



POSUDEK Oponenta Disertační práce

Assessment of the Dissertation

Titul, jméno a příjmení studenta:

Title, name, surname of student

Ing. Lukáš Veg

Doktorský studijní program:

Doctoral study programme

Elektrotechnika a informatika

Studijní obor:

Study branch

Elektrotechnika

Téma disertační práce:

Topic of the dissertation

Vlivy konstrukčního provedení na oteplení vysokorychlostního stroje s permanentními magnety

Školitel:

Supervisor

doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.

Oponent:

Opponent

prof. Ing. Ivo Doležel, CSc.

Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Evaluation of the importance of the dissertation for the field

Tepelné výpočty elektrických strojů a následná kontrola oteplení jejich konstrukčních částí zejména v exponovaných pracovních režimech patří k nezbytným úkonům prováděným ve stadiu jejich návrhu. Zatímco elektromagnetické výpočty v současné době již nepatří ke kritickým položkám návrhu (výsledky většinou bývají v dobré shodě s experimentem), v případě modelování tepelných poměrů tomu tak zatím doposud není a hlavním důvodem je nesnadné určování odvodu tepla ze stroje do okolního prostředí, jež se ve velké míře realizuje konvekcí a v malé míře i radiací. Přesnější modely nemohou proto zahrnovat jen samotný vznik a přenos tepla, ale i proudění případných chladicích médií a okolního prostředí. Tyto sdružené nelineární modely se zpravidla řeší metodou konečných objemů a u větších strojů jsou velmi náročné jak na rychlost použitých algoritmů, tak i na paměť použitých počítačů. Jen zřídka je lze využít k mnohonásobně opakovaným řešením, například za účelem tvarových či jiných optimalizací. To je důvod, proč se tepelným výpočtům věnuje ve světové komunitě stále velká pozornost, což potvrzuje i množství publikací ve vědeckém a odborném tisku. Téma práce proto pokládám za dobře zvolené. Autor se v ní sice nezabývá vývojem nových efektivnějších výpočetních postupů, ale spíše zdokonalením metodiky, která se při určování tepelných poměrů ve vysokorychlostních strojích doposud používá. Cenné je podle mého názoru jednak podrobné vyšetření vlivu axiální tepelné vodivosti statorové laminace, dále vlivu potenciální vzduchové mezery mezi státorem a kóstrou a především pak kombinace semianalytických a numerických metod pro vyšetření tepelného modelu pasivně chlazeného vysokootáčkového stroje s permanentními magnety s cílem nalézt žebrování kóstry pro nejvyšší možný odvod tepla do okolního prostředí. Výsledky získané na tomto základě vedou ke zjednodušení metodiky výpočtu chladicích parametrů pasivně chlazeného stroje.

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

Při návrhu zdokonalené metodiky pro vyšetření tepelných poměrů ve stroji využívá autor tři přístupy a tyto přístupy poté kombinuje. Prvním z nich je semianalytická metoda tepelných sítí, využívající podobnost s elektrickými obvody. Druhým je numerická metoda konečných prvků vhodná zejména pro řešení teplotních polí v uspořádáních s dobře definovanými okrajovými podmínkami, nejčastěji pro případ okolních médií, jež jsou v klidu, nebo lze předpokládat jejich laminární proudění. Konečně třetím je metoda konečných objemů, jež je schopna současně řešit jak problematiku samotného proudění, které bývá velmi často turbulentní, tak i problematiku přenosu tepla. Ta je z hlediska přesnosti řešení sice nejlepší, ale

také nejnáročnější co se týče doby výpočtu a hardwarového vybavení příslušných počítačů. Nelze ji proto doposud využívat pro mnohonásobně opakované výpočty, jež jsou nezbytné při tvarové nebo topologické optimalizaci složitějších konstrukcí. Používá se tedy často jen pro přesnější určování okrajových podmínek k úloze.

Konstatuji, že použité metody, jejichž principy autor v textu dostatečně objasňuje, jsou korektní a v komunitě odborníků na tepelné výpočty jsou široce využívány. Rovněž navržená kombinace zmíněných metod pro modelování tepelných poměrů velkých rychloběžných motorů poskytuje nástroj, jenž tyto výpočty oproti stávajícím postupům urychluje. Cíle disertační práce byly podle mého názoru splněny.

