

Irena Kováčová, Dobroslav Kováč, Matej Bereš, Ján Molnár, Tibor Vince, Iveta Tomčíková,  
Jozef Dziak

## EMC elektrického diskového motora s permanentnými magnetmi

Článok sa zaoberá problematikou jedného z možných spôsobov počítačovej analýzy elektromagnetickej kompatibility (EMC) zameranej na oblasť elektrických strojov, s cieľom jej zlepšenia. Sústreďuje sa taktiež na vyžarovanie elektromagnetického poľa motora a jeho vplyv na okolie.

Kľúčové slová: elektromagnetická kompatibilita; diskový motor s permanentnými magnetmi; elektromagnetické vyžarovanie

The paper deals with the mode of computer analysis of the electromagnetic compatibility (EMC) problems focused on the area of electrical machines and the manner it's improving. A problem of interference between electric motor and surrounding space caused by the electromagnetic field radiation is discussed too. **(EMC of Electric Disk Motor with Permanent Magnets)**

Keywords: electromagnetic compatibility; permanent magnet (PM) disc motor; electro-magnetic field radiation

### I. ÚVOD

V posledných desaťročiach stúpla dôležitosť elektromagnetickej kompatibility (EMC) všetkých elektrických produktov veľmi výrazne [1]. Zvyšovaním elektromagnetického smogu sa kvalita života, ako aj životného prostredia, výrazne zhoršuje. Výkon vyžarovaný elektrickými zariadeniami do okolia sa zdvojnásobuje každé tri roky a pokrýva čoraz širší frekvenčný rozsah. So vzrastom elektronizácie vzrastá aj pravdepodobnosť rušení sa zariadení navzájom. EMC všetkých nových produktov preto musí byť dôsledne vyšetovaná, čo potvrdzuje aj nová technická a ekonomická legislatíva a literárne zdroje [2], [3].

### II. DISKOVÝ JEDNOSMERNÝ MOTOR S PERMANENTNÝMI MAGNETMI

Vo väčšine elektrotechnických systémov je záťaž predstavovaná rezistorom, cievkou alebo motorom. V priemysle sa elektrická energia najčastejšie využíva na premenu na energiu mechanickú, preto sa v ďalšom sústredíme iba na motorickú záťaž. Podľa napájania môžeme motory rozdeliť do dvoch skupín. Prvú tvoria striedavé (AC) a druhú jednosmerné (DC) motory. Z pohľadu EMC by sa DC motory javiť výhodnejšie ako motory AC, vďaka tomu, že ich jednosmerný prúd generuje jednosmerné magnetické pole daného smeru. Pomocou simulácie magnetického poľa diskového DC motora s permanentnými magnetmi (PM) ukážeme, že chybné pochopenie jeho EMC môže viesť k nežiaducim dôsledkom pri prevádzke týchto motorov.

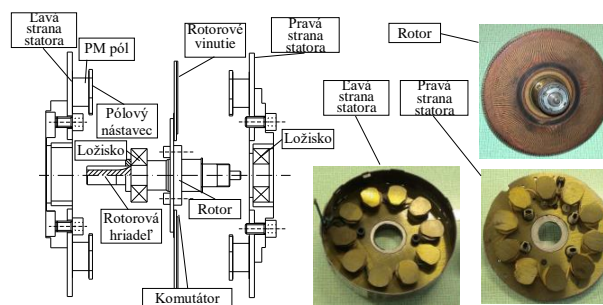
#### A. Konštrukcia motora

Po klasicknej metóde výpočet hlavných parametrov diskového motora ( $U_n = 70$  V,  $I_n = 6$  A,  $P_{In} = 420$  W) je možné začať s vyšetovaním jeho EMC. Na obrázku Obr. 1 je zobrazený motor v rozloženom stave.

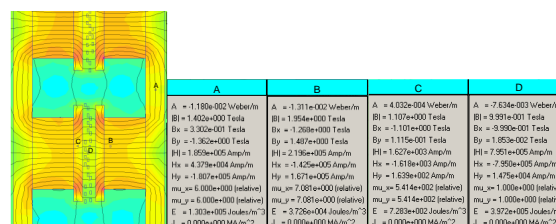
#### B. Numerická počítačová simulácia magnetického poľa motora

Správnosť návrhu motora môže byť overená pomocou numerických matematických metód, ktoré nám pomôžu stanoviť jeho magnetické pole. Obrázok Obr. 2 ukazuje grafické a numerické výsledky počítačovej analýzy [4], pri ktorej bola využitá metóda

konečných prvkov v programe QuickField. Z dôvodu zjednodušenia analýzy bolo uvažované, že desať v kružnici rozložených statorových pólov motora je rozvinutých do roviny.



