

Posudek disertační práce

Autor: **Ing. Michal Kroneisl**
Téma: **Algoritmy řízení trakčního pohonu potlačující elektromagnetický hluk**
Oponent: **doc. Ing. Martin Kuchař, Ph.D.**
Docent
VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky
17. listopadu 2172/15
708 00 Ostrava – Poruba
tel.: +420 597 325 834, e-mail: martin.kuchar@vsb.cz

1. Aktuálnost zvoleného tématu

Disertační práce Ing. Michala Kroneisla se zabývá problematikou vhodného řízení střídavého elektrického pohonu za účelem dosažení méně rušivého akustického projevu. Při provozu elektrický pohon s frekvenčním měničem produkuje určité negativní vlivy do svého okolí. Kromě elektromagnetického rušení jde i o akustický hluk, který může nepříznivě ovlivňovat zdraví, komfort a soustředěnost v daném místě vyskytujících se osob. Pro některé aplikace, jako např. oblast vojenských plavidel nebo trakčních vozidel, jde opravdu o velmi důležité a aktuální výzkumné téma, což dokládají i publikace v prestižních odborných časopisech uvedené v práci v seznamu použité literatury. V práci navržené algoritmy využívají prediktivní řízení s matematickým modelem. V oblasti elektrických regulovaných pohonů jde o jednu z poměrně nových metod umožňující současnou optimalizaci více sledovaných parametrů.

2. Přínos disertační práce pro rozvoj vědního oboru

a) Cíle disertace a jejich splnění

Ing. Michal Kroneisl řešil v rámci své práce úkol spojený s problematikou řízení elektrického pohonu s asynchronním motorem a frekvenčním měničem s ohledem na akustický hluk tohoto pohonu. V úvodu disertační práce autor prezentoval příčiny vzniku hluku v elektrickém pohonu se zaměřením na hluk elektromagnetický, který je kromě samotné konstrukce elektrického motoru ovlivněn i způsobem řízení použitého napěťového střídače. Další kapitola se pak věnuje různým modulačním algoritmům známým z literatury jako RPWM (Random Pulse Width Modulation), které potlačují elektromagnetický hluk. Hlavní pozornost je věnována metodám RPWM s náhodnou spínací frekvencí a náhodným zpožděním. V kapitole 4 jsou prezentovány vlastní řídicí algoritmy založené na prediktivním řízení s matematickým modelem a konečnou množinou akčních zásahů FCS-MPC (Finite Control Set – Model Predictive Control). Autor se pak konkrétně zaměřuje na základní metodu FCS-MPC, dále na FCS-MPC s možností tvarování spektra s jednodukovým modelem nebo lineárně kvadratickým regulátorem (LQ řízení). Poslední část práce je věnována experimentálnímu ověření navržených metod na elektrických pohonech s asynchronními motory o výkonu 4, 11 a 15 kW. Rozebrána je i problematika

automatického nastavení váhových koeficientů ve ztrátové funkci prediktivního řízení s jednokrokovým tvarováním spektra.

Naplnění cílů disertační práce vyžadovalo znalost příslušné teorie z oblasti elektrických strojů a pohonů, výkonové elektroniky, algoritmů řízení, matematiky, fyziky i informatiky. Doktorand rovněž prokázal velmi dobré praktické dovednosti při zprovoznění a testování navržených metod řízení elektrického pohonu s asynchronním motorem včetně realizace některých měřicích komponent laboratorního stanoviště.

Cíle disertační práce přímo vyplývají z jejího obsahu, ale v samotné práci bohužel uvedeny nejsou, což považuji za chybu. Nalezl jsem je v obecné formě až v autoreferátu k této disertační práci. Ing. Michal Kroneisl takto stanovené cíle disertační práce splnil.

b) Výsledky disertace a nové poznatky

Mezi nové poznatky je možné zahrnout především navržené prediktivní metody řízení pro snížení tonality hluku elektrického pohonu a získané experimentální výsledky včetně srovnání všech vybraných řídicích algoritmů.

