

# POSUDEK OPONENTA DISERTAČNÍ PRÁCE

Assessment of the Dissertation

Titul, jméno a příjmení studenta:

Title, name, surname of student

Ing. Bedřich Bednář

Doktorský studijní program:

Doctoral study programme

Elektrotechnika a informatika

Studijní obor:

Study branch

Elektronika

Téma disertační práce:

Topic of the dissertation

Modulární koncepce trakčního pohonu se vstupním vysokonapětovým měničem a středofrekvenčním transformátorem

Školitel:

Supervisor

doc.Ing.Pavel Drábek, PhD

Oponent:

Opponent

prof.Ing.Petr Chlebiš, CSc.

## Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Evaluation of the importance of the dissertation for the field

Řešení nových trakčních výstrojí zejména vícesystémových hnacích vozidel závislé trakce je v současnosti jeden ze základních úkolů spojených se zvyšováním dopravní kapacity železniční dopravy. Řešení této problematiky je vynuceno zejména omezeným maximálním nápravovým tlakem hnacích vozidel. Další zvyšování trakčního výkonu hnacích vícesystémových vozidel, částečně i vozidel se střídavým napájením je omezeno zejména hmotností trakčního transformátoru. Problematika je velice složitá, neboť pracujeme se systémy velkých výkonů nejméně na úrovni napájecí troleje 15 kV nebo 25 kV. V disertační práci zpracovávané téma uvedenou problematiku řeší pomocí modulární struktury měničů s přenosem výkonu středofrekvenčním transformátorem. Tato koncepce není zcela nová, teprve nyní však nachází reálné možnosti využití zejména díky pokroku v oboru výkonových polovodičových spínacích součástek a zejména značnému zvýšení výkonnosti řídicích systémů použitelných pro řízení měničů i celých pohonů v trakci.

Vzhledem k tomu, že disertační práce je pojata jako modelové řešení se závěrečným ověřením na fyzikálním modelu malého výkonu, poskytuje řadu velmi cenných informací z řešení dané problematiky, které mají značnou důležitost pro další pokrok pro v soustavách trakčních měničů. Proto je její význam pro obor návrhu nových generací trakčních polovodičových měničů nezpochybnitelný.

## 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

Těžiště disertační práce spočívá ve vývoji metod pro řízení velice pokrokové struktury modulového měniče s maticovým měničem a středofrekvenčním transformátorem. V tomto směru práce využívá ověřený postup řešení složitých úloh VaV. V úvodu je provedeno shrnutí současného stavu poznatků k dané problematice, dále je vybráno perspektivní řešení, následně je řešení podrobena teoretické analýze s definováním problémových partií a návrhem řešení. Samotná řešení jsou potom v několika verzích ověřena simulací a následně ověřena na realizovaném fyzikálním vzorku malého výkonu. Tuto metodologickou strukturu práce definují podrobněji Cíle práce v kap. 3 na str. 9 a definicí struktury na str.10.

Na základě prostudování disertační práce mohou potvrdit, že tyto vytýčené cíle byly beze zbytku 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 svým obsahem řeší řadu dílčích problémů modulární topologie koncepce s maticovým měničem a středofrekvenčním kondenzátorem. Dílčích problémů, které práce řeší je celá řada. Za zmínku stojí např. vývoj řízení vstupního maticového měniče a ošetření komutačních stavů v oblasti malých napětí a proudů, vývoj algoritmů pro balancování napětí vstupních kondenzátorů, vývoj řídicích algoritmů pulzního usměrňovače a řada dalších drobných problémů. Pro všechny tyto modely byly zpracovány jak numerické modely, tak algoritmy běžící na řídicím systému se signálovým procesorem spolupracujícím s FPGA. Je nutné si uvědomit, že složitost algoritmů prudce narůstá s počtem spínacích součástek při modulárních koncepcích měničů. V tomto směru by bylo možné najít řadu nových dílčích poznatků, které jsou v práci vyřešeny. Jsou v práci uvedeny na str. 90.