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

Disertační práce vznikla v rámci projektu MPO č. FV10310 s názvem Nová generace pohonné jednotky pro kolejová vozidla za finanční podpory lokálního fakultního projektu SGS-2018-009. Postupně vznikla první a druhá generace takového motoru, jenž byl laboratorně testován na definovaný jízdní cyklus a na maximální udržitelný výkon. Vyšetření tepelných poměrů bylo nedílnou součástí příslušného návrhu a stalo se hlavní vědeckovýzkumnou náplní autorových aktivit. Metodika, kterou autor navrhl, zde byla úspěšně využita. Výsledky, které získal, vykazují dobrou přesnost a řada z nich byla experimentálně ověřena například měřením časového vývoje teplot v exponovaných místech stroje pomocí termočlánků.

Výsledky práce proto pokládám za hodnotné a použitelné jak v další vědecké, tak i aplikační praxi.

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

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

Dobrá kvalita odborného obsahu této disertační práce je bohužel do jisté míry poškozena formálními a jazykovými prohřešky. Nejčastější jsou zde nedostatky typografické. Jako příklad lze uvést nestejně symboly v rovnicích a v textu (roman versus italics), nesprávné zápisy některých indexů, střídavé používání desetinných teček a čárek, odsazování odstavců atd. Dostí chyb je i mluvnického typu a objevuje se zde i řada překlepů i neobratných formulací. Rozhodně měla být závěrečné redakci textu věnována daleko větší pozornost. Na část uvedených chyb poukazuji v pdf verzi předložené práce ve formě žlutých bublin.

Vyjádření k publikacím studenta

Statement to student's publications

Autor publikuje aktivně a do této doby vykazuje spoluautorství na jednom impaktovaném článku, autorství a spoluautorství na 32 recenzovaných příspěvcích ve sbornících národních, mezinárodních a zahraničních konferencích, dále podíl na 13 výzkumných zprávách vztahujícím se k tématu disertační práce a 6 funkčních vzorcích a prototypch. Jádro disertační práce bylo ve zcela dostatečném rozsahu publikováno.

Celkové zhodnocení a otázky k obhajobě

Total evaluation and questions for defence

Ing. Lukáš Veg zpracoval danou tematiku na velice dobré vědeckotechnické úrovni a výsledky jeho práce bezesporu představují přínos pro výzkum v dané oblasti. Přesvědčil, že je schopen samostatné vědecké práce a dalšího rozvoje své osobnosti. Předloženou práci pokládám za disertabilní, a přes výhrady k jejímu formálnímu zpracování doporučuji, aby byla přijata k obhajobě, a aby mu po jejím úspěšném zakončení byl udělen titul Ph.D.

K práci mám následující dotazy a připomínky:

- Během své životnosti permanentní magnety stárnou a částečně se zhoršují jejich fyzikální parametry (a mění se tedy i jejich ztráty). Lze tento jev nějak rozumně postihnout nějakou závislostí měrných ztrát na době využívání?
- Byla v kapitole 5.1.3 posouzena konvergence výsledků v závislosti na počtu elementů

tepelné sítě?

- Jak uvádíte v kapitole 7, použití teplovodivých past může být u větších strojů dosti nákladné. Ovšem během návrhu stroje není známo, jak budou ve skutečnosti vzduchové mezery mezi statorem a kostrou velké. Je to tak, že se nejprve stanoví nejlepší případ (mezera je všude nulová) a nejhorší případ (mezera je nejvyšší možná pro dané uspořádání), ty se spočtou, a na základě obdržných výsledků se rozhodne, zda pasta bude aplikována či nikoli?
- Přístup ke stanovení nejvhodnějšího tvaru chladicích žeber na kostrě stroje je, pokud se zkoumají jednotlivá variantní řešení, zřejmě velmi zdlouhavý, což vyplývá z nutnosti použití techniky *computational fluid dynamics*. Asi by zde stálo za úvahu nasadit techniky vhodné pro tvarovou optimalizaci tak, že by tvar žebra byl nahrazen křivkou zadanou několika body a jeho výškou, a cílová funkce by byla definována jako celkové teplo odvedené z kostry do okolního prostředí (tedy monokriteriální, ale multiparametrická optimalizace).