3. Zpracování disertační práce

a) Zvolené metody zpracování

Práce je logicky členěna, je srozumitelná a přehledná. Nejprve je uvedena nutná analýza problému a potřebné teoretické základy. Následuje rozbor stávajících i nově navržených řešení včetně matematického popisu a experimentální výsledky.

b) Jazyková, terminologická a grafická úroveň práce

Jazyková úroveň práce je na velmi dobré úrovni s minimem pravopisných chyb. Drobnou připomínku mám k popisu vztahu (33), kdy p_a by měl vyjadřovat akustický tlak a ne tlak atmosférický. Dále na obr. 34 a 38-42 není uvedena veličina ani její jednotka odpovídající barevnému rozlišení. Připomínku mám rovněž k seznamu použitých symbolů a zkratk, který neobsahuje řadu v práci použitých veličin a zkratk, např. matice A, B, C, D, L , váhové koeficienty λ , zkratku LQ atd. I přes zmíněné připomínky je celkové zpracování práce na vysoké úrovni a uvedené obrázky výstižně doplňují textovou část.

4. Přehled publikovaných prací

Seznam autorových publikací vztahujících se k tématu disertační práce zahrnuje 1 článek v časopise kategorie D1 a 10 příspěvků na mezinárodních, příp. tuzemských konferencích, což je dostatečný počet pro seznámení odborné veřejnosti s jádrem této práce. Pět z těchto publikací je navíc indexováno v databázi Scopus a Web of Science. Celkové shrnutí autorových publikačních výsledků v databázi Scopus i Web of Science: 5 dokumentů, 3 citace bez autocitací (h-index 1). Ing. Michal Kroneisl je i autorem devíti vědeckých zpráv a jednoho funkčního vzorku. Publikační výsledky autora práce považuji za naprosto vyhovující.

5. Závěr

Vzhledem k velmi dobré úrovni disertační práce, splnění stanovených cílů, přínosu pro obor a prokázání teoretických i praktických schopností při vědeckých a výzkumných aktivitách, disertační práci Ing. Michala Kroneisla **doporučuji k obhajobě** před komisí pro obhajoby ve studijním programu "Elektrotechnika a informatika". Po úspěšné obhajobě této disertační práce doporučuji udělit Ing. Michalu Kroneislovi akademicko-vědecký titul "doktor", ve zkratce "Ph.D."

V Ostravě dne 9. 8. 2021



doc. Ing. Martin Kuchař, Ph.D.

Dotazy k obhajobě disertační práce

1. Na jaké platformě byly navržené algoritmy řízení implementovány (obr. 33)? Jaké jsou požadavky na výpočetní výkon řídicího systému?
2. Nezkoušel autor, alespoň pro nízké otáčky experimentálně ověřit i metodu FCS-MPC s tvarováním spektra i redukcí spínací frekvence podle (65)? V případě, že ano, jak byly nastaveny jednotlivé váhové koeficienty ve ztrátové funkci?
3. Nezkoumal autor, jakým způsobem ovlivňují aplikované algoritmy řízení problematiku elektromagnetického rušení produkovaného elektrickým pohonem?
4. V jaké pozici byl umístěn mikrofon pro měření akustického tlaku a proč (viz obr. 33)?

POSUDEK OPONENTA DISERTAČNÍ PRÁCE

Assessment of the Dissertation

Titul, jméno a příjmení studenta:

Title, name, surname of student

Ing. Michal Kroneisl

Doktorský studijní program:

Doctoral study programme

Elektrotechnika a informatika

Studijní obor:

Study branch

Elektronika

Téma disertační práce:

Topic of the dissertation

Algoritmy řízení trakčního pohonu
potlačující elektromagnetický hluk

Školitel:

Supervisor

Doc. Ing. Pavel Drábek, Ph.D.

Oponent:

Opponent

Doc. Ing. Pavol Makyš, Ph.D.

Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Evaluation of the importance of the dissertation for the field

Dizertačná práca sa zaoberá možnosťami zníženia hluku v pohonárskych aplikáciách určených pre trakčné pohony s asynchrónnym motorom. Autor sa v práci venuje problematike vzniku a šírenia hluku v elektrických pohonoch, pričom na jeho potlačenie využíva rôzne modifikácie modulačných techník a ním navrhnuté riadiace metódy využívajúce prediktívne algoritmy. Práca svojim obsahom prináša nové poznatky, ktoré prispievajú nielen k teoretickému, ale aj k praktickému rozvoju príslušného odboru.

