

## OPONENTNÍ POSUDEK NA DIZERTAČNÍ PRÁCI ING. MARTINA BRUHY

Název dizertační práce:	Electro – mechanical interaction between electric drive and it's mechanical load and control interventions mitigating unwanted vibration phenomena
Obor dizertace	Elektronika
Oponent	Ing. František Bernat, CSc
Pracoviště oponenta	ABB s.r.o., Praha, Robotics and Motion Division

Předložená dizertační práce se vymyká běžným standardům z několika pohledů. Je zcela zřejmě podložena letitou prací na dané problematice – torzních oscilacích pohonů s měniči frekvence. Autor má detailní přehled o dané problematice v literatuře a mohl přidat osobní zkušenosti z uvádění do provozu velkých regulovaných pohonů majících sklon k oscilacím.

Cílem dizertace bylo pochopit a vysvětlit příčiny možných torzních oscilací momentu (resp. otáček) v regulovaných pohonech se zaměřením na pulzace momentu ve vzduchové mezeře, vliv zpětných vazeb a důsledky na elastickou mechanickou sestavu pohonu.

Důležitým cílem bylo vyvinout simulační model měničů a motoru s respektováním právě zmíněné elasticity.

Při respektování jak otevřeného systému tak i s otáčkovou zpětnou vazbou probádat interakce jednotlivých regulačních smyček a zhodnotit tlumení soustavy včetně vlivu regulace.

Dále pak vytvořit Bodeho diagramy, které s respektováním elasticity umožní rychleji optimalizovat nastavení regulátorů měniče a to ještě během interních testů.

Z toho pak vyplývají požadavky na zjištění možností zlepšení tlumení kmitů jak pasivními, tak i aktivními prostředky.

Konečným cílem dizertace pak bylo experimentální ověření modelů, vyvinutých algoritmů aktivního tlumení a využití dostupných interních signálů měniče pro diagnostiku pohonu.

Význam předložené dizertační práce pro obor elektrických pohonů je dle mého názoru mimořádný – zejména v oblasti středních a velkých rychloběžných pohonů, přičemž poznatky lze samozřejmě aplikovat obecně.

Torzní oscilace momentu v regulovaných pohonech s frekvenčními měniči patří mezi techniky k nejobávanějším problémům při uvádění zařízení do provozu. Pokud se jim nepředchází již v době projektování – což je častý případ – pak pokud se objeví odstraňují se velmi obtížně v reálném provozu. Jsou totiž obvykle velmi málo tlumené a jejich amplituda bývá značná. Z vlastní zkušenosti jsem se s touto problematikou několikrát setkal a ve 4 případech – než se našlo řešení - došlo k mimořádně nákladným mechanickým poškozením – převodovky, spojky, ložisek a štítu motoru, případně ulomení lopatek poháněného ventilátoru.

Z tohoto hlediska je nutno ocenit systematickosti přístupu dizertanta, který podrobně analyzuje možnosti vzniku torzních kmitů a jde přitom skutečně do detailů. O něco větší část pozornosti věnuje pohonům s měniči LCI (proudového typu), zejména možnosti oscilací během rozběhu v režimu pulsního řízení měniče. Tato větší pozornost k měničům LCI souvisí pravděpodobně s tím, že se používají pro pohony největších výkonů a dizertant na nich v praxi pracoval. Osobně se domnívám, že tento typ měniče je na odstraňování problémů s oscilacemi obtížnější s ohledem na velké indukčnosti v obvodu. Nelze však v žádném případě říci, že by byly zanedbány napěťové střídače (VSI) s poněkud odlišnými vlastnostmi z hlediska oscilací a jejich odstraňování.

Dosažení cílů: Lze konstatovat, že všechny cíle dizertace byly dosaženy. Po zmíněném detailním rozboru problematiky a fyzikálních příčin vytvořil autor simulační model pro pohony s frekvenčními měniči obou typů včetně elastické mechaniky a vlivu zpětných vazeb. Pomocí frekvenčních charakteristik vytvořil zrychlený přístup ke stanovení nebezpečí oscilací, rezervy v tlumení a možnosti tlumení pasivního i aktivního. Mimořádně zajímavá je celá řada experimentálního ověření na realizovaných pohonech o výkonech až desítek MW.

