

Izračun magnetnega polja okrog dolgih neprevodnih magnetnih zaslonov

Edi Bulić, Anton R. Sinigoj

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: edi.bulic@fe.uni-lj.si

Povzetek. Predstavljena je numerična metoda za izračun kvazistatičnega magnetnega polja v okolici ravnih tokovodnikov in njim vzporednih dolgih magnetnih zaslonov. Metoda predvideva, da so zasloni slabo prevodni, lamelni ali feritni, oziroma neprevodni. Izračun polja sledi iz predhodne določitve tokov magnetizacije na površinah magnetnih zaslonov. Za verifikacijo metode so prikazani rezultati zastiranja magnetnega polja ravnega tokovodnika z zelo širokim ravnim neprevodnim magnetnim zaslonom, pri katerem moremo kot aproksimativno uporabiti analitično rešitev za “neskončno” razsežen magneten in/ali prevoden zaslon. Iz primerjave je razvidno, da je predlagana metoda vsekakor primerna za neprevodne, delno pa tudi za prevodne magnetne zaslone, kar je gotovo dobrodošlo, saj kot takšna omogoča analizo širšega spektra zaslonkih struktur. Z uporabo predlagane metode in metode vrtničnih tokov je predstavljena primerjava učinkov zastiranja magnetnega polja dvovoda z zaslonom profila U, prvič s slabo prevodnim magnetnim, drugič s prevodnim nemagnetnim, tretjič z dvoplastnim magnetno-prevodnim in četrtič z dvoplastnim prevodno-magnetnim zaslonom. Iz primerjave gostotnic magnetnega polja sta lepo razvidna fizikalna principa zastiranja enega in drugega zaslonov, iz primerjav faktorjev zastiranja pa tudi učinkovanje posameznih zaslonov.

Ključne besede: magnetno zaslanjanje, ploskovni toki, integralske enačbe, momentna metoda

Computation of the Magnetic Field around Long Nonconducting Magnetic Shields

Extended abstract. A numerical method for computation of the quasi-static magnetic field in the vicinity of long nonconducting magnetic shields placed parallel with straight conductors is presented. The primary magnetic-field source are time-harmonic currents in conductors. The purpose of the shields is to reduce the magnetic-flux density in a particular region. The shielding efficiency can be determined by a comparison of the primary and total field.

The method assumes the magnetic shields to be electrically nonconducting, ferrite, laminated, or weakly conducting, so that the impact of the induced eddy currents is negligible. The calculation of the field in the vicinity of the shield structure is based on a preceding determination of the magnetization current distribution on the shield surfaces. This distribution results from the solution of the appropriate integral equation which we solve by using the moment method.

If the flat magnetic and/or conducting shield is exceedingly wide (Fig. 2), the analytical solution (5) for the infinite planar shield can be applied. This enables verification of the method and the numerical procedure. As seen from the comparison given in Fig. 3, the proposed method is suitable for weakly conducting and also in some cases for conducting magnetic shields thus enabling the analysis of a wider spectrum of the shield structures.

The proposed method offers an excellent insight in the shielding effect and is found to be a very useful tool in designing shielding structures. This is demonstrated in the case of shielding the magnetic field from a pair of conductors by a

U-shaped shield (Fig. 4). We compare four types of shields: a) weakly conducting magnetic, b) conducting nonmagnetic, and two shields that consist of two layers, c) the first one has its inner layer magnetic and the outer conducting and d) the second one has its inner layer conducting and the outer magnetic. The first of the four types of shields is analysed with the proposed method, the second one with the multiconductor method [1], and the last two with a concept reasonably combining both methods. Figs. 5 and 6 show the magnetic-flux lines and distribution of the shielding factor, respectively, in the vicinity of the shield.

Key words: magnetic shielding, surface currents, integral equations, moment methods

1 Uvod

Pričujoče delo obravnava zastiranje harmoničnega magnetnega polja snopa ravnih tokovodnikov z neprevodnimi magnetnimi zasloni in je nekakšno nadaljevanje članka [1], ki se je ukvarjal z zastiranjem enakega polja s prevodnimi nemagnetnimi zasloni. Pri tem se seveda zavedamo, da so tako eni kot drugi le poseben primer splošnega prevodno-permeabilnega zaslonov.

Razlogi, ki narekujejo ločeno obravnavo različnih vrst zaslonov, so ali praktični ali teoretični ali numerični. Za-

kaj? V praksi so zasloni pogosto iz aluminija ali drugih prevodnih nemagnetnih materialov, lahko pa so tudi iz šibko prevodnih feritov ali lamelni, zato je vsakršna poenostavitev elektromagnetnih karakteristik (tudi v luči frekvence) prej dobrodošla kot ne. Izkaže se, da sta teoretični obravnavi prevodnih nemagnetnih in neprevodnih magnetnih zaslonov razmeroma preprosti in numerično ne preveč zahtevni, medtem ko je celovita analiza hkrati prevodnih in magnetnih zaslonov razmeroma zahtevno in obsežno numerično opravilo.