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

Zvolené metódy spracovania zahrňujú:

- popis súčasného stavu problematiky,
- teoretický rozbor vzniku a šírenia elektromagnetického hluku v elektrických pohonoch.
- tvorba simulačných modelov
- implementácia techník v prostredí Matlab
- experimentálne overenie navrhnutých topológií riadenia ASM na meracom zariadení s mikroprocesorom.

Zvolené metódy sú správne s dobrou logickou nadväznosťou. Autor splnil zvolený cieľ práce, pričom zvlášť oceňujem praktickú realizáciu a merania navrhnutých modifikácií modulačných techník a vlastných riadiacich techník na rôznych ASM.

**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

Práce v úvodných dvoch kapitolách ponúka teoretický úvod do problematiky vzniku elektromagnetického hluku, jeho súvislosť s priebehmi napájacích prúdov a napätí, ale taktiež definuje hlavné veličiny ktoré vyjadrujú mieru vplyvu hluku na okolité prostredie a jeho dopad na ľudský organizmus. Túto časť práce považujem za najdôležitejší teoretický prínos práce z pohľadu matematicko-fyzikálneho popisu vzniku elektromagnetického hluku.

Nasledujúca tretia kapitola sa už detailnejšie zaoberá modulačnými technikami, pričom autor uvádza modifikácie základnej PWM techniky, označených ako RPWM (z ang. „Random Pulse Width Modulation“). Autor v prevažnej miere uvádza simulačné výsledky, ale v závere kapitoly je prezentovaná aj implementácia tejto modulačnej techniky. Obrázky frekvenčných spektier poukazujú na rozloženie hluku do celého spektra frekvencií čím prispievajú k zníženiu tzv. tonality, ale taktiež poukazujú aj na fakt nemožnosti vyhnúť sa vybudeniu vlastných rezonančných frekvencií iných častí pohonu. Keďže model bol tvorený iba samotným motorom so záťažou, objavila sa vo výsledkoch iba jedna rezonančná frekvencia. V prípade celého trakčného traktu (napr. v prípade elektromobilu) by tých frekvencií bolo isto niekoľko.

Štvrtá kapitola je venovaná návrhu riadenia s využitím predikčných algoritmov. Vďaka možnosti voľby váhových koeficientov, chcel autor eliminovať vybudenie mechanických rezonancií. Výsledná charakteristika úrovne hluku bola v porovnaní s PWM plochejšia, autor však dospel k názoru že na výrazné potlačenie vybudzovania vlastných frekvencií by bolo nutné implementovať taký komplexný model, ktorého riešenie v reálnom čase je zatiaľ prakticky nemožné. Zvolil jednoduchší prístup s využitím tvarovania frekvenčného spektra pomocou filtrov, prípadne kvadratickým regulátorom (označ. ako LQR). Výsledky poukazujú na mierne potlačenie vplyvu rezonančnej frekvencie a tým pádom celé riadenie vykazuje aj nižší hluk.

Tieto záverečné kapitoly popisujúce modifikácie a návrhy riadení s nameranými výsledkami považujem za najvýznamnejšiu časť práce s pohľadom jej prínosu pre vedu a prax.

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

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

Predložená dizertačná práca je členená logicky a zrozumiteľné, je na dobrej grafickej úrovni s minimom preklepov a gramatických chýb (napr. str.12, opakujúce sa „částí částí“, príloha A7, „hluksu“). Z formálneho hľadiska azda jediná podstatnejšiu pripomienku mám len k označovaniu obrázkov, kde si autor zvolil metódu popisu „obr. vpravo dole, vľavo hore atď.“, možno jednoduchšie by bolo označiť príslušné obrázky písmenami napr. 28.a), 28.b) atď'. Uvedené formálne nedostatky však nijako neznižujú vynikajúcu odbornú úroveň práce.

Vyjádření k publikacím studenta

Statement to student's publications

Dosiahnuté výsledky v tejto dizertačnej práci boli publikované v nadštandardnej miere. Ide o 22 publikácií, 8 konferenčných, 3 príspevkov v časopise a množstvo výskumných prác,

ktorých pozadie asi mohlo byť v práci niekde popísané. Z práce sa nedá určiť za akým účelom boli tieto výskumné správy vytvorené.

