

## Oponentský posudek disertační práce

Autor práce: **Ing. Marek Toman**

Název práce: **Výpočet optimálního magnetického toku asynchronního motoru pro minimalizaci ztrát se zohledněním teplotních vlivů**

Oponent: **prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**

Fakulta elektrotechnická  
Západočeská univerzita v Plzni  
Univerzitní 26, 306 14 Plzeň  
Česká republika

Tento oponentní posudek je vypracován na základě žádosti Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v souladu s požadavky zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů.

### 1. Aktuálnost řešeného tématu a jeho význam pro praxi a rozvoj oboru

Předložená disertační práce je zaměřena na výpočet optimálního toku asynchronního motoru (ASM) s cílem minimalizace ztrát motoru v různých provozních režimech. Řešeným tématem se dlouhodobě zabývají všechna přední světová výzkumná a vývojová pracoviště. Řešená problematika nabývá na významu v souvislosti s hledáním energetických úspor a také s rostoucí popularitou elektrifikovaných vozidel pro všechny typy dopravy, neboť minimalizace ztrát resp. maximalizace účinnosti pohonu významně ovlivňuje dojezd vozidla nebo jeho provozní náklady. Jedná se o téma aktuální a z hlediska praxe téma důležité.

### 2. Obsah disertační práce, posouzení zvolené metodiky řešení

Posuzovaná disertační práce sestává ze šesti hlavních kapitol (+úvod a závěr), celkový rozsah práce je 146 stran.

V úvodu autor definuje motivaci pro svoji práci, přičemž primárně cílí na elektromobilitu a související hon za maximalizací dojezdu vozidla napájeného z baterií.

V kap. 1 analyzuje autor současný stav poznání ve zkoumané problematice. Rešerše je rozdělena do třech oblastí: (i) matematické modely ASM, (ii) identifikace parametrů modelů ASM a (iii) minimalizace ztrát ASM provozovaného v širokém rozsahu otáček a momentu. Analýza současného stavu poznání je dosti stručná a mohla by být propracovanější. Autor ve velké míře odkazuje na práce vlastního pracoviště. Rešerše obsahuje formulaci hlavních v současnosti řešených problémů, a tak ji považuji za akceptovatelnou – avšak s vážnou výhradou.

V kap. 2 jsou definovány cíle práce. Tyto jsou formulovány jasně a srozumitelně.

Kap. 3 popisuje známé základní rovnice ASM a ztráty ve stroji. Tato kapitola je za mě nadbytečná, nepřináší žádné nové informace ani závěry.

Vlastní řešení (jádro disertační práce) začíná kap. 4. Zde je popsáno náhradní schéma ASM, ze kterého autor v práci vychází (parametrický  $\Gamma$ -článek), a následně jsou experimentálně pro dva různé ASM (600W a 1500W) identifikovány parametry zvoleného náhradního obvodu. Autor provedl standardní testy – měření statorových odporů stejnosměrnou metodou, měření naprázdno a měření pod zatížením. Z práce není zřejmé, zda měl autor u měřených strojů k dispozici pro srovnání parametry náhradních schémat od výpočtáře. Ověření parametrů např. pomocí FEM také nebylo provedeno. Líbí se mi provedené ověření správnosti separace ztrát v železe a mechanických ztrát.

Kap. 5 je věnována tepelnému modelu ASM. V první části kapitoly autor opakuje základní principy přenosu tepla (přenos vedením, konvekcí a zářením) a tyto aplikuje na ASM. Odvozuje náhradní tepelné sítě a tepelné odpory, střední a maximální teploty pro základní geometrické tvary (tělesa) tak, aby mohl být stroj na tyto tělesa dekomponován a následně aplikována metoda tepelných sítí k vytvoření náhradního tepelného modelu celého ASM. Výsledné vztahy jsou vesměs známé, autor je pro jistotu ještě ověřil pomocí FEM. Za přínosné považuji některé zajímavé autorovy komentáře v této části práce. Následně autor zkonstruoval zjednodušený náhradní tepelný model ASM, identifikoval jeho parametry a ověřil jeho validitu jak FEM simulacemi v ANSYSu, tak řadou laboratorních experimentů. Algoritmus identifikace parametrů použitého modelu je popsán příliš stručně, a tak není možné posoudit validitu použitého postupu ani postup replikovat.

