

VÝSLEDKY VÝSKUMU V OBLASTI ELEKTRICKÝCH POHONOV A MECHATRONIKY ZA UPLYNULÉ OBDOBIE

RECENT RESEARCH RESULTS IN THE FIELD OF ELECTRIC DRIVES AND MECHATRONICS

Ján Vittek, Valéria Hrabovcová, Rastislav Tabaček

Katedra výkonových elektrotechnických systémov, Elektrotechnická fakulta ŽU v Žiline
Veľký diel ND, 010 26 Žilina, tel.: +421 41 513 2155, e-mail: jan.vittek@fel.utc.sk

Abstrakt Článok predkladá prehľad dosiahnutých výsledkov vo vedecko-výskumnej činnosti zameranej na oblasť *Elektrických pohonov a mechatroniky* v období ostatných troch rokov. Dosiahnuté výsledky sú zostavené do troch samostatných celkov. V oblasti elektrických pohonov sa najvýraznejšie výsledky dosiahli vo vývoji riadiacich algoritmov pre striedavé pohony charakterizované ako riadenie s vnútenou dynamikou, v zdokonalení bezsnímačových metód riadenia a v implementácii navrhnutých metód pomocou digitálnych signálových procesorov. V oblasti elektrickej trakcie sa najdôležitejšie výsledky dosiahli pri optimalizácii výkonu trakčných vozidiel a pri vývoji diagnostických systémov na hodnotenie technického stavu trakčných zariadení. V oblasti elektrických strojov boli najdôležitejšie výsledky dosiahnuté vo vedeckom výskume moderných elektronicke komutovaných elektrických strojov, pri vyšetrovaní ich vlastností v ustálených a prechodových stavoch, nových návrhových metód pre ich konštrukčné usporiadanie a v automatizovanom vyšetrovaní parametrov náhradných schém. V závere je uvedený prehľad najdôležitejších publikácií za všetky tri uvedené oblasti.

Summary The paper presents an overview of research results achieved in the field of *Electrical Drives and Mechatronics* for the period of three years. The achieved outputs are formed into three individual parts. In the field of Electric Drives the most significant outputs have been achieved in the development of a new control algorithms for a.c. drives under general name 'Forced Dynamics Control', in improvement of shaft sensorless control methods and in implementation of developed algorithms via digital signal processors. In the field of Electric Traction the most important results have been gained in optimization of power of traction vehicles and at development of diagnostic systems for evaluation of technical conditions of traction devices. In the field of Electric Machines the most important outputs have been achieved in the research of modern electronically commutated electrical machines, their performances in steady and transient states, new design method for their configuration and new methods for automatic parameters identification. In the end the list of the most important publications for all three parts is enclosed.

1. ÚVOD

Charakteristickou črtou pre každého vedeckopedagogického pracovníka je aj výskumná činnosť, ktorá dotvára jeho vedecký profil. Cieľmi vedecko-výskumných aktivít orientovaných na "**Elektrické pohony a mechatroniku**" na úrovniach od fakultného výskumu až po medzinárodný bilaterálny projekt preto sú:

- hlboká teoretická analýza vybraných vedeckých problémov s cieľom dosiahnutia pôvodných výsledkov s možnosťou ich publikovania ako vedeckej monografie, v odborných časopisoch a na vedeckých konferenciách,
- vedecká výchova a zapájanie do výskumných projektov mladých pedagógov a doktorandov oddelenia,
- spolupráca s externými vedecko-výskumnými organizáciami, ako aj aplikácie dosiahnutých výsledkov v praxi,
- v neposlednej miere aj aplikácia výsledkov vedy a výskumu priamo vo výučbe inžinierskeho a doktorandského štúdia v štúdijských zameraniach **elektrické pohony a elektrická trakcia**.

Oddelenie má preto do svojej štruktúry organicky integrovanú aj ďalšiu sekciu, ktorou sú **elektrické stroje**.