Celkové zhodnocení a otázky k obhajobě

Total evaluation and questions for defence

Doktorandská dizertačná práca Ing. Michala Kroneisla poukazuje na nové poznatky hlavne vzniku a možnej eliminácie nadmerného hluku v oblasti riadiacich techník striedavých pohonov s ASM určených pre elektrickú trakciu.. Výsledky práce sú jednoznačne prospešne pre prax či ďalší rozvoj vedy a techniky.

Konštatujem, že predložená práca spĺňa podmienky stanovené podľa zákona o vysokých školách č. 111/98, § 147 a preto odporúčam prijať dizertačnú prácu k obhajobe a po úspešnom obhájení udeliť pánovi Ing. Michalovi Kroneislovi vedecko-pedagogický titul

Philosophiae doctor (PhD.)

Otázky k obhajobe:

1. V úvodnej časti ste spomenuli opotrebovanie motora (ASM) vplyvom prevádzky. Čo presne ste tým mysleli?
2. V kapitole 3. uvádzate, že vzorkovacia frekvencia je konštantná, ale spínicia sa oneskoruje. Akým spôsobom a či vôbec, je potom vykonávaná synchronizácia merania so spínaním prvkov?
3. Teoretická úvaha: Ktorá z metód by bola najvhodnejšia, ak by sa v pohonnom trakte vyskytovalo niekoľko rezonančných frekvencií, nielen jedna?

Doporučuji disertační práci k obhajobě

I recommend the dissertation for the defence

<u>ano</u> yes	x	ne no
-------------------	---	----------

Datum

Date

7. 6. 2021

Podpis oponenta:

Signature of opponent



Oponentský posudek doktorské disertační práce

Ing. Michala Kroneisla

„Algoritmy řízení trakčního pohonu potlačující elektromagnetický hluk“

Aktuálnost tématu a splnění cíle

Doktorská disertační práce Ing. Michala Kroneisla je zaměřena na aktuální problematiku elektromagnetického hluku a jeho omezování. Jsou analyzovány metody PWM používané s cílem tento hluk omezit a je představena originální metoda uplatnění prediktivního řízení s konečnou množinou řídicích signálů pro tento účel.

Obsah a dosažené výsledky disertační práce jsou plně v souladu s cíly deklarovanými v závěru úvodu.

Metodika a postup řešení

Disertační práce je psána v českém jazyce a má včetně všech příloh celkový rozsah 82 stran.

Po úvodní kapitole, uvádějící základní skutečnosti o zdrojích elektromagnetického hluku v pohonech s polovodičovými měniči, možnostech jeho omezování a cílech práce, jsou v kapitole druhé představeny typy hluku v elektrických pohonech, vysvětleny příčiny vzniku hluku elektromagnetického, posuzován vliv typu PWM na jeho vznik a velikost a analyzován průběh fázového napětí motoru z hlediska obsahu harmonických složek. Dále je uveden způsob stanovení harmonických proudů a způsobovaného hluku. Kapitola končí přehledem dopadů hluku na jeho vnímání lidským sluchem a způsobů a kritérií jeho hodnocení. Tuto kapitolu lze chápat jako přehledné zpracování původu elektromagnetického hluku v pohonech s měniči kmitočtu a jeho dopadů na lidský organizmus.

Kapitola třetí je věnována metodám modulace polovodičových měničů. Postupně uvádí principy RPWM s náhodným spínacím kmitočtem, RPWM s náhodným zpožděním a RPWM s náhodnou pozicí pulzu a jejich hodnocení. Porovnává i metody implementace jednotlivých metod v modulu řídicího mikroprocesoru.

Klíčová kapitola čtvrtá je věnována prediktivnímu řízení elektromagnetického hluku pohonu. Jsou uvedeny základní principy prediktivního řízení (FCS-MPC = Finite Control Set - Model Predictive Control), základní rovnice IM, jejich diskretizace a základní tvar ztrátové funkce pro řízení proudu IM s kmitočtovým spektrem blízkým spektru bílého šumu. Dále jsou uvedeny dvě metody FCS-MPC: jednokroková metoda a metoda s tvarováním spektra s LQR regulací. Nakonec jsou zde uvedeny úvahy o řízení spínacího kmitočtu a jeho vlivu na akustické projevy pohonu.

