

Vyšetřování harmonických v trakci

(2. část – dokončení)

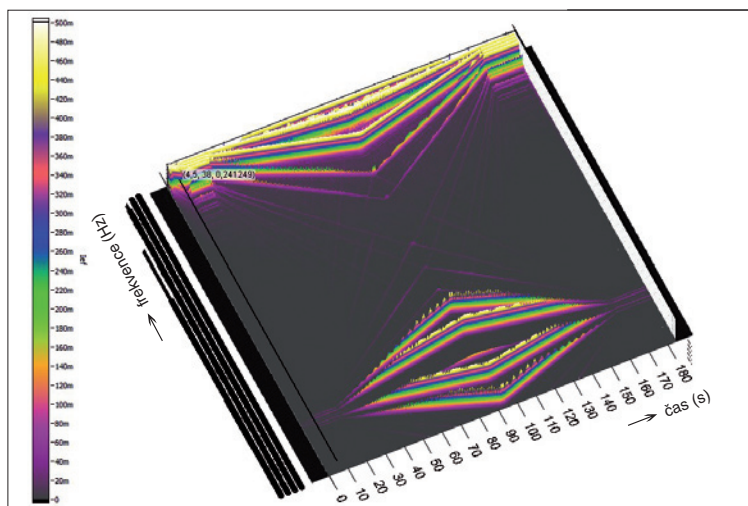
doc. Ing. Jaroslav Novák, CSc., doc. Ing. Radovan Doleček, Ph.D., Ing. Ondřej Černý, Ph.D.,
Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice
Ing. Jan Švanda, Škoda Electric, a. s.

5. Výsledky měření

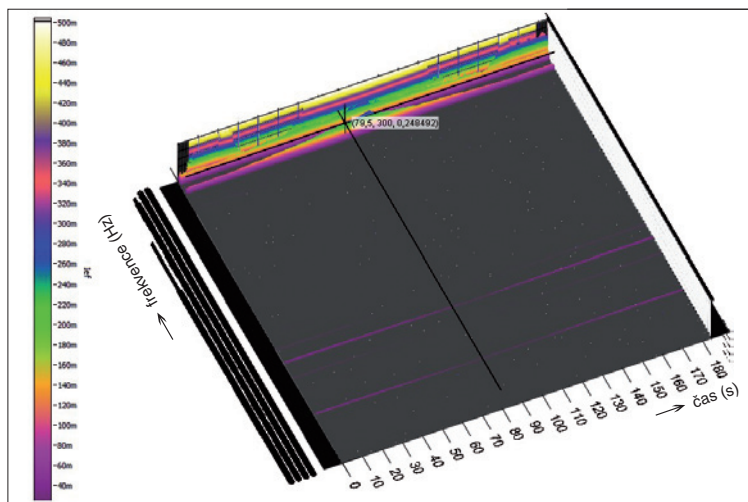
Pro účely vyšetřování harmonické skladby proudů v obvodu trakčního pohonu s PMSM byla na experimentálním pracovišti vykonána série měření. Při měření byly snímány a následně vyhodnocovány průběhy proudů ve fázích motoru a proud ve vstupním stejnosměrném obvodu trakčního pohonu, tj. proud filtrační tlumivky. Proudly byly snímány galvanicky oddělenými sondami 100 kHz pracujícími na principu Hallova jevu. Spínací frekvence šířkově pulzní modulace střídače byla 5 kHz. Většina měření probíhala při rozběhu a následném zpomalování pohonu po pomalé rampě. Šlo o frekvenční rampu měniče zatěžovacího asynchronního motoru. PMSM byl provozován se zpětnovazební regulací momentu. Při vyhodnocování měření se vychází z třírozměrných grafů s osami času, frekvence harmonické složky a efektivní hodnoty příslušné harmonické složky. Při vyhodnocování měření byl sledován vliv parametrů vstupního filtru trakčního střídače, předřadného rezistoru před střídačem, zatížení pohonu a režimu pohonu na harmonická spektra proudů při různých frekvencích základní harmonické složky proudu na výstupu střídače. Jak se ukázalo po vyhodnocení měření, zvláštní pozornost si zasluhuje spektrum subharmonických složek, které jsou v průbězích fázových proudů i v průběhu vstupního proudu pohonu – proudu filtrační tlumivky – významně zastoupeny. Této oblasti je věnován největší prostor v následujícím textu a zobrazeních.

