

# Elektromagnetická kompatibilita elektrických pohonov (4)

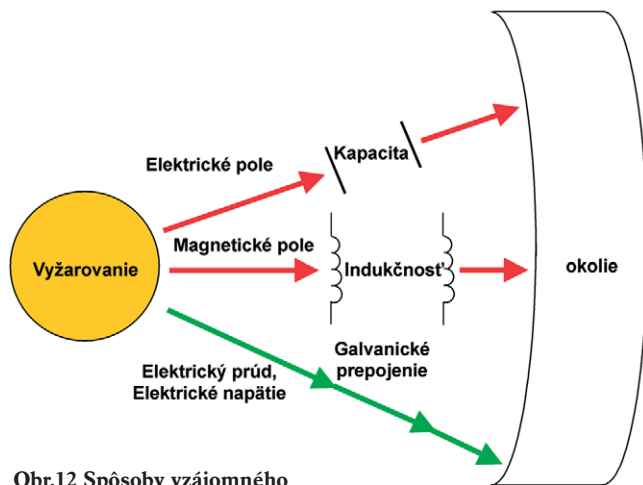
## Typy vzájomných väzieb

Vzájomné elektromagnetické ovplyvňovanie jednotlivých elektrických pohonov sa môže uskutočňovať prenosovými cestami, ktoré sú znázornené na obr. 12.

Z hľadiska teoretickej analýzy je zrejmé, že prenos vyžarovanej energie medzi jednotlivými skúmanými zariadeniami sa uskutočňuje nasledujúcimi spôsobmi:

- induktívnu väzbou,
- kapacitnou väzbou,
- galvanickou väzbou,
- elektromagnetickým poľom.

Ďalej uvedieme prvý spomínaný, a to induktívny typ väzby. Najprv urobíme teoretickú analýzu, odvodíme rovnice, potom ako dôkaz správnosti rovníc uskutočníme simulačnú analýzu pomocou počítača a nakoniec overíme praktickým meraním. Ak sa všetky výsledky budú zhodovať, možno túto metodiku predikcie uplatniť pri správnom návrhu elektrického pohonu z hľadiska najlepšíšej EMC a tým znížiť náklady o 30 – 50 %.



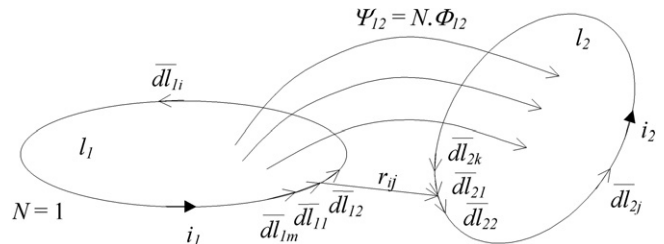
Obr.12 Spôsoby vzájomného elektromagnetického ovplyvňovania

## Induktívna väzba

Induktívna magnetická väzba vzniká v dvoch galvanicky oddelených slučkách elektrického obvodu, pričom aspoň jednou z týchto slučiek preteká časovo premenlivý prúd, ktorý v jej okolí vytvára časovo premenlivé magnetické pole. Vplyv jedného obvodu na druhý je v tomto prípade daný veľkosťou prúdu, strmostou jeho nárastu alebo poklesu, magnetickými vlastnosťami prostredia, v ktorom sa obvody nachádzajú, a geometrickým usporiadaním oboch obvodov.

## Teoretická analýza

Pri prediktívnom vyšetrení vplyvu induktívnej väzby vychádzame z nasledujúceho prípadu. Uvažujme dve samostatné elektrické slučky s dĺžkami  $l_1$  a  $l_2$ , cez ktoré pretekajú prúdy  $i_1$  a  $i_2$ , pričom



Obr.13 Analyzovaný prípad induktívnej väzby

vyšetrujeme vplyv slučky  $l_1$  na elektrické pomery v slučke  $l_2$  tak, ako je to uvedené na obr. 13.

Vychádzame z Maxwellovej rovnice pre kvázistacionárne pole, ktorú upravíme z diferenciálneho tvaru na integrálny. Pre elektromagnetickú indukciu dostaneme potom nasledujúcu rovnicu:

$$\int_S \text{rot } \vec{E} \cdot d\vec{S} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} = - \frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (2)$$

Aplikáciou Stokesovej vety dostaneme:

$$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (3)$$

Výsledný tvar indukovaného napätia  $u_{i2}$  vyvolaného viacerými ( $N$ ) závitmi prúdovodníka je daný vzťahom:

$$u_{i2} = -N \cdot \frac{\partial \Phi_{12}}{\partial t} = - \frac{\partial \Psi_{12}}{\partial t} \quad (4)$$

príčom:

$$l_1 = \sum_{i=1}^m dl_{1i} \quad l_2 = \sum_{j=1}^k dl_{2j}$$

sú dĺžky jednotlivých slučiek.