V kap. 6 jsou provedeny výpočty magnetického toku ASM pro různé pracovní body (otáčky a momenty) s cílem minimalizace ztrát motoru. Stejně jako v kap. 5 je algoritmus výpočtu optimálního toku ASM pro daný pracovní bod popsán příliš stručně, a tak není možné posoudit validitu použitého postupu, resp. jeho výpočetní efektivnost, ani postup replikovat. Z textového popisu prováděné optimalizace usuzuji, že byla použita hrubá síla, přičemž by šlo použít elegantnější a rychlejší optimalizační techniky. Provedené experimenty vykazují dobrou shodu s výsledky simulací. Nebylo však systematicky ověřeno, zda navržený tok je skutečně optimální (v práci uvedeny výsledky pouze pro jeden pracovní bod – obr. 6.13).

V poslední kapitole jsou shrnuty hlavní výsledky práce, autor se vyjadřuje k souladu obsahu práce s definovanými cíli a definuje perspektivní směry dalšího zkoumání v návaznosti na výsledky této disertační práce.

Z hlediska formálního a jazykového je práce na velmi dobré úrovni, obsahuje minimální množství překlepů a gramatických chyb. Grafické zpracování práce je na dobré úrovni.

### **3. Posouzení přínosu disertační práce**

#### **a) Cíle disertační práce a jejich splnění**

Cíle posuzované disertační práce jsou definovány v kap. 2 na str. 13 a jejich soulad s obsahem práce je autorem hodnocen v kap. 7 na str. 103 a 104. Cíle práce byly podle mého názoru splněny. Byl navržen náhradní model ASM a algoritmus identifikace jeho parametrů. Dále autor navrhl teplotní model stroje v ustáleném stavu. Navrhl algoritmus výpočtu a provedl výpočet optimálního toku ASM pro obecný pracovní bod definovaný požadovaným

momentem a otáčkami. Autor vybudoval laboratorní stanoviště se dvěma různými ASM a provedl řadu experimentů, kterými doložil teoretické výsledky své práce.

#### **b) Výsledky disertační práce, dosažené nové poznatky a jejich přínos pro praxi a rozvoj vědního oboru**

Přínos disertační práce spatřuji především v provedených experimentech. Oceňuji množství experimentů, které autor provedl a jeho snahu experimentálně doložit všechny teoretické výsledky. Částečně původní je náhradní model ASM ve tvaru parametrického  $\Gamma$ -článku, algoritmus identifikace jeho parametrů a sestavený zjednodušený tepelný model vycházející z metody tepelných sítí. Je škoda, že autor provedl testy pouze na dvou ASM a neprovedl systematickou studii pro větší počet strojů, aby bylo možné výsledky statisticky vyhodnotit a zobecnit. Algoritmy identifikace parametrů modelů a technika výpočtu optimálního toku stroje pro zadaný moment a otáčky jsou v práci popsány příliš stručně, a tak není možné posoudit validitu použitého postupu ani postup replikovat. Zajímavé jsou závěry některých analýz – např. separace ztrát motoru, či citlivostní analýza vypočteného optimálního toku.

Navržený model ASM lze využít pro studium jeho vlastností, lze analyzovat provozní parametry motoru s cílem maximalizace jeho účinnosti, což je kritický parametr např. pro elektrifikované dopravní prostředky mající významný vliv na dojezd vozidla nebo jeho provozní náklady. Prezentované teoretické rozborů a odvození, včetně sestaveného modelu stroje, jsou využitelné i pro pedagogické účely v pregraduálních i postgraduálních studijních programech.

V práci postrádám kritické srovnání výsledků s existujícími metodami, jako jsou MTPA nebo MTPL (viz část 6 posudku). Navržený model je vhodný pro off-line analýzu stroje, možnosti jeho využití pro řízení stroje v reálném čase jsou podle mého názoru pouze omezené.