Na obr. 7 je spektrální mapa proudu motoru pro rozsah harmonických složek 0 až 6 000 Hz. Efektivní hodnotu harmonických složek proudu je možné odečíst v rozsahu 0 až 500 mA podle barevné stupnice. Parametry filtru byly $L = 3$ mH, $C = 4,7$ mF, moment motoru byl 70 %. Ve spektrální mapě jsou zřejmá postranní pásma daná součtem, popř. rozdílem základní a třetí harmonické (během experimentů 0 – 238 – 0 Hz) a frekvence šířkově pulzní modulace (5 kHz). Dále jsou výrazné průběhy 1., 3., 5. a 7. harmonické. Kromě toho je zřejmé, že pod hodnotou první harmonické jsou poměrně velké hodnoty subharmonických složek, které budou znázorněny v detailech dále.

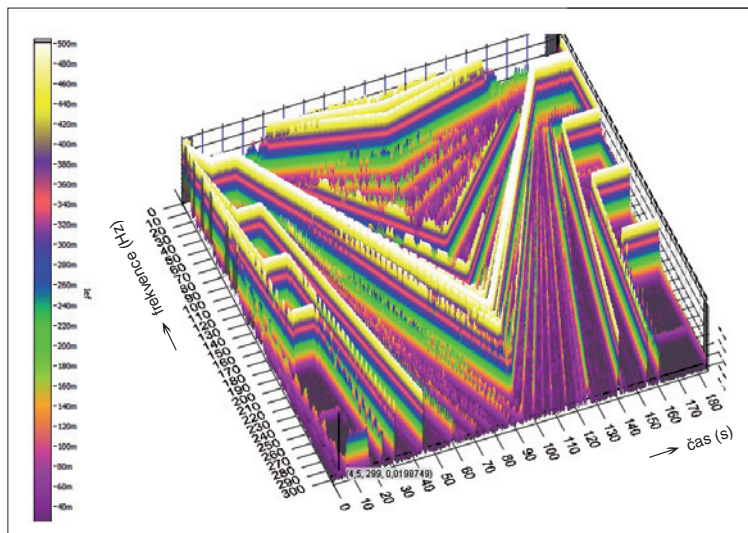
Na obr. 8 je spektrální mapa stejnosměrného proudu filtrační tlumivky naměřená za stejných podmínek jako u obr. 7. Z obr. 8 je zřejmé, že frekvence dané šířkově pulzní modulací (4 a 5 kHz) jsou vyjádřeny jen málo, jsou dostatečně filtrovány. Výrazněji jsou vyjádřeny frekvence 100 a 300 Hz, jejichž pří-



Obr. 7. Spektrální mapa rozběhu a zpomalování pohonu – proud motoru



Obr. 8. Spektrální mapa rozběhu a zpomalování pohonu – proud filtrační tlumivky



Obr. 9. Spektrální mapa rozběhu a zpomalování pohonu (proud motoru) detail pro harmonické do 305 Hz

tomnost je dána činností vstupního síťového šestipulzního diodového usměrňovače. Pod těmito frekvencemi je vyjádřena první harmonická proudů motoru, a zejména nutná stejnosměrná složka.

Obr. 9 zachycuje stejnou situaci jako obr. 7, avšak v detailu pro harmonické do 305 Hz. Kromě první harmonické jsou výrazně zastoupeny subharmonické složky s frekvencemi rovnými $1/22$ a $1/11$ první harmonické statorového proudu a dále jejich násobky.

Pro stejný detail frekvencí a pro stejné podmínky je spektrální mapa stejnosměrného proudu filtrační tlumivky znázorněna na obr. 10. Kromě frekvencí 100 a 300 Hz, daných činností vstupního usměrňovače, je na průběhu základní harmonické proudu fáze motoru zřejmé zvýšení velikosti v okolí rezonanční frekvence filtru 42 Hz. Opět jsou silně vyjádřeny subharmonické složky. Detail subharmonických složek je na obr. 11.