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

ano
yes

Datum
Date

28. 7. 2021

Podpis oponenta:
Signature of opponent



POSUDEK Oponenta DISERTAČNÍ PRÁCE

Assessment of the Dissertation

Titul, jméno a příjmení studenta:

Title, name, surname of student

Ing. Lukáš Veg

Doktorský studijní program:

Doctoral study programme

Elektrotechnika a informatika

Studijní obor:

Study branch

Elektrotechnika

Téma disertační práce:

Topic of the dissertation

Vlivy konstrukčního provedení na oteplení vysokorychlostního stroje s permanentními magnety

Školitel:

Supervisor

doc.Ing.Bohumil Skala, Ph.D.

Oponent:

Opponent

doc.Ing.Želmíra Ferková,CSc.

Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Evaluation of the importance of the dissertation for the field

Téma dizertačnej práce je zameraná na teplotné výpočty v elektrických strojoch. Jedná sa dôležitú oblasť pri navrhovaní strojov.

Čo najpresnejší výpočet oteplenia v jednotlivých častiach elektrického stroja pomáha pri optimalizácii rozmerov, účinnosti a návrhu chladenia. V práci sú použité moderné metódy výpočtov ako metóda konečných prvkov a metóda konečných objemov ale aj metóda tepelnej siete.

Hlavná časť práce je zameraná na úpravu kostry vysokootáčkového synchronného stroja použitého pre trakčný pohon a nastavenie tepelného modelu tohto vyvíjaného stroja pre ďalšie zlepšenie jeho výkonového využitia.

Vyjádrení 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 úvode práce je jasne definovaný cieľ práce. Nasleduje teoretický rozbor tepelných výpočtov, metódy riešenia tepelných modelov PMSM a ich aplikácia. 5. až 8. kapitola sa venuje riešeniu vytýčených cieľov. V závere sú zrozumiteľne zhrnuté výsledky práce. Dielčie závery sú uvedené tiež v závere kapitol 5 až 8.

Cieľom práce bolo:

- vytvárania tepelných modelov a určovaniu dôležitých koeficientov a parametrov,
- vplyvu axiálnej vodivosti statorového paketu na tepelný model,
- vplyvu vzduchovej medzery medzi statorom a kostrou na tepelný model a oteplenie,
- vplyvu tvaru, veľkosti a materiálu kostry na oteplenie stroja.

Prie riešení práce autor postupoval logicky a splnil stanovené ciele.

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

Výsledky a prínosy dizertačnej práce je možné zhrnúť do nasledujúcich konkrétnych bodov:

- Porovnanie výpočtu oteplenia z 2 rôznych modelov. Jedným bola tepelná sieť a druhým výpočet pomocou MKP v programe Ansys. Modely pracujú na rôznom princípe. Metóda tepelných sietí je voči metóde konečných prvkov oveľa rýchlejšia. Dôležité je rozhodnúť sa

kedy použiť ktorú metódu. V obidvoch modeloch je dôležité čo najsprávnejšie určenie potrebných koeficientov.

- Vyšetrenie vplyvu axiálnej vodivosti statorového paketu v strojoch bez radiálnych kanáloch.
- Vyšetrenie vplyvu vzduchovej medzery medzi statorom a kostrou stroja a jej vplyv na odvod tepla.
- Výber tvaru a materiálu chladiacej kostry vysokootáčkového stroja s permanentnými magnetmi. Pri tejto voľbe musel autor práce zohľadniť možnosti a ekonomiku výroby.

Výsledky práce je možné považovať za pôvodné.

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

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

Práca je vypracovaná prehľadne na veľmi dobrej úrovni, s minimálnym množstvom chýb a preklepov. Jednotlivé kapitoly za sebou logicky nadväzujú.

Grafická úroveň práce je na veľmi dobrej úrovni. V zozname symbolov a skratiek však chýbajú niektoré symboly a použité indexy. Časť z chýbajúcich veličín je vysvetlená v texte.