Ďalšími úpravami pre magnetický tok  $\Phi_{12}$  dostaneme:

$$\Phi_{12} = \oint_{l_2} \left[ \frac{\mu \cdot i_1}{4\pi r_{12}} \oint_{l_1} d\vec{l}_1 \right] \cdot d\vec{l}_2 = \frac{\mu \cdot i_1}{4\pi} \oint_{l_1} \oint_{l_2} \frac{d\vec{l}_1 \cdot d\vec{l}_2}{r_{12}} \quad (5)$$

Po odvedení, ak vykonáme prechod od integrálu po uzavretej slučke k sume dĺžkových elementov v príslušnej slučke, dostaneme upravené výrazy pre veľkosť vzájomnej indukčnosti  $M$  aj indukovaného napätia  $u_i$  v diferenciálnej podobe:

$$M = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k M_{ij} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k \frac{\mu}{4\pi} \frac{dl_{1i} \cdot dl_{2j}}{r_{ij}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k \frac{\mu}{4\pi} \frac{dl_{1i} \cdot dl_{2j} \cdot \cos \gamma_{ij}}{r_{ij}} \quad (6)$$

$$u_i = - \frac{di}{dt} \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k \frac{\mu}{4\pi} \frac{dl_{1i} \cdot dl_{2j} \cdot \cos \gamma_{ij}}{r_{ij}} \quad (7)$$

Na základe predchádzajúcich rovníc a zdĺhavejšieho odvodenia môžeme pre výpočet veľkosti vzájomnej indukčnosti medzi dvojicou slučiek elektrických obvodov umiestnených v trojrozmernom priestore odvodiť výslednú rovnicu:

$$M = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k \frac{\mu}{4\pi} \frac{(A_{x2i} - A_{x1i}) \cdot (B_{x2j} - B_{x1j}) + (A_{y2i} - A_{y1i}) \cdot (B_{y2j} - B_{y1j}) + (A_{z2i} - A_{z1i}) \cdot (B_{z2j} - B_{z1j})}{\left( \left( B_{x1j} + \frac{|B_{x2j} - B_{x1j}|}{2} \right) - \left( A_{x1i} + \frac{|A_{x2i} - A_{x1i}|}{2} \right) \right)^2 + \left( \left( B_{y1j} + \frac{|B_{y2j} - B_{y1j}|}{2} \right) - \left( A_{y1i} + \frac{|A_{y2i} - A_{y1i}|}{2} \right) \right)^2 + \left( \left( B_{z1j} + \frac{|B_{z2j} - B_{z1j}|}{2} \right) - \left( A_{z1i} + \frac{|A_{z2i} - A_{z1i}|}{2} \right) \right)^2} \quad (8)$$

Rovnakým spôsobom môžeme vyjadriť aj veľkosť indukovaného napätia:

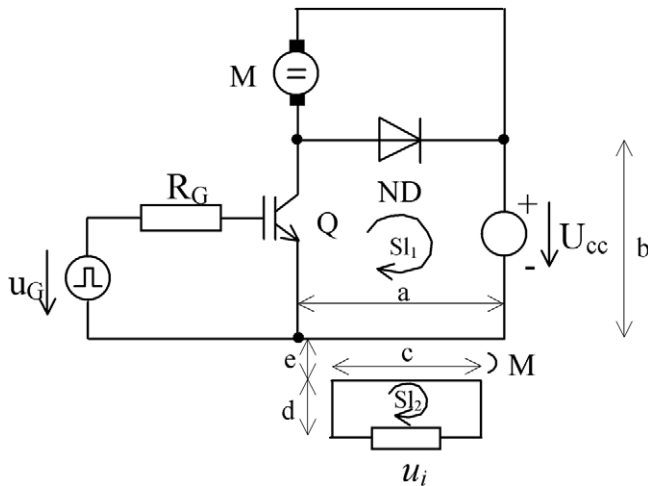
$$u_i = -\frac{di}{dt} \cdot \frac{(A_{x2i} - A_{x1i}) \cdot (B_{x2j} - B_{x1j}) + (A_{y2i} - A_{y1i}) \cdot (B_{y2j} - B_{y1j}) + (A_{z2i} - A_{z1i}) \cdot (B_{z2j} - B_{z1j})}{\left( \left( B_{x1j} + \frac{|B_{x2j} - B_{x1j}|}{2} \right) - \left( A_{x1i} + \frac{|A_{x2i} - A_{x1i}|}{2} \right) \right)^2 + \left( \left( B_{y1j} + \frac{|B_{y2j} - B_{y1j}|}{2} \right) - \left( A_{y1i} + \frac{|A_{y2i} - A_{y1i}|}{2} \right) \right)^2 + \left( \left( B_{z1j} + \frac{|B_{z2j} - B_{z1j}|}{2} \right) - \left( A_{z1i} + \frac{|A_{z2i} - A_{z1i}|}{2} \right) \right)^2} \quad (9)$$