Obr. 1. Motor v rozloženom stave.



Obr. 2. Magnetické pole motora získané počítačovou simuláciou.

Stanovenie relatívnej chyby  $\delta$  teoretického modelu môžeme vykonať pomocou porovnania veľkosti magnetických polí získaných klasickým výpočtom a počítačovou simuláciou v jednotlivých pozíciách A, B, C a D obvodu motora. Maximálna odchýlka veľkosti poľa medzi týmito dvoma metódami tak pravdepodobne reprezentuje aj maximálnu chybu celkového modelu motora. Relatívna chyba v bode A je  $\delta_A = 2,519\%$ , v bode B je  $\delta_B = 0,357\%$ , v bode C je  $\delta_C = 14,208\%$  a v bode D je  $\delta_D = 0,355\%$ . Z uvedených výsledkov je zrejmé, že najväčšia nepresnosť je v oblasti pólového nástavca, pretože tam je odchýlka spomínaných dvoch metód najväčšia. To je spôsobené

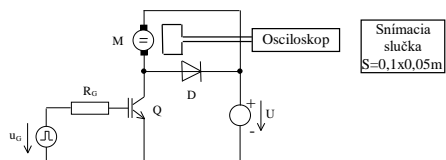
tým, že v malých geometrických rozmeroch je alokovaný veľký gradient magnetického poľa ako aj v dôsledku existencie rozptylových magnetických tokov.

C. EMC jednosmerného diskového motora s PM

Na základe výsledkov získaných pomocou počítačovej simulácie a zobrazených v obrázku Obr. 2 je vidieť, že magnetické pole motora sa neuzatvára len vo vnútri motora, ale zasahuje aj do blízkeho okolia. V dôsledku tejto skutočnosti sa pri vyšetřovaní EMC elektrotechnických systémov musí brať do úvahy aj vplyv takéhoto motora. Výsledky získané takýmito analýzami môžu byť využité nielen vyšetřovaní jednosmerných diskových motorov s permanentnými magnetmi, ale aj pri vyšetřovaní EMC vplyvu ostatných DC a AC elektrických strojov.

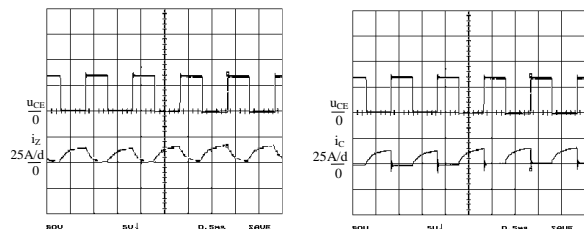
1) Simulácia a meranie EMC motora

Skúsme teda vyšetřiť EMC spomínaného motora. Pre tento účel môžeme výhodne využiť numerickú počítačovú analýzu a zobrazenie magnetického poľa. Pozícia A predstavuje miesto, kadiaľ sa uzatvára rozptylové magnetické pole medzi ľavým a pravým pólom motora. Magnetické pole v tomto mieste je takmer homogénne. Pozícia B je zvolená na vonkajšej strane pólu motora tvoreného permanentným magnetom. Magnetické pole motora je rozmiestnené periodicky (v závislosti od počtu pólových dvojíc) po obvode motora. Z pohľadu skúmania EMC nás bude zaujímať nielen stanovenie absolútne hodnoty magnetického poľa, ale aj jeho časová zmena, ktorá však závisí na jeho pracovných podmienkach. Zmena magnetického poľa totiž indukuje neželané napätia v slučkách okolitých elektrických obvodov. Zmena magnetického poľa motora sa však negeneruje len v dôsledku zmeny jeho krútiaceho momentu, ale taktiež aj pri ustálených pracovných podmienkach, ak je motor napájaný z polovodičového meniča, tak ako je to ukázané na obrázku Obr. 3 [5].



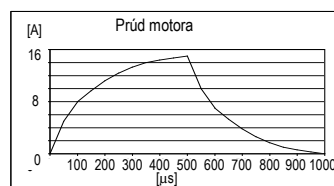
Obr. 3. Meraný obvod.

