

Elektromagnetická kompatibilita elektrických pohonov (6)

Galvanická väzba

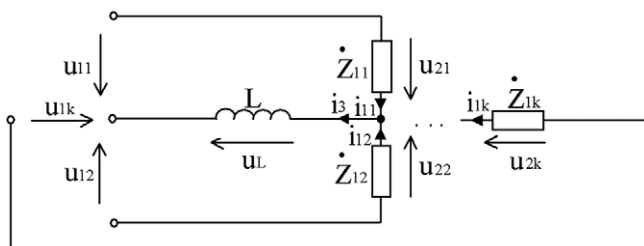
Pri galvanickej väzbe ide o prepojenie jednotlivých elektrotechnických zariadení alebo ich častí takým spôsobom, že jestvuje minimálne jeden alebo (v niektorých prípadoch, napríklad napájacia sieť) viac spoločných vodičov spájajúcich tieto zariadenia, prostredníctvom ktorých dochádza k ich vzájomnému ovplyvňovaniu. Vždy musíme vziať do úvahy veľkosti pracovných frekvencií jednotlivých zariadení a dĺžky spoločných vodičov. Vo všetkých prípadoch elektromagnetického ovplyvňovania iných zariadení prostredníctvom galvanickej väzby ide o skutočnosť, že elektrotechnické komponenty nie sú ideálne a teda, že obsahujú určité parazitné kapacity, indukčnosti a reálne odpory. Pri vyšších frekvenciách prúdov prechádzajúcich danými prepájacími vodičmi budeme musieť, pre získanie prediktívnych výsledkov dôsledku existencie galvanickej väzby, analyzovať vyšetrované obvody tak, že budeme uvažovať dané vodiče ako obvody s rozloženými parametrami. Pri nižšej frekvencii môžeme vlastnosti prepájacieho obvodu reprezentovať ako sústredené parametre.

Jednovodičové prepojenie obvodov – riešenie pre nízke frekvencie so sústredenými parametrami

1. Teoretická analýza

Jednovodičové prepojenie je zapojenie minimálne dvoch alebo viacerých elektrických obvodov, ktoré sú vzájomne galvanicky spojené prostredníctvom jedného spoločného vodiča s dĺžkou l . Keďže ide o prípad činnosti pri nízkych frekvenciách, tak jeho elektrické parametre môžeme definovať pomocou sústredených parametrov jeho odporu R a vlastnej indukčnosti L . Ak budeme ďalej uvažovať, že daný vodič bude z medeného materiálu, tak úbytky napätia na jeho odpore R budú oveľa nižšie v porovnaní s úbytkami na reaktancii induktívneho charakteru L , spôsobenými časovou zmenou prúdu tohto vodiča. Preto pre zjednodušenie analýzy problému zanedbáme ohmickú zložku vodiča v ďalšom postupe. Pre stanovenie konkrétnej veľkosti vlastnej indukčnosti daného vodiča môžeme využiť vzťahy uvedené v kapitole opisujúcej induktívnu väzbu medzi elektrickými obvodmi. Schematické znázornenie problému je uvedené na obr. 36.

Matematický opis pomerov vo vyšetrovanom obvode je potom daný nasledujúcou sústavou integrálno-diferenciálnych rovníc:



Obr.36 Schematické znázornenie jednovodičového prepojenia obvodov

$$\begin{aligned}
 u_{11} - u_L - u_{21} &= u_{11} - L \frac{di_3}{dt} - \left(R_{11} \cdot i_{11} + L_{11} \frac{di_{11}}{dt} + \frac{1}{C_{11}} \cdot \int i_{11} \cdot dt \right) = 0 \\
 u_{12} - u_L - u_{22} &= u_{12} - L \frac{di_3}{dt} - \left(R_{12} \cdot i_{12} + L_{12} \frac{di_{12}}{dt} + \frac{1}{C_{12}} \cdot \int i_{12} \cdot dt \right) = 0 \\
 &\vdots \\
 u_{1k} - u_L - u_{2k} &= u_{1k} - L \frac{di_3}{dt} - \left(R_{1k} \cdot i_{1k} + L_{1k} \frac{di_{1k}}{dt} + \frac{1}{C_{1k}} \cdot \int i_{1k} \cdot dt \right) = 0 \\
 i_3 &= i_{11} + i_{12} + \sum_{k=3}^n i_{1k}
 \end{aligned} \tag{38}$$