Vyjádření k publikacím studenta

Statement to student's publications

Autorova publikačná činnosť pozostáva z jedného článku v časopise s IF 2,822 a 32 recenzovaných príspevkov na domácich a medzinárodných konferenciách.

Veľmi významné sú výskumné správy, žiaľ v práci nie sú uvedené projekty v rámci ktorých boli vypracované.

Ing.L. Veg je tiež autorom alebo spoluautorom 6 funkčných vzorov a prototypov.

Publikačnú činnosť autora dizertačnej práce považujem za dostatočnú.

Celkové zhodnocení a otázky k obhajobě

Total evaluation and questions for defence

Dizertačná práca rieši v elektrických strojoch veľmi dôležitú problematiku oteplenia a chladenia elektrických strojov. Na riešenie problému boli použité najnovšie metódy, ktoré mal autor k dispozícii. Výsledok práce je použiteľný v praxi.

Otázky a pripomienky k práci:

Áké sú dôvody pre zvolené rozdelenie prídavných strát (str.38)?

V Tabuľke X je v stĺpci MKP pre jednotlivé časti stroja uvedená stredná alebo maximálna teplota?

Prosím vysvetlite bližšie obrázok 28 (str.55)?

Str.57 – posledný riadok – pravdepodobne sa jedná o chybné číslo rozmeru vzduchovej medzery.

Obr. 56-58 – pre lepšiu názornosť by mali byť použité rovnaké pohľady pre výsledky prúdenia.

Áké by bolo oteplenie motora pri ideálnej dĺžke rebra resp. približne o akú percentuálnu hodnotu by sa oteplenie zmenilo?

Prácu Ing. Lukáša Vega **doporučujem** prijať k obhajobe .

Doporučuji disertační práci k obhajobě

I recommend the dissertation for the defence

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

Datum 16.7.2021

Date

Podpis oponenta:

Signature of opponent





POSUDEK OPONENTA DISERTAČNÍ PRÁCE

Assessment of the Dissertation

Titul, jméno a příjmení studenta:

Title, name, surname of student

Ing. Lukáš Veg

Doktorský studijní program:

Doctoral study programme

Elektrotechnika a informatika

Studijní obor:

Study branch

Téma disertační práce:

Topic of the dissertation

Vlivy konstrukčního provedení na oteplení vysokorychlostního stroje s permanentními magnety

Školitel:

Supervisor

doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.

Oponent:

Opponent

doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.

Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Evaluation of the importance of the dissertation for the field

Problematika chlazení vysokootáčkových strojů s permanentními magnety je stále aktuální a využití nejmodernějších výpočetních přístupů při jejich návrhu je v současné době nezbytné. Navíc výsledky simulací je vhodné použít při identifikaci parametrů analytických výpočtů, které jsou mnohonásobně rychlejší na výpočet a dávají základní představu o tepelném stavu nejdůležitějších částí stroje.

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 přehledně popsán současný stav a použitá teorie v oblasti tepelných výpočtů elektrických strojů. V páté kapitole je popsána aplikace LPTN přístupu na synchronní motor s permanentními magnety. U navržené náhradní tepelné sítě mně chybí popis jednotlivých uzlů. Je uveden jenom pro některé vybrané uzly. Není tedy zřejmé, jestli je svazek plechů uvažován jako jeden uzel nebo je rozdělen na zuby a jho. Matematický popis tepelné sítě je uveden pro tranzientní stav. Bylo by vhodné kdyby kromě porovnání tepelné sítě a MKP pro ustálený stav bylo toto porovnání provedeno i pro tranzientní stav. Dávalo by to ještě lepší představu o vhodnosti použití jednotlivých přístupů pro danou aplikaci a případně další aplikace. V práci je správně analyzována příčná vodivost vinutí, ale podélná vodivost nikoliv. Použit pro podélnou vodivost měrnou vodivost mědi je poněkud optimistické s ohledem, že plnění drážky je převážně izolace s podstatně nižší vodivostí. V kapitole 6 je posuzován vliv axiální vodivosti statorového paketu na celkové tepelné poměry. Závěry, které z analýzy výsledků vyplynuli jsou zcela správné, ale daly by se zjistit na podstatně jednodušších výpočtových modelech založených na MKP. Stejnou připomínku mám ke kapitole 7. V této části zabývající se vlivem vzduchové vrstvy u lisovaného spoje, je tento vliv již dobře znám a je tedy zbytečné potvrdit tento vliv na MKP modelu s velkou výpočetní náročností, když stejného výsledku je možné dosáhnout analytickým výpočtem. Podstatně zajímavější by bylo posoudit vznik tepelných mostů v lisovaném spoji vlivem různých tepelných roztažností materiálů kostry a statorového paketu. Nejrozsáhlejší část se zabývá posouzením konstrukčního uspořádání kostry zajišťující co nejlepší chlazení stroje. Při analýze vlivu žebrování pomocí tepelných odporů není vhodné použít vztahy pro povrchový odpor jak je uvedeno ve vztahu 8.4. Vliv žebrování by měl být posouzen podle účinnosti případně efektivnosti žebrování. Dává to pak lepší představu jednotlivých konfiguracích, zejména při jejich porovnání. Použité přístupy u porovnání jednotlivých variant žebrování jsou adekvátní. Pouze porovnávat chladicí účinnost jednotlivých uspořádání pouze na základě součinitele