Velmi vhodné je rovněž uveřejnění doporučeného postupu pro servisní inženýry a to jak postupovat při problémech s nestabilitou pohonu. Tato doporučení vycházejí ze závěrů předložené práce a ze zkušeností dizertanta.

Přínos předkladatele je jednoznačný – dosud se při problémech s torzní stabilitou pracovalo částečně s (mechanickou) torzní analýzou a poté spíše experimentálně s regulační částí měničů anebo pasivně změnou tuhosti a tlumení mechaniky (zvláště spojky).

Předložená práce umožňuje pohony modelovat vcelku, tj. elektrickou i mechanicky elastickou část a tak omezit budoucí nebezpečí a řadu doporučení aplikovat předem.

Nelze však asi říci, že je tímto problém oscilací zcela vyřešen. Jedná se o nesmírně komplikovaný elektromechanický nelineární systém, kde mechanika ovlivňuje elektrickou část a naopak. Vždyť je i problém, kam umístit na elastické soustavě např. čidlo otáček nebo ve vzácných případech čidlo momentu. Vše pak může být ještě zesíleno použitou zpětnou vazbou resp. regulačními smyčkami měniče.

Práce je napsána v angličtině, což je pro její význam přínosné. Systematickosti od analýzy přes řešení až k experimentům je příkladná. Je jasné, že zejména v experimentální části byl autor jedním z členů realizačního týmu, proto jsem uvítal tabulku s vyznačením toho, co řešil u jednotlivých experimentů osobně.

Formální stránka práce – odkazy na obrázky, tabulky a literaturu je příkladná včetně jasněho popisu použitých veličin, zkratk a indexů. Lze mít jen málo připomínek, např. některé popisy obrázků jsou až na další stránce, tzv. waterfall diagrams by vyžadovaly lepší popisky a odkazy jsou někdy k tabulkám, umístěnými v jiné kapitole.

Práce je psána téměř bez chyb – snad jen v 6.1.2 jsou 2 řádky shodné – zřejmě v jedné chybí slovo „not“.

Všechny zmíněné klady však vedou k značnému rozsahu práce (212 stran), což je způsobeno i celou řadou jinak velmi cenných Appendixů. Proto je zprvu obtížnější se v práci orientovat, než se najde jádro práce. Na druhou stranu případný pedagogický přínos je nesporný.

K práci bych měl jeden dotaz: Při ověřování příčin torzních oscilací v důsledku vzájemného ovlivňování regulačních smyček autor doporučuje některé rozpojit. To bylo provedeno na modelu anebo i během experimentů?

Publikační činnost: Autor uvádí 22 publikací na toto téma, kde je autorem nebo spoluautorem. Je v nich i jeden patent na redukování buzení kmitů v LCI pohonech. Zbývající jsou přednášky na mezinárodních i lokálních vědeckých konferencích, výzkumné zprávy a modely. Domnívám se, že publikační činnost je dostatečná.

Vzhledem k tomu, že až na zmíněné drobné připomínky považuji tuto práci za jednu z nejlepších z poslední doby nejen z hlediska zpracování, nových poznatků ale i pozitivních důsledků pro rozvoj vědního oboru, jednoznačně

**doporučuji předloženou práci k obhajobě**

neboť splňuje všechny zákonné požadavky.

Praha 31.10.2018

  
Ing. František Bernat, CSc

## Oponentní posudek disertační práce

Předkladatel: **Ing. Martin Brůha**

Název disertační práce: **Electro-mechanical interaction between electric drive and its mechanical load and control interventions mitigating unwanted vibration phenomena**  
**Elektromechanická interakce mezi elektrickým pohonem a mechanickou zátěží a řídicí algoritmy pro její potlačení**

Tento oponentní posudek jsem vypracoval v souladu se žádostí o jeho vypracování, zaslané mi dopisem doc. Ing. Jiřího Hammerbauera, Ph.D., proděkana FEL ZČU v Plzni zn. DFEL/Le/18 ze dne 24. září 2018.