kde $(n + 2)$ je počet všetkých slučiek, ktoré obsahujú rovnaký, spoločný vodič. V prípade veľkého počtu slučiek je analytické vyšetrenie vplyvu galvanickej väzby (ako jednej zložky EMC) na jednotlivé elektrické obvody pomerne komplikované, preto možno výhodne využiť numerické počítačové riešenie prostredníctvom už spomínaných simulačných programov.

V nasledujúcom kroku sa pokúsime získať predstavu o veľkosti vzájomnej medziobvodovej interakcie, spôsobenej existenciou galvanickej väzby pomocou vyšetrenia prípadu len dvoch elektrických obvodov. Pre zjednodušenie analytického riešenia predpokladajme, že v obidvoch galvanicky spojených elektrických obvodoch je pripojená iba ohmická záťaž, obvody sú v ustálenom stave a sú napájané z jednosmerných napätových zdrojov tak, ako je to zobrazené na obr. 37.

Pre ustálený stav v obvode budú potom platiť nasledujúce rovnice:

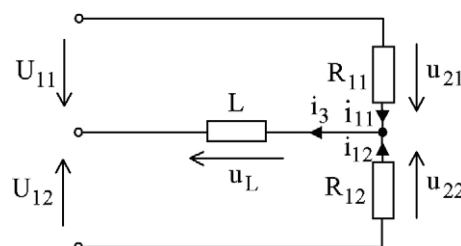
$$U_{11} - u_L - u_{21} = U_{11} - L \frac{di_3}{dt} - R_{11} \cdot i_{11} = U_{11} - R_{11} \cdot i_{11} = 0 \tag{39}$$

$$U_{12} - u_L - u_{22} = U_{12} - L \frac{di_3}{dt} - R_{12} \cdot i_{12} = U_{12} - R_{12} \cdot i_{12} = 0 \tag{40}$$

$$i_3 = i_{11} + i_{12} \tag{41}$$

Predpokladajme, že v spodnom obvode dôjde ku skokovej zmene hodnoty napájacieho napätia z hodnoty U_{12} na nulu. Opis časovej závislosti priebehu napätia u_2 v prvom obvode, v ktorom nedošlo k žiadnej zmene napájania ani záťaže, získame na základe riešenia nasledujúceho systému diferenciálnych rovníc:

$$U_{11} - L \frac{di_3}{dt} - R_{11} \cdot i_{11} = 0 \tag{42}$$



Obr.37 Vyšetovaný obvod

$$-L \frac{di_3}{dt} - R_{12} \cdot i_{12} = 0 \quad (43)$$

$$i_3 = i_{11} + i_{12} \quad (44)$$

Prevodom do Laplaceovej-Carsonovej oblasti dostaneme sústavu lineárnych rovníc. Z nej napíšeme rovnicu pre tvar prúdu. Spätným prevodom do časovej oblasti a po dosadení začiatočnej podmienky získame výraz pre prúd i_3 . Vplyv činnosti druhého obvodu na prvý, spôsobený existenciou galvanickej väzby, vyjadríme prostredníctvom napätia na záťaži u_{21} :

$$\begin{aligned} u_{21} &= U_{11} - u_L = \\ &= U_{11} - L \frac{di_3}{dt} = U_{11} + U_{12} \frac{R_{11}}{(R_{11} + R_{12})} \cdot e^{-\frac{R_{11}R_{12}}{L(R_{11}+R_{12})}t} \end{aligned} \quad (45)$$

