

Oponentský posudok dizertačnej práce Ing. Pavla Janduru

„Současné trendy optimálního řízení pohonů a energetických úložišť v elektromobilech a městské trakci“

Predkladaná dizertačná práca sa zaoberá súčasnými trendmi riadenia pohonov a energetických úložísk v elektromobiloch a mestskej trakcii. Téma práce zodpovedá študijnému odboru *Technická kybernetika*.

Zvolená téma je veľmi aktuálna a žiadaná. Tematicky má práca veľmi široký záber a spracováva veľmi veľa informácií. Zaoberá sa mechanickými ako aj elektrickými komponentmi.

Rozoberaná problematika je v súčasnej dobe v popredí záujmu všetkých výskumných pracovísk a praxe zaoberajúcich sa elektromobilitou.

Práca je v súlade so súčasným stavom poznania.

Hlavná osnova dizertačnej práce je prehľadná a správna. Ciele sú v úvode jasne vymedzené.

Práca je členená do siedmich kapitol, v ktorých sa autor zaoberá hlavne návrhom hnacieho ústrojenstva elektrického vozidla (vrátane zdrojov energie) a optimalizáciou spotreby energie mestskej jednosmernej trakcie, kde sa zaoberá aj ukladaním elektrickej energie.

Práca je kvalitne spracovaná.

Formálne nepresnosti a preklepy sa vyskytujú v práci výnimočne. Grafické spracovanie je na dobrej úrovni. Inak veľmi dobrú kvalitu práce však znižuje veľmi drobný popis v obrázkoch, ktorý je miestami nečitateľný. Dôležité obrázky ako sú výsledky simulácii by mali byť väčšie.

Autor si na pomenovanie dôležitých opakujúcich sa pojmov zaviedol skratky. Sú používané až príliš často a je ich priveľa, čo zhoršuje zrozumiteľnosť textu. Na druhej strane je treba vyzdvihnúť to, že používané skratky sú v úvode práce prehľadne uvedené. (až na niektoré výnimky)

K lepšej zrozumiteľnosti a kontrole by prispelo aj vyčíslenie použitých matematických vzorcov tam kde je to možné.

Prvá kapitola je venovaná úvodu do problematiky. Druhá a tretia kapitola spolu úzko súvisia a zaoberajú sa hnacím ústrojenstvom elektromobilov ako aj návrhom napájania. Veľmi obsiahne sú popísané možné technické riešenia ako aj ich výhody a nevýhody.

Autor vytvoril vlastné simulačné prostredie k odsimulovaniu motorových vozidiel. Bolo odsimulovaných a porovnaných niekoľko trakčných pohonov. Výsledky simulácii sú spracované vo forme grafov a tabuliek, kde sú jednotlivé pohony medzi sebou porovnané.

Teoretické znalosti a výsledky simulácii autor využil na návrh a realizáciu pohonu experimentálneho elektromobilu TUL ako aj na návrh trakčnej batérie spolu s jej managementom a ostatnou palubnou elektronikou. Funkčná vzorka elektromobilu bola predstavená na MSV Brno v 2013. Na realizácii druhej generácii vozidla sa v súčasnosti pracuje. Autor sa pre druhú generáciu rozhodol použiť Dual Motor Drive System a navrhol vhodné elektromotory, meniče a prevodovku. Navrhnutý pohon bol odsimulovaný.

Mestskej jednosmernej trakcii sú venované kapitoly 4. 5. 6. Autor podrobne analyzoval problémy električkovej prevádzky v Liberci z pohľadu napájania a spotreby elektrickej energie ako aj možnosti krátkodobého ukladania elektrickej energie.

Po dôkladnom rozobratí technológie energetických úložísk sa autor rozhodol pre krátkodobé uskladnenie energie na báze zotrvačníka. Bol navrhnutý tvar zotrvačníka a v programe ANSYS pomocou metódy konečných prvkov urobená pevnostná analýza t.j. vypočítané rozloženie napätia reze profilu ako aj deformácia zotrvačníka. V programe MATLAB Simulink bol model úložiska odsimulovaný.

Hlavným prínosom doktoranda je návrh a realizácia hnacieho ústrojenstva experimentálneho elektromobilu TUL, ktorý obsahuje návrh prototypu jednorýchlostnej prevodovky, výber vhodných elektromotorov, meničov s vektorovým riadením a riadiacej jednotky. Ďalšími veľmi dôležitými prínosmi sú návrh trakčnej batérie a zotrvačníka.