přestupu tepla není zcela ideální. Spíše bych sledoval jaká je teplota základny (vnitřní průměr kostry), jelikož cílem je snížit teplotu kostry při daném ztrátovém výkonu. Porovnání simulací s měřeními na konkrétních kostrách a strojích je popsáno a realizováno zcela v pořádku a dává jasnou představu zda zvolené výpočetní přístupy jsou použitelné pro daný stroj i u jiných strojů.

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

Porovnání jednotlivých simulací pomocí různých přístupů s měřeními považuji za hlavní přínos práce. Rovněž využití nejmodernějších výpočtových programů pro identifikaci a zpřesnění parametrů náhradní tepelné sítě beru jako přínosné a do budoucna použitelné zejména při tvorbě například virtuálního dvojčete elektrického stroje. Jedinou výtku mám, jak již bylo zmíněno výše, k porovnání jednotlivých variant žebrování. V dalších pracích bych doporučoval využít pro porovnání parametru účinnosti žebrování, která je používána u chladičů a podobných zařízení. Jako poslední vidím přínos, že celá práce je součástí projektu pro návrh pohonné jednotky kolejového vozidla a má tedy úzkou vazbu na praxi.

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

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

Grafická úprava práce je dobrá a nemám žádné připomínky. V práci se objevují překlepy i pravopisné chyby v nepárném množství. Popis některých obrázků by mohl být názornější pro lepší orientaci při jejich porovnání. Práce je strukturovaná systematicky se všemi náležitostmi, které jsou na ni kladeny.

Vyjádření k publikacím studenta

Statement to student's publications

Publikace studenta hodnotím jako plně dostačující, zvláště cenná je publikace s impakt faktorem.

Celkové zhodnocení a otázky k obhajobě

Total evaluation and questions for defence

Předložená práce splňuje zákonné požadavky na disertační práci. Práci doporučuji k obhajobě a při uspokojivých odpovědích na otázky doporučuji udělení titulu PhD.

Otázky:

1. Str.62: Rovnice 8.3 popisuje tranzientní stav. Byla rovnice v tomto tvaru použita? Pokud ano, jak byla stanovena kapacita kostry?
2. Str.79: "Na základě slabě sdružených úloh vznikají tepelné modely, které jsou rychleji počítány s velmi vysokou přesností v porovnání se silně sdruženými úlohami. V rámci řešení problému bylo právě použito slabě sdružené úlohy, jak je naznačeno na Obr. 46." – Ověřil jste si to nějak na jednoduché úloze (modelu)?
3. Str. 79-80: Jaké byly nastaveny podmínky pro CFD simulace – turbulentní model, vstup, výstup, okolí atd.?
4. Str.81: Jak byly z výsledků CFD simulací stanoveny součinitelé přestupu tepla uvedené v tabulce XXII a na obr.51?
5. Str. 109: Jak byla stanovena teplota T_1 ve vztahu 8.61?

Doporučuji disertační práci k obhajobě

I recommend the dissertation for the defence

ano
yes

x

ne
no

Datum
Date

9.8.2021

Podpis oponenta:
Signature of opponent

doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.