

Oponentní posudek disertační práce

Název: **Estimace vybraných veličin elektrických pohonů a aktivních filtrů**

Autor: **Ing. Jakub Talla**

Školitel: doc. Ing. Luděk Piskač, CSc.

Oponent: doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
Katedra elektroniky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
VŠB-Technická univerzita Ostrava
17. listopadu 15, 708 33 Ostrava-Poruba
Tel. 597 324 276, e-mail: petr.palacky@vsb.cz

Předložená disertační práce se v rozsahu 116 stran věnuje problematice estimačních metod pro vybrané veličiny elektrických pohonů a aktivních filtrů. Dosažené výsledky jsou v práci dokumentované jednak pomocí číslicové simulace a jednak experimentálními měřeními na reálných laboratorních modelech pohonů s reluktančním motorem, se synchronním motorem s permanentními magnety a jednofázovým paralelním aktivním filtrem. Obsahově je práce rozdělena do sedmi kapitol včetně závěru, seznamu literatury a autorových publikací. Dle doporučení pro zpracování oponentských posudků hodnotím uvedenou práci z následujících hledisek:

a) Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Moderní způsoby řízení střídavých regulovaných pohonů a výkonových polovodičových systémů se již staly v dnešní době nedílnou součástí řídicích a regulačních technik v průmyslové elektronice. Tyto metody využívají matematické modely řízených soustav, které však vyžadují znalosti všech jejich parametrů. Ne všechny parametry však lze jednoduchým způsobem získat měřením ve všech provozních režimech. Řešením pak bývá zjednodušování těchto matematických modelů, což však může způsobit nestabilitu regulace v určitých provozních stavech, nebo se využívá technik odhadu těchto parametrů z jiných dostupných měřených veličin. Právě tento způsob získávání parametrů se v posledních letech stále častěji dostává do popředí. Současný stav v oblasti vývoje mikropočítačových systémů dovoluje realizovat i výpočetně náročné algoritmy řízení s možností identifikací a následnou adaptací algoritmů řízení na změnu parametrů regulovaného systému. Vzhledem k tomu, že tato práce zapadá do tohoto trendu, považuji její význam pro obor za zcela zásadní.

b) Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a ke splnění stanoveného cíle

Zvolený postup řešení je dle mého názoru plně v souladu s obecnými zvyklostmi i se stanovenými cíli.

Vlastní řešení je obsahem kapitol 2 až 4. Jednotlivé kapitoly pojednávají o zdánlivě nesouvisejících tématech, všechny však řeší problém estimačních technik v různých aplikacích. Kapitoly jsou pak logicky členěny od popisu teoretických základů principu funkce řízení, matematického modelu regulované soustavy, přes popis jednotlivých metod estimace a jejich simulační výsledky, až k experimentálnímu ověření daných metod na reálném modelu soustavy. Každá metoda je doprovázena grafy nejdůležitějších veličin a následně vyhodnocena v dílčím závěru. Tím jsou naplněny i cíle disertační práce.

Některé uvedené metody jsou známé a v dostupné literatuře zpracované, některé naopak nejsou běžně publikované a v praxi ověřené.

c) Stanovisko k výsledkům disertační práce a původního konkrétního přínosu disertanta

Disertační práce se zaměřuje především na řešení metod estimace parametrů různých regulovaných soustav. Kapitola 2 je zaměřena na oblast střídavých regulovaných pohonů. Její první část je zaměřena na problematiku řízení spínaného reluktančního pohonu, zejména pak na identifikaci polohy rotoru. Disertant zde z nastíněných možných metod vybral metodu odhadu polohy rotoru ze spráženého magnetického toku. Využívá umělou neuronovou síť, kterou doplnil o algoritmy pro zpřesnění odhadu prostřednictvím průběžné úpravy hodnoty fázového odporu eventuálně o algoritmy, které využívají průměrování hodnoty polohy z ANN estimátoru a polohy získané z odhadnuté rychlosti. Druhá část se pak věnuje problematice estimátoru polohy synchronního motoru s permanentními magnety s pomocí Kalmanova filtru. V této části pak také porovnává výsledky estimace algoritmu Kalmanova filtru a jeho doplněním o pomocnou neuronovou síť. Další dvě kapitoly jsou zaměřeny na problematiku kvality napájecí sítě. Kapitola 3 pojednává o prediktivní estimaci a aktivní tlumení kmitů LC filtru trakčního vozidla s PMSM řízeného DTC, přičemž se využívá možnost korekce žádaného momentu stroje a kapitola 4 pak řeší estimaci základní harmonické pro jednofázový paralelní aktivní filtr pomocí novelizovaného MPG-FIR filtru. Za disertabilní jádro a tedy i konkrétní přínos disertanta považují právě navržené algoritmy pro estimátory parametrů představených soustav a jejich simulační a následně i experimentální ověření pro různé provozní režimy. Výsledné experimentální výsledky potvrzují dobrou kvalitu regulace s danými estimátory a dokazují jednoznačný přínos disertanta.

