



# POSUDEK OPONENTA DISERTAČNÍ PRÁCE

Assessment of the Dissertation

Titul, jméno a příjmení studenta:

Title, name, surname of student

Ing. Martin Votava

Doktorský studijní program:

Doctoral study programme

Elektrotechnika a informatika

Studijní obor:

Study branch

Téma disertační práce:

Topic of the dissertation

Regulační algoritmy pro optimalizaci  
maximálního výkonu duálního měniče

Školitel:

Supervisor

Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.

Oponent:

Opponent

Ing. Pavel Cejnar, Ph.D.

## Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Evaluation of the importance of the dissertation for the field

Zlepšování účinnosti nejen v oblasti elektrických pohonů má velkou důležitost, a to především s ohledem na rozšiřující se bateriové aplikace, kdy vyšší účinnost znamená logicky delší dobu práce zařízení, v případě vozidel i dojezd. Práce obhájí teoreticky i prakticky cesty ke zlepšení účinnosti elektronického výkonového měniče určeného pro napájení pohonu při zachování činitele obsahu vyšších harmonických, což je správně také sledováno- nelze tedy předpokládat zhoršenou účinnost elektrického stroje.

Téma je proto velmi významné, stejně tak jako jeho zpracování.

## 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

Práce teoreticky (velmi podrobně) i prakticky zpracovává popis a porovnání modulačních technik elektrického pohonu v duálním zapojení. Členění kapitol logicky navazuje, výsledky jsou srozumitelně popsány.

Student teoreticky zpracovává teplotní model pro výkonovou elektroniku včetně kalibrace modelu pro konkrétní řešení, což je zřejmě správný postup.

Řízení s exponenciálním filtrem za účelem vyrovnání spínací frekvence a tím i ztrát jednotlivých prvků výkonové elektroniky, včetně modelové ochrany proti přetížení elektroniky měniče, je prakticky velice přínosné. Porovnání modulačních technik v teoretických i praktických výsledcích dává čtenáři představu, jakou cestu v modulačních technikách zvolit, lze hovořit o společenském přínosu práce pro technickou obec.

## 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

Snížení ztrát duálního měniče až o 20% při zachování stejného výkonu je prakticky velmi významné.

Ačkoliv primárním cílem práce bylo zlepšení účinnosti elektrického pohonu (resp. dle názvu související optimalizace maximálního výkonu), a cíl byl také splněn, uvítal bych také kapitulu o vlivu zavedených řízení do frekvenčního spektra pohonu- při tomto zpracování se toto nabízí. Může to být tématem pro další analýzu.

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

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

Práce teoreticky (velmi podrobně) i prakticky zpracovává popis a porovnání modulačních technik elektrického pohonu v duálním zapojení. Členění kapitol logicky navazuje, výsledky jsou srozumitelně popsány. Kapitola VI vyčerpávajícím způsobem popisuje způsoby modulací a cestu k optimalizaci ztrát, to však není myšleno v negativním smyslu- je zřejmé, že studentovi šlo o názornost pro lepší pochopení čtenáře, proto hodnotím tento popis velice kladně.

### Vyjádření k publikacím studenta

Statement to student's publications

Autor v práci uvádí 35 publikací, na kterých se podílel- to považuji za rozhodně dostatečné a nemám námitek.

### Celkové zhodnocení a otázky k obhajobě

Total evaluation and questions for defence

V práci se objevují formální chyby nebo nedostatky: opakování stejných obrázků, viz Obr. 8 a 126, 1 a 5- Obr.5 navíc vůbec nesouvisí s popisem na str.30. U většiny rovnic úplně chybí jednotky veličin (především kap. 5 při vyjadřování ztrát a teplotních modelů), nejsou ani uvedeny v seznamu zkratk. Přestože takováto práce jistě předpokládá erudici čtenáře, považuji to za podstatný nedostatek.