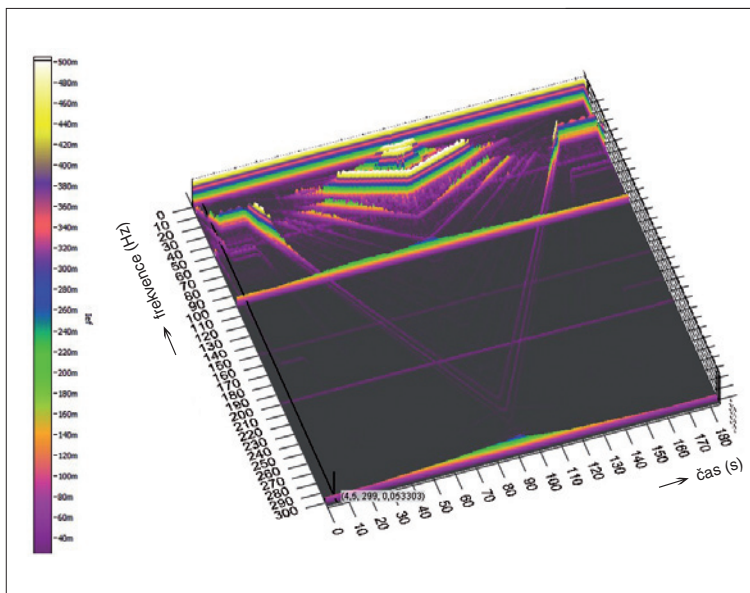
Z obr. 11 je zřejmé, že jsou nejvíce vyjádřeny subharmonické složky $1/22$ první harmonické střídavého proudu a její 1,5-, 2-, 3- a 4násobek. Šesti- a osminásobek jsou zesíleny pouze v oblasti rezonanční frekvence filtru.

Příčiny vzniku subharmonických složek proudů v trakčním obvodu mohou mít dvojí podstatu – může jít o vliv mechanických jevů spojených s nerovnoměrnostmi otáčecí kola a s funkcí homokinetického kloubu spojovacího hřídel motoru s kolem, může jít i o vlivy specifické konstrukce trakčního synchronního motoru s permanentními magnety. Tento stroj je na experimentálním pracovišti se 44 póly. Nejnižší frekvence subharmonické složky je dána $1/22$ první harmonické proudu motoru, tj. odpovídá frekvenci jedné mechanické otáčky. Mnohapólové pomaluběžné bezpřevodkovkové synchronní stroje s permanentními magnety se konstruují tak, že počet pólů statoru se mírně liší od počtu pólů rotoru. Důvodem této konstrukce je omezení reluktančního momentu stroje. Při větších otáčkách motoru roste výkon a proud ve stejnosměrném vstupním filtru, tj. i velikost těchto subharmonických složek, které jsou však díky nízké frekvenci obtížně odfiltrovatelné.

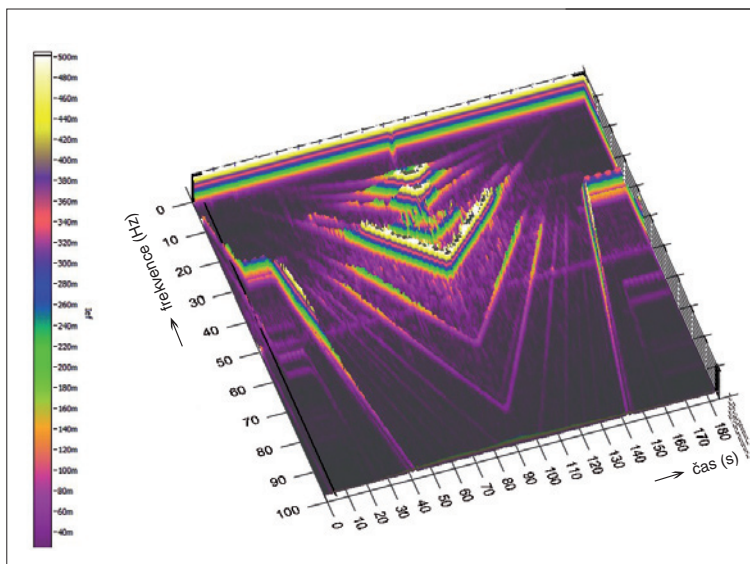
Na obr. 12 až obr. 15 lze sledovat vliv zatížení motoru, parametrů filtru na vstupu střídače a rezistoru řazeného sériově ve vstupu střídače na velikost těchto subharmonických složek.