Výše navržené estimátory lze využít i pro jiné moderní metody řízení střídavých strojů a výkonových polovodičových systémů.

Poznámky k disertační práci a otázky pro disertanta, které v žádném případě nesnižují úroveň této práce a slouží především k diskusi při obhajobě, jsou uvedeny v příloze.

d) Vyjádření k systematičnosti, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni

Disertační práce má velmi dobrou formální úroveň. Jednotlivé kapitoly práce vytvářejí logickou návaznost řešených problémů umožňující dobré seznámení se s danou problematikou. Jazyková stránka práce má velmi vysokou úroveň, v práci se v podstatě nevyskytují jazykové nebo gramatické chyby, dobrou úroveň má rovněž grafické zpracování práce. Připomínky však mám k některým grafům s průběhy, které jsou velmi malých rozměrů a snižují tak rozlišovací schopnost. V práci také postrádám detailnější bloková schémata regulačních struktur, zejména pak jejich vysvětlení ve vztahu k implementaci zkoumaných algoritmů estimace.

e) Vyjádření k publikacím disertanta

Seznam publikační a výzkumné činnosti disertanta je uveden na stranách 113 až 116. obsahuje celkem 26 titulů, z toho 1 článek v odborném časopise, 16 článků na tuzemských a zahraničních konferencích, 4 položky představují výzkumné zprávy, na kterých se disertant podílel jako autor nebo spoluautor a 4 funkční vzorky. Dvě publikace jsou uvedeny v databázi Web of Science. Publikační aktivitu považuji za dostatečnou, neboť překračuje obvyklý počet publikací disertačních prací v ČR. Všechny tyto publikace se zabývají problematikou, na které je postaveno jádro disertační práce.

f) Doporučení

Disertační práce obsahuje řadu nových poznatků k problematice techniky estimace veličin v oblasti elektrických pohonů a výkonových polovodičových systémů.

Vzhledem k vysoké odborné úrovni, významnému přínosu pro obor a taktéž preciznímu zpracování, disertační práci Ing. Jakuba Tally s názvem „Estimace vybraných veličin elektrických pohonů a aktivních filtrů“

doporučuji k obhajobě

a v souladu se zákonem č. 111/1998 Sb. o vysokých školách, doporučuji po úspěšné obhajobě udělit titul Ph.D.

V Ostravě, dne 4.1.2013



doc. Ing. Petr Paľacký, Ph.D.

VŠB-Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Příloha

Poznámky a dotazy k doktorské disertační práci

1. Jaký byl rozdíl v kvalitě regulace při zavedení zpětné vazby nezpřesněného a zpřesněného odhadu polohy rotoru spínaného reluktančního motoru?
2. Z jakého důvodu byla volena spínací frekvence 10KHz, když vzorkovací perioda regulace byla 5KHz (str. 65, poslední odstavec)?
3. Jakým způsobem by byla principiálně prováděna stabilizace v rychlostním módu (obr. 43)?
4. Vysvětlete pojem „lehké frekvenční fluktuace základní harmonické“ (str. 80)?

Oponentský posudek doktorské disertační práce

Ing. Jakuba Tally

„Estimace vybraných veličin elektrických pohonů a aktivních filtrů“

Aktuálnost tématu a splnění cíle

Doktorská disertační práce Ing. Jakuba Tally je zaměřena na aktuální problematiku, která v posledních deseti až dvaceti letech představuje jednu z klíčových oblastí, která je v oboru výkonových elektronických systémů intenzivně rozvíjena. Estimace veličin neměřitelných, obtížně měřitelných nebo těch, jejichž měření je z hlediska ceny potřebných čidel nákladné, představuje způsob, jak snížit cenu celého zařízení, náklady na údržbu, jak zvýšit jeho spolehlivost a rozšířit možnosti diagnostiky.