Otázky k obhajobe:

Aké straty sa znižujú v rotore asynchrónnych strojov s medenou klietkou asi o 50%? (str.29)

Str. 42 – čo predstavujú symboly i_r a η_r v rovniciach 2.20 a 2.21?

Vysvetlite význam ΔW v tab 2.5 str.56 .

Str.51 – medzi straty mechanické strojov s PM ako signifikantné uvádzate straty spôsobené permanentnými magnetmi – čím sú tieto straty spôsobené?

Môžete vyčíslieť jazdné odpory električky, ktoré ste použil pri simulácii?

Str 87-Za základe akej teoretickej úvahy ste došli k záveru, že špičkový výkon pre všetky vozy akcelerujúce zároveň by bolo cca 5400kW?

Dokážete odhadnúť za akú dobu by sa dopravnému podniku vrátila investícia do prepojenia napájacích úsekov pri súčasných cenách elektrickej energie?

Aké sú úplne rozmery zotrvačníka?

Môžete vysvetliť toky energie pri práci zotrvačníka a na základe akých výpočtov ste sa dopracovali k hodnote 5kWh?

Aký typ stroja by ste navrhol Vy pre pohon zotrvačníka?

Doktorand vo svojej práci veľmi podrobne spracoval zadanú problematiku a získané teoretické znalosti uplatnil pri praktických realizáciách, čo je veľmi dôležité. Veľmi cenné je aj zhodnotenie výsledkov jednotlivých kapitol samotným autorom.

Hlavné myšlienky práce boli publikované v 12 článkoch na domácich a zahraničných konferenciách, v časopisoch a v troch výskumných správach. Autor je spoluautorom funkčného vzoru elektromobilu *eŠus* a funkčného vzoru *trakčnej batérie elektromobilu*.

Z prehľadu odbornej činnosti uchádzača je zrejmé, že sa jedná a pracovníka s dobrou vedeckou erudíciou a silným experimentálnym základom.

Doporučujem prácu Ing. Pavla Janduru k obhajobe a ak bude práca úspešne obhájená doporučujem udeliť autorovi titul Ph.D.

V Košiciach 23.11.2015



Doc. Ing. Želmíra Ferková, CSc.
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Technická univerzita v Košiciach

Posudek disertační práce

Autor disertační práce: **Ing. Pavel Jandura**

Vedoucí práce: Ing. Josef Černohorský, Ph.D.

Pracoviště: TU Liberec

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Oponent: doc. Ing. Pavel Mindl, CSc.

Katedra elektrických pohonů a trakce,

ČVUT FEL, Technická 2, 166 27 Praha 6

Název Práce: „Současné trendy optimálního řízení pohonů a energetických úložišť v elektromobilech a městské trakci“

Předložená disertační práce je zaměřena na dva současně velmi aktuální problémy. Prvým problémem je komplexní řešení elektrického pohonu automobilu v celé jeho šíři, se zvláštním důrazem na problematiku optimalizace elektrického pohonu a palubních úložišť elektrické energie.

Druhý řešený problémem se týká optimalizace hospodaření s elektrickou energií pro napájení vozidel závislé trakce, v tomto případě v tramvajové síti městské hromadné dopravy Dopravního podniku měst Liberce a Jablonce n. Nisou (DPMLJ).

Práce je členěna do sedmi kapitol, přičemž první tři poměrně rozsáhlé kapitoly jsou věnovány formulaci cílů disertační práce, přehledové analýze možných architektur a pohonných jednotek elektropohonu vozidla, optimalizaci hnacího ústrojí elektrického vozidla a zhodnocení jednotlivých výstupů analýzy.

Po formulaci cílů v první kapitole autor ve druhé kapitole provádí posouzení jednotlivých konfigurací elektrických pohonů a jejich chování ve vozidle. Pro tuto činnost byl použit vlastními silami vyvinutý simulační program v prostředí Microsoft Excel.

Výsledky simulací byly vyhodnoceny a na jejich základě byl navržen spřažený dvumotorový pohon s motory různých typů a výkonů (hlavní PMSM, pomocný ACIM).

Ve třetí kapitole byly teoretické výsledky dosažené ve druhé kapitole hned zúročeny v návrhu experimentálního elektromobilu. V této kapitole je proveden zevrubný popis jednotlivých částí hnacího ústrojí, trakční baterie a řídicího systému vozidla. Je zde představen experimentální elektromobil 1. generace, realizovaný na TUL a rozpracován návrh vozidla 2. generace, které je v současné době ve stádiu stavby. Tento oddíl končí popisem aktuálního stavu řešené problematiky.