Na obr. 12 je spektrální mapa stejnosměrného proudu filtrační tlumivky analogická k obr. 10, měření však bylo vykonáno při menším zatěžovacím momentu 20 %. Ze srovnání obr. 10 a obr. 12 je zřejmé, že s menším zatěžovacím proudem a momentem se sníží i efektivní hodnoty harmonických složek vstupního proudu trakčního střídače.

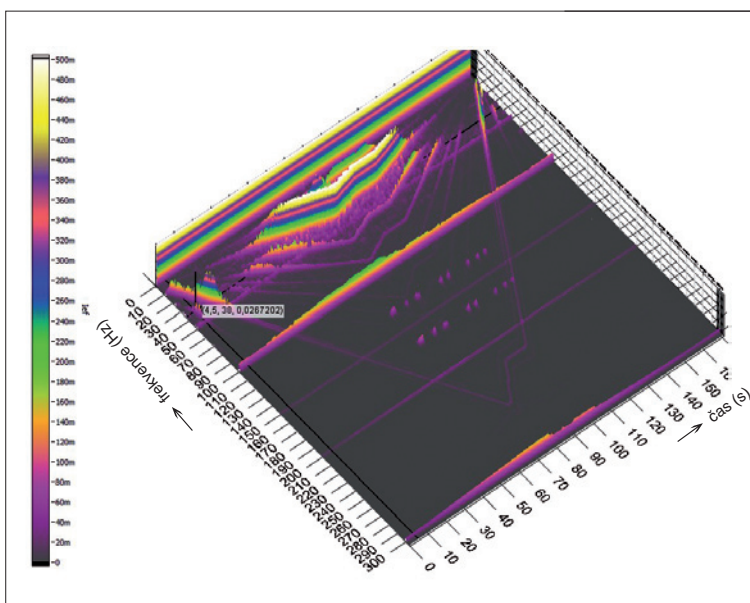
Na obr. 13 je spektrální mapa stejnosměrného proudu filtrační tlumivky při zatěžovacím momentu 70 % a při parametrech vstupního filtru $L = 1$ mH, $C = 4,7$ mF, tj. při sní-



Obr. 10. Spektrální mapa rozběhu a zpomalování pohonu (proud filtrační tlumivky) detail pro harmonické do 305 Hz



Obr. 11. Spektrální mapa rozběhu a zpomalování pohonu (proud filtrační tlumivky) detail pro harmonické do 100 Hz



Obr. 12. Spektrální mapa rozběhu a zpomalování pohonu (proud filtrační tlumivky) detail pro harmonické do 305 Hz, moment motoru 20 %

žené indukčnosti filtrační tlumivky. Je zřejmé, že jsou výrazně více vyjádřeny frekvence 100 a 300 Hz, které korespondují s frekvencí zvlnění napětí na výstupu síťového diodového usměrňovače. Frekvence 100 Hz leží navíc v blízkosti rezonanční frekvence filtru. Ve spektru je výrazně znatelné navýšení velikostí všech harmonických složek; výrazné je zvýšení zejména subharmonických složek a složky, která má frekvenci první harmonické proudu motoru.