Keďže každá sekcia sa aktívne venuje vedecko-výskumnej činnosti v zodpovedajúcej oblasti, v ďalšom texte budú uvedené dosiahnuté výsledky pre každú sekciu samostatne.

2. ELEKTRICKÉ POHONY

Výskumná činnosť v oblasti elektrických pohonov úzko nadviazala na výsledky dosiahnuté v rámci projektu **INCO Copernicus** č. 960169 „**UCODRIVE**“ schváleného a financovaného Európskou komisiou, ktorého hlavným cieľom bolo vyvinúť novú generáciu striedavých elektrických pohonov bez snímača na hriadeli. Nosnou myšlienkou projektu bolo rozšíriť bežné metódy vektorového riadenia rýchlosti striedavých elektrických motorov o „**riadenie s vnútenou dynamikou**“. Táto nová metóda riadenia umožňuje dodržať nielen vzájomnú kolmost vektorov statorového prúdu a rotorového magnetického toku a tým dosahovať najvyšší moment stroja a dobrú dynamiku pohonu, ale ponúka aj relatívne presnú realizáciu viacerých dynamických oziev, ktoré si môže zvoliť užívateľ pohonu. Celé riadenie tak, ako to predpokladalo zadanie projektu, bolo koncipované bez snímača na hriadeli.

Po skončení projektu Copernicus sa ďalšie práce na tejto metóde riadenia uskutočnili v rámci grantu prideleného slovenskou grantovou agentúrou VEGA, ktorý

mal č. 1/6111/99 a názov „Výskum a vývoj nových rýchlostne riadených bezsnímačových pohonov s predpísanou spätnoväzobnou dynamikou pre trakčné aplikácie“. V laboratóriu riadených elektrických pohonov sa s významnou pomocou EVPÚ Nová Dubnica dobudovali zariadenia potrebné pre experimentálne overovanie navrhnutých algoritmov a ich odskúšanie nielen v stave naprázdno, ale aj pri zaťažení. V rámci tohto výskumu sa metódy riadenia s vnútenou dynamikou aplikovali aj na riadenie rýchlosti striedavých pohonov so snímačom na hriadieli.

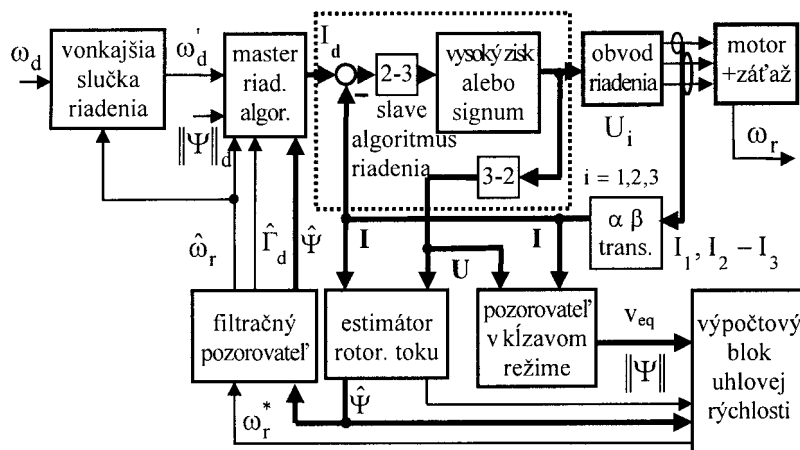
Podstatnou mierou sa však počas výskumu zdokonalilo pôvodné bezsnímačové riadenie, ktoré dovtedy dosahovalo strednú presnosť riadenia t.j. $\cong \pm 5\%$ tým, že sa pôvodné riadiace štruktúry rozšírili o vonkajšie riadiace slučky pracujúce:

- v kľzavom režime
- s adaptívnym riadením na báze referenčného modelu.