Ve výše uvedeném dopise je požadováno, aby posudek obsahoval celkem šest částí. Tomuto požadavku také odpovídá členění mého posudku.

Disertační práce Ing. Brůhy je napsána v anglickém jazyce a má celkem včetně příloh 212 stran. Vlastní práce je rozdělena do 10 kapitol. Práce dále obsahuje seznam obrázků, seznam tabulek, 130 odkazů na použitou literaturu a seznam celkem 22 publikací různého charakteru autora disertační práce a čtyř absolvovaných kurzů a seminářů. Součástí práce je také 16 příloh, které doplňují vlastní práci.

### a) Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Vzájemná interakce elektrického pohonu a jeho zátěže byla studována již od začátku praktického používání elektrických pohonů a význam takových studií roste s růstem jmenovitých výkonů realizovaných pohonů. Elektrický pohon a jeho zátěž tvoří spolu dynamickou soustavu, která má své vlastní torzní frekvence a která se proto může torzně rozkmitat. Mechanická namáhání některých komponentů takové soustavy při torzním kmitání mohou dosáhnout hodnot, které překračují jejich dovolená namáhání a vést tak k jejich poškození nebo až k provozním haváriím.

Rozvoj měničů výkonové elektroniky a jejich mikroprocesorového řízení v posledním půlstoletí umožnil aplikovat tuto techniku i v oblasti střídavých regulovaných pohonů. Tyto měniče jsou ze svého principu funkcí zdrojem vyšších harmonických proudů ve vinutí elektrického motoru a v jejich důsledku také torzních momentů na hřídeli motoru. To může vést k nežádoucím budícím frekvencím na mechanickou soustavu. Na druhé straně ale moderní mikroprocesorové řízení umožňuje navrhnout a použít nové metody řízení, které vedou k potlačení nežádoucího kmitání. Předložená disertační práce se zabývá analýzou vlivu měničů výkonové elektroniky na dynamické chování elektropohonu a rozбором možných regulačních metod pro potlačení jejich nežádoucího kmitání.

Z výše uvedených důvodů je téma předložené disertační práce pro obor regulovaných pohonů velmi aktuální.

### b) Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění určeného cíle

Disertant v úvodu své práce uvádí, že hlavní pozornost jeho práce je věnována elektromechanické interakci mezi střídavým elektrickým motorem, napájeným z invertoru a poháněným zařízením. Konstatuje, že takové pohony nalezneme v mnoha různých průmyslových aplikacích, jako jsou rotační kompresory pro dopravu plynu, odstředivá

čerpadla pro dopravu ropy, pohony cementových a surovinových mlýnů, pomocné pohony v elektrárnách a jejich budící systémy, pohony ve válcovnách a podobně. Jedná se tedy o velmi široké spektrum problémů. Proto si předkladatel v kap. 3 stanovuje celkem 6 cílů. Tyto cíle obsahují:

1. vysvětlení mechaniky vzniku torsních kmitů v regulovaných pohonech a vlivu uzavřené regulační smyčky na ni,
2. rozvinutí a ověření simulačního modelu regulovaného pohonu s elastickou hřídelí a studium torzní odezvy elastického mechanismu v ustáleném i přechodovém stavu,
3. provedení simulace s uzavřenými smyčkami a zkoumání jejich chování a jejich vliv na tlumení systému a regulaci,
4. vytvoření frekvenčních charakteristik systému s elastickým hřídelem a jejich použití pro optimalizaci nastavení parametrů regulace a pro určení torzní stability,
5. zvýšení tlumení regulačních smyček při pasivním i aktivním tlumení,
6. provedení experimentálních měření na vysokonapěťových regulovaných pohonech a využití získaných výsledků pro potvrzení teoretických závěrů. Použití interních signálů pohonu pro účely diagnostiky.