Domnívám se však, že zásadním přínosem předkladatele disertační práce je potvrzení skutečnosti, že řešená koncepce modulárního měniče s maticovým měničem a středofrekvenčním transformátorem je z pohledu řízení realizovatelná a při respektování podmínek vysokého napětí střídavé trakční troleje a při aplikaci vhodného středofrekvenčního transformátoru je také pro velké výkony použitelná.

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

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

Tak, jako je velmi logická myšlenková struktura práce, je logická i formální struktura práce. Práce nezabíhá do zbytečných detailů, řeší podstatné problémy a jejich řešení srozumitelnou formou prezentuje. V tomto směru je práce velice čtivá a přehledná, a to i přesto, že řeší poměrně složité problémy. Zásadní výtky nemám ani k formální úpravě a jazykové stránce. V dalších prezentacích výsledků disertační práce bych doporučoval zvětšení průběhů z osciloskopů, nebo jiný způsob prezentace volby konstant PI regulátoru na obr. 6.25 a 6.26. Obecně by asi bylo vhodné, kdyby doktorand věnoval více pozornosti čitelnosti schémat. V práci jsem našel zanedbatelné minimum jazykových a gramatických chyb vyjma seznamu publikační činnosti a ostatních výstupů. V těchto seznamech pro mne zcela nevysvětlitelně chybí velké množství diakritických znamének. Toto však nepovažuji za závažnou chybu. Celkově po formální a jazykové stránce práci považuji za velice zdařilou.

### Vyjádření k publikacím studenta

Statement to student's publications

Seznam publikační činnosti doktoranda uvedený od str. 93 do str. 99 obsahuje celkem 56 položek. Ze struktury autorských týmů je zřejmé, že student velice dobře uchopil principy týmové práce. Je na škodu věci, že seznam publikačních výstupů není strukturován podle vědeckého významu jednotlivých položek ve smyslu Článku 2, bod (3) Směrnice děkana č.2D O uskutečňování doktorského studijního programu.

Je zřejmé, že publikační činnost doktoranda svým rozsahem několikanásobně překračuje obvyklý průměr, přičemž problematika tématu disertační práce je publikována v dostatečném rozsahu.

### Celkové zhodnocení a otázky k obhajobě

Total evaluation and questions for defence

V rámci obhajoby si dovoluji požádat disertanta o vyjádření následujícími dotazům.

1. Na str. 11 uvádíte že: "jednotlivá buňka se izoluje na provozní napětí buňky, nikoliv na napětí troleje např. 25 kV" Vysvětlete prosím pojem „provozní napětí buňky“ a odůvodněte svoje tvrzení. Jak ovlivní izolační chování celé soustavy způsob, nebo

stav izolace, příp. uzemění kostry napájeného motoru M ve schématu na Obr 3.1 na str. 10.

2. Na str. 65 uvádíte, že u reálného měniče se trolejovým napětím 25 kV by bylo nutné řídit celkem 168 tranzistorů. Je reálné, aby u takto složité soustavy byla dosažena potřebná spolehlivost a dostatečná úroveň v oblasti EMC?
3. Které výstupy publikační činnosti považujete za vědecky nejvýznamnější?

Vzhledem k vysoké odborné úrovni tematicky velmi cenné disertační práce, přínosu práce pro obor, prokázání vysoké úrovně zvládnutí výzkumných a vývojových metod a vynikající publikační činnosti disertační práci Ing. Bedřicha Bednáře s názvem „Modulární koncepce trakčního pohonu se vstupním vysokonapětovým měničem a středofrekvenčním transformátorem“ doporučuji k obhajobě a v souladu se zákonem č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a ustanoveními Studijního a zkušebního řádu ZČU a po úspěšné obhajobě doporučuji udělit titul PhD.