Navrhnuté spôsoby riadenia, ktoré podstatne zlepšili jeho presnosť sa experimentálne overili na vybudovanom laboratórnom zariadení nižšieho výkonu (cca 180 W) a neskôr aj na zariadení vyššieho výkonu (cca 1,5 kW). Experimentálne zariadenie v oboch prípadoch pozostáva z asynchrónneho motora a synchronného mo-

tora (resp. z jednosmerného motora s cudzím budením), z ktorých jeden slúži na zaťažovanie a z tranzistorového striedača riadeného cez počítač. Riadiaci algoritmus realizuje počítač so zabudovanou PC-Lab kartou. PC-Lab kartou sa snímajú a vyhodnocujú dva satorové prúdy príslušného motora a napätie jednosmerného medziobvodu, ktorý je vstupom striedača. Jeden zo vstupov PC-Lab karty sníma aj skutočnú uhlovú rýchlosť rotora (pri bezsnímačovom riadení len pre registračné účely), čo umožňuje počas rozbehu motora porovnávať reálnu nábehovú krivku rýchlosti s ideálnou ozvou vypočítanou na základe žiadanej funkcie pre rozbeh (referenčný model).

Podstatné zlepšenie celého riadiaceho systému sa dá očakávať od implementácie riadiacich algoritmov pomocou digitálnych signálnych procesorov (k dispozícii sú DSP od firiem Texas Instrument, Analog Devices a Motorola). To by malo viesť ku kratším vzorkovacím intervalom, čo by malo podstatne prispieť k vyhladeniu prúdov motora. Taktiež zosilnenia korekčných slučiek pozorovateľov sú priamo úmerné vzorkovacím frekvenciám. V prípade ich zvýšenia by bolo možné zvýšiť aj zosilnenia pozorovateľov, čo sa odrazí v ich kvalitnejších a presnejších odhadoch pozorovaných veličín a tým aj vo zvýšenej presnosti celého riadiaceho systému.



Obr. 1. Bloková schéma vyvíjaných riadiacich systémov pre striedavé pohony
Fig. 1. Block scheme of developpe control systems for alternate drives

Experimentálne overenie riadenia ako aj dosiahnuté výsledky umožnili ich medzinárodnú prezentáciu v rámci konferencie EPE-PEMC 2002 (European Power Electronics, Power Electronics and Motion Control), ktorá sa konala v sept. 2002 v Dubrovniku a v Cavtate, Chorvátsko. Špeciálna sekcia, ktorú viedol prof. Vittek, mala názov „Nelineárne riadenie striedavých pohonov a odhadovanie rýchlosti“ a prispeli do nej renomovaní autori z Veľkej Británie, Poľska a Česka a Slovenska. Po dvojročnom období, na ktoré boli pridelené finančné prostriedky grantu a jeho skončení, výsledky dosiahnuté

v rámci tohto výskumu **zhodnotila** grantová agentúra **VEGA ako vynikajúce**.

V súčasnosti výskum oddelenia pokračuje v rámci bilaterálneho projektu udeleného Zmiešanou česko-slovenskou komisiou. Projekt má č. 016/023 a názov „Analýza moderných elektrických pohonov - výskum a vývoj regulovaných elektrických pohonov bez snímača na hriadieli so širokým spektrom aplikácií“.

Hlavná pozornosť sa v súčasnosti sústreďuje na doplnenie už vyvinutého riadenia rýchlosti o polohové riadenie, čo je ďalšou z výhod riadenia pomocou vnútenej dynamiky. Relatívne jednoduchým doplnením riadenia

rýchlosti s vnútenou dynamikou o nadradenú polohová spätnú väzbu (*podobne ako to bolo s doplnením vonkajších riadiacich slučiek na zlepšenie presnosti riadenia*) je možné realizovať polohovú reguláciu. Na vývoji algoritmov pre polohové riadenie sa naďalej úzko spolupracuje s University of East London, UK, konkrétne s prof. Stephenom J. Doddsom a dr. Royom Perrymanom. Prvé experimentálne výsledky potvrdili, že takéto riešenie je reálne, aj keď sa v tomto prípade využíva snímač polohy. Tu sa otvára priestor pre ďalší výskum a vývoj odhadovania polohy rotora synchronného motora pomocou injekovania vyšších harmonických, prípadne inými metódami, čo by prispelo nielen k bezsnímačovému riadeniu polohy, ale aj k podstatnému zvýšeniu rozsahu riadenia rýchlosti pôvodných riadiacich algoritmov, ktoré pracovali bez snímača na hriadieli.