V kapitole páté uvádí autor schémata laboratorních zapojení a výsledky provedených experimentů. Je uveden popis měřicího stanoviště a způsoby měření. Jsou uvedeny výsledky měření rozběhu i ustálených stavů s vyhodnocením proudových spekter stroje a hluku pro uvažované klasické i nově formulované metody s využitím FCS-MPC. Následuje podkapitola o automatickém ladění váhových koeficientů ve váhové funkci.

V závěru uvádí autor přehled náplně jednotlivých kapitol, rozsáhlé hodnocení dosažených poznatků a návrhy pro jejich další rozvíjení.

Výsledky disertace a získané poznatky

Jádro vlastního přínosu doktoranda lze nalézt zejména v kap. 4 a 5. Obě kapitoly představuje inspirativní text, pojednávající o aplikaci FCS-MPC pro omezení elektromagnetického hluku pohonu s IM a měničem kmitočtu. Podle mého názoru jde o originální využití FCS-MPC v oblasti řízení pohonů, jemuž nebyla až do posledních let věnována ani ve světě významná pozornost.

Potenciál využití všech poznatků získaných a prezentovaných v této práci v pedagogické i výzkumné činnosti pracoviště je evidentní.

Formální a jazyková úprava práce

Grafická úprava práce je velmi dobrá a v práci jsem nenalezl žádné podstatné formální, gramatické ani stylistické prohřešky. Zejména vzhledem ke složitosti problematiky využití FCS-MPC k řízení modulace měniče s cílem snížení hlukových projevů lze zvolenou strukturu práce, posloupnost a obsah jednotlivých kapitol i způsob výkladu považovat za příkladný.

Publikační aktivita autora práce

V práci uvádí autor celkem 22 publikovaných příspěvků (včetně tezí k disertační práci), vztahujících se k tématu práce, z toho 1 příspěvek v časopise s vysokým IF, 4 příspěvky v jiných časopisech, 6 příspěvků na konferencích, 1 funkční vzorek, a zbývající uváděná lite-

ratura jsou výzkumné zprávy. Ačkoli se jedná většinou o práce více spoluautorů, považují publikační aktivitu doktoranda za nadprůměrnou.

Připomínky, dotazy a náměty do diskuse při obhajobě DDP

- Na obrázcích 26 a 28 (a některých dalších) jsou výrazné špičky v kmitočtovém spektru fázového proudu v okolí 13kHz. Čím jsou způsobeny a nemají žádný vliv na mechanické a zvukové projevy motoru?
- Ladění parametrů FCS-MPC je prováděno pro určitý napájecí kmitočet motoru. Je možno uvedený postup prakticky uplatnit pro širší rozsah kmitočtů (otáček) motoru?
- Je možno při uvedeném postupu očekávat praktickou stabilitu řízení? Zaznamenal jste nějaké projevy nestability a pokud ano, jak jste se s tím vyrovnal?
- Práce se zakládá na určitých relacích mezi proudy motoru a elektromagnetickým hlu-
kem. Bylo by možno očekávat, že také při alternativní optimalizaci jiných důležitých
veličin motoru (například pulzačních momentů) by se jako doprovodný efekt projevilo
významné snížení hluku?
- Zabýval jste se dopadem navržených a porovnávaných variant na ztráty v motoru?
- V seznamu referencí neuvádíte žádné odkazy na cizí práce zabývající se problemati-
kou řešenou v disertační práci? Jaký je pro to důvod?

Závěr

Předkládaná doktorská disertační práce Ing. Michala Kroneisla je věnována velmi aktuální problematice, splnila zadané cíle a přináší řadu nových vědeckých poznatků, velmi aktuálních i z hlediska jejich praktického uplatnění. Formálně byla zpracována na vysoké úrovni a její základní části již byly publikovány v prestižním časopise i na konferencích. Domnívám se, že práce splňuje požadavky kladené na úroveň doktorských disertačních prací podle §47 zákona 111/1998 Sb., a **doporučuji** ji tudíž k obhajobě a po jejím úspěšném obhájení udělení uchazeči titul PhD.

V Praze 13. 7. 2021



prof. Ing. Viktor Valouch, CSc.