Doporučuji disertační práci k obhajobě

I recommend the dissertation for the defence

ANO yes	x	ne no
------------	---	----------

Datum

Date

29.1.2020

Podpis oponenta:

Signature of opponent



## Oponentní posudek doktorské disertační práce

Autor: **Ing. Bedřich Bednář**  
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky  
Fakulta elektrotechnická  
Západočeská univerzita v Plzni  
306 14 Plzeň, Univerzitní 8

Téma: **Modulární koncepce trakčního pohonu  
se vstupním vysokonapětovým měničem  
a středofrekvenčním transformátorem**

Oponent: **Prof. Ing. Jiří Lettl, CSc.**  
Katedra elektrických pohonů a trakce  
Fakulta elektrotechnická  
České vysoké učení technické v Praze  
166 27 Praha 6, Technická 2  
Tel.: +420 224 352 147, e-mail: lettl@fel.cvut.cz

Doktorská disertační práce Ing. Bedřicha Bednáře se zabývá řešením teoreticky velice zajímavé a z praktického hlediska perspektivní modulární koncepce trakčního měniče se středofrekvenčním transformátorem využívající maticových měničů a napětových usměrňovačů s šířkově pulzní modulací, zaměřeným zejména na návrh a verifikaci řídicích algoritmů.

### 1. Význam disertační práce pro obor

Ing. Bedřich Bednář ve své disertační práci popisuje návrh topologie a řídicích algoritmů modulární koncepce trakčního pohonu. Těžištěm návrhu je modulární trakční měnič se středofrekvenčním transformátorem napájeným z jednofázového maticového měniče a s aktivním napětovým usměrňovačem na sekundární straně. Použití středofrekvenčního transformátoru oproti klasickému nízkofrekvenčnímu trakčnímu transformátoru umožní významné snížení hmotnosti trakčního transformátoru a tím i výraznou redukci hmotnosti celého vozidla, neboť při dnes obvyklých 50 Hz (nebo dokonce 16,7 Hz) představuje nízkofrekvenční trakční transformátor výrazný podíl na celkové hmotnosti. To je v současné Evropě důležité zejména u nejvýkonnějších vícesystémových lokomotiv (např. o výkonu 6,4 MW, které jsou omezeny maximální hmotností 4 x 22,5 t), neboť limitující faktorem je maximální nápravový tlak. Navrhovaná koncepce předpokládá modulární uspořádání několika identických buněk složených z kondenzátoru vstupního filtru, vysokonapětového jednofázového maticového měniče, středofrekvenčního transformátoru a pulzního napětového usměrňovače. Pro jednotlivé části trakčního měniče jsou navrženy, implementovány a ověřeny vhodné řídicí algoritmy. Provedené simulace a měření na realizovaném laboratorním vzorku potvrdily funkčnost a použitelnost navržené topologie měniče i strategie jeho řízení.

## 2. Stanovené cíle a jejich splnění, postup řešení, použité metody

Vytyčené základní cíle jsou přehledně shrnuty v desíti bodech na str. 9 disertační práce. Zahrnují návrh modulární topologie trakčního měniče se středofrekvenčním transformátorem, návrh algoritmů pro balancování napětí kondenzátorů vstupního filtru, pro kombinovaný výběr komutace maticového měniče, pro řízení maticového měniče s optimalizací spínací frekvence a pro řízení pulzních napěťových usměrňovačů, jakož i sestavení matematického modelu pro simulaci pohonu, vytvoření fyzikálního modelu v laboratoři, implementaci algoritmů řízení do DSP a algoritmů spínacích sekvencí do FPGA, propojení řízení procesorů DSP a FPGA. Řešení stanovených dílčích cílů je obsahem jednotlivých kapitol. Jejich náplní je navrhovaná topologie trakčního měniče se separátními středofrekvenčními transformátory (kap. 4), zapojení, spínací kombinace, komutace (dle polarity vstupního napětí, dle polarity výstupního proudu, kombinace předchozích) a optimalizace spínací frekvence maticového měniče (kap. 5), spínací stavy, metody řízení (dvouhodnotová regulace, přímé řízení proudu při použití PWM a jejich porovnání) pulzního usměrňovače včetně balancování napětí kondenzátorů vstupního filtru (kap. 6), implementace řídicích algoritmů do DSP a FPGA včetně testování (kap. 7), experimentální ověření činnosti měniče s jednou a se dvěma buňkami v ustálených a dynamických stavech i popis prostředků pro realizaci experimentů (kap. 8).