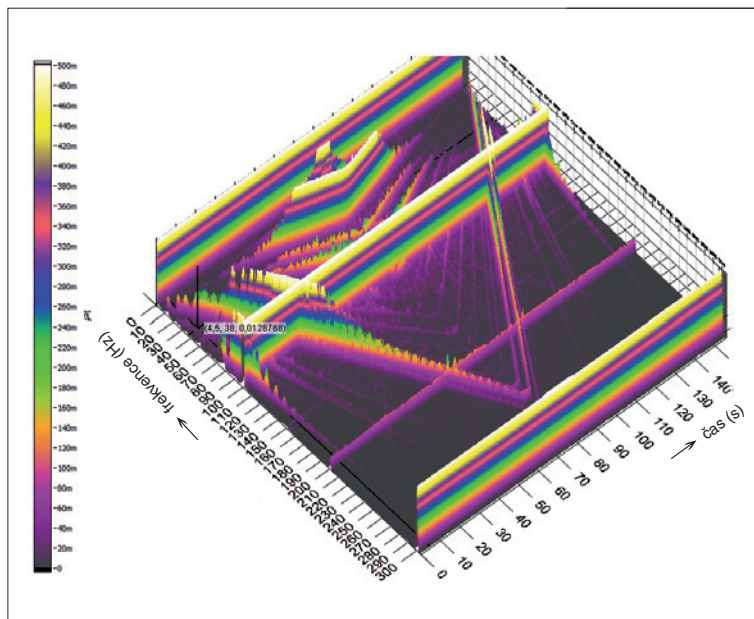
Na obr. 14 je spektrální mapa stejnosměrného proudu filtrační tlumivky při zatěžovacím momentu 20 % a při parametrech vstupního filtru $L = 4 \text{ mH}$, $C = 6,9 \text{ mF}$. Je zde zřejmé výrazné omezení harmonických složek s frekvencemi nad hodnotou rezonanční frekvence filtru s výjimkou 100 a 300 Hz. Zároveň je patrné zvýšení harmonických složek při přechodu v okolí rezonanční frekvence filtru.

Na obr. 15 je spektrální mapa stejnosměrného proudu filtrační tlumivky pro základní parametry filtru $L = 3 \text{ mH}$, $C = 4,7 \text{ mF}$ při momentu motoru 70 % při zařazeném předřadném rezistoru 2Ω , zapojeném v sérii s filtrační tlumivkou. Z obr. 15 je zřejmé, že předřadný rezistor tlumí harmonické složky ve vstupním stejnosměrném proudu pohonu velmi výrazně.

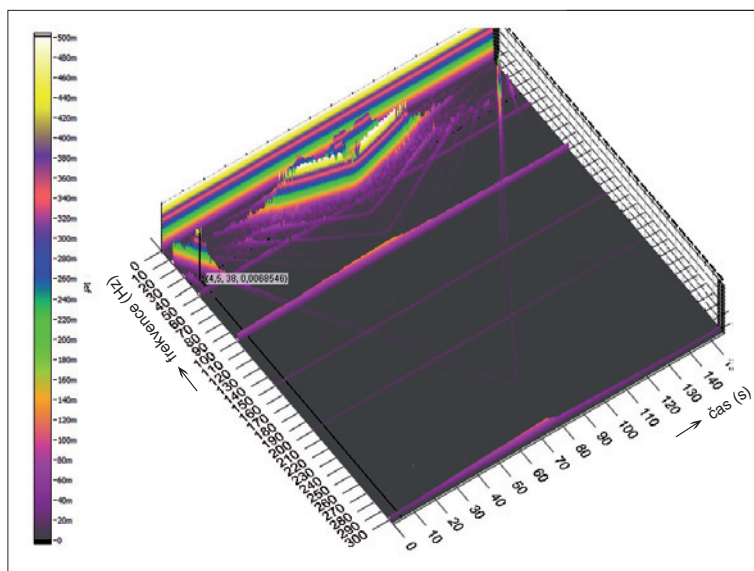
6. Závěry

Vykonaná měření jsou úvodním příspěvkem k řešení problematiky rušivých vlivů trakčních pohonů se synchronními motory s permanentními magnety. Měřilo se na jednom trakčním motoru (obr. 16) s konfigurací obvodu, ve které byly možnosti modifikace parametrů pouze omezené. I v tomto případě však měření přinesla některé velmi zajímavé výsledky. Mnoho vlastností pohonu z hlediska rušivých vlivů je velmi podobných vlastnostem vyskytujícím se u pohonů s asynchronními trakčními motory. Do této skupiny vlastností patří zejména vyjádření frekvence šířkově pulzní modulace střídače ve spektrálních mapách proudů pohonu, vyjádření násobků frekvencí síťového střídavého napájecího napětí v proudu filtrační tlumivky, vyjádření 1., 3., 5. a 7. harmonické v proudu motoru a 1. harmonické v proudu filtrační tlumivky, vyjádření rezonanční frekvence filtru v proudu filtrační tlumivky a výraznější omezení harmonických složek s frekvencemi vyššími, než je rezonanční frekvence vstupního filtru střídače v proudu filtrační tlumivky.