Otázky:

- 1) Zapojení duálního měniče v případě obnovitelných zdrojů, str.16 dole: je potřeba transformátor? Pokud budou obvody galvanicky propojeny, jaký je dopad do izolačního návrhu systému?
- 2) Str. 17: „...dodávána energie poze z jednoho měniče... díky tomu... generátor má lepší účinnost...“. Jenon generátor?
- 3) Kap. 2.2 jmenuje možnost hysterezního řízení- lze použít bez obav/opatření pro elektrické pohony?
- 4) Kap. 2.3, II. odstavec: ve výčtu, na čem závisí spínací ztráty, chybí velmi významný parametr.
- 5) Můžete vysvětlit poznámku v kap. 2.5.: „kvůli vyvážení ztrát byla navýšena spínací frekvence tranzistorů“?
- 6) 5.3- řídicí ztráty v polovodiči: jaký význam mají v použitém IGBT modulu?
- 7) 5.7 – pro moduly stejného typu „...očekávány téměř identické vlastnosti...“- lze se na toto tvrzení spolehnout?
- 8) 5.7.1 – práce neuvádí schématem ani popisem, co představuje hodnotu  $I_m=0.9A$ , je zde pouze odkaz na Obr.7, jehož vertikální osa je bezrozměrná. Lze prosím vysvětlit?
- 9) Proč byl pro účet této práce zvolen IGBT transistor s  $U_{rrm}=6.5kV$  a tomu odpovídající systémové napětí?

Doporučuji disertační práci k obhajobě

I recommend the dissertation for the defence

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

Datum  
Date

22.10.2021

Podpis oponenta:

Signature of opponent

2

## Posudek disertační práce

Autor: **Ing. Martin Votava**  
Téma: **Regulační algoritmy pro optimalizaci maximálního výkonu duálního měniče**  
Oponent: **doc. Ing. Martin Kuchař, Ph.D.**  
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. Martina Votavy se zabývá problematikou analýzy a návrhu řídicích algoritmů pro kaskádní zapojení dvou dvouúrovňových měničů, tzv. duální měnič. Ten oproti známým topologiím víceúrovňových měničů nevyžaduje žádné další pasivní ani polovodičové součástky a využívá otevřené vinutí zátěže. Navíc není potřeba balancovat napětí v meziobvodu. Tyto výhodné vlastnosti ho řadí mezi perspektivní topologie výkonových polovodičových měničů s využitím v oblasti moderní energetiky zahrnující obnovitelné zdroje energie a rovněž v oblasti elektrických regulovaných pohonů pro různé typy dopravy, jako jsou lodě, elektrická vozidla apod. Navíc řada v práci navržených řešení využívá moderní prediktivní řízení s matematickým modelem pro současnou optimalizaci více sledovaných parametrů za účelem dosažení vysoké výkonové hustoty použitého měniče. Zmíněná výzkumná témata této disertační práce tedy považují za velice aktuální a zásadní, což dokládají i publikace v prestižních odborných časopisech uvedené v práci v seznamu použité literatury.

### 2. Přínos disertační práce pro rozvoj vědního oboru

#### **a) Cíle disertace a jejich splnění**

Ing. Martin Votava řešil v rámci své disertační práce náročný úkol spojený s návrhem metod řízení duálního měniče. V úvodu práce prezentoval současný stav poznání ve zkoumané problematice. Následuje popis matematického modelu duálního měniče se zátěží s otevřeným vinutím z pohledu napěťových, proudových a tepelných poměrů. Stěžejní část práce je obsažena v kapitolách 6, 7 a 8. Nejprve jsou rozebrány algoritmy řízení založené na PWM, které autor modifikoval za účelem vyrovnání ztrát mezi jednotlivými spínacími prvky a ochrany spínacích prvků před přetížením. Jedná se o modifikace subhexagonální PWM s variabilní spínací sekvencí, s redukovanou spínací sekvencí, s rotujícími nosnými signály a s nespojitým referenčním signálem. Autor dále navrhl řešení využívající vektorovou PWM a subhexagonální PWM spolu s prediktivním řízením s konečným počtem akčních zásahů. V kapitole 7 jsou pak prezentovány metody řízení výstupního proudu duálního měniče. V závěru práce pak autor rozebírá velmi perspektivní metodu prediktivního řízení využívající tepelný model měniče s ohledem na ochranu polovodičových prvků proti přetížení. Všechny prezentované metody

řízení jsou ověřeny rozsáhlými simulacemi a následně implementovány do řídicího systému s digitálním signálovým kontrolérem TMS320F28335 a FPGA Cyclon III. Následně byly získány experimentální výsledky na realizovaném laboratorním prototypu duálního měniče. V práci je prezentováno tolik řešení a výsledků, že svým rozsahem, podle mého názoru, překračuje standardní úroveň disertačních prací, což dokládá i celkový počet 222 stran.