Z celkových 108 stránek textu představuje 72 % (78 stránek, kapitoly 5 až 8) vlastní podíl autora, věnovaný návrhu nové modulární topologie trakčního pohonu se středofrekvenčním transformátorem, návrhu, implementaci a experimentálnímu ověření funkce algoritmů balancování napětí kondenzátorů vstupního filtru, komutace a řízení s optimalizací spínací frekvence maticového měniče s ohledem na syčení magnetického obvodu středofrekvenčního transformátoru i řízení pulzních usměrňovačů. Pečlivě provedený rozbor a návrh řídicích algoritmů jednotlivých částí modulární topologie trakčního měniče a zejména graficky doložené výsledky experimentálního ověření jejich funkce přesvědčivě dokazují, že stanovené cíle byly v plném rozsahu splněny.

Použité metody zpracování zahrnují analýzu současného stavu poznání ve zkoumané problematice včetně uvedení variant topologií trakčního měniče se středofrekvenčním transformátorem, charakterizaci jednotlivých částí zvolené modulární koncepce trakčního pohonu, pečlivý matematický rozbor, výběr a návrh řídicích strategií, jejich ověření simulací na sestaveném matematickém modelu, vytvoření a implementaci sestavených řídicích algoritmů do DSP a FPGA, jejich testování a experimentální ověření na realizovaném laboratorním modelu. Celkově lze prohlásit, že oprávněnost použitých postupů a prostředků jasně prokázaly výsledky experimentů na realizovaném laboratorním vzorku pohonu.

Disertant by měl blíže uvést, vysvětlit či zhodnotit:

- způsob realizace kombinovaného algoritmu komutace a chování systému v oblasti nízkého vstupního napětí i nízkého výstupního proudu maticového měniče a spínací sekvence během přechodů mezi jednotlivými typy komutace, případně včetně porovnání s robustnější komutací vícekrokovou,
- porovnání metod řízení pulzního napěťového usměrňovače z hlediska vlivu na správnou funkci kolejových obvodů zabezpečovacího zařízení,

- účinnost přirozeného balancování napětí na kondenzátorech vstupních filtrů maticových měničů v případě většího počtu (více než 2) primárních vinutí středofrekvenčního transformátoru se sdíleným magnetickým obvodem, míra složitosti řídicích obvodů v případě kompletního provedení modulárního (modulů více než 2) a tudíž nutnosti balancování aktivního,
- zvlnění výstupního napětí pulzního napěťového usměrňovače a tedy vstupního napětí napěťového střídače pro střídavý trakční motor,
- vliv řízení maticového měniče na řízení fázového posunu základních harmonických trolejového proudu a napětí,
- rozdělení potřebného výpočetního výkonu mezi DSP a FPGA.

### 3. Výsledky a původní konkrétní přínos disertační práce

Kromě důsledně a precizně provedeného matematického rozboru a odvozených řídicích strategií potvrzuje kvalitu doktorské disertační práce zejména množství graficky doložených výsledků experimentálního ověření funkčnosti realizovaných laboratorních vzorků (viz časové průběhy veličin na obr. 8.3 až obr. 8.22 uvedené na str. 73 až str. 82). Za původní konkrétní teoretický i praktický přínos disertace lze považovat ucelený návrh nové perspektivní koncepce modulární topologie trakčního měniče se středofrekvenčním transformátorem umožňující podstatné snížení hmotnosti trakční výzbroje především u moderních vozidel s velkým instalovaným výkonem. Navrhovaná koncepce využívá modulárního uspořádání více identických buněk sestávajících z kondenzátoru vstupního filtru, vysokonapěťového jednofázového maticového měniče, středofrekvenčního transformátoru a pulzního napěťového usměrňovače. Výsledky experimentálního ověření funkčnosti realizovaných funkčních vzorků představují významný přínos práce, neboť poskytují detailní praktický pohled na řešenou problematiku i chování systému v ustálených i dynamických stavech a prokazují životaschopnost navržené varianty silového obvodu včetně navržených řídicích algoritmů.