Pri riešení otázky EMC pri celom skúmanom zariadení alebo konfigurácii zariadení prostredníctvom indukčnej magnetickej väzby treba vykonať obvodovú simulačnú analýzu pre všetky na seba pôsobiace slučky, čo z matematického hľadiska vedie k riešeniu sústavy k integrálno-diferenciálnych rovníc:

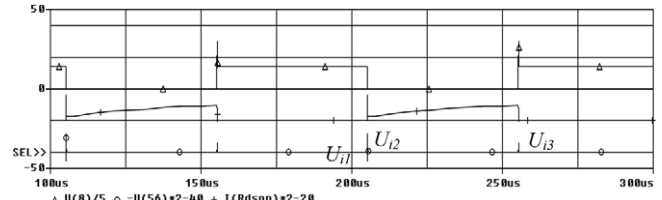
$$\begin{aligned} u_{ccl} &= R_{cl} \cdot i_l + L_{cl} \cdot \frac{di_l}{dt} + \frac{1}{C_{cl}} \int i_l \cdot dt + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq l}}^k u_{ij} \\ &\vdots \\ u_{cck} &= R_{ck} \cdot i_k + L_{ck} \cdot \frac{di_k}{dt} + \frac{1}{C_{ck}} \int i_k \cdot dt + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^k u_{ij} \end{aligned} \quad (10)$$

## Simulácia a meranie

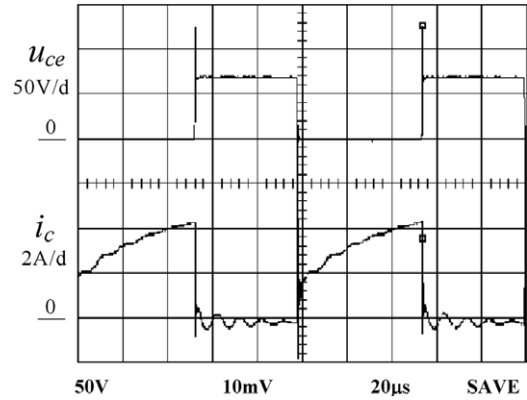
Simuláciu a meranie uskutočnime na jednosmernom elektrickom pohone znázornenom na obr. 14. Riadiace obvody predstavuje ge-



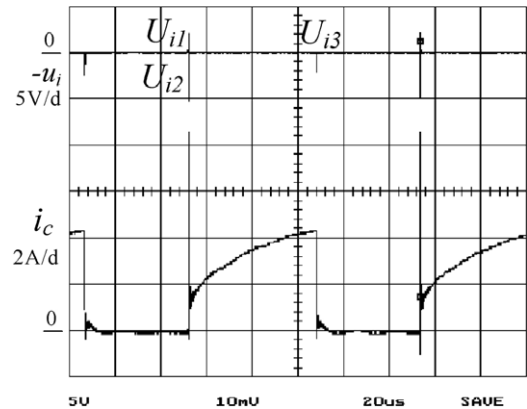
Obr.14 Schéma vyšetovaných obvodov



Obr.15 Výsledné priebehy získané simuláciou



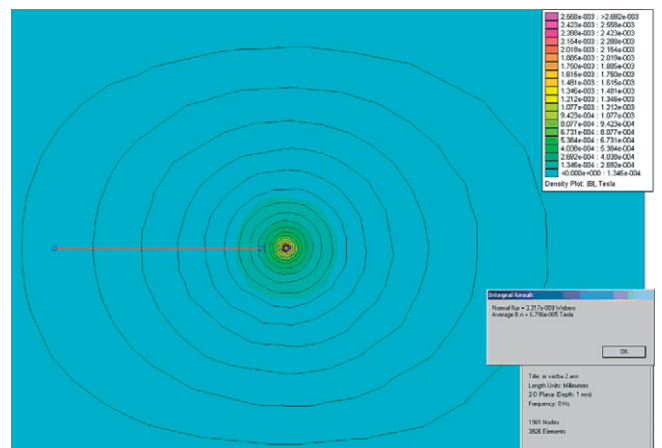
Obr.16 Výsledky získané meraním



Obr.17 Výsledky získané meraním

nerátor s napätím  $u_G$  a odporom  $R_G$ . Výkonový menič reprezentuje IGBT tranzistor Q s nulovou diódou ND a napájacím zdrojom  $U_{CC}$ , ktorý súčasne vytvárajú slučku  $Sl_1$ .