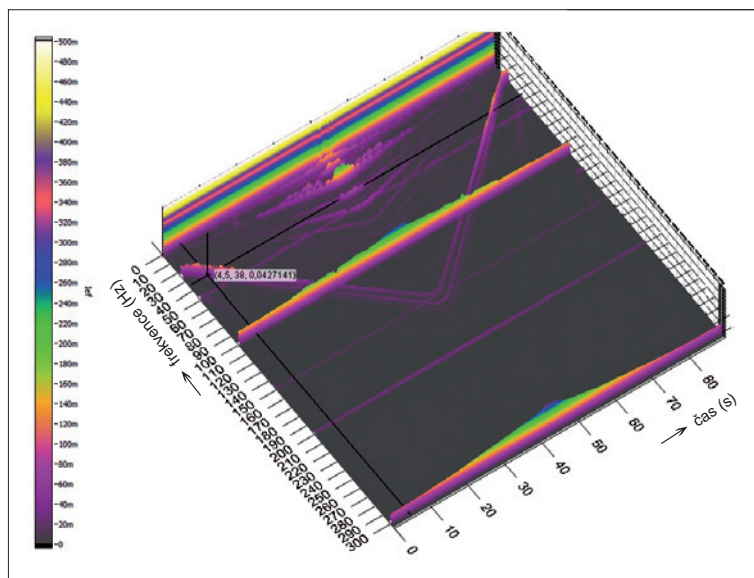
Kromě těchto výsledků se však projevíly závažné jevy, které souvisejí s konstrukčními specifiky synchronních motorů s permanentními magnety pro pomaluběžné bezpřevodkové trakční pohony. Tyto motory jsou konstruovány jako mnohapólové – měřený motor měl 44 pólů. V naměřených průbězích proudů motoru i proudů vstupní filtrační tlumivky střídače jsou výrazně vyjádřeny subharmonické složky, jejichž nejnižší



Obr. 13. Spektrální mapa rozběhu a zpomalování pohonu (proud filtrační tlumivky) detail pro harmonické do 305 Hz, moment motoru 70 %, parametry filtru $L = 1 \text{ mH}$, $C = 4,7 \text{ mF}$

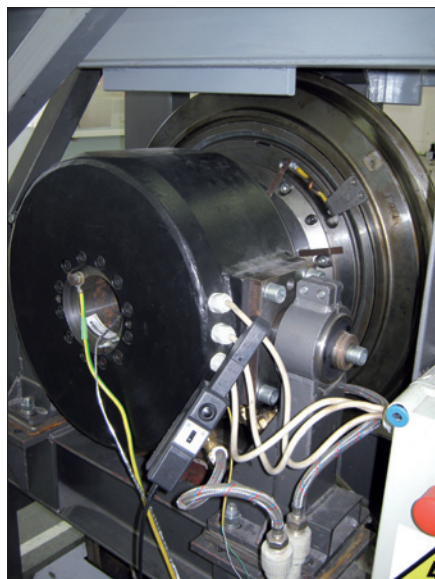


Obr. 14. Spektrální mapa rozběhu a zpomalování pohonu (proud filtrační tlumivky) detail pro harmonické do 305 Hz, moment motoru 20 %, parametry filtru $L = 4 \text{ mH}$, $C = 6,9 \text{ mF}$



Obr. 15. Spektrální mapa rozběhu a zpomalování pohonu (proud filtrační tlumivky) detail pro harmonické do 305 Hz, moment motoru 70 %, parametry filtru $L = 3 \text{ mH}$, $C = 4,7 \text{ mF}$, zařazen předřadný rezistor 2Ω

frekvence je rovna frekvenci mechanických otáček motoru. Násobky, zejména dvojnásobek, této frekvence jsou ve spektrech vyjádřeny velmi výrazně. Tyto vlastnosti po-



Obr. 16. Motor měřeného pohonu s měřicí sondou proudu

honů s PMSM mohou být velmi závažné při konstrukcích motorů pro výkonná železniční vozidla, neboť subharmonické složky lze velmi obtížně filtrovat a přitom mohou kolí-

dat při určitých rychlostech vozidla s frekvencemi, které využívá drážní zabezpečovací zařízení. Proto se jeví jako nezbytné mít tuto problematiku na zřeteli jak při návrhu filtru a regulační části, tak při návrhu konstrukce trakčního pohonu. Vzhledem ke složitosti, rozsáhlosti a aktuálnosti popisované problematiky bude třeba se tomuto tématu dále věnovat.