Druhá část práce představuje další samostatný problém, který má s první částí práce společného jmenovatele, a tím je problematika úložišť elektrické energie.

V této části jde speciálně o problém dočasného ukládání rekuperované energie, produkované tramvajovým provozem DPMLJ ve výškově členitém terénu města Liberec.

V této souvislosti byla zpracována rozsáhlá studie energetických toků v části tramvajové napájecí sítě města Liberec, se záměrem vyšetřit toky energie a její přebytky v různých dopravních situacích. Dále se hledal optimální způsob dočasného uložení a následného využití těchto energetických přebytků.

Autor práce v této souvislosti provedl technicko-ekonomické vyhodnocení v úvahu připadajících zásobníků energie. Nakonec detailněji rozpracoval a technicky navrhl elektro-mechanické úložiště na principu setrvačnickového akumulátoru.

V této souvislosti provedl výpočet potřebného setrvačnicku a po řadě konzultací vybral i vhodný elektrický stroj pro motor-generátor setrvačnickového systému.

Autor si stanovil za cíl nalézt a ověřit nová řešení návrhu a optimálního řízení moderních pohonů a úložišť elektrické energie s cílem prodloužit dojezd elektrických vozidel nezávislé trakce a maximalizovat zužitkování rekuperované energie u vozidel závislé trakce. K tomu použil tři následující přístupy:

1. Optimalizaci celkové spotřeby vozidla pomocí snižování jízdních odporů a hmotnosti, omezením jízdní dynamiky, zvýšením celkové účinnosti hnacího ústrojí a snížením spotřeby povinných i komfortních palubních spotřebičů elektrické energie.
2. Navyšování kapacity energetického úložiště.
3. Pro provoz závislé trakce využít stacionárních úložišť energie. Tato úložiště obvykle nejsou omezena instalačním prostorem, avšak musí být schopna pokrýt výkonové špičky celého provozu v řádu stovek kW až jednotek MW.

Po prostudování práce lze konstatovat, že její autor je hluboce seznámen s řešenou problematikou a v práci prokázal schopnost metodicky správně postupovat jak v oblasti teoretických analýz jednotlivých problémů, tak při jejich simulačním a následně i experimentálním ověření.

I když práce má převážně popisný charakter a nejsou detailně prezentovány konkrétní matematické postupy analýzy jednotlivých dílčích problémů, je evidentní, že rozsáhlý matematický aparát je skryt v přípravě a realizaci velkého množství simulací, na jejichž základě byly provedeny návrhy dílčích komponent elektrického pohonu konceptu elektrického vozidla. Podobně v případě analýzy a simulace toků energie v tramvajovém provozu je patné masivní využití matematického aparátu. Pro nedokončenost realizace funkčního vzorku elektromobilu i setrvačnickového zásobníku, nelze objektivně posoudit soulad teoretických a experimentálních výsledků.

Celkově práce budí velmi solidní dojem a dokazuje, že její autor je nejenom zdatný teoretik, ale že je schopen věci dotáhnout do praktické aplikace a provést konstrukční návrh teoreticky zpracovaného řešení.

Za velice přínosnou a originální považuji pasáž práce, věnovanou problematice optimalizace elektrického pohonu. Jejím využitím lze dosáhnout energetické úspory, které napomohou k dosažení vyšších dojezdů automobilů a odrazí se i v potřebné hustotě obslužných stanic.

Doložený přehled publikační činnosti dokazuje, že doktorand publikoval výsledky své práce systematicky po dobu několika let na významných vědeckých fórech a dosáhl značné vědecké erudice.

Na závěr bych si dovolil několik dotazů

1. Jaký je Váš názor na budoucnost alternativních zdrojů, jako např. palivových článků + vodíku, resp. přímometanolových palivových článků v lehkých automobilech?
2. Jaké jsou možnosti dalšího zvyšování úspor elektrické energie na palubě vozidel?
3. Jaké jsou relace mezi energetickými nároky pohonu a komfortní výbavy elektromobilu?

Předložená práce „Současné trendy optimálního řízení pohonů a energetických úložišť v elektromobilech a městské trakci“ svojí formou i obsahem odpovídá obecně uznávaným pravidlům, platným pro doktorské kvalifikační práce. Hodnotím ji jako velice přínosnou s celou řadou originálních výsledků. Na tomto základě ji bez připomínek **doporučuji k obhajobě.**

V Praze, 6.11. 2015


doc. Ing. Pavel Mindl, CSc.