Obsah a dosažené výsledky práce jsou v souladu s cíly deklarovanými v kapitole 1.

Metodika a postup řešení

Doktorská disertační práce má celkový rozsah 115 stran.

Práce určitým způsobem shrnuje poznatky a výsledky práce jejího autora v několika posledních letech, které byly jím jako členem širšího autorského kolektivu publikovány na významných domácích a zahraničních konferencích a ve výzkumných zprávách. Ačkolí se práce týká problematiky více typů elektrických strojů a také pasivního a aktivního výkonového filtru, jednotlivým námětem je vždy estimace některých klíčových veličin těchto zařízení.

V úvodu práce autor shrnuje současný stav problematiky a uvádí cíle práce. Ve druhé kapitole se zabývá estimací polohy rotoru spínaného reluktačního motoru a synchronního motoru s permanentními magnety s využitím Kalmanova filtru a ANN. Ve třetí kapitole představuje prediktivní estimaci a aktivní tlumení kmitů vstupního LC filtru trakčního vozidla s DTC řízeným PMSM. V poslední páté kapitole se věnuje estimaci základní harmonické proudu zátěže pomocí MGP – FIR (Multiplicative General Parameter – Finite Impulse Response) filtru pro řízení jednofázového paralelního aktivního výkonového filtru. V závěrečném shrnutí sumarizuje hlavní přínosy práce a naznačuje možné směry dalšího výzkumu v této oblasti.

V každé kapitole autor představuje principy a postupy každé z metod užitých pro příslušnou estimaci, popisuje její implementaci a uvádí klíčové výsledky simulací i experimentálního ověření.

Originální nové poznatky

Originální poznatky a výsledky jsou ve všech kapitolách 2-4. Tyto kapitoly vesměs shrnují výsledky prezentované některým z členů autorského kolektivu na konferencích nebo uvedené ve výzkumných zprávách. Ačkoli tematika disertační práce zahrnuje problematiku různých estimačních technik, uplatněných u různých silnoproudých systémů, nepůsobí práce nikterak roztržtěně, neboť úvodní partie a celkový způsob prezentace poskytují čtenáři dostatečný jednotící pohled. Oceňuji, jak při nutném omezeném rozsahu jednotlivých kapitol dokázal autor v každé z nich srozumitelně a výstižně prezentovat teoretické základy zvolené estimační strategie i dosažené výsledky.

Formální a jazyková úprava práce

Disertační práce obsahuje všechny potřebné náležitosti a nenalezl jsem v ní žádné gramatické ani stylistické prohřešky.

Z častých doplňujících poznámek pod čarou je zřejmé, že autor užitě techniky prostudoval a promyslel i v širších souvislostech.

Grafy a obrázky, uváděné v závěru každé kapitoly, byly vybrány z jistě mnoha získaných velmi vhodně tak, že ilustrují klíčové vlastnosti každé z užitých metod.

Publikační aktivita autora práce

Nadprůměrná publikační aktivita autora obnáší 1 článek v časopise, 9 příspěvků na mezinárodních konferencích (z toho 5 na významných zahraničních), 7 příspěvků na českých konferencích a 4 výzkumné zprávy. Kromě toho je Ing. Talla spoluautorem 5 funkčních vzorků spadajících do problematiky topologie a strategie řízení aktivních výkonových filtrů.

Dotazy a náměty do diskuse při obhajobě doktorské disertační práce:

- na několika místech v práci, tedy asi ne pouze náhodně, se vyskytuje gramatická chyba typu „kalmanův filtr“, „choleského dekompozice“; i v češtině se počáteční písmeno jmen autorů určité metody píše s velkým písmenem;
- v kap. 2.1 jsou uváděny výsledky zejména pro 600 a 200 ot/min; zajímaly by mne také otáčky nižší;

- autor využívá pro některé estimace ANN; zajímalo by mne, zda by mohl nějak komentovat také užití FL, eventuelně neuro-fuzzy logických algoritmů;
- jaká jsou měřítka na ose kmitočtu u obrázků kmitočtových spekter v kap. 4.6?