Namerané priebehy napätia  $u_{CE}$  a prúdu  $i_C$  spínaného tranzistora IGBT a prúdu motora  $i_Z$  sú zobrazené na obrázku Obr. 4. Tranzistor IGBT je použitý ako hlavný prvok jednkvadrantového napätového polovodičového impulzového meniča [6] spínaného s frekvenciou 1 kHz a napájaného z napätového zdroja  $U = 70$  V.



Obr. 4. Namerané priebehy napätia  $u_{CE}$  a prúdu  $i_C$  tranzistora IGBT a prúdu motora  $i_Z$ .

Časovú závislosť prúdu motora  $i_Z$  môžeme tiež získať aproximáciou a pomocou programu Excel. Výsledný priebeh je zobrazený na obrázku Obr. 5.



Obr. 5. Aproximovaný prúd motora  $i_Z$  získaný pomocou program Excel.

Tabuľkový zápis prúdu motora  $i_Z$  získaného z nameraných dát pre jednotlivé časové okamihy je uvedený v tabuľke TABUĽKA I. Pre každý diskretný časový moment a zodpovedajúci prúd motora bola vykonaná numerická počítačová simulácia a boli získané hodnoty indukcie magnetického poľa  $B$  pre jednotlivé vyšetřované pozície. Hodnoty indukovaných napätí boli vypočítané podľa vzťahu:

$$u_i = d\Phi/dt = (dB \cdot S)/dt = (B_2 - B_1) \cdot S / (t_2 - t_1) \quad (1)$$

pre jednotlivé časové prírastky.

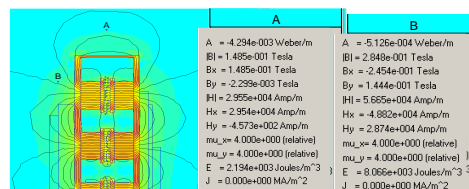
V nasledujúcom kroku bola vykonaná numerická analýza EMC pre dve extrémne hodnoty prúdu motora  $i_Z$ .

TABUĽKA I

Tabuľkový zápis priebehov prúdu motora  $i_Z$ , indukcií magnetického poľa a indukovaných napätí pre dané časové momenty

t [μs]	$i_Z$ [A]	$B_1$ [T]	$B_2$ [T]	$u_{iA}$ [V]	$u_{iB}$ [V]
0	0	1.485E-01	2.848E-01	0	0
50	5	1.482E-01	2.847E-01	-0.03	-0.01
100	8	1.480E-01	2.846E-01	-0.02	-0.01
150	9,7	1.479E-01	2.846E-01	-0.01	0
200	11,2	1.478E-01	2.846E-01	-0.01	0
250	12,4	1.478E-01	2.845E-01	0	-0.01
300	13,3	1.477E-01	2.845E-01	-0.01	0
350	14	1.477E-01	2.845E-01	0	0
400	14,4	1.477E-01	2.845E-01	0	0
450	14,7	1.476E-01	2.845E-01	-0.01	0
500	15	1.476E-01	2.845E-01	0	0
550	10	1.479E-01	2.846E-01	0.03	0.01
600	7	1.481E-01	2.846E-01	0.02	0
650	5,3	1.482E-01	2.847E-01	0.01	0.01
700	3,8	1.483E-01	2.847E-01	0.01	0
750	2,6	1.484E-01	2.847E-01	0.01	0
800	1,7	1.484E-01	2.847E-01	0	0
850	1	1.485E-01	2.847E-01	0.01	0
900	0,6	1.485E-01	2.848E-01	0	0.01
950	0,3	1.485E-01	2.848E-01	0	0
1000	0	1.485E-01	2.848E-01	0	0

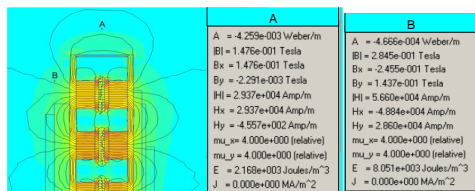
Pre prúd  $I = 0$  A a  $I = 15$  A. Ak zmenu hodnôt magnetického poľa, pre uvedené prúdy, vynásobíme veľkosťou plochy snímačej slučky s veľkosťou  $S = 0,1 \times 0,05$  m, ktorá reprezentuje slučku iného elektrického obvodu, a výsledok podelíme rozdielom časov, v ktorých boli tieto prúdy vzorkované, tak získame predstavu o vplyve motora na iný obvod, prostredníctvom v ňom indukovaného napätia. Simuláciou získané magnetické pole pre obidve skúmané pozície, na začiatku spínacej periódy meniča ( $I = 0$  A), je zobrazené na obrázku Obr. 6.