V prípade vyšetrovania zopnutia napájacieho napätia v druhom obvode by sme podobným postupom získali informáciu o priebehu napätia na záťaži u_{21} :

$$\begin{aligned} u_{21} &= U_{11} - u_L = \\ &= U_{11} - L \frac{di_3}{dt} = U_{11} - U_{12} \frac{R_{11}}{(R_{11} + R_{12})} \cdot e^{-\frac{R_{11}R_{12}}{L(R_{11}+R_{12})}t} \end{aligned} \quad (46)$$

Vidíme, že veľkosť napätia na záťaži v prvom obvode sa zmení až o hodnotu napätia z otvoreného intervalu $(-U_{12}, 0)$ opäť v závislosti od pomeru veľkostí odporov záťaže. Celkový vplyv spínacieho procesu v druhom obvode sa prostredníctvom galvanickej väzby premieta do celkovej možnej zmeny napätia záťaže u_{21} až o hodnotu napätia z rozsahu intervalu $(-U_{12}, U_{12})$ v závislosti od pomeru veľkostí záťaží a znamienka derivácie priebehu prúdu tečúceho cez indukčnosť L spoločného vodiča.

2. Simulácia a meranie

Analyticky získané závislosti overme pomocou numerickej počítačovej simulácie s využitím programu PSPICE. Nech dĺžka spoločného vodiča $l = 0,1$ m. Na základe vzťahov odvodených v diele opisujúcom induktívnu väzbu sa dá vypočítať vlastná indukčnosť tohto vodiča, pričom uvažujeme vplyv jeho magnetického poľa vo vzdialenosti $d = 1$ m, polomer medeného vodiča $R = 0,6$ mm a $\mu_r = 0,991$. Vlastná indukčnosť vodiča po výpočte je $L = 302$ nH.

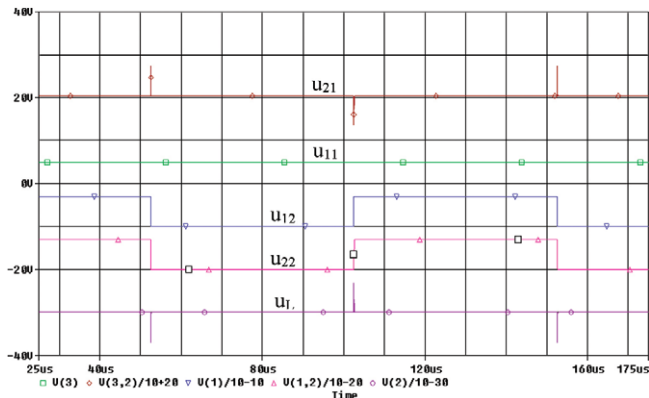
V nasledujúcom kroku budeme predpokladať, že napätie u_{12} má obdĺžnikový priebeh s amplitúdou 70 V, striedou $z = 0,5$, so spínacou frekvenciou $f = 10$ kHz, $R_{12} = 11,66 \Omega$, $U_{11} = 5$ V, $R_{11} = 10$ k Ω a $L = 302$ nH. Pre zvolené hodnoty odporov záťaží, napájacích napätí zdrojov a danú veľkosť indukčnosti vzájomného vodiča obidvoch obvodov môžeme z odvodených rovníc vypočítať veľkosť amplitúd napätových špičiek v napätí u_{21} tak, že do posledného výrazu pre uvedené napätie dosadíme za čas $t = 0$. Potom dostaneme:

$$\begin{aligned} u_{21}(t_{\text{vypnutie}}) &= U_{11} + U_{12} \frac{R_{11}}{(R_{11} + R_{12})} = \\ &= 5 + 70 \frac{10000}{10011,66} = 74,918 \text{ V} \end{aligned} \quad (47)$$