Literatura:

- [1] NOVÁK, J: *Uplatnění synchronních strojů v dopravní technice – 1. část*. Časopis Elektro 6/2006, s. 4–7, Praha 2006, ISSN 1210-0889.
- [2] NOVÁK, J: *Uplatnění synchronních strojů v dopravní technice – 2. část*. Časopis Elektro 7/2006, s. 8–11, Praha 2006, ISSN 1210-0889.
- [3] NOVÁK, J: *Uplatnění synchronních strojů v dopravní technice – 3. část*. Časopis Elektro 8/2006, s. 76–78, Praha 2006, ISSN 1210-0889.
- [4] NOVÁK, J. – ČERNÝ, O. – ŠIMÁNEK, J.: *Regulace synchronního motoru pro lehkou kolejovou trakci*. Časopis Elektro 6/2008, s. 4–10. ISSN 1210-0889.
- [5] DOLEČEK, R. – NOVÁK, J. – ČERNÝ, O.: *Traction Permanent Magnet Synchronous Motor Torque Control with Flux Weakening*. Časopis Radioengineering 4/2009, ISSN 1210-2512, vydavatel Vysoké učení technické, Brno.
- [6] LETTL, J., FLÍGL, S.: *Matrix converter hybrid drive system*. WSEAS Transactions on Power Systems, Issue 7, vol. 1, pp. 1217–1222, July 2006, ISSN 1790-5060.



doc. Ing. Jaroslav Novák, CSc., ukončil studium na Fakultě elektrotechnické ČVUT v Praze v oboru silnoproudá elektrotechnika v roce 1989.

V roce 1992 ukončil studium ve vědecké výchově na téže fakultě na Katedře elektrických pohonů a trakce. Od roku 1992 pracoval jako odborný asistent, od roku 2003 jako docent v Ústavu přístrojové a řídicí techniky Fakulty strojní ČVUT v Praze. V letech 1995 až 2001 úzce spolupracoval s firmou Elektrosystém Praha, s. r. o., v oblasti vývoje a využití elektrických pohonů a řídicích systémů v průmyslových aplikacích, od roku 1998 úzce spolupracuje s Dopravní fakultou Jana Pernera (DFJP) Univerzity Pardubice v oblasti elektrických pohonů a mikroprocesorového řízení v dopravní technice. Svou odbornou činnost zaměřuje zejména do oblastí elektrických pohonů, výkonové elektroniky, testování elektromechanických soustav a mikroprocesorového řízení.



doc. Ing. Radovan Doleček, Ph.D., vystudoval Dopravní fakultu Jana Pernera (DFJP) Univerzity Pardubice. Po úspěšném absolvování doktorského studia na DFJP pracoval jako odborný asistent, od roku 2009 jako

docent na Katedře elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě, DFJP Univerzity Pardubice, kde se zabývá problematikou elektromagnetické kompatibility, simulacemi pro drážní systémy a energetikou.



Ing. Ondřej Černý, Ph.D., ukončil studium na Dopravní fakultě Jana Pernera (DFJP) Univerzity Pardubice v roce 2004. Od roku 2004 je asistentem na Katedře elektro-

techniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě, DFJP Univerzity Pardubice, kde v roce 2010 úspěšně ukončil doktorské studium. Zabývá se problematikou řízení pohonů, elektronikou a výkonovou elektronikou.



Ing. Jan Švanda ukončil v roce 2008 studium na ČVUT v Praze, Fakultě elektrotechnické, obor elektroenergetika. V letech 2006 až 2007 studoval na Montanuniversität Leoben. Pracuje ve firmě Škoda Electric, a. s., kde se věnuje problematice měření s důrazem na oblast rušení drážních zabezpečovacích zařízení. Současně je studentem doktorského studia na ČVUT, Fakultě elektrotechnické, na Katedře elektrických

pohonů a trakce.



MOELLER

An Eaton Brand

EATON

Powering Business Worldwide