Z výše uvedeného výčtu cílů je zřejmé, že si disertant vytkl zabývat se ve své práci jak teorií, tak simulacemi i praktickým ověřením závěrů na reálných pohonech. Splnění výše uvedených cílů popsal disertant v jednotlivých kapitolách své disertační práce.

**c) Stanovisko k výsledkům disertační práce a k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele disertační práce**

Po prostudování předložené disertační práce konstatuji, že disertant skutečně šest konkrétních cílů své disertační práce splnil. Musím přitom vyzdvihnout šířku i hloubku jeho orientace v problematice torzního kmitání soustav s regulovanými elektropohony. Jedná se totiž o problematiku, která vyžaduje jak znalosti z oblasti elektrotechniky, především elektrických točivých strojů, výkonové elektroniky a regulace, tak i znalosti z oblasti strojírenství, především torzního kmitání mechanických soustav. Konkrétní přínos předkladatele práce na měřených soustrojích buď na zkušebně ABB, nebo u zákazníka je přehledně sestaven v Table 26.

**d) Vyjádření k systematické, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni disertační práce**


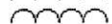
Předložená disertační práce je rozčleněna do 10 kapitol. První dvě kapitoly jsou věnovány uvedení do problematiky kmitání regulovaných elektropohonů s různými typy rotačních zařízení, popisu vývoje řešení jejich torzního kmitání především z hlediska moderních měničů výkonové elektroniky, používaných v různých aplikacích. Teprve po těchto dvou kapitolách je zařazena kapitola 3: Hlavní cíle této práce. Na jedné straně je toto zařazení zcela logické z pohledu čtenáře práce, na druhé straně bývá zvykem u tohoto typu prací zařazovat cíle práce hned za úvod. Vzhledem k široké problematice torzního kmitání mechanických soustav s regulovanými elektropohony považuji zařazení stanovení hlavních cílů předložené disertační práce až jako 3. kapitolu za vhodnější.

Práce je napsána velmi přehledně a pořadí jednotlivých kapitol je logické. Po formální stránce práce obsahuje hned v úvodu seznam symbolů a zkratk a na závěr seznam obrázků a seznam tabulek. To činí práci snadněji čitelnou.

K předložené práci mám tyto poznámky nebo připomínky:

1. Na Figures 2-1, 5-11, 5-12 jsou nakreslena obvody schémata různých zapojení nepřímých měničů frekvence s proudovým meziobvodem. Z pohledu průběhu proudu ve stejnosměrném obvodu jsou schémata správná, ale v reálných aplikacích se musí tlumivka ve stejnosměrném obvodu rozdělit do kladné i záporné části meziobvodu

s ohledem na napětové namáhání na střídavých stranách a problémům při fázování v případě použití měniče pro frekvenční rozběh synchronního stroje měničem frekvence.

2. Průběhy pulzačního momentu ve Figure 5-17 jsou teoretické průběhy při zanedbání komutace. Ve skutečnosti ale komutaci nelze zanedbat - na jiném místě práce se uvádí nastavení zadního dorazu zapínacího impulsu  $150^\circ$  až  $160^\circ$ . Tomu odpovídá komutační úhel  $10^\circ$  až  $15^\circ$ . V době komutace se magnetické pole statorového vinutí otočí o  $60^\circ$ el. a to má za následek zmenšení pulzačního momentu.
3. V rov. (31), (32), (33) a (34) je na levé straně použito pro moment označení  $T_{e(\text{xxxx})}$  a na pravé straně jsou pro jednotlivé složky momentu použita označení  $M_0, M_1, M_2, M_{00}$ . Proč?
4. Jak jsou definovány přenosy  $G_e$  a  $G_m$  v rov. (36) a (37)?
5. Proč je v Figures 7-8 a 7-9 použito pro moment označení  $t_{motor}, t_{load}$  a nikoliv  $T_{motor}, T_{load}$ ?
6. V náhradních obvodech Appendix 1 jsou použita označení reaktancí, která neodpovídají normě ČSN EN 60617 Grafické značky pro schémata  
Použito  místo .