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

Ing. Martin Votava stanovené cíle disertační práce jednoznačně splnil.

#### **b) Výsledky disertace a nové poznatky**

Mezi nové poznatky patří především navržené algoritmy řízení duálního měniče s ohledem na vyrovnání ztrát mezi jednotlivými spínacími prvky a ochranu spínacích prvků před přetížením. Další přínos k poznání přináší získané simulační a experimentální výsledky včetně podrobného srovnání všech zmíněných algoritmů.

### **3. Zpracování disertační práce**

#### **a) Zvolené metody zpracování**

Práce je logicky členěna, je srozumitelná a přehledná. Autor postupoval podle výzkumné linie teorie – simulace – experiment. Nejprve je uvedena nutná analýza problému a potřebné teoretické základy. Následuje rozbor stávajících a především nově navržených řešení včetně simulačních a experimentálních výsledků.

#### **b) Jazyková, terminologická a grafická úroveň práce**

Jazyková úroveň práce je na velmi dobré úrovni. Vzhledem k opravdu širokému rozsahu disertační práce lze nalézt jen velmi málo pravopisných chyb a překlepů. Drobnou připomínku mám k obrázku 13, kde uvedený vývojový diagram neodpovídá metodě CRPWM (chybné odkazy na vzorce a špatný popis). Dále je pak v rovnici (230) chybně uvedený index u vektoru proudu. Jinak je práce sepsaná velmi pečlivě a podrobně, popisky obrázků jsou kompletní a samonosné. Celkové zpracování práce je tedy na vysoké úrovni.

### **4. Přehled publikovaných prací**

Seznam autorových publikací vztahujících se k tématu disertační práce zahrnuje 1 článek v časopise kategorie Q2 a 16 příspěvků na mezinárodních a tuzemských konferencích, což je naprosto dostatečný počet pro seznámení odborné veřejnosti s jádrem této práce. Jedenáct z těchto publikací je navíc indexováno v databázi Scopus a Web of Science. Celkové shrnutí autorových publikačních výsledků v databázi Scopus: 11 dokumentů, 10 citací bez autocitací; v databázi Web of Science: 11 dokumentů, 7 citací bez autocitací. Ing. Martin Votava je i autorem šestnácti výzkumných zpráv a dvou funkčních vzorků. Publikační výsledky autora práce považují za zcela 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. Martina Votavy **doporučuji k obhajobě** před komisí pro obhajoby ve studijním programu "Elektrotechnika a informatika". Po úspěšné obhajobě této disertační práce doporučuji udělit Ing. Martinu Votavovi akademicko-vědecký titul "doktor", ve zkratce "Ph.D."

V Ostravě dne 4. 12. 2021



doc. Ing. Martin Kuchař, Ph.D.

### Dotazy k obhajobě disertační práce

1. Jaké je využití napětí meziobvodu pro prezentované metody řízení? Jaká je maximální možná hodnota amplitudy základní harmonické fázového napětí zátěže při hloubce modulace 1?
2. Pro všechny prezentované výsledky uvedené v práci byla použita RL zátěž. Nezkoušel autor i zátěž typu asynchronní motor, tak jak naznačuje v závěru práce? Jestli ano, v jaké konfiguraci a s jakými výsledky?
3. Práce se zaměřuje na algoritmy řízení duálního měniče s ohledem na možné zvýšení výkonové hustoty. Budou výsledky práce využity pro realizaci duálního měniče s velkou výkonovou hustotou? Jestli ano, jakou hodnotu předpokládáte dosáhnout?
4. Jakou hodnotu měl žádaný vektor proudu v simulačních a experimentálních výsledcích v rámci kapitol 7.6 a 7.7? Byl nastaven stejně i pro všechny metody na obr. 106?
5. Jaká SW platforma byla použita pro simulační ověření navržených algoritmů?

