

Účinky a modelovanie elektromagnetických polí pri použití tieniacej bariéry

¹Ján Zbojovský, ²Alexander Mészáros, ³Michal Kolcun, ⁴Dušan Medved',
⁵Marek Pavlík

^{1,2,3,4,5} Department of Electric Power Engineering, Faculty of Electrical Engineering
and Informatics, Technical University of Košice, Slovak Republic

¹jan.zbojovsky@tuke.sk, ²alexander.meszaros@tuke.sk, ³michal.kolcun@tuke.sk,
⁴dušan.medved@tuke.sk, ⁵marek.pavlik@tuke.sk

Abstrakt — Tento príspevok pojednáva o problematike, účinkoch elektromagnetických polí a ich simulácii v programe Ansys, konkrétne je simulovaný vplyv tieniaceho materiálu na rozloženie elektromagnetického poľa.

Kľúčové slová — elektromagnetické pole, Ansys, účinky elektromagnetických polí, modelovanie

I. ÚVOD

Problematika vplyvu elektromagnetických polí na ľudský organizmus je v dnešnej dobe veľmi aktuálna, v dôsledku neustále narastajúceho počtu i výkonu zdrojov elektromagnetického poľa. Experimentálne, aj rozsiahlymi štatistikami sa dokázalo, že elektromagnetické polia sú v celom svojom frekvenčnom rozsahu biologicky aktívne, teda interagujú so živou hmotou. O tom, aká závažná je táto problematika, svedčí aj množstvo zrealizovaných a publikovaných výskumov [1].

V súčasnosti sa vplyvom elektromagnetických polí na živé organizmy zaoberá hlavne Svetová zdravotnícka organizácia (WHO) a Medzinárodná komisia pre ochranu pred neionizujúcim žiarením (ICNIRP) pričom bolo stanovené, že elektrické zariadenia musia spĺňať určité limity a musia byť elektromagneticky kompatibilné, aby mohli byť používané v praxi. Elektromagnetickú kompatibilitu je možné definovať ako schopnosť súčasnej správnej funkcie (čiže koexistencie) zariadení alebo systémov – elektrických aj biologických – nachádzajúcich sa v spoločnom elektromagnetickom prostredí bez závažného nežiaduceho ovplyvňovania ich normálnych funkcií. Elektrické systémy musia byť odolné proti pôsobeniu ostatných systémov a nesmú pri svojej činnosti ovplyvňovať normálne fungovanie iných systémov a zariadení. Elektromagnetické rušenie môže spôsobiť vážne problémy, a to je potrebné zohľadniť pri návrhu nových elektrických zariadení [2], [3], [4].

II. CHARAKTERISTIKA ELEKTROMAGNETICKÉHO POĽA

Elektromagnetické pole sa môže charakterizovať ako fyzikálne pole, v ktorom pôsobia elektrické a magnetické sily v priestore, pričom sa skladá z dvoch navzájom prepojených polí. Vektory elektrického a magnetického poľa sú na seba kolmé. Elektromagnetické polia sú buď stationárne – časovo nepremenné, alebo nestacionárne – časovo premenné [1], [5]. Je ich možné popísať Maxwellovými rovnicami:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{D} \quad (1)$$

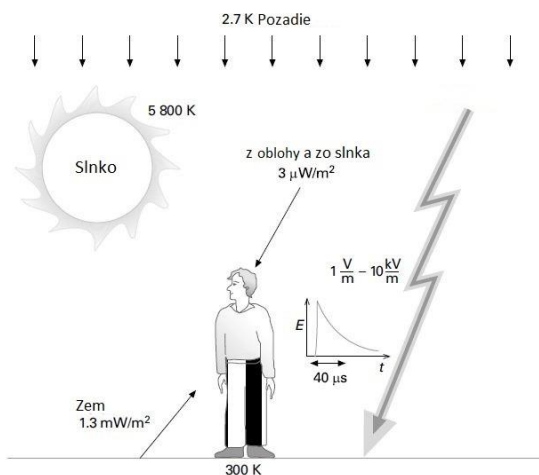
$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B} \quad (2)$$

Doplňujúce vzťahy:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (3)$$

$$\frac{1}{\mu_r \cdot \mu_0} \cdot \left(\frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial z^2} \right) = -\mathbf{J}_z + j \cdot \omega \cdot \gamma \cdot \mathbf{A} \quad (4)$$

Zdroje elektromagnetického poľa môžeme rozdeliť na prírodné a umelé. Prírodné elektromagnetické prostredie pochádza z pozemských a mimozemských zdrojov ako napríklad radiácia z vesmíru a slnka alebo od elektrických výbojov v zemskej atmosfére. Umelo vytvorené elektromagnetické polia sa šíria od zdrojov ako elektrické vedenia, telekomunikačné a rádio-televízne zariadenia a mnoho ďalších ako elektrické motory, železničná doprava, zvaracie zariadenia a iné.