Závěr

Předkládaná doktorská disertační práce Ing. Jakuba Tally je věnována aktuální problematice a přináší řadu nových vědeckých poznatků, formálně byla zpracována na vysoké úrovni a její základní části již byly dostatečně publikovány. Domnívám se, že práce splňuje požadavky kladené na úroveň disertačních prací podle 111/1998 Sb.§47 a **doporučuji** ji tudíž k obhajobě.

V Praze 11. 12. 2012


prof. Ing. Viktor Valouch, CSc.

Oponentský posudok

doktorandskej dizertačnej práce **Ing. Jakuba Tallu** s názvom:
„Estimace vybraných veličin elektrických pohonů a aktivních filtrů“

Na podklade menovania oponentom listom zo dňa 27.11.2012 od dekana FEL ZČU Plzeň doc. Ing. J. Hammerbauera, PhD predkladám nasledujúci oponentský posudok doktorandskej dizertačnej práce Ing. Jakuba Tallu.

Predložená dizertačná práca (*d'alej DDP*) sa na 116 stranách (*vrátane autorových publikácií s.113-116*) zaoberá aplikáciami metód umelej inteligencie (*d'alej UI*) pri estimácii veličín nutných pre riadenie elektrických pohonov (*d'alej EP*):

- a) so spínaným reluktančným motorom (*d'alej SRM*),
 - b) so synchronným motorom s permanentnými magnetmi (*d'alej SMPM*)
- a pre riadnie meničov výkonovej elektroniky (*d'alej VE*) s aplikáciami pre:

- a) vstupný filter vozidiel js. elektrickej trakcie,
 - b) jednofázových aktívnych filtrov,
- čo DDP jednoznačne zaraďuje do vedného odboru „**Elektronika**“.

c) Zhodnotenie významu DDP pre odbor

Tým, že DDP obsahuje aplikácie metód UI ako UNS a GA v EP a VE je aj napriek pomerne vysokej výpočtovej náročnosti pre tento odbor veľmi aktuálna.

Jej prvé dve časti sa zaoberajú bezsnímačovým riadením EP so SRM a SMPM, Riadenie SRM využíva na odhad polohy rotora z mg. toku a prúdu stroja umelú neurónovú sieť (*d'alej UNS*) s priebežnou adaptáciou odporu fáze. Navrhnuté riadenie je overené experimentálne s využitím FPGA.

Vektorové riadenie SMPM na odhad polohy rotora využíva modifikovaný kalmanov filter (*viď pozn. 1*), rozširujúci stochastický model SMPM o UNS umožňujúcu modelovať aj nelinearity, ktoré sa pri jednoduchších modeloch zanedbávajú. Táto časť bola overená simulačne.

Obidve uvedené aplikácie umožňujú eliminovať snímač mechanickej veličiny na hriadeli stroja, čo môže významne prispieť k rozšíreniu aplikačnej oblasti regulovaných EP.

Ďalšie dve časti DDP sa zaoberajú prediktívnou estimáciou a aktívnou stabilizáciou vstupného LC filtra js. trakčného vozidla s priamym momentovým riadením (*d'alej DTC*) a odhadom základnej harmonickej prúdu pre jednofázový aktívny filter pomocou FIR filtra.

Parametre prediktívneho regulátora prúdu sú stanovené na základe opisu systému v stavovom priestore. Experimentálne overenie ako aj amplitúdové a frekvenčné charakteristiky systému potvrdzujú veľmi dobré vlastnosti navrhnutého regulátora.

Odhad základnej harmonickej prúdu s mierne meniacou sa frekvenciou pre jednofázový aktívny filter sa realizuje FIR filtrom s novelizovanou štruktúrou, ktorej

fixné koeficienty sú určené s využitím genetických algoritmov a diferenčnej evolúcie. Navrhnuté riadenie je overené experimentálne.