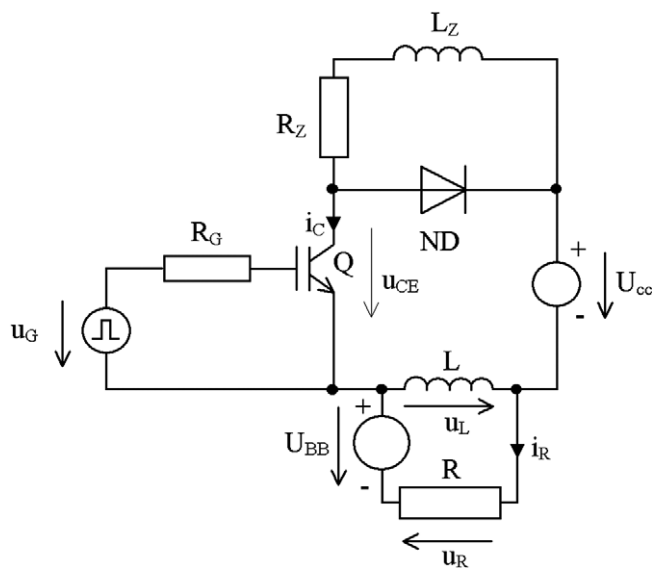
Analogicky stanovme veľkosť amplitúdy napätovej špičky napätia u_{21} v okamihu zapínania druhého obvodu:

$$\begin{aligned} u_{21}(t_{\text{zapnutie}}) &= U_{11} - U_{12} \frac{R_{11}}{(R_{11} + R_{12})} = \\ &= 5 - 70 \frac{10000}{10011,66} = -64,918 \text{ V} \end{aligned} \quad (48)$$

Pre porovnanie sú na obr. 38 uvedené priebehy vstupných napätí u_{11} a u_{12} , napätia na záťažiach u_{21} a u_{22} a priebeh napätia u_L získané simuláciou vyšetrovaného obvodu v programe PSPICE pri už uvedených hodnotách odporov a napätí. Už na prvý pohľad je zrejma zhoda výsledkov získaných numericke – počítačovou simuláciou a analyticky vo forme už odvodených vzťahov. Z vypo-



Obr.38 Výsledky získané simuláciou v programe PSPICE

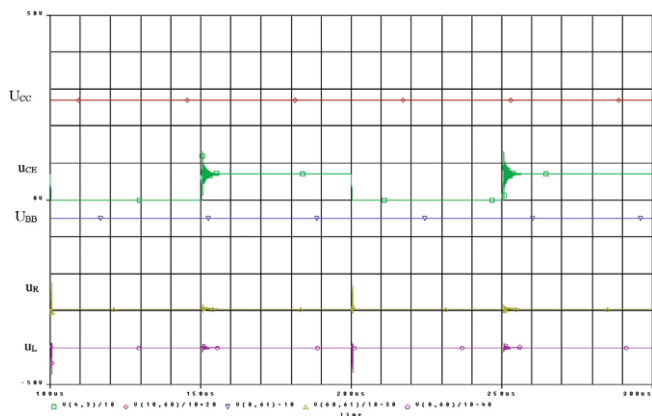


Obr.39 Zapojenie simulovaného a meraného obvodu

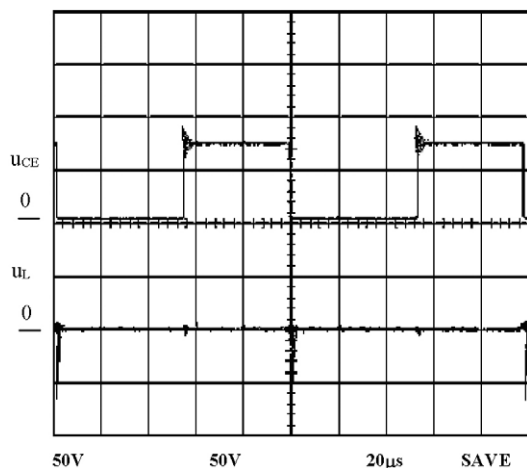
čítaných aj simulovaných priebehov vidieť, že vplyv galvanickej väzby medzi jednotlivými vyšetrovanými elektrickými obvodmi je značný a v prípade reálnych obvodov meniča a jeho častí môže spôsobiť vážne problémy vo funkčnosti celého systému alebo dokonca zničenie jeho elektronických obvodov citlivých na napätia.