#### **4. Hodnocení publikační činnosti uchazeče**

Součástí posuzované disertační práce je seznam autorových publikací. Seznam čítá 44 položek, k tématu disertační práce se vztahuje 13 článků na národních a mezinárodních konferencích. Doktorand nemá žádnou publikaci v impaktovaném časopise, ani není původcem patentu. Na WoS jsem našel celkem 18 autorových prací. Jeho H-index dle WoS je 2.

Počet a skladbu autorových prací považuji z hlediska standardů pro disertační práce za mírně podprůměrnou. Jádro disertační práce bylo podle mého názoru v akceptovatelné míře publikováno.

#### **5. Dotazy a komentáře k disertační práci**

K práci mám níže uvedené výhrady, dotazy a komentáře:

- Str. 31, kap. 4.4.1: Proč bylo měření na prázdno prováděno od 20 Hz? Jak bylo ověřeno chování stroje resp. modelu při nižších statorových frekvencích?

Je škoda, že měření ve větším rozsahu odbuzování bylo provedeno pouze pro jeden motor.

- Str. 33 a 34, kap. 4.4.1, obr. 4.4 a obr. 4.5: Čím jsou způsobeny rozdílné teploty vinutí pro různé otáčky? Jak byly teploty ustalovány – jak byl hledán ustálený stav?
- Str. 37, kap. 4.4.1, obr. 4.6: Chyba aproximačního modelu roste s rostoucí statorovou frekvencí. Analyzoval jste důvody?

- Str. 50, kap. 4.5.4, obr. 4.15: Vysvětlete prosím, jak přesně jste určil finální hodnotu rozptylové indukčnosti.  
Porovnával jste výsledek měření s měřením nakrátko nebo s parametry náhradního schématu od výpočtáře?
- Str. 76, kap. 5.5.2, obr. 5.16: Proč jste nepoužili bezdrátový přenos měřených teplot rotoru?
- Str. 80, kap. 5.7.1, obr. 5.20: Algoritmus je popsán pouze principiálně – není jasné jaké parametry tepelného modelu byly identifikovány a jaký aparát byl přesně použit. Vysvětlete prosím detailně.
- Str. 84, kap. 6.1, obr. 6.1 + str. 86, kap. 6.2, obr. 6.2: Algoritmy jsou popsány pouze principiálně, chybí podrobnější matematický postup. Vysvětlete prosím detailně.  
Proč začínáte statorovou frekvenci vždy iterovat od jmenovité rotorové frekvence (resp. jmenovitého skluzu) bez ohledu na požadovaný moment a otáčky?
- Jakým způsobem by v disertaci popisovaný výpočet optimálního toku ASM šel použít pro řízení motoru v reálném čase?
- Porovnejte v disertaci navržený optimální tok ASM se známými technikami MPTA nebo MTPL, viz např. *J. Kullick and C. M. Hackl, "Nonlinear modeling, identification and optimal feedforward torque control of induction machines using steady-state machine maps," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, doi: 10.1109/TIE.2022.3153811.*
- Str. 89, kap. 6.3.1, obr. 6.3: Výsledky optimalizace navrhují pracovní body pro  $U_s \gg U_{sn}$ . Jak je řešena a v optimalizaci zohledněna saturace magnetického obvodu stroje?
- Str. 99, kap. 6.5: Jak jste při laboratorních testech ověřil, že spočtený tok je skutečně optimální pro daný ASM? V práci je uveden pouze jeden pracovní bod – str. 101, obr. 6.13.

## 6. Závěr

Ing. Marek Toman splnil stanovené cíle disertační práce. Práce podle mého názoru obsahuje původní výsledky a dokládá odbornou erudici uchazeče potřebné k získání titulu Ph.D.

Na základě posouzení disertační práce pana Ing. Marka Tomana na téma „Výpočet optimálního magnetického toku asynchronního motoru pro minimalizaci ztrát se zohledněním teplotních vlivů“ a po seznámení se s výsledky jeho odborné práce ve smyslu §47 zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů **doporučuji disertační práci k obhajobě.**

V Plzni dne 27. července 2022

prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.