Čeravno je sestavek zasnovan kot nadaljevanje problematike zastiranja magnetnega polja, dolgujemo krajši uvod. Potrebe po zaslanjanju magnetnega polja narekujejo kriteriji elektromagnetne kompatibilnosti in standardi za neionizirajoča sevanja. Zmanjšanje polja v določenem območju dosežemo lahko z nameščanjem zaslonov [2, 3]. Njihovo učinkovitost pogojujejo elektromagnetne karakteristike, frekvenca, položaj, oblika, velikost, debelina in električne povezave.

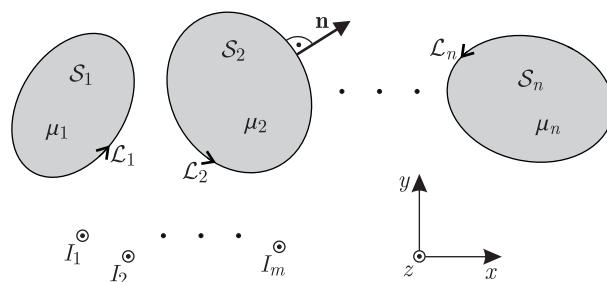
O pregledu različnih metod za analizo učinkovitosti zaslanjanja povejmo naslednje. Klasične so različne analitične ocene [4, 5, 6, 7, 8]; te so računsko preproste, imajo pa vrsto omejitev, ki izhajajo iz poenostavitev. Pomanjkljivosti odpravljajo primerne numerične metode. Zaradi praviloma odprtih mej in tankih zaslonov se metoda končnih elementov ne izkaže kot najbolj primerna, saj zahteva veliko elementov; v literaturi jo zasledimo v vlogi verifikacije kakšnega drugega učinkovitejšega pristopa [7, 8]. Navedene težave v znatni meri zaobidejo integralske metode, pri katerih se diskretizirajo le zasloni ali njihove površine, kar bistveno zmanjšuje potrebno število neznank numeričnega postopka. Eno takšnih, ki temelji na določitvi vrtilničnih tokov v zaslonih in je primerna za analizo prevodnih nemagnetnih struktur, smo predstavili v [1]. Njej tokrat pridružujemo metodo, ki temelji na magnetizaciji oziroma iskanju porazdelitve ploskovnih tokov [9] po površinah magnetnih neprevodnih zaslonov.

2 Opredelitev problema

Na sliki 1 je prikazan prerez zaslonске strukture. Opraviti imejmo s snopom tankih vzporednih vodnikov s harmoničnimi toki I_1, I_2, \dots, I_m npr. industrijske frekvence 50 Hz (kot viri primarnega magnetnega polja) in njim vzporednimi permeabilnimi in neprevodnimi ali slabo prevodnimi, feritnimi ali lamelnimi zasloni oziroma takšnimi, za katere velja, da je učinek v njih induciranih vrtilničnih tokov na celotno magnetno polje zanemarljiv; kar je, kot vemo, doseženo tedaj, ko vdorna globina nekajkrat preseže prečne izmere zaslonov.

Preseki zaslonov so S_1, S_2, \dots, S_n , njihovi robovi so $\mathcal{L}_1, \mathcal{L}_2, \dots, \mathcal{L}_n$, S in \mathcal{L} sta uniji presekov oziroma robov, $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ so permeabilnosti zaslonov in \mathbf{n} je eksterni normalni vektor.

Analizo bomo izvedli v kompleksnem prostoru, elek-



Slika 1. Presek zaslonov in vodnikov
Figure 1. Cross-section of shields and conductors

tromagnetno polje pa razumeli kot kvazistatično. Učinek zaslanjanja bomo vrednotili s faktorjem zastiranja s_B , ki je v splošni točki T definiran z razmerjem absolutnih vrednosti vektorjev gostot magnetnega pretoka primarnega (\mathbf{B}_0) in celotnega polja (\mathbf{B}):

$$s_B(T) = \frac{|\mathbf{B}_0(T)|}{|\mathbf{B}(T)|}. \quad (1)$$

3 Teorija

Neprevodne magnetne zaslone bomo v elektromagnetno analizo vključili s pomočjo ekvivalentnega ploskovnega toka gostote \mathbf{K} po površinah zaslonov, ki korelira z vektorjem magnetizacije tik pod njo (v točki T_-) in je sorazmerna tudi tangencialni komponenti vektorja gostote magnetnega pretoka $\mathbf{n} \times \mathbf{B}$ v sami površini magnetnega zaslonu [9], [10, razdelek 22]:

$$\mathbf{K}(T) + \frac{2}{\mu_0} \beta(T) \mathbf{n}(T) \times \mathbf{B}(T) = \mathbf{0}. \quad (2)$$