Obr. 6. Magnetické pole v okolí motora pri hodnote jeho prúdu  $I = 0$  A.

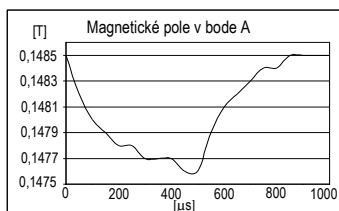
Výsledné magnetické pole, pre rovnaké geometrické a materiálové podmienky, ale časový okamih maximálneho prúdu motora  $i_Z$ , je zobrazený na obrázku Obr. 7. Tento okamih

nastáva uprostred spínacej periódy, keď prúd dosahuje hodnotu  $I = 15$  A.

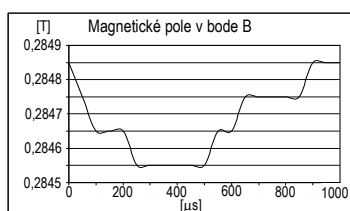


Obr. 7. Magnetické pole v okolí motora pri hodnote jeho prúdu  $I = 15$  A.

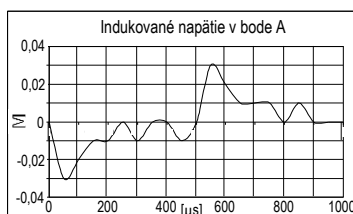
Grafická interpretácia indukcie magnetického poľa  $B$  ako časovej závislosti je zobrazená na obrázkoch Obr. 8 a Obr. 9. Časové priebehy indukovaných napätí  $u_i$  sú zobrazené v obrázkoch Obr. 10 a Obr. 11. Na základe skutočností uvedených v predchádzajúcom môžeme zistiť, že najvyššia amplitúda indukovaného napätia nastáva v čase najväčšej strmosti vzrastu alebo poklesu prúdu motora, a to v pozícii A. Nastáva to teda v časoch spínacích hrán napájacieho signálu z polovodičového meniča. Špičky indukovaného napätia v snímačej slučke vtedy dosahujú hodnoty do 30 mV. Musíme však mať na pamäti, že indukované napätie je generované pri spínacej frekvencii 1 kHz. V prípade, že spínacia frekvencia bude vyššia, tak doba nárastu a poklesu prúdu (pre rovnaký výkon motora) musí byť kratšia, a v dôsledku toho bude indukované napätie vyššie. Tým bude EMC motora horšie. Závislosť takto indukovaného napätia na frekvencii však nie je lineárna. Verifikácia presnosti simulačného modelu bola realizovaná pomocou automatizovaného merania magnetickej indukcie  $B$  na zvolenom mieste A, kde amplitúda magnetickej indukcie  $B$  získaného simuláciou je najhoršia. Meranie veľkosti magnetickej indukcie  $B$  bolo realizované mikropočítačom a osciloskopom.



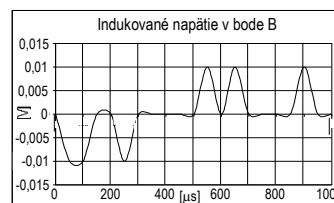
Obr. 8. Magnetická indukcia  $B$  v bode A získaná simuláciou.



Obr. 9. Magnetická indukcia  $B$  v bode B získaná simuláciou.

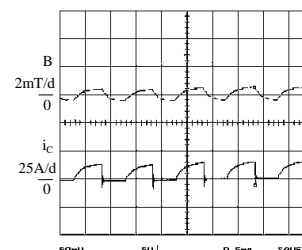


Obr. 10. Indukované napätie  $u_i$  v bode A získané simuláciou a výpočtom.



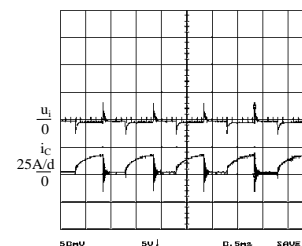
Obr. 11. Indukované napätie  $u_i$  v bode B získané simuláciou a výpočtom.

Správnosť simulačných výsledkov je potrebné verifikovať meraním na reálnom motore. Pre meranie veľkosti magnetickej indukcie  $B$  bol použitý Hallov snímač, typ A3516, s citlivosťou 2,5 mV/G. Nameraný priebeh magnetickej indukcie  $B$  v pozícii A, je zobrazený na obrázku Obr. 12 spolu s prúdom  $i_c$  tranzistora IGBT, tvoriaceho jadro jednosmerného impulzového výkonového polovodičového meniča. Porovnaním výsledkov získaných simuláciou a zobrazených v obrázku Obr. 8 s výsledkami získanými meraním a zobrazenými na Obr. 12 vidíme, že tvar aj amplitúdy sú rovnaké. To znamená, že simulačný model je korektný.