#### e) Vyjádření k publikacím studenta

Seznam publikací obsahuje 1 patent, 8 příspěvků na mezinárodních konferencích, 2 příspěvky na národních konferencích, 5 skript a 6 interních výzkumných zpráv ABB. Kromě výzkumných zpráv ABB je ve většině ostatních publikací disertant uveden jako spoluautor. Neznám interní předpisy pro doktorské studium na ZČU Plzeň a proto nemohu posoudit zda jsou splněny požadavky těchto předpisů na publikace předkladatele.

#### f) Jednoznačné vyjádření oponenta, zda doporučuje či nedoporučuje disertační práci k obhajobě.

Práci doporučuji k obhajobě.

Prof. Ing. Jiří Pavelka, DrSc.  
emeritní profesor  
Elektrotechnická fakulta ČVUT v Praze

Praha 22. 10. 2018

# Oponentský posudek doktorské disertační práce

Ing. Martina Brůhy

## **„Electro-mechanical interaction between electric drive and its mechanical load and control interventions mitigating unwanted vibration phenomena“**

### Aktuálnost tématu a splnění cílů práce

Problematika torzního kmitání a hřídelových soustav elektrických pohonů a možností jejich tlumení je studována a rozvíjena již desítky let. Zvýšený zájem o tuto problematiku nastal zejména s rozvojem výkonových elektronických měničů pro napájení točivých strojů, neboť to vedlo ke generování výrazných pulzačních momentů. Současně však rozvoj mikroelektroniky a tím podmíněná možnost užití složitých sofistikovaných řídicích algoritmů pohonů otevírají nové možnosti tlumení těchto buzených torzních kmitů.

Předkládaná disertační práce reaguje na tyto trendy a možnosti a představuje rozsáhlou ucelenou studii, vycházející jak z rozsáhlé literatury, tak i z vlastních autorských praktických pracovních zkušeností. Práce se dotýká všech podstatných aspektů této problematiky včetně problematiky měření a interpretace veličin pro jejich dokumentaci a také potřebných pro realizaci vhodných algoritmů tlumení torzních kmitů. Specifické zaměření práce je orientováno na přehled, analýzu a simulaci vhodných zásahů a kompenzačních algoritmů pro redukci torzního kmitání a na praktické demonstrace z průmyslu při jejich uplatnění.

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

### Metodika a postup řešení

Doktorská disertační práce je psána v anglickém jazyce a má celkový rozsah 214 stran včetně všech doplňků a příloh.

Po úvodu v kapitole 1 je v kapitole 2 shrnut současný stav problematiky, a to jak v oblasti průmyslu, tak i v oblasti akademického výzkumu. Celkový seznam referencí obnáší 130 položek. Po uvedení cílů práce v kapitole 3 je v následující kapitole 4 shrnuta použitá metodologie a stručné zaměření jednotlivých kapitol.

V kapitole 5 jsou představena teoretická východiska pro pochopení problematiky vzniku, projevu a možností tlumení torzního kmitání. Kapitola obnáší 36 stran a představuje určitý

„výukový materiál“, uvádějící základní rovnice, schémata i grafy, vztahující se ke všem dílčím částem řetězce točivý stroj + hřídelový systém + regulátor + tlumící a měřící členy.

Kapitola 6 je následně věnována samotnému zaměření práce, tj. představení tlumících prostředků pro redukci torzního kmitání. Jsou uvažovány samostatně pohony s napájením z proudového a napětového měniče, poněvadž obé vykazují specifické vlastnosti a jim odpovídající způsob analýzy i syntézy vhodných intervenčních prostředků pro redukci kmitání. Výklad je doprovázen řadou výsledků simulovaných grafů i průběhů a také experimentálními záznamy.

Kapitola 7 uvádí výsledky autorem provedených simulací. Po představení typických typů zdrojů vybudujících torzní kmitu hřídelových soustav a ukázkových výsledků simulací takových kmitů se autor opět samostatně věnuje měničům s proudovým a napětovým meziobvodem. Simuluje kmitavé jevy v jednotlivých přechodových dějích i ustálených stavech pohonů. Pro napětové měniče si všímá modulačních strategií PWM i DTC.