Ďalšie rozšírenie riadenia polohy striedavých strojov je časovo-optimálne riadenie, pri ktorom sa môže využiť plný moment motora, takže žiadaná poloha sa dosahuje v optimálnom čase. Prvé experimentálne výsledky potvrdili dobrú zhodu s teoretickými predpokladmi, za ktorých boli riadiace algoritmy pre približne časovo-optimálne riadenie navrhnuté a realizované. Bezsnímačové určovanie polohy hrá aj v tomto prípade dôležitú úlohu, ktorá už bola spomenutá v predchádzajúcom odstavci.

Ako zhodnotenie výskumnej činnosti sekcie Elektrických pohonov možno uviesť, že vyvinuté riadiace systémy pre asynchrónne a synchronné motory sú funkčné a reálne môžu tvoriť základ pre novú generáciu striedavých elektrických pohonov. Napriek tomu je tu ešte dostatok priestoru na ďalšie zlepšenia nielen čo sa týka presnosti a robustnosti riadiaceho systému, ale hlavne v realizácii riadenia na bázi mikropočítačov, čo bude jedna z podmienok pre priame priemyslové aplikácie.

3. ELEKTRICKÁ TRAKCIA

Výskumná činnosť sekcie je zameraná hlavne na konkrétne aplikácie v odvetví dopravy a to v prevádzke, v projekcii i výrobe.

3.1. Elektrické trakčné zariadenia. Práce vyplývajúce z výskumnej úlohy VÚ EF-B-079/94: „*Racionalizácia a modernizácia elektrických trakčných zariadení*“ boli orientované na tvorbu simulačných programov pre racionalizáciu a modernizáciu projektovania a prevádzky koľajovej železničnej a mestskej dopravy. S využitím výpočtových programov sa vykonali trakčné a energetické výpočty bratislavského metra, výpočty a optimalizácia tachogramov na trati Ostrava-Petrovice-štátna hranica, trakčné a energetické výpočty na TEŽ, výpočty pre dimenzovanie nezávislého elektrického pohonu pre rušne 110, 111, 121 ČD a úpravu týchto rušňov na dvojzdrojové, Optimalizácia riešenia železničného uzla Bohumín pre ČD, Automatizácia riadenia hnacích vozidiel ŽSR 363 a 773.

3.2. Optimalizácia výkonu trakčných vozidiel. V rámci fakultnej úlohy VU EF-18/603-02-XII 03: „*Simulácia jazdy vlaku a jeho riadenie pri pohone s asynchrónnym motorom*“ je riešený program pre stanovenie optimálnych parametrov a dimenzovanie menovitého bodu trakčného motora vozidiel s asynchrónnym trakčným motorom. Program umožňuje simuláciu pohonu so statickým modelom asynchrónneho motora vrátane simulácie jazdy vozidla s takýmto pohonom. Program bol aplikovaný v ČKD Praha, Dopravní systémy. Podobný výpočtový program bol vytvorený aj pre potreby EVPÚ Nová Dubnica, kde sa používa pri simulácii jazdy rušňa 774 AC s plne striedavou výzbrojou a pre výpočty prúdov motorov v režime jazda a brzda.

Súčasťou úlohy bolo riešenie systému riadenia spolupráce dieselového motora s trakčným generátorom pri prenose výkonu s asynchrónnymi trakčnými motormi. V súčasnosti sa tvorí program pre simuláciu dynamického modelu ASM vrátane modelu vektorového riadenia a výpočtu hlavných parametrov ASM trakčných charakteristík vozidiel s týmto pohonom.