Obr. 12. Namerané priebehy magnetickej indukcie  $B$  a prúdu tranzistora  $i_c$ .

Obrázok Obr. 13 zobrazuje nameraný priebeh indukovaného napätia snímaný snímačou slučkou. Porovnaním výsledkov z Obr. 10 s výsledkami na Obr. 13 vidíme, že tvar a amplitúda sa opäť zhodujú. Obrázok Obr. 13 zobrazuje pre porovnanie aj prúd tranzistora (IGBT)  $i_c$ .

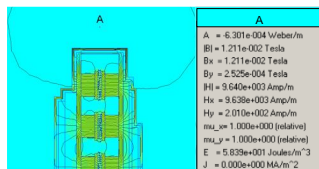


Obr. 13. Namerané priebehy indukovaného napätia  $u_i$  a prúdu tranzistora  $i_c$ .

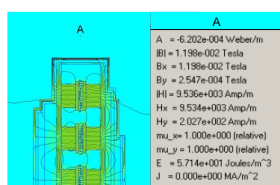
## 2) Možnosti zlepšenia EMC motorov

Požiadavku na zlepšenie EMC motora je možné chápať jednak ako požiadavku na zníženie absolútnej hodnoty magnetickej indukcie  $B$  rozptyľového magnetickej indukcie v danom mieste, ktorá je spôsobená zmenou pracovných podmienok elektrického stroja. Jedným zo spôsobov zlepšenia EMC môže byť voľba vhodného tieniaceho obalu motora. Mal by pozostávať z dvoch vrstiev. Úlohou prvej vrstvy, s relatívne veľkým magnetickej indukcie odporom (mala by mať čo najnižšiu relatívnu permeabilitu a vysokú vodivosť), je znížiť veľkosť rozptyľového magnetickej indukcie poľa. Úlohou druhej tieniacej vrstvy, s relatívne malým magnetickej indukcie odporom (mala by mať čo najväčšiu relatívnu permeabilitu), je vytvoriť cestu nakrátko pre zvyšný, redukovaný, rozptyľový magnetickej indukcie tok. Navrhnuté odporúčané konštrukčné riešenia tienenia

motora bolo analyzované pomocou počítačového simulačného modelu. Ako prvý tieniaci materiál bola zvolená meď ( $\mu_r = 0,9999935$ ) s hrúbkou 2 mm. Ako materiál pre druhú vrstvu bol zvolený supermaloy ( $\mu_r = 529095$ ), ktorý mal hrúbku taktiež 2 mm. Simulácia bola vykonaná pre dve hodnoty prúdu motora  $I = 0$  A a  $I = 15$  A, aby sa zabezpečila možnosť porovnania výsledkov s predchádzajúcimi výsledkami. Výsledky získané takouto simuláciou sú uvedené na obrázkoch Obr. 14 a Obr. 15.



Obr. 14. Magnetické pole tieného motora pri prúde 0 A.



Obr. 15. Magnetické pole tieného motora pri prúde 15 A.

Porovnaním získaných výsledkov s výsledkami na obrázkoch Obr. 6 a Obr. 7 zistíme, veľkosť magnetickej indukcie  $B$  bola znížená z hodnoty 0,1485 T na novú hodnotu 0,01211 T pri hodnote prúdu motora  $I = 0$  A. Znamená to, že bola znížená o jeden rád. Podobne bola znížená veľkosť magnetickej indukcie  $B$  pri prúde motora  $I = 15$  A z hodnoty 0,1476 T na novú hodnotu 0,01198 T. Výhoda uvádzaného riešenia spočíva v jeho jednoduchjej realizácii a možnosti návrhu jeho tienenia v závislosti od pracovnej frekvencie meniča napájajúceho motor. Ak bude jeho pracovná frekvencia vyššia, hĺbka vniku  $\delta$  elektromagnetickej vlny bude menšia, a tak môže byť menšia aj hrúbka materiálov potrebných na jej utlmenie. Naopak, nevýhodou navrhovaného riešenia je vzrast hmotnosti motora, jeho objemu a ceny.