Overenie odvodených výsledkov vykonajme pomocou simulácie a praktického merania obvodu výkonového polovodičového meniča zapojeného podľa schémy na obr. 39.

Výsledky získané simuláciou, ako napätie tranzistora u_{CE} , napätie na indukčnosti u_L a napätie u_R na odpore R pre frekvenciu $f = 10$ kHz sú uvedené na obr. 40. Na rozdiel od výsledkov vypočítaných v predchádzajúcej časti v tomto prípade nedochádza ku skokovej zmene napätia, pretože tranzistor spína iba koneč-



Obr.40 Výsledky získané simuláciou v programe PSPICE



Obr.41 Výsledky získané meraním

nou rýchlosťou. Na základe tejto skutočnosti dosahuje napätie na indukčnosti pri zapínaní a vypínaní tranzistora hodnotu približne ± 10 V v závislosti od nárastu alebo poklesu prúdu. Najvýraznejší úbytok na indukčnosti sa objaví v okamihu poklesu prúdu tranzistora, spôsobeného existenciou komutačného náboja nulovej diódy. V tomto okamihu dochádza k výraznému zvýšeniu strmosti prúdu a tým aj k nárastu napätia na parazitnej indukčnosti. Porovnávacie výsledky získané verifikačným meraním sú uvedené na obr. 41.

Z nameraných priebehov je viditeľná zhoda s výsledkami získanými pomocou simulácie.

V nasledujúcom diele tohto seriálu rozoberieme ďalší vplyv galvanickej väzby z hľadiska EMC v elektrických pohonoch.

Literatúra

- [1] KOVÁČOVÁ, I., KOVÁČ, D.: Parasitic Capacitances of Converters and EMC. Transactions of the Universities, 2005, No. 1, pp. 40 – 47.
- [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] FODOR, J. C.: Contrapositive Symmetry of Fuzzy Implications. Fuzzy Sets and Systems 69, 1995, pp. 141 – 148.
- [5] GALLOVÁ, Š.: A Progressive Manufacturing Operation. International Congress MATAR, Prague 2004, pp. 141 – 146.
- [6] KOVÁČOVÁ, I., KOVÁČ, D.: Converter's EMC – Parasitic Capacitances. Electronics Letters, Vol. 5, No. 1, 2005, 6 pages.

[7] ŠPÁNIK, P., FEŇO, I., KÁCSOR, G., LOKŠENINEC, I.: Using Planar Transformers in Soft Switching DC/DC Power Converters, Advances in Electrical and Electronic Engineering, 2004, Vol. 3, No. 1, pp. 59 – 65.

[8] TAR, J. K., RUDAS, I. J., MADARÁSZ, L., BITÓ, J. F.: Simultaneous Optimization of the External Loop Parameters in an Adaptive Control Based on the Co-operation of Uniform Procedures. Journal of Advanced Computational Intelligence 4, 2000, pp. 279 – 285.

[9] KOVÁČOVÁ, I., KAŇUCH, J., KOVÁČ, D.: Elektromagnetická kompatibilita výkonových elektrotechnických systémov. Vydavateľstvo Eqlibria, s. r. o., Košice, 2005, 182 strán.

[10] 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.

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

[12] 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.

doc. Ing. Irena Kováčová, CSc.

Katedra elektrotechniky, mechatroniky
a priemyselného inžinierstva
e-mail: irena.kovacova@tuke.sk

prof. Ing. Dobroslav Kováč, CSc.

Katedra teoretickej elektrotechniky a elektrického merania
e-mail: dobroslav.kovac@tuke.sk

Ing. Ján Kaňuch

Katedra elektrotechniky, mechatroniky
a priemyselného inžinierstva
e-mail: jan.kanuch@tuke.sk

Technická univerzita v Košiciach
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Letná 9, 042 00 Košice

doc. Ing. Štefánia Gallová, CSc.

Technická univerzita v Košiciach
Strojnícka fakulta, Katedra automatizácie a riadenia
Park Komenského 9, 042 00 Košice
e-mail: stefania.gallova@tuke.sk

59