3.3 Hodnotenie technického stavu trakčných zariadení. Okrem uvedených prác sme zapojení do riešenia programu pre plánovanie údržby a opráv infraštruktúry ŽSR – pilotný projekt ŽSR PP 5.4. Navrhli sme optimálnu metodiku diagnostiky a hodnotenia technického stavu zariadení elektrickej trakcie. Stanovili sa parametre a charakteristiky hodnotenia zostáv trakčného vedenia a napájacích staníc pre diagnostický systém a v súčasnosti sa pracuje na programe pre riadenie údržbových prác týchto zariadení na základe hodnotenia parametrov získaných diagnostickými meraniami.

Treba ešte spomenúť medzinárodnú spoluprácu v rámci európskeho programu FP 5, kde sme v r. 2002 v spolupráci s Vydialom trakcii elektrycznej Politechniky Warszawa spracovali časť: „UserGroup and InfoBank to support rail interoperability GMA2 2000“.

V súčasnosti práce pokračujú na riešení trakčného asynchrónneho pohonu a jeho riadenia v úlohe uvedenej v bode 2.2.2 a pri riešení podľa bodu 2.2.3.

4. ELEKTRICKÉ STROJE

V ostatnom období vedecký výskum v oblasti elektrických strojov je venovaný jednak novým druhom elektronicky komutovaných elektrických strojov, jednak klasickým indukčným motorom a synchronným strojom s permanentnými magnetmi. V oboch prípadoch je vedecký výskum založený na hlbokéj analýze vlastností týchto strojov vykonávanej modernými metódami s využitím výpočtovej techniky a sústreďuje sa na tieto oblasti:

4.1. V oblasti indukčných strojov a synchronných strojov s permanentnými magnetmi, ktoré sú určené na trakčné aplikácie, sa pozornosť sústreďuje na vyšetrovanie parametrov ich náhradných schém modernými

metódami automatizovanej identifikácie a na optimalizáciu konštrukčného usporiadania týchto druhov elektrických strojov. Výskum nadväzuje na návrh, spracovanie, simuláciu a implementáciu automatizovanej *off-line* deterministickej a stochastickej metódy identifikácie parametrov v súvislosti s aplikáciou na vektorovo-orientované riadenia indukčných strojov a princíp online deterministickej adaptácie odporu rotora, ktoré boli vykonané v predchádzajúcom období v rámci doktorskej dizertačnej práce. Za túto prácu bola autorovi Ing. Ladislavovi Janouškovi, PhD. udelená cena Wernera von Siemens Excellence Award za školský rok 2001/2002 v kategórii doktorandských dizertačných prác.

4.2. V oblasti spínaného reluktančného stroja je hlavná pozornosť venovaná generátorickej oblasti, vyšetruje sa pracovný rozsah samostatne pracujúceho spínaného reluktančného generátora pre rôzne druhy záťaže a pre rôzne otáčky. Tento generátor má šancu vykazovať veľmi dobré vlastnosti z hľadiska možných minimálnych geometrických rozmerov a jeho širokého pracovného rozsahu. Nadväzuje sa na predtým vypracovaný a odvodený lineárny a nelineárny matematický model, na riešenie prechodových dejov spínaného reluktančného motora (SRM), na jeho podrobnú identifikáciu dôležitých parametrov, ktorými sú indukčnosť, spriahnutý magnetický tok a statické charakteristiky momentu pomocou meracích metód, metódy konečných prvkov a analytickým výpočtom. Bola tiež vykonaná analýza strát a účinnosti meraním a výpočtom. Straty v železe boli analyticky vypočítané z odvodených tvarov spriahnutého magnetického toku pre jednotlivé časti motora. Cieľom je spracovať základné zásady metodiky konštrukčného návrhu spínaného reluktančného stroja, ktorá zabezpečí, že vyrobený stroj bude vykazovať predpokladané vlastnosti.