DDP prináša nové, komplexné riešenia pomerne veľmi široko formulovaných cieľov (s.19 – s.20), ktoré sa vyskytujú pri riadení EP s SRM a s PMSM a pri riadení meničov VE vo vozidlách s DTC a riadení meničov 1f aktívnych filtrov.

d) Postup riešenia problému a zvolené metódy spracovania

Metódy spracovania DDP vychádzajú z jej jednotlivých definovaných cieľov. Autor správne vychádza z rozboru súčasného stavu v daných oblastiach EP a VE, na základe ktorých pristupuje k vlastným návrhom riešení.

DDP preto predkladá nielen opis širokého spektra metód UI ale aj ich priamu aplikáciu na riešenie praktických úloh pri riadení EP so SRM a SMPM bez snímača na hriadeli ako aj pri riadení meničov VE s ohľadom na aktívne tlmenie kmitov vstupného filtra a rýchlu estimáciu základnej harmonickej pre riadenie 1f paralelného aktívneho filtra.

Stabilizácia vstupného filtra ľahkého js. vozidla rieši aktuálny problém, čo sa zrejme odrazí aj v rýchlej realizácii v praxi. Podobné konštatovanie platí aj pre určovanie polohy SRM bez snímača na hriadeli, prípadne pre navrhnutý FIR filter v skrátenej verzii (*oproti pôvodnej*). Výpočtová náročnosť stochastického modelu SMPM zatiaľ nedáva záruku priamej aplikovateľnosti praxi, čo konštatuje aj sám autor DDP.

e) Výsledky DDP a jej prínosy

Ako už bolo uvedené DDP predkladá riešenie štyroch rozličných úloh z oblasti EP a VE, ktoré charakterizuje (*s výnimkou jednej*) využitie metód UI.

Pri odhade polohy SRM sa využíva off-line natrénovaná UNS s adaptívnym odhadom odporu statorovej fáze, pričom výsledná poloha je ešte korigovaná váženým priemerom výpočtu rýchlosti UNS a integráciou rýchlosti.

Výpočet polohy SMPM sa realizuje modifikovaným kalmanovým filtrom. Stochastický model je rozšírený o on-line adaptovanú UNS, ktorá umožňuje postihnúť aj niektoré nelinearity systému.

Stabilizácia vstupného LC filtra vozidla sa rieši pomocou návrhu prediktívneho regulátora s dobrým eliminovaním možných kmitaní vstupného filtra.

Riadenie 1f aktívneho filtra pre odhad prvej harmonickej 1f sústavy využíva modifikovaný FIR filter. Jeho koeficienty sú navrhnuté pomocou genetického algoritmu a algoritmom diferenčnej evolúcie, čo umožnilo nielen skrátene filtra, ale aj zlepšenie jeho vlastností.

Aj keď sa ciele DDP spočiatku javia ako neúmerne široké, ich reálne riešenie vo forme implementovaných pozorovacích a riadiacich algoritmov meničov pre reálne praktické aplikácie v plnej miere charakterizuje ich splnenie.

f) Vyjadrenie sa k publikáciám doktoranda

Publikačná činnosť doktoranda je viac ako na veľmi dobrej úrovni. Podľa podkladov autor DDP publikoval 17 vedeckých odborných príspevkov, z toho: 1 v domácom nekarentovanom časopise, 7 príspevkov na zahraničných vedeckých konferenciách a 5 príspevkov na domácich vedeckých konferenciách. Na 10 príspevkoch (v členení 1-5-4) je dizertant uvedený ako prvý autor. Ako zodpovedný riešiteľ riešil 1 výskumnú úlohu a ako riešiteľ sa podieľal na riešení 3 VÚ. Je tiež spoluautorom 5 funkčných vzoriek.

g) Pripomienky k DDP

Pri obhajobe DDP navrhujem sa sústrediť na podrobnejšie vysvetlenie nasledujúcich otázok a pripomienok, ktoré však neznižujú úroveň DDP:

1. Ako bolo zabezpečené spínanie meniča typu Miller a správna činnosť komutačnej logiky pre získanie dátových súborov na tréningovanie UNS? Odhad polohy na počiatku prakticky vždy vykazuje (v oboch prípadoch: odhad z UNS a aj spresnený odhad) určitý prechodový dej. Nebolo možné spúšťať motor až po odznení prechodového javu?
2. Aký bol dosiahnutý dolný a horný rozsah otáčkovej regulácie SRM (DDP uvádza experiment pri 200 ot/min pri menovitých 2000 ot/min). Do akej miery je navrhnutá metóda univerzálnej?
3. Čo bránilo experimentálnemu overeniu riadenia SMPM pomocou UKF? Nebolo možné pre overenie UKF spracovať aspoň doteraz namerané údaje?
4. Do akej miery je prezentovaná metóda oproti metódam pracujúcim s injekciou vF prípadne s metódami, ktoré využívajú nesymetriu mg. obvodu stroja (INFORM)?
5. Nie je možné využiť na elimináciu oscilácií stavových veličín vstupného filtra js. vozidla napr. zmenu žiadanej hodnoty prúdu pomocou oneskorovacieho člena?
6. Aký charakter majú zmeny frekvencie kompenzovanej siete a ako ich možno v prípade použitia aktívnych filtrov detekovať?
7. Na odhad základnej harmonickej prúdu symetrických m-fázových sústav je možné použiť viacero metód, pričom analýza v komplexnej oblasti je nezávislá na frekvencii (pozn. 3). Pri takejto analýze sa 1f sústavy dopĺňujú o fiktívnu imaginárnu zložku. Do akej miery je použitie novelizovaného FIR filtra efektívnejšie v porovnaní s uvedenými metódami?

h) Vyjadrenie k formálnym náležitostiam DDP

Z formálnych nedostatkov, ktoré však nemajú vplyv na odbornú úroveň DDP, považujem za potrebné ďalej uviesť:

1. DDP je napísaná starostlivo, aj keď sa dizertant pri jej písaní nevyhol niektorým drobným chybám a prepisom. Ako príklad uvádzam: čiarky na začiatku riadkov, písanie ± 1 , písanie mena Kalman, skloňovanie angl. výrazov atď.

2. Niektoré obrázky sú príliš malé na to, aby boli dobre čitateľné. Na druhej strane oceňujem veľmi dobrú grafickú úroveň DDP.
3. Výraz „Unscented Kalman Filter“ mal byť preložený do češtiny, k čomu mohla byť využitá vedecká erudícia a zahraničné skúsenosti autora v danej oblasti.
4. Väčšina doteraz uvedených pripomienok sa týka aj Autoreferátu DDP, ktorý je na stránke <http://www.fel.zcu.cz/files/data/2159>.

i) Záver

Doktorandská dizertačná práca Ing. Jakuba Tallu preukazuje schopnosť doktoranda vedecky pracovať. Jej výsledkom je nielen analýza a syntéza metód umelej inteligencie v elektrických pohonoch a výkonovej elektronike, ale aj ich implementovanie v reálnom prostredí. Práca spĺňa podmienky stanovené pre úroveň dizertačných prác. Jadro DDP bolo publikované v domácom časopise a na vedeckých zahraničných a domácich konferenciách.

Vzhľadom na uvedené, doktorandskú dizertačnú prácu odporúčam k obhajobe pred komisiou pre obhajoby dizertačných prác v odbore „Elektronika“ a po jej úspešnej obhajobe

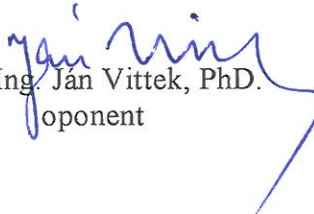
odporúčam

aby bol dizertantovi Ing. Jakubovi Tallovi udelený vedecko-akademický titul

Philosophiae Doctor (PhD.).

V Žiline dňa 17.12.2012

prof. Ing. Ján Vittek, PhD.
oponent



Pozn.:

1. angl. SCENT pochádza z latinského „sentire – citiť“ a znamená okrem čuchového vnemu aj indikáciu alebo pomôcku niečoho, čo má nastať...(predikciu).
2. Robeischl, E, Schroedl M.: Optimized INFORM Measurement Sequence for Sensorless PM Synchronous Motor Drives With Respect to Minimum Current Distortion. IEEE Trans on IA, vol. 40, No. 2, March/April 2004, pp.591-599.
3. Dobrucký, B., Solík, I., Vittek, J.: Časovo-optimálna analýza charakteristických veličín periodických priebehov m-fázových súmerných sústav v komplexnej oblasti. Elektrotechnický obzor, vol.78, č.5, 1989, s.257-320.