Obr. 1 Pozemské a mimozemské zdroje vysokofrekvenčného žiarenia.

Účinky elektromagnetických polí na ľudský organizmus boli a sú preukázané. Sú to merateľné zmeny vyvolané určitým podnetom alebo zmenou v prostredí, pričom tieto zmeny nemusia nevyhnutne viesť k poškodeniu zdravia kvôli určitej schopnosti organizmu adaptovať sa rôznym zmenám. K poškodeniu môže dôjsť, ak organizmus je dlhšiu dobu vystavený pôsobeniu škodlivého faktora. Biologický účinok elektromagnetického poľa závisí od niekoľkých objektívnych a subjektívnych parametrov:

Z fyzikálnych parametrov poľa (objektívne parametre) sú to predovšetkým:

- použitý rozsah frekvencií,
- intenzita elektromagnetického poľa,
- doba pôsobenia (ožiarenia).

Výsledok interakcie závisí aj od fyzikálnochemických vlastností organizmu (subjektívne parametre), a to od:

- rozmerov,
- hmotnosti,
- charakteru povrchu (odevu),
- hrúbky vrstiev (koža - tukové vrstvy - svaly),
- obsahu vody,
- okamžitého stavu organizmu (zdravotný aj psychický),
- prípadného súčasného pôsobenia iných záťažových, či stresových faktorov [3].

Účinky elektromagnetických polí sa delia na tepelné a netepelné. Tepelné účinky vznikajú vtedy, ak množstvo absorbovanej energie v biologickom organizme spôsobí vzostup teploty presahujúci termoregulačné schopnosti organizmu. Závisia v prvom rade od frekvencie, t.j. platí, že s rastúcou frekvenciou sa zvyšujú tepelné účinky na organizmus, a tiež od obsahu vody v tkanive. Orgány zvlášť citlivé na zvýšenie teploty sú očná šošovka, mozog a semenníky. Pretože sa očná šošovka ťažko zbavuje tepla, môže už neveliká záťaž vysokofrekvenčným žiarením vyvolať jej zákal [3]. Netepelné účinky súvisia s dlhodobým pôsobením slabých polí.

Sú určené prevažne okamžitou amplitúdou nízkofrekvenčného žiarenia. Ich účinok stúpa pri opakovanom ožiarení pomerne nízkymi intenzitami, najmä pri vystavení impulznému poľu, pri ktorom je celková vyžiarená energia pomerne malá, ale okamžitá amplitúda veľká. Dlhodobé pôsobenie elektromagnetických poľí s malou hustotou výkonu sa prejaví predovšetkým na stave centrálnej nervovej sústavy. Prejavuje sa subjektívnymi ťažkosťami astenického typu ako napríklad pocit ochablosti, vyčerpanosti, ľahostajnosti, zvýšená únava, poruchy spánku, pokles koncentrácie - pozornosti, útlm intelektuálnych funkcií, zhoršenie pamäti, bolesti hlavy, emotívna labilita, znížená potencia [1],[3],[6].

V nasledujúcej tabuľke sú uvedené akčné hodnoty pre elektrické, magnetické a elektromagnetické polia podľa smernice 2004/40/EC.

Tabuľka 1
 Akčné hodnoty podľa smernice EC

Frekvenčný rozsah	Intenzita elektrického poľa, E (V/m)	Intenzita magnetického poľa, H (A/m)	Magnetická indukcia, B (μT)
0 – 1 Hz	—	$1,63 \times 10^5$	2×10^5
1 – 8 Hz	20000	$1,63 \times 10^5 / f^2$	$2 \times 10^5 / f^2$
8 – 25 Hz	20000	$2 \times 10^4 / f$	$2,5 \times 10^4 / f$
0,025 – 0,82 Hz	$500 / f$	$20 / f$	$25 / f$
0,82 – 2,5 Hz	610	24,4	30,7
2,5 – 65 kHz	610	24,4	30,7
65 – 100 kHz	610	$1\,600 / f$	$2\,000 / f$
0,1 – 10 MHz	610	$1,6 / f$	$2 / f$
1 – 10 MHz	$610 / f$	$1,6 / f$	$2 / f$
10 – 110 MHz	61	0,16	0,2
110 – 400 MHz	61	0,16	0,2
400 – 2 000 MHz	$3f^{1/2}$	$0,008 / f^{1/2}$	$0,01 / f^{1/2}$
2 – 300 GHz	137	0,36	0,45