# Oponentský posudek doktorské disertační práce

Ing. Martina Votavy

## „Regulační algoritmy pro optimalizaci maximálního výkonu duálního měniče“

### Aktuálnost tématu a splnění cílů práce

Problematika optimalizace výkonových ztrát a jejich rozložení mezi jednotlivé prvky výkonových elektronických měničů je v posledních letech intenzivně studována a rozvíjena. Cestou k řešení je jak využití vhodných tepelných modelů měničů, tak hledání vhodných modifikací obvyklých algoritmů řízení a pulzně šířkových modulací měničů. Současně však rozvoj mikroelektroniky a tím podmíněná možnost užití sofistikovaných řídicích algoritmů měničů (například prediktivního řízení) otevírají nové možnosti pro řešení této problematiky.

Předkládaná disertační práce reaguje na tyto trendy a možnosti a představuje rozsáhlou ucelenou studii, vycházející jak z rozsáhlé literatury, tak i z vlastních autorových dosavadních prací. Práce se dotýká všech podstatných aspektů této problematiky, včetně problematiky měření a interpretace veličin a také potřebných podmínek pro realizaci vhodných algoritmů optimalizace maximálního výkonu duálního měniče.

Obsah a dosažené výsledky práce jsou v souladu s cíly deklarovanými v kapitole 3.

### Metodika a postup řešení

Doktorská disertační práce je psána v českém jazyce a má celkový rozsah 222 stran včetně všech doplňků a příloh.

Po úvodu v kapitole 1 je v kapitole 2 shrnut současný stav problematiky kaskádního spojení dvouúrovňových měničů, metod řízení i problematiky ztrát v měniči.

Po uvedení cílů práce v kapitole 3 je v následující kapitole 4 shrnuta použitá metodologie a stručné zaměření jednotlivých kapitol.

V kapitole 5 jsou představeny čtyři matematické modely měniče: napěťový, proudový, model ztrát a tepelný model.

V rozsáhlé kapitole 6 o rozsahu 103 stran je následně věnována pozornost detailnímu rozboru algoritmů řízení výstupního napětí měniče a jejich modifikaci pro lepší dělení ztrát mezi

jednotlivými prvky měniče. Je otázkou, zda tak detailní rozbor jsou pro náplň doktorské disertační práce skutečně nutné.

V kapitole 7 je prezentována strategie využití metod prediktivního řízení s konečnou množinou akčních zásahů k řízení proudu duálního měniče.

V obou kapitolách 6 a 7 jsou v jejich závěru uvedeny výsledky simulačních studií i experimentálních laboratorních testů.

V kapitole 8 jsou představeny možnosti volby ztrátových funkcí prediktivního řízení pro spínání měniče s cílem vyrovnávání teplot polovodičových prvků měniče a také omezování amplitud jeho proudu. I zde jsou v závěru kapitoly uvedeny výsledky simulačních studií i experimentálních laboratorních testů.

V závěrečné kapitole 9 autor shrnuje přínosy své práce a nastiňuje možnosti dalšího výzkumu v této oblasti.

Práce obsahuje 2 přílohy uvádějící katalogové listy polovodičových modulů.

#### Originální nové poznatky

Pomineme-li určitý integrující pohled na celou tuto interdisciplinární problematiku, představený v této práci, což lze rovněž považovat za originální přínos autora, lze za něj bezesporu považovat zejména návrhy řídicích algoritmů prediktivního řízení a výsledky simulačních i laboratorních experimentů a jejich interpretaci a zhodnocení uváděné v kapitolách 6, 7 a 8. Tyto poznatky jsou v souladu s aktuálním stavem poznání i výzkumnými aktivitami na významných univerzitních pracovištích ve světě a jejich publikací ve významných periodikách i na konferencích.