### III. ZÁVER

Získané výsledky potvrdzujú, že pomocou prezentovanej počítačovej simulačnej metódy magnetickeho poľa je možné vyšetrovať EMC parametre elektrických strojov ako aj ich vplyv na okolie. Simulačné metódy poskytujú veľmi dobrú zhodu s výsledkami získanými pomocou reálnych meraní. Vyšetovaný prípad navyše ukazuje, že aj DC motor malého výkonu môže spôsobiť indukovanie 30 mV impulzových signálov v okolitých elektrických súčiastkach s rozmermi 10x5 cm. Túto skutočnosť je potrebné mať na pamäti, pretože množstvo elektrických systémov pracuje so signálmi na mV úrovniach.

Na základe vyššie uvedenej metódy bol vyvinutý a simulovaný model jednosmerného motora s permanentnými magnetmi, ktorý má zlepšené parametre EMC. V dôsledku návrhu vhodného tienenia motora bola veľkosť magnetickej indukcie  $B$  vyžarovanej z motora do okolitého priestoru redukovaná 10 násobne.

### POĎAKOVANIE

„Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci operačného programu Výskum a inovácie pre projekt: Inovatívne postupy testovania pre priemysel 21. storočia ITMS: 313011T565, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja“.

### LITERATÚRA

- [1] I. Doležel, J. Škramlík, V. Valouch, "Design of Inverter-Fed Induction Motor Drive Systems With Regard to EMC Problems", *Proc. of Int. Conf. on Advanced Engineering Design*, University of Glasgow, Faculty of Engineering, Glasgow, Scotland, 24-26 June 2001, pp. 27-322, 2001.
- [2] I. Kováčová, D. Kováč, "Converter's EMC – Parasitic Capacitances", *Electronics Letters*, Vol. 5, No. 1, 6p., 2005.
- [3] V. Kús, *Vliv polovodičových měničů na napájecí síť*, BEN- technická literatura, Praha 2002.
- [4] D. Mayer, B. Ulrych, M. Škopek, "Electromagnetic Field Analysis by Modern Software Products", *Journal of Electrical Engineering*, Vol. 7, No.1, 2001.
- [5] J. Pajtas, D. Kováč, "Design of converter for controlling DC motors", *Journal of Industrial Electrical Eng.*, Vol. 1, No. 2, pp.15-19, 2017.
- [6] M. Zagimyak, A. Kalinov, M. Maliakova, "Analysis of instantaneous power components of electric circuit with a semiconductor element", *Archives of Electrical Engineering* 62.3 (2013): 473-486

### ADRESY AUTOROV

Irena Kováčová, Technická Univerzita Košice, Katedra teoretickej a priemyselnej elektrotechniky, Park Komenského 3, Košice, SK 04200, Slovenská Republika, [Irena.Kovacova@tuke.sk](mailto:Irena.Kovacova@tuke.sk)  
 Dobroslav Kováč, Technická Univerzita Košice, Katedra teoretickej a priemyselnej elektrotechniky, Park Komenského 3, Košice, SK 04200, Slovenská Republika, [Dobroslav.Kovac@tuke.sk](mailto:Dobroslav.Kovac@tuke.sk)  
 Matej Beres, Technická Univerzita Košice, Katedra teoretickej a priemyselnej elektrotechniky, Park Komenského 3, Košice, SK 04200, Slovenská Republika, [Matej.Beres@tuke.sk](mailto:Matej.Beres@tuke.sk)  
 Ján Molnár, Technická Univerzita Košice, Katedra teoretickej a priemyselnej elektrotechniky, Park Komenského 3, Košice, SK 04200, Slovenská Republika, [Jan.Molnar@tuke.sk](mailto:Jan.Molnar@tuke.sk)  
 Tibor Vince, Technická Univerzita Košice, Katedra teoretickej a priemyselnej elektrotechniky, Park Komenského 3, Košice, SK 04200, Slovenská Republika, [Tibor.Vince@tuke.sk](mailto:Tibor.Vince@tuke.sk)  
 Iveta Tomčíková, Technická Univerzita Košice, Katedra teoretickej a priemyselnej elektrotechniky, Park Komenského 3, Košice, SK 04200, Slovenská Republika, [Iveta.Tomcikova@tuke.sk](mailto:Iveta.Tomcikova@tuke.sk)  
 Jozef Dziač, Technická Univerzita Košice, Katedra teoretickej a priemyselnej elektrotechniky, Park Komenského 3, Košice, SK 04200, Slovenská Republika, [Jozef.Dziac@tuke.sk](mailto:Jozef.Dziac@tuke.sk)