Jedným zo základných spôsobov ochrany pred účinkami elektromagnetických poľí je ich tienenie. Je ním možné obmedziť jednak vzájomné ovplyvňovanie zariadení, jednak expozíciu obyvateľstvu. [7]

Mieru tienenia je možné vyjadriť podľa tzv. koeficientu tienenia [8],[9]. V prípade elektrického a magnetického poľa:

$$K_s = \frac{E_2}{E_1} \quad (4)$$

$$K_s = \frac{H_2}{H_1} \quad (5)$$

kde E_1, H_1 predstavuje intenzitu elektrického a magnetického poľa dopadajúceho na tieniacu prepážku (bariéru), E_2, H_2 predstavuje intenzitu elektrického a magnetického poľa za tieniacou bariérou.

Účinnosť tienenia SE sa vyjadrí podľa:

$$SE = 20 \log \frac{|E_1|}{|E_2|} \text{ (dB)} \quad (6)$$

$$SE = 20 \log \frac{|H_1|}{|H_2|} \text{ (dB)} \quad (7)$$

V nasledujúcej tabuľke je uvedené rozdelenie tieniacich zábran (bariér) podľa účinnosti tienenia.

Tabuľka 2
Rozdelenie tieniacich bariér podľa SE [10]

Kategória	SE (dB)
Nedostatočné tienenie	0-10
Tienenie pre minimálne požiadavky	10-30
Tienenie dostačujúce pre väčšinu bežných požiadaviek	30-60
Veľmi dobré tienenie	60-90
Tienenie veľmi vysokej kvality	90-120

Platí, že čím je menšia hĺbka vniku do tieniaceho materiálu, tým je hustota indukovaných prúdov na povrchu materiálu vyššia a tým väčšie je aj indukované magnetické pole pôsobiace proti účinkom pôvodného poľa. Teda nižšia hĺbka vniku do tieniaceho materiálu znamená vyššiu účinnosť tienenia.

III. MODELOVANIE ELEKTROMAGNETICKÉHO POĽA

Pre riešenie elektromagnetických polí sú k dispozícii analytické a numerické metódy. Pri numerickom riešení elektromagnetického poľa sa vychádza z Maxwellových rovníc, ktoré sú doplnené o určité materiálové konštanty [11]. V súčasnosti sa využívajú počítačové programy využívajúce metódu konečných prvkov. Metóda konečných prvkov je numerická metóda, ktorá transformuje systém obyčajných alebo parciálnych diferenciálnych rovníc, ktoré opisujú danú úlohu, na systém algebrických rovníc, ktoré sa dajú riešiť na počítači. Diferenciálne rovnice sú zostavené pre neznámu funkciu riešeného poľa. Riešením rovníc je táto funkcia splňujúca počiatočné a okrajové podmienky riešenia. Pri riešení sa pre neznámu funkciu poľa zvolí vhodná náhradná funkcia, splňujúca počiatočné a okrajové podmienky. Metóda konečných prvkov sa zavádza v oblastiach, kde sa počíta pole, uzly a uzlové potenciály [12],[13].

Postup pri aplikácii metódy konečných prvkov:

- generovanie siete prvkov s uzlami,
- aproximácia potenciálu na jednotlivých prvkoch z uzlových hodnôt,
- zostavenie sústavy rovníc pre neznáme uzlové hodnoty,
- vyriešenie sústavy,
- spracovanie dodatočných požiadaviek - výpočet ďalších veličín a zobrazenie výsledkov.

Modelovanie bolo realizované v programovom prostredí Ansys Workbench. Ako zdroj bol zvolený medený materiál o priemere 2 cm a dĺžke 20 cm s nastaveným prúdom 100 A a napätím 200 V pri teplote 25 °C. Sledovala sa účinnosť tienenia pri zmene relatívnej permeability tieniaceho materiálu, pri zmene jeho hrúbky a frekvencie. Okolie predstavuje vzduch. Magnetický vektorový potenciál A je nulový pozdĺž hranice okolia. Modelovanie bolo vykonané v 3D prostredí, pričom konvergencia výsledkov nebola realizovaná. Meracie sondy sú umiestnené v mieste dopadu intenzity poľa na bariéru vo vzdialenosti 0,24-0,46 cm pred bariérou vo výške 11,87-12,41 cm od x-ovej osi a v mieste tieneneho priestoru, t.j. za bariérou vo vzdialenosti 0,32-0,54 cm od bariéry, vo výške 11,68-12,31 cm od x-ovej osi.