4.3. V oblasti reluktančného synchronného motora (RSM) sa vedecký výskum sústreďuje na optimalizáciu konštrukčného usporiadania bariérových rotorov a celkové zlepšenie ich kvalitatívnych ukazovateľov. Výskum nadväzuje na simulačnú analýzu bezkietkového a kietkového RSM v dynamických stavoch a výsledky získané analýzou nového konštrukčného usporiadania RSM s axiálne vrstveným rotorom, ktorý z hľadiska kvalitatívnych ukazovateľov je schopný konkurovať asynchrónnemu motoru a pritom si udržať svoje výhodné vlastnosti.

LITERATÚRA

- [1] HRABOVCOVÁ, V.; JANOUŠEK, L.; RAFAJDUS, P.; LIČKO, M.: *Moderné elektrické stroje*, vydavateľstvo **EDIS** Žilinská univerzita, máj 2001, 265 strán, ISBN 80-7100-809-5.
- [2] HRABOVCOVÁ, V., LIČKO, M.: *Reluktančný synchronný motor*, vydavateľstvo **EDIS**, Žilinská univerzita, 2001, monografia, ISBN 80-7100-891-5.
- [3] BEDNÁRIK, B., POSPÍŠIL, M., FECURA, T., LEHOCKÝ, P.: Elektrické pohony dielelektrických vozidiel. **EDIS**, Žilinská univerzita v Žiline, 2001, učebný text, ISBN 80-8070-038-9
- [4] LOUKYANOV, A. G., UTKIN, V. A., DODDS, S. J., VITTEK, J.: *Block Control Principle for Time Varying Plants*, **International Journal of Control**, vol. 74, r. 2001, č. 13, s. 1335 - 1352.
- [5] VITTEK, J., RAPŠÍK, M., BUDAY, J.: *Shaft Sensorless Direct Vector Control of Induction Motor*, Zborník abstraktov 10. konferencie **EPE-PEMC'02**, Špeciálna sekcia: *Nelineárne riadenie striedavých pohonov a odhadovanie rýchlosti*, sept. 2002, Cavtat - Dubrovnik, Chorvátsko, s. 88 a CD Rom.
- [6] VITTEK, J., ALTUS, J., DODDS, S. J., PERRYMAN, R.: *Vector Controlled Reluctance Synchronous Motor Drives with Prescribed Closed-Loop Dynamics*, **Automatika**, Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications, KoREMA, Chorvátsko, vol. 42, r. 2001, č. 1-2, s. 29 - 36.
- [7] RAFAJDUS, P.; KOSTECKÝ, P.; HRABOVCOVÁ, V., KOHÚT, I.: *High-Order FEM Analysis of Electromagnetic Fields*, **Compel**, The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 19, č. 2, r. 2000, s. 323 - 331.
- [8] VITTEK, J., ALTUS, J., BEDNÁRIK, B., DODDS, S. J., PERRYMAN, R.: *Výskum nových bezsúčinných rýchlostne riadených pohonov s asynchrónnymi motormi pre trakčné aplikácie. Research of A New Sensorless Speed Controlled Drives with Induction Motors for Traction Applications*, **Komunikácie/Communications**, Vedecké listy Žilinskej univerzity, **ŽU EDIS**, r. 2001, č. 2-3, s. 5 - 15.
- [9] TABAČEK, R., VITTEK, J.: *Elektrická výzbroj hnacích koľajových vozidiel - súčasný stav a perspektívy. The Electric Equipment of Traction Vehicles - Current Development and Perspectives*, **Komunikácie/Communications**, Vedecké listy Žilinskej univerzity, **ŽU EDIS**, r. 2001, č. 2-3, s. 114 - 120.
- [10] RAFAJDUS, P.; HRABOVCOVÁ, V.; JANOUŠEK, L.; HUDÁK, P.: *Spínaný reluktančný motor a jeho využitie v trakčnej aplikácii*, **Komunikácie/Communications**, Vedecké listy Žilinskej univerzity, **ŽU EDIS**, r. 2001, č. 2-3, s. 38 - 47.