#### Formální a jazyková úprava práce

Disertační práce obsahuje veškeré formální náležitosti, uváděné se značnou precizností.

Práce se vymyká z obvyklých podob disertačních prací svým širokým záběrem i rozsahem, což přináší pro čtenáře jak pozitiva, tak i negativa.

Mezi pozitiva patří hlavně komplexní a zevrubný pohled na tuto problematiku v teoretické i praktické rovině. Po vhodných menších úpravách by na základě práce mohl podle mne vzniknout kvalitní výukový text pro studenty i doktorandy.

Jako přirozené negativum vyplývající z rozsahu práce vnímám určitou obtížnější čitelnost některých teoretických partií vzhledem k detailním popisům různých typů struktur a procedur (například variant pulzních modulací), a z toho také vyplývající pocit „ztracení“ se v textu a souvislostech.

Tyto poznámky však nemají za cíl popřít celkově velmi dobrou strukturu, obsah a přínosy práce.

#### Publikační aktivita autora

Autor v práci uvádí celkem 40 prací týkajících se problematiky disertační práce, jejichž byl spoluautorem. Převážná část seznamu literatury autora jsou výzkumné zprávy ZČU v Plzni a dále příspěvky na domácích konferencích. Nicméně je také spoluautorem 11 uváděných příspěvků na významných mezinárodních konferencích a 1 příspěvku ve významném periodiku. Dále autor uvádí 3 publikační výstupy věnované problematice jiné, než je obsahem disertační práce.

Proto pokládám jeho publikační aktivitu za kvalitativně přiměřenou a kvantitativně za nadprůměrnou.

#### Připomínky, dotazy a náměty do diskuse při obhajobě doktorské disertační práce

- jak je definován v práci užívaný termín „výkonová hustota“ u výkonových elektronických měničů?
- proč bylo napětí meziobvodu při simulacích i experimentech zvoleno tak nízké? Lze očekávat, že závěry formulované v disertační práci zůstanou v platnosti i pro obvyklá podstatně vyšší napětí?
- v odkazu na Obr. 103 se říká „Závislost  $THD_i$  na  $f_{sw,avg}$  pro různé hodnoty  $\lambda_{sw}$ ,  $\Delta k$  a  $f_{pwm}$  je vyšetřena na obr. 103“. Strukturovaný soubor takových hodnot však na Obr. 3 není uveden a jinde jsem ho také nenašel. Totéž platí i pro další obrázek Obr. 104.
- v základní části kap. 8 je uveden vzorec (254), který říká, jak závratně roste počet iterací s rostoucím počtem predikčních kroků pro 64 možných spínacích kombinací. Proto byl interval predikce zvolen  $N=1$ . Bylo by možno (simulačně nebo jiným přístupem) vyzkoušet alespoň  $N=2$  a posoudit nebo odhadnout tak vliv této volby na výsledky? Můžete posoudit, co bychom takovou volbou (jistě prakticky nereálnou) mohli získat?
- v závěru uvádíte mezi perspektivními směry dalšího výzkumu v této oblasti také vývoj komplexních algoritmů prediktivního řízení zohledňujících kromě ztrátových poměrů prvků napájecího měniče také řízení otáček/momentu motoru. Nebude takový algoritmus kompromisem mezi ztrátami a jejich rozdělením v měniči a dynamikou a ztrátami motoru? Máte nějaké informace nebo již vlastní první zkušenosti s takovou koncepcí řízení pohonu?



## Závěr

Předkládaná doktorská disertační práce Ing. Martina Votavy je věnována aktuální problematice, splnila zadané cíle a přináší řadu nových poznatků, velmi aktuálních i z hlediska jejich praktického uplatnění. Formálně byla zpracována na vysoké odborné úrovni a její základní části již byly dostatečně publikovány. Domnívám se, že práce splňuje požadavky kladené na úroveň doktorských disertačních prací podle §47 zákona 111/1998 Sb. a **doporučuji** ji tudíž k obhajobě.

V Praze 28. 10. 2021



prof. Ing. Viktor Valouch, CSc.