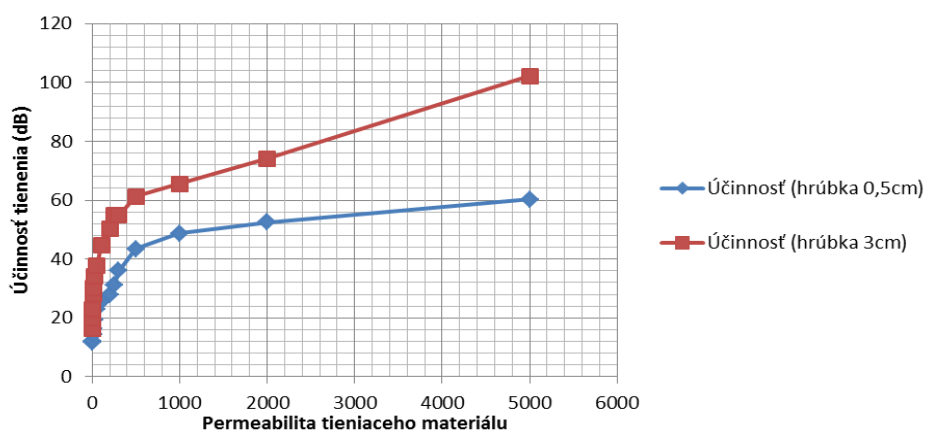
Tabuľka 3
 Závislosť účinnosti tienenia od zmeny relatívnej permeability pri hrúbke 0,5 cm a 3cm pre magnetickú zložku.

Relatívna permeabilita materiálu [-]	Hrúbka 0,5cm			Hrúbka 3cm		
	Intenzita pred bariérou (A/m)	Intenzita v mieste tieného priestoru (A/m)	Účinnosť tienenia (dB)	Intenzita pred bariérou (A/m)	Intenzita v mieste tieného priestoru (A/m)	Účinnosť tienenia (dB)
1	521,651	136,630	11,636	521,44	80,892	16,185
2	521,732	132,650	11,894	521,42	52,497	19,941
5	521,533	130,150	12,056	521,35	37,252	22,919
10	520,121	100,260	14,299	521,23	20,412	28,142
15	521,361	80,106	16,269	521,72	16,164	30,177
25	533,752	57,088	19,415	521,63	10,120	34,243
55	520,531	37,489	22,850	521,35	6,635	37,905
105	520,961	27,006	25,706	520,85	3,033	44,696
200	521,242	21,179	27,822	522,01	1,610	50,217
250	521,681	14,526	31,105	520,32	0,952	54,752
300	521,774	8,204	36,069	521,76	0,944	54,849
500	521,510	3,514	43,429	521,36	0,452	61,239
1000	521,094	1,909	48,722	522,13	0,277	65,505
2000	521,361	1,242	52,460	521,45	0,103	74,087
5000	521,271	0,508	60,223	521,65	0,00410	102,091

V prípade elektrického poľa sa intenzita v závislosti od relatívnej permeability nemení. V tabuľke 4 sú preto uvedené hodnoty intenzity pred bariérou a v mieste tieného priestoru pri hrúbke 0,5 cm a 3 cm.

Tabuľka 4
 Závislosť účinnosti tienenia pri zmene hrúbky 0,5 cm a 3cm pre elektrickú zložku.

Hrúbka 0,5 cm			Hrúbka 3 cm		
Intenzita pred bariérou (V/m)	Intenzita v mieste tieného priestoru (V/m)	Účinnosť tienenia (dB)	Intenzita pred bariérou (V/m)	Intenzita v mieste tieného priestoru (V/m)	Účinnosť tienenia (dB)
606,9	19,516	29,854	667,57	7,580	38,896



Obr. 2 Závislosť účinnosti tienenia pri zmene permeability a hrúbky materiálu.