### 4. Systematicčnost, přehlednost, formální úprava a jazyková úroveň

Kromě obsahu, úvodu (kap. 1), analýzy současného stavu poznání trakčních pohonů (kap. 2), cílů práce (kap. 3), závěru (kap. 9) s uvedením hlavních přínosů práce a perspektivních směrů dalšího zkoumání, seznamu použité literatury, seznamu publikací a výstupů studenta, seznamu obrázků, seznamu symbolů a zkratk, jakož i dvou příloh, je práce rozdělena do pěti částí (kap. 4 až kap. 8), které jsou dále logicky členěny do dvou podúrovní vždy několika podkapitol. Práce je zpracována velice pečlivě a systematicky, má přehlednou skladbu i ucelený charakter. Autor vhodně a často uvádí odkazy na použitou literaturu, a proto se čtenář neutápí ve zbytečných podrobnostech. K přehlednosti práce rovněž přispívá zařazení seznamu použitých symbolů a zkratk. Jednotlivé kapitoly obsahují srozumitelné shrnutí dílčích závěrů, poctivý a odpovědný přístup k realizaci úkolu dokazuje i vysoká grafická úroveň zpracování práce. Některé chyby formální a stylistické nemají závažný charakter, nenalezl jsem nesrovnalosti terminologické. V práci je více nepodstatných překlepů (např. str. 7, nedokončená věta v 6. až 8. řádce zdola; str. 8, opakování slova byl v 8. až 9. řádce zdola; str. 32, poslední řádek, vynechání písmene n ve slově kladnou, atd.), které bylo možno omezit pozornější korekturou čistopisu.

## 5. Publikované práce

Seznam autorových publikací zařazený na str. 93 až 99 doktorské disertační práce zahrnuje celkem 55 položek zveřejněných vědeckých a odborných prací, z toho se 28 prací vztahuje k tématu disertační práce a 27 jsou ostatní publikace a výstupy studenta. Prvá část obsahuje 4 články v zahraničních časopisech, 2 články tuzemské, 11 příspěvků prezentovaných na mezinárodních konferencích, 6 příspěvků ve sborníku tuzemské konference Elektrické pohony, 4 výzkumné zprávy a 1 funkční vzorek. V databázi Web of Science pro vyhledávání aktuálních vědeckých informací jsem k dnešnímu datu našel 15 položek z uvedeného celkového přehledu publikovaných prací, kde je doktorand autorem nebo spoluautorem, z toho 3 články v časopisech a 12 příspěvků ve sbornících mezinárodních konferencí. Publikační aktivitu autora lze dle mého názoru považovat v daném oboru za nadprůměrnou a je zřejmé, že jádro disertační práce bylo publikováno v dostatečné míře a na přiměřené úrovni.

## 6. Závěr

Doktorand Ing. Bedřich Bednář splnil v plném rozsahu stanovené cíle doktorské disertační práce a prokázal schopnost samostatné vědecké práce. Téma disertační práce odpovídá doktorskému studijnímu oboru Elektronika, je vysoce aktuální a perspektivní, má konkrétní praktický význam. Disertace obsahuje původní vědecké poznatky, formálně je zpracována na vysoké úrovni, její jádro bylo dostatečně publikováno. Předložené dílo dle mého názoru splňuje obecně uznávané požadavky kladené na úroveň doktorských disertačních prací v souladu se zákonem č. 111/1998 Sb. o vysokých školách, a proto doktorskou disertační práci

**d o p o r u č u j i k o b h a j o b ě .**

V Praze dne 20. prosince 2019



Prof. Ing. Jiří Lettl, CSc.

## Oponentní posudek disertační práce

Autor posudku: Doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.

Název práce: *Modulární koncepce trakčního pohonu se vstupním vysokonapětovým měničem a středofrekvenčním transformátorem*

Autor práce: *Ing. Bedřich Bednář*

Disertační práce je věnována výzkumu a vývoji v oblasti trakčních pohonů s napájením ze střídavé soustavy (25 kV / 50 Hz nebo 15 kV / 16,7 Hz). Hlavní myšlenkou, kolem níž je soustředěn výzkum popisovaný v práci, je náhrada těžkého nízkofrekvenčního transformátoru lehčím a levnějším transformátorem středofrekvenčním (s pracovním kmitočtem alespoň 400 Hz). Úspora hmotnosti transformátoru je významným konstrukčním přínosem pro elektrické lokomotivy velkých výkonů.