V rozsáhlé kapitole 8 potom uvádí výsledky provedení řady opatření pro potlačení torzního kmitání a jejich příznivých dopadů u velkých systémů pohonů různých uspořádání, jichž se autor v různých stadiích a funkcích sám aktivně zúčastnil.

V kapitole 9 shrnuje výsledky svých simulací, měření a zkušeností v jakýsi inženýrský stručný manuál, jak postupovat v procesu snahy o úspěšnou minimalizaci nebezpečí plynoucích z torzního kmitání.

V závěrečné kapitole 10 potom shrnuje přínosy své práce a nastiňuje možnosti dalšího výzkumu v této oblasti.

Práce obsahuje celkem 15 příloh, věnovaných vysvětlení zejména základních principů, schémat a jevů z oblastí mechaniky a motorové, měničové i řídicí techniky.

#### Originální nové poznatky

Pomineme-li určitý integrující pohled na celou tuto interdisciplinární problematiku, představený v této práci, což nelze nepovažovat rovněž za originální přínos autora, lze za něj považovat zejména výsledky uváděné v kapitole 7 a také autorem v kapitole 9 zformulované zásady a postupy, doporučené pro efektivní omezení torzního kmitání a jeho nepříznivých důsledků. Tyto principy autor definoval na základě svých studií, simulací i bohatých praktických zkušeností v této oblasti.



### Formální a jazyková úprava práce

Disertační práce obsahuje veškeré formální náležitosti, uváděné s neobvyklou precizností. Jazykovou úroveň práce v angličtině si dovoluji hodnotit jako velmi dobrou.

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.

Jako negativum vnímám určitou roztržitost a v některých partiích i zkratkovitost.

Zvláště v kapitole 5, 6 nejsou také vesměs uváděny zdroje použitých grafů a záznamů (nebo jsou z autorova archivu?). Také u některých ne zcela elementárních rovnic (jen např. (31), (32)) není uveden zdroj ani komentář.

Ačkoli zaměření jednotlivých kapitol je stručně předesláno v kapitole 4., uvítal bych v tomto bohatě strukturovaném textu vždy na vhodných místech informace, jak bude následující text organizován, na co bude zaměřen a naopak, také na vhodných místech, co z dosavadních úvah a dat v příslušných subkapitolách již plyne.

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

### Publikační aktivita autora

Autor v práci uvádí 1 patent, 10 příspěvků na mezinárodních i národních konferencích, seznam 5 svých Matlab skriptů a 6 výzkumných zpráv ABB. U příspěvků jde vesměs o spoluautorství, zatímco skripta a výzkumné zprávy jsou výlučně autorovým dílem.

Vzhledem k autorově dosavadní profesionální kariéře pokládám jeho publikační aktivitu za přiměřenou a dostačující.

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

Mé podněty k diskusi se týkají hypotetických možností, jak zpřesnit výpočet torzních kmitů, generovaných poháněcím strojem:

- vzhledem k analogii mezi elektrickým vedením a dlouhým hřídelem se nabízí myšlenka pohlížet na tento hřídel v určitých případech také jako na obvod s rozprostřenými parametry; domníváte se, že by to mohlo přinést něco nového?
- při základním analytickém výpočtu generovaných pulzačních momentů stroje v ustálených stavech z proudů a toků buzených pulzním napájecím napětím se předpokládá konstantní rychlost otáčení rotoru; bylo by možno nalézt nějakou relativně výpočetně jednoduchou (nejlépe analytickou) metodu, která by kolísání otáček ale-

spoň přibližně respektovala a tím snad základní výpočet pulzačních momentů zpřesnila?

### Závěr

Předkládaná doktorská disertační práce Ing. Martina Brůhy 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 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 19. 10. 2018

  
prof. Ing. Viktor Valouch, CSc.