IV. ZÁVER

Tento príspevok pojednáva o problematike elektromagnetických polí, ich účinkoch a možnosti ako znížiť ich expozíciu tienením. Následne boli vykonané simulácie závislosti účinnosti tienenia pri zmene permeability a hrúbky tieniaceho materiálu. Teplota okolia predstavovala 25 °C a rezistivita materiálu bola konštantná $\rho=1,7 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot m$. Získané výsledky zo

simulácie sú vyhodnotené v tabuľke 3, 4 a na obrázku 2, pričom v prvom prípade sa sledovala účinnosť tienenia v závislosti od permeability materiálu pri vzdialenosti 0,5 cm od zdroja a pri hrúbke 0,5 cm. V druhom prípade bola zmenená hrúbka bariéry na 3 cm. Tieniaci materiál vykazoval najmenšiu účinnosť pri relatívnej permeabilite 1 a hrúbke 0,5 cm, konkrétne 11,636 dB. Najvyššia účinnosť bola dosiahnutá pri hrúbke 3 cm, relatívnej permeabilite 5000 a pri vzdialenosti 0,5 cm od zdroja, konkrétne 102,091 dB. Vzhľadom na rozptyl umiestnených sond má intenzita poľa pred bariérou premenlivé hodnoty. V prípade elektrického poľa bola pri hrúbke tieniacej bariéry 0,5 cm účinnosť 29,854 dB, a pri hrúbke 3 cm bola účinnosť tienenia 38,896 dB.

Ďalšie experimenty budú zamerané na štúdie vplyvu zmeny kombinácie relatívnej permeability a rezistivity tieniaceho materiálu pri zmene frekvencie na rozloženie magnetickej ako aj elektrickej zložky elektromagnetického poľa

POĎAKOVANIE

Táto práca vznikla vďaka podpore v rámci operačného programu Výskum a vývoj pre projekt: Ochrana obyvateľstva Slovenskej republiky pred účinkami elektromagnetického poľa, s kódom ITMS: 26220220145, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.



Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku.
Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ.

REFERENCIE

- [1] P. Vecchia, et al, *Exposure to high frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (100kHz to 300GHz)*. INCIRP 16/2009
- [2] M. Kmec, M. Hvizdoš, *Skúšky digitálnych ochrán prístrojov Omicron CMC*, Electrical Engineering and Informatics 3.: Proceeding of the Faculty of Electrical Engineering and Informatics of the Technical University of Košice, Košice: FEI TU, 2012. s. 705-710. ISBN 978-80-553-0890-6
- [3] A. Mészáros, *Elektrotechnika a problémy životného prostredia*. Košice, KEE FEI TU, 2009. 304 s. ISBN 978-80-553-0175-4
- [4] K. Marton, J. Balogh, J. Džmura, J. Petráš, *Elimination of dust particle sedimentation in industry environment*. Journal of Electrostatics, (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.elstat.2012.12.026J>.
- [5] J. Zbojovský, M. Pavlík, *Sources, use and measurement of electromagnetic field*, In: SCYR 2012: proceedings from conference: 12th Scientific Conference of Young Researchers: May 15th, 2012, Herľany, Slovakia. - Košice: TU, 2012 s. 407-410. - ISBN 978-80-553-0943-9
- [6] J. Vrba, *Lékařské aplikace mikrovlnné techniky*. Vydavatel'stvo ČVUT, Praha 2003
- [7] P. Šimunek, K. Kluch, J. Tkáč, *Životné prostredie*, ES SVŠT Bratislava, 1991. 208 s., ISBN 80-227-0335-4.
- [8] S. Celozzi, R. Araneo, G. Lovat, *Electromagnetic Shielding*. Electrical Engineering Department La Sapienza University Rome, Italy, IEEE Press
- [9] E. Ůnal, A. Gökçen, Y. Kutlu, *Effective Electromagnetic Shielding*. IEEE Microwave magazine, 1527-3342, 2006, s. 48 – 54.
- [10] IEEE Guide--Adoption of IEC/TR 61000-3-7:2008, *Electromagnetic compatibility (EMC)--Limits--Assessment of emission limits for the connection of fluctuating installations to MV, HV and EHV power systems*. IEEE Std 1453.1-2012 (Adoption of IEC/TR 61000-3-7:2008), 78s, 2012, E-ISBN: 978-0-7381-7285-9.
- [11] D. Medveď, *Modeling of Electromagnetic Fields Close to the Very High Voltage and Extra High Voltage Poles*. In: Elektroenergetika, Vol.5, No. 2, 2012. ISSN 1337-6756, s. 17-19
- [12] V. Ivančo, K. Kubín, K. Kostolný, *Metóda konečných prvkov I*. Technická univerzita v Košiciach, Elfa, 1994, 80 s., ISBN 80-96731-4-0
- [13] D. Mayer, B. Ulrych, *Základy numerického řešení elektrických a magnetických polí*, SNTL/ALFA Praha 1988, 208 s., 04-528-88