Koncepce se středofrekvenčním transformátorem se již objevují v praxi, v současnosti nejčastěji s použitím tzv. nepřímého měniče kmitočtu. Ten sestává z aktivního usměrňovače (napětového pulzního usměrňovače) a následného střídače, který napájí transformátor napětím o vyšší frekvenci.

Autor se v práci pokusil o odvážné řešení – nahradit nepřímý měnič kmitočtu přímým maticovým měničem. To ovšem z praktického hlediska přináší obrovské komplikace, jak bude dále diskutováno. Dále autor řešil aktivní usměrňovač napájený ze sekundárního vinutí středofrekvenčního transformátoru. Ten slouží pro vytvoření stejnosměrného meziobvodu pro následný trakční měnič. Věnoval se také problematice použitelnosti potřebně velkého vstupního napětí – dosaženo sériovým řazením více vstupů více dílčích maticových měničů. V té souvislosti řešil i problematiku rovnoměrné distribuce napětí na jednotlivé měniče.

### *1) Význam disertační práce pro obor, konkrétní přínos autora*

Téma práce je velice aktuální. Autor provedl velké množství teoretických výpočtů, simulací spínacích algoritmů a také realizoval malovýkonové funkční vzorky celé soustavy (střídavé napájení – maticový měnič – středofrekvenční transformátor – aktivní usměrňovač – zátěž na ss výstupu) se sofistikovaným řízením (DSP + FPGA). Následně na tomto zařízení experimentálně ověřil navržené a nasimulované řídicí struktury. Z tohoto hlediska velmi oceňuji pozoruhodný objem prací, které autor vykonal. Svědčí to o jeho kvalitách.

Nicméně z výsledků práce je patrné, že navrhovaná koncepce nevykazuje uspokojivé výsledky pro praktické nasazení. Hlavní potíží tkví v rizicích napětových překmitů při vypínání prvků maticového měniče v případě nevhodné komutace, jíž se v zaručeném prostředí sotva bude možné vyhnout. Oscilogramy uvedené v práci toto bohužel potvrzují (viz níže).

**Nesnižuji tím nijak význam cenné práce, kterou autor odvedl a které se vážím. Ale vyjadřuji silnou pochybnost o praktické použitelnosti řešené koncepce.**

### *2) Postup řešení, metody, splnění cílů, výsledky práce*

**Cíle práce byly jasně formulovány a výsledky jasně dokumentují, že byly také splněny.** To jistě svědčí o efektivním postupu autora s použitím adekvátních metod.

Zásadnější připomínku mám skutečně pouze ke kontroverznímu nápadu použít přímý maticový měnič. Dokladem přetrvávajících problémů s překmity při vypínání prvků maticového měniče jsou výsledné oscilogramy realizovaných vzorků. Např. na Obr. 8.13 jsou překmity vysoké občas skoro 300 V, přičemž amplituda vstupního střídavého napětí je necelých 30 V. Podobný vážný problém je



vidět téměř ve všech pořízených oscilogramech výstupního napětí maticového měniče. Ve schématu na Obr. 8.24 je vidět, že autor s tímto asi velmi bojoval a musel použít i ochranné transily. To bylo možné v relativně malovýkonových funkčních vzorcích, ale ve výkonové verzi by to samozřejmě neobstálo.

Mimo to, i kdyby se toto nějak podařilo odstranit, přetrvává problém s malou robustností takového řešení. Např. riziko destrukce napěťovým průrazem při vypnutí všech prvků maticového měniče (např. zásah saturační ochrany) při výstupní indukčnosti pod proudem. Zde patrně nebude možné použít nějakou ochrannou nulovou diodu, jak by tomu bylo u měniče s proudovým meziobvodem...