Výsledky získané simuláciou, ako napätie na tranzistore  $u_{CE}$ , prúd tranzistora  $i_C$  a napätie  $-u_i$  na odpore, sú uvedené na obr. 15. Namerané priebehy rovnakých veličín sú uvedené na obr. 16 a 17, pričom na jednom aj druhom obrázku je na porovnanie uvedené spoločný priebeh prúdu  $i_C$  tranzistora IGBT.



Obr.18 Simulácia magnetostatického poľa metódou konečných prvkov

Porovnaním vypočítaných, simulovaných a nameraných hodnôt vidíme, že vo všetkých prípadoch má špička prúdu tranzistora hodnotu 8,4 A, prúd tranzistora v okamihu vypnutia nadobúda rovnaké hodnoty 4,4 A. Špičky napätí v priebehu indukovaného napätia získaného simuláciou a meraním majú rovnaké hodnoty  $U_{i1} = -2,2 \text{ V}$ ,  $U_{i2} = 5,02 \text{ V}$ ,  $U_{i3} = 2,1 \text{ V}$ .

Kvôli viacnásobnej verifikácii analyticky získaných výsledkov možno vykonať aj analýzu induktívnej väzby EMC prostredníctvom numerickej simulácie magnetostatického poľa metódou konečných prvkov. Jej výsledky sú uvedené na obr. 18.

Porovnaním teoretických vypočítaných údajov s údajmi získanými simuláciou a meraním vidíme, že medzi nimi existuje významná zhoda a maximálna odchýlka v prípade špičky indukovaného napätia  $U_{i1}$  dosahuje hodnotu 7,6 %.

*V nasledujúcom diele tohto seriálu rozoberieme vplyv kapacitnej väzby v elektrických pohonoch z hľadiska EMC.*

## Literatúra

[1] KOVÁČOVÁ, I.: EMC of Power DC Electrical Drives. Journal of Electrical Engineering, Vol. 5, No. 1, 2005, pp. 61 – 66.

[2] KOVÁČOVÁ, I., KOVÁČ, D.: EMC Compatibility of Power Semiconductor Converters and Inverters. Acta Electrotechnica et Informatica, No. 2, Vol. 3, 2003, pp. 12 – 14.

[3] RYBÁR, R., KUDELAS, D., FISCHER, G.: Alternative sources of energy III – Winding energy. Textbook, Košice, 2004.

[4] GALLOVÁ, Š.: A Progressive Manufacturing Operation. International Congress MATAR, Prague 2004, pp. 141 – 146.

[5] KOVÁČOVÁ, I., KOVÁČ, D.: Converter's EMC – Paracitic Capacitantes. Electornics Letters, Vol. 5, No. 1, 2005, 6 pages, ISSN 1213-161x.

[6] KOVÁČOVÁ, I., KAŇUCH, J., KOVÁČ, D.: Elektromagnetická kompatibilita výkonových elektrotechnických systémov, vydavateľstvo Equilibria, s. r. o., Košice, 2005, 182 strán, ISBN 80-969224-5-9.

[7] ŠPÁNIK, P., FEŇO, I., KÁCSOR, G., LOKŠENINEC, I.: Using Planar Transformers in Soft Switching DC/DC Power Con-

verters, Advances in Electrical and Electronic Engineering, 2004, Vol. 3, No. 1, pp. 59 – 65.

[8] KOVÁČOVÁ, I., KAŇUCH, J., KOVÁČ, D.: DC permanent magnet disc motor design with improved EMC, Acta Technica CSAV, Vol. 50, No. 3, 2005, pp. 291 – 306.

[9] KŮS, V.: The influence of power semiconductor converters on power distribution net, BEN – technical literature Publisher, Praha 2002, 184 pages, ISBN 80-7300-062-8.

[10] KOVÁČOVÁ, I., KAŇUCH, J., KOVÁČ, D.: The EMC of Electrical Systems – Galvanic Coupling (Part I.), Acta Electrotechnica et Informatica, 2005, Vol. 5, pp. 22 – 28.

[11] DOBRUCKÝ, B., RÁČEK, V., ŠPÁNIK, P., GUBRIC, R.: Výkonové polovodičové štruktúry. Edičné stredisko VŠDS Žilina, 1. vyd., 1995.

## doc. Ing. Irena Kováčová, CSc.

Technická univerzita v Košiciach  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektrotechniky, mechatroniky  
a priemyselného inžinierstva  
Letná 9, 042 00 Košice  
e-mail: irena.kovacova@tuke.sk

## prof. Ing. Dobroslav Kováč, CSc.

Technická univerzita v Košiciach  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra teoretickej elektrotechniky a elektrického merania,  
Letná 9, 042 00 Košice  
e-mail: dobroslav.kovac@tuke.sk

## Ing. Ján Kaňuch

Technická univerzita v Košiciach  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektrotechniky, mechatroniky  
a priemyselného inžinierstva  
Letná 9, 042 00 Košice  
e-mail: jan.kanuch@tuke.sk

61

