární rešerše zaměřuje na popis současné situace v oblasti BLDC motorů, jejich konstrukce, řízení a použití v praxi. V této kapitole je také diskutována problematika 3D tisku komponent elektromotoru a speciálních topologií umístění permanentních magnetů v rotoru včetně jejich uspořádání do Halbachova pole, což je předmětem zájmu předložené disertační práce. Dále je v práci uveden jednak teoretický základ a popis návrhů jednotlivých variant rotorů pro jeden stator BLDC elektromotoru, které byly následně vyrobeny a podrobeny experimentálnímu zkoušení. Za formální nedostatky považují zejména, že některé citace mají nesprávný tvar (viz [11], [12]; [15], [16]), nebo není uveden název (viz [39], [40], [41], [67] nebo [73]).

Vyjádření k publikacím studenta

Statement to student's publications

V závěru disertační práce student uvedl celkem 5 publikací vztahující se k řešené problematice, z nichž dvě jsou publikovány na mezinárodních konferenčních. Dvě jsou jeho autorským počinem a dvou je spoluautorem. Poslední v seznamu publikací je přihláška k patentovému řízení v disertační práci diskutovaného inovativního řešení konstrukce rotoru BLDC motoru. Domnívám se, že výčet uvedené publikační aktivity doktoranda, včetně přihlášky patentu, je v souladu s podmínkami doktorského studia o povinnosti publikovat výsledky disertační práce.

Celkové zhodnocení a otázky k obhajobě

Total evaluation and questions for defence

Jak jsem uvedl výše, předložená práce je založena na analýze experimentálního měření a má charakter spíše reportu. V práci je řešena unikátní konstrukce rotoru BLDC motoru, jenž je opatřen uspořádáním permanentních magnetů do Halbachova pole a jeho rotoru je vyrobeno z nemagnetického materiálu pomocí 3D tisku (pro tuto technologii bylo doktorandem požádáno o udělení patentu). Tím se šetří hmotnost stroje, usnadňuje výroba i cenová náročnost prototypu. Podle uvedených výsledků simulace má stroj pro daný moment i o cca 1 % vyšší účinnost (viz tabulky 2 a 6). Ta však nebyla experimentálně ověřena. Měřením bylo ověřeno, že simulační model opravený dle skutečných rozměrů konstrukčních částí stroje dává akceptovatelné výsledky.

Na druhou stranu doktorand ve své práci dokázal, že se je schopen nastudovat poměrně obsáhlou problematiku návrhu a konstrukce BLDC motorů, zkonstruovat a vyrobit funkční vzorek a provést na něm měření potřebná pro zhodnocení navrženého řešení. Výsledek své práce doktorand také přihlásil k patentovému řízení, prokázal své inovativní myšlení.

Vzhledem k výše uvedenému se domnívám, že předložená disertační práce splňuje podmínky tvůrčí vědecké práce a **doporučuji** práci k obhajobě. Doktoranda žádám o odpověď na následující otázky:

- 1) Proč jste ve zhodnocení měření na funkčních vzorcích neuvedl srovnání s projektovanými parametry získanými při návrhu?
- 2) Čím je způsoben vyšší obsah harmonických v případě použití feromagnetického jha experimentálního rotoru s Halbachovým uspořádáním permanentních magnetů v porovnání s plastovým jhem téhož provedení (Kap. 8, Obr. 38, str. 68)?
- 3) Lze metodiku návrhu vhodné varianty pólového krytí doplnit/nahradit optimalizačním algoritmem?

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

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

Datum
Date

24.8.2022

Podpis oponenta:
Signature of opponent



POSUDEK OPONENTA DISERTAČNÍ PRÁCE

Assessment of the Dissertation

Titul, jméno a příjmení studenta:

Title, name, surname of student

Doktorský studijní program:

Doctoral study programme

Studijní obor:

Study branch

Téma disertační práce:

Topic of the dissertation

Školitel:

Supervisor

Oponent:

Opponent

Ing. Miroslav Blohmann

Elektrotechnika a informatika

Elektrotechnika

Bezkartáčový motor s Halbachovým polem

Prof. Ing. Pavel Karban, Ph.D.

doc. Ing. Miroslav Chomát, CSc.

Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Evaluation of the importance of the dissertation for the field

Jedná se o přepracovanou verzi již dříve studentem předložené disertační práce. Práce byla rozšířena a částečně pozměněna. Posuzovaná disertační práce se zabývá bezkartáčovými stejnosměrnými (BLDC) motory. V práci jsou porovnávány vlastnosti různých konstrukcí tohoto typu motoru - s klasickým rotorem a s rotorem využívajícím Halbachova pole. Dále byly uvažovány variantní konstrukce rotoru s Halbachovým polem s kovovou a plastovou nosnou konstrukcí. Student porovnával různé návrhové varianty, ze kterých pak vybíral optimální variantu. U této optimalizace však postrádám systematický přístup, včetně definice požadovaných cílových parametrů a vlastností. Popisované činnosti, přes svůj rozsah a technický nadhled, odpovídají spíše konstrukční a inženýrské práci než vědecké a výzkumné práci. Vědecký přínos práce je poměrně malý a spočívá zejména v ověření možnosti využití 3D tisku z plastu pro konstrukci rotoru. Vzhledem k omezenému rozsahu testování motoru s touto konstrukcí, však ani tyto výsledky nemají širší praktický dopad.

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

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

V rámci své práce navrhl disertant několik variant BLDC motoru, lišících se konstrukcí rotoru. Tyto varianty dále analyzoval a realizoval jako funkční vzorky. Bylo provedeno porovnání s komerčně dostupným BLDC motorem podobného výkonu. K analýze byla použita metoda konečných prvků v programu MotorAnalysis-PM. Stroje jsou porovnávány z hlediska pulzační momentu, momentu, výkonu a účinnosti. Uvažované varianty stroje pak byly realizovány a byla na nich provedena měření, která byla porovnávána s výsledky simulací. Na základě analýzy obou variant byly zformulovány závěry týkající se konstrukce BLDC motorů. Cíle uvedené v disertační práci jsou poměrně obecně formulovány a lze je považovat za splněné.

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

Za hlavní výsledek disertační práce považuji návrh BLDC motoru s Halbachovým polem na rotoru a ověření praktické možnosti využití metody 3D tisku z plastu pro konstrukci mechanické části rotoru. Popis postupu konstrukce tohoto stroje může být užitečný pro studenty elektrotechniky a konstruktéry elektrických strojů. Předložená disertační práce nepřináší příliš mnoho nových vědeckých poznatků a svým charakterem odpovídá spíše

diplomové práci. Disertant prokázal dobrou znalost dané problematiky na inženýrské úrovni, méně však již schopnost samostatné výzkumné a vědecké práce.

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

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

Práce je zpracována pečlivě, přehledně a po formální stránce na dobré úrovni. Jazyková úroveň textu je také na dobré úrovni. Některé části práce, které se netýkají jádra práce, jsou zbytečně rozsáhlé, např. v kapitole 5 popis statické a dynamické D-Q analýzy, jejíž výsledky nejsou v práci využity. Autor používá nesystematický způsob referencí publikačních zdrojů, kdy někdy kromě odkazu na seznam literatury uvádí v textu i název publikace.

Vyjádření k publikacím studenta

Statement to student's publications

V práci jsou uvedeny publikace autora související s tématem disertační práce. Jedná se o čtyři konferenční příspěvky, kde je disertant prvním autorem, a o podanou přihlášku českého patentu. Z citace patentu však není zřejmé, zda byl ÚPV přijat. Mezi publikačními výstupy disertanta zcela chybí publikace v časopisech.

Celkové zhodnocení a otázky k obhajobě

Total evaluation and questions for defence

Úroveň předložené práce je podle mého názoru na hranici úrovně požadované pro disertační práci. Disertant prokázal dobrou znalost dané problematiky na inženýrské úrovni, méně však již schopnost samostatné vědecké práce. Přes tyto výhrady doporučuji práci k obhajobě.

Otázky k obhajobě:

1. Pro simulace v kapitole 6.3 na Obr. 28 uveďte uvažované elektrické zapojení a pro Obr. 29 uvažovaný zátěžný moment.
2. Jaký byl časový průběh měřeného proudu ukázaného na Obr. 62 a 64 a proudu na Obr. 63 a 65. Jaká hodnota je v grafech zobrazena?

Doporučuji disertační práci k obhajobě

I recommend the dissertation for the defence

ano
yes

x

ne
no

Datum
Date

28. 7. 2022

Podpis oponenta:
Signature of opponent



POSUDEK OPONENTA DISERTAČNÍ PRÁCE

Assessment of the Dissertation

Titul, jméno a příjmení studenta:

Title, name, surname of student

Ing. Miroslav Blohmann

Doktorský studijní program:

Doctoral study programme

Elektrotechnika a informatika

Studijní obor:

Study branch

Téma disertační práce:

Topic of the dissertation

Bezkartáčový motor s Halbachovým polem

Školitel:

Supervisor

Prof. Ing. Pavel Karban, Ph.D.

Oponent:

Opponent

Doc. Ing. Roman Pechánek, Ph.D.

Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Evaluation of the importance of the dissertation for the field

Řešená problematika je velmi aktuální, a i přes řadu publikací zabývajících návrhem a simulacemi BLDC motorů, obsahuje téma stále řadu nedořešených problémů, které si zasluhují podrobnější rozbor (příklad: kapitola věnovaná volbě rozměrů magnetů pro Halbachovo pole). Kladně hodnotím především realizaci netradičního konstrukčního řešení BLDC motoru s Halbachovým polem a jeho následné experimentální porovnání s klasickým provedením. V tomto hledu práce pokládá základní kámen dalšího možného výzkumu v oboru bez-jhových motorů.

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

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

V úvodu práce je obecně zpracován současný stav poznání z oblasti BLDC motorů. Autor na základě provedené rešerše stanovil cíle práce v podobě prototypu a ověření vlastností BLDC motoru s Halbachovým polem a BLDC motoru s vnějším rotorem.

Návrh obou typů motoru je proveden pomocí ověřených metod a návrh stroje tak vyhází ze standardních postupů a metod. V oblasti návrhu stroje postrádám konkrétní zdůvodnění řady zvolených parametrů a koeficientů s ohledem na elektrické, magnetické, tepelné a mechanické vlastnosti stroje.

Simulace jsou provedeny komerčním softwarem založeným na ověřených matematických vztazích.

Experimentální ověření obou sestavených motorů je provedeno jak měřením naprázdno, tak měřením se zatížením. Oba realizované stroje jsou v práci na základě měření porovnány a jsou jasně definovány výsledky měření. Práce neobsahuje zpětnou vazbu k elektromagnetickému návrhu stroje.

Cíl práce v podobě realizace funkčního vzorku BLDC motoru s železným rotorem a BLDC motoru s rotorem využívajícím Halbachovo pole je splněn. V práci postrádám jednoznačně stanovené parametry navrhovaného motoru a jejich porovnání s realizovanými funkčními vzorky.

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

Realizovaný funkční vzorek BLDC motoru s permanentními magnety v uspořádání do Halbachova pole je vlastní přínos autora. Na realizovaném funkčním vzorku BLDC motoru s Halbachovým polem je ověřena funkčnost vzorku a jsou definovány výhody a nevýhody

oproti BLDC motoru s klasickým uložením magnetů na vnějším rotoru. Autor dostatečně dokládá novost svého výzkumu. Velmi přínosné jsou simulace uložení PM do Halbachova pole a stanovení jejich rozměrů.

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

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

Práce je zpracována systematicky a jednotlivé pasáže na sebe vzájemně logicky navazují. Po formální stránce je práce na standardní úrovni.

Vyjádření k publikacím studenta

Statement to student's publications

Autor publikoval dosažené výsledky své práce ve čtyřech publikacích – jedna tuzemská konference a tři mezinárodní konference. Autor v červnu 2021 podal patentovou přihlášku „Elektrický stroj s permanentními magnety v Halbachově uspořádání“, PV 2021 - 320.

Celkové zhodnocení a otázky k obhajobě

Total evaluation and questions for defence

Disertační práce je napsána na 100 stranách textu s přílohami a je strukturována do dvanácti kapitol. Práce je zpracována systematicky a přehledně, jazykově je na dobré úrovni a má jen minimum pravopisných chyb, resp. překlepů. V úvodu autor na základě rešerše současného stavu stanovil cíl své disertační práce v podobě „vývoje a realizace funkčního vzorku bezkartáčového stroje s rotorem s permanentními magnety v uspořádání do Halbachova pole za použití 3D tisku a porovnání tohoto typu stroje se strojem s rotorem s permanentními magnety v klasickém uspořádání, a to nejen pomocí simulací, ale také pomocí praktických měření na zkonstruovaném funkčním vzorku“. Autor s využitím moderních simulačních metod, technologických postupů a experimentálního ověření tento cíl práce splnil.

Kapitoly práce věnující se elektromagnetickému návrhu a simulacím neuvádí konkrétní zdůvodnění řady zvolených parametrů. Funkční vzorky BLDC motorů jsou porovnány pouze mezi sebou, chybí porovnání s návrhovými parametry a chybí zpětná vazba do elektromagnetického návrhu motoru.

Práce i tak prokazuje schopnost autora samostatně pracovat na vědeckém tématu. Práce svojí novostí otevírá cestu k řadě zajímavých témat z oblasti návrhu el. strojů především s ohledem na bez-jhové stroje s Halbachovým polem a stroje vyráběné pomocí aditivních technologií.

Otázky:

Jaké jsou jmenovité parametry realizovaných motorů a jaké parametry jste naměřil?

Jak vypadalo napájecí napětí při simulacích a při experimentech.

Čím si vysvětlujete zvlnění momentu na obr. 39?

Můžete objasnit dopad zvlnění magnetické indukce Obr. 41. na ztráty motoru?

Doporučuji disertační práci k obhajobě

I recommend the dissertation for the defence

ano
yes

x

ne
no

Datum

Date

9.8.2022

Podpis oponenta:

Signature of opponent