Dále i tvar odebíraného proudu z troleje je horší než u normálního aktivního usměrňovače (v nepřímém měniči kmitočtu). Tam by bylo proud kvazisinusový s malým trojúhelníkovým zvlněním. Zde vykazuje silné jehlové propady, jak dokládají všechny simulace i oscilogramy.

Dále mám už jen některé drobné připomínky:

- Na Obr. 5.1 je zapojení uvažovaného maticového měniče (AC/AC) s tranzistorem IGBT. V následném popisu spínacích kombinací na Obr. 5.3 a Obr. 5.6 se však najednou objevují ve schématu místo tranzistorů tyristory, přestože se tu mluví o rizicích možného vypnutí pod proudem indukčností, což u tyristoru ani nejde. To je pro čtenáře matoucí.
- Veličina  $\psi$  na str. 23 není magnetický tok skutečný, ale spřažený.
- Podmínka uvedená na str. 34 – „výstupní ss napětí napěťového pulzního usměrňovače je vyšší než napětí na vstupních svorkách“ musí být splněna z principu vždy, nikoliv jen ve stavu „-1“, jak je v práci naznačeno. Jinak by došlo k havárii nulových diod.
- U Obr. 6.15 na str. 43 je chybný popis – nejde o maticový měnič, ale napěťový pulzní usměrňovač.
- Na str. 42 nahoře se mluví o nedostatečné indukčnosti transformátoru, myšlena je ale indukčnost rozptylová.

Naopak velmi oceňuji úvahy a jejich matematické rozpracování v kap. 5.4 – metoda optimálních přepínacích úhlů (nekonstantní spínací perioda) pro dosažení konstantního zdvihu syčení transformátoru, přestože nakonec ve finální simulaci a v experimentu nebyla použita. Líbí se mi, že autor zde nakonec prozkoumal spektrum proudu odebíraného z troleje a vzal s citem pro praktičnost v úvahu, že optimalizované spínání maticového měniče, jakož i hysterezní řízení NPU místo komparačního PWM by bylo z hlediska EMC nedobré.

Rovněž bych chtěl velmi ocenit práci se simulacemi a samotnou realizací.

### 3) Formální hodnocení

Práce je psána poměrně čtivě, je patrné, že autor si umí sestavit pořadí myšlenek, aby byl popis výstižný. Přesto se občas nevyvaroval jazykových chyb - např. slovo „protože“ místo „proto“ na straně 23 nebo „vynutí“ místo „vinutí“ v tab. 3 na str. 49.

Průběhy v Obr. 6.25 a Obr. 6.26 jsou velmi zhuštěné a malé popisky v nich špatně čitelné.

### 4) Vyjádření k publikacím doktoranda

Doktorand je autorem nebo spoluautorem mnoha relevantních publikací a je tedy zcela zřejmé, že jádro práce bylo dostatečně publikováno.

### 5) Závěr posudku

Uvedené nedostatky jsou drobné, práci naopak opravdu oceňuji. Hlavní výtka směřovaná k samotné koncepci s přímým maticovým měničem budiž vnímána přátelsky – spíše k odborné diskusi, není nijak namířena proti autorovi práce.

**Disertační práci doporučuji k obhajobě. Chtěl bych požádat autora, aby zodpověděl následující otázky.**

*Otázky k obhajobě:*

- 1) V kap. 6.4 se hovoří o balancování vstupních kondenzátorů. Je aktivní balancování opravdu prakticky nutné, když i bez něj bylo dosaženo poměrně přijatelné symetrie (díky paralelnímu spojení výstupů, což pasivně také vytváří vyrovnávací zápornou zpětnou vazbu)? Dokládají to nakonec i Obr. 8.21 a Obr. 8.22...
- 2) Přemýšlel jste o nějaké možnosti eliminace problémů s překmity na výstupním napětí maticového měniče, o kterých je psáno výše?
- 3) Jakou perspektivu dáváte přímému maticovému měniči v dané aplikaci po konfrontaci se všemi potížemi?

V Brně, dne 6.1.2020



Doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.