T je splošna točka v površini zaslonu, faktor $\beta(T) = (\mu(T_-) - \mu_0) / (\mu(T_-) + \mu_0)$ pa določata permeabilnosti prostorov z obeh strani meje. Če vektor \mathbf{B} v tej enačbi izrazimo kot vsoto primarnega polja (\mathbf{B}_0) in polja ploskovnega toka gostote $\mathbf{K} = \mathbf{e}_z K_z$, dobimo integralsko enačbo za funkcijo K_z :

$$K_z(T) - \frac{\beta(T)}{\pi} \oint_{\mathcal{L}} K_z(T') \frac{\mathbf{n}(T) \cdot \mathbf{P}}{P^2} dl' = -\frac{2\beta(T)}{\mu_0} \mathbf{e}_z \cdot (\mathbf{n}(T) \times \mathbf{B}_0(T)), \quad (3)$$

kjer je $\mathbf{P} = \overrightarrow{TT'} = (x' - x, y' - y)$ distančni vektor med površinskima točkama $T(x, y)$ in $T'(x', y')$.

S pridobljeno rešitvijo integralske enačbe (3) izrazimo vektorski magnetni potencial oziroma njegovo komponento z kot vsoto primarnega polja A_{0z} in polja ploskovnega toka,

$$A_z(T) = A_{0z}(T) - \frac{\mu_0}{2\pi} \oint_{\mathcal{L}} K_z(T') \ln \overline{TT'} dl', \quad (4)$$

v nadaljevanju pa še vektor gostote magnetnega pretoka iz enačbe $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ v okolici zaslonke strukture.

Integralno enačbo (3) smo reševali z momentno metodo; za poskusne funkcije smo izbrali pravokotne impulze na primerno kratkih podintervalih robu \mathcal{L} , za testne pa Diracove δ -funkcije.

4 Numerični rezultati

4.1 Zelo širok raven zaslon

Primernost in natančnost predlagane metode smo ugotavljali na primeru zelo širokega ravnega magnetnega zaslonka širine w in debeline t , ki je nameščen na višini y_C nad tokovodnikom (slika 2). Zanj moremo kot aproksimativno uporabiti kar analitično rešitev za "neskončno" razsežen permeabilen in hkrati tudi prevoden zaslon [11, 6].

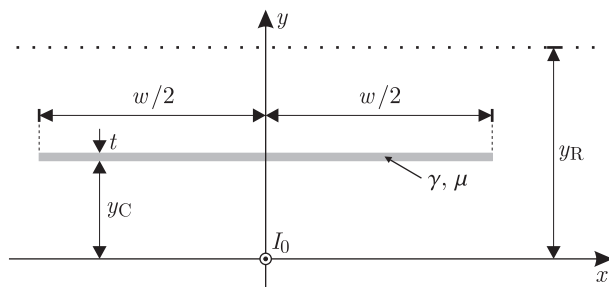
Za komponento A_z vektorskega magnetnega potenciala nad zaslonom dobimo naslednji integral:

$$A_z(x, y > y_C + t) = \int_0^{\infty} f(\xi) e^{-\xi y} \cos(\xi x) d\xi. \quad (5)$$

Funkcija $f(\xi)$ sledi iz mejnih pogojev za tangencialni komponenti poljskih jakosti na spodnji in zgornji površini zaslonka in se izraža v naslednji obliki:

$$f(\xi) = \frac{I_0 \mu \mu_0^2}{\pi} \sqrt{\xi^2 - k^2} e^{t\xi} \cdot \left(2\mu \mu_0 \xi \sqrt{\xi^2 - k^2} \cosh\left(t\sqrt{\xi^2 - k^2}\right) + \left(\mu^2 \xi^2 + \mu_0^2 (\xi^2 - k^2)\right) \sinh\left(t\sqrt{\xi^2 - k^2}\right) \right)^{-1}, \quad (6)$$

kjer je $k = \sqrt{-j\omega\mu\gamma}$ valovno število prevodno-magnetnega zaslonka. V numeričnih postopkih smo vrednosti pričujočega Fourierjevega integrala (5) računali do zgornje meje 10^4 .



Slika 2. Zelo širok raven zaslon nad vodnikom
Figure 2. Exceedingly wide flat shield above the conductor

Glede na to, da obravnavana metoda (zaradi zgolj privzete neprevodnosti magnetnih zaslonov) ne vključuje

vrtničnih tokov, smo njene rezultate primerjali z rezultati analitične aproksimacije za različne specifične prevodnosti γ zaslonka. Na sliki 3(a) je prikazan potek absolutnih vrednosti gostote magnetnega pretoka nad zaslonom na višini $y_R = 15$ cm nad vodnikom, na sliki 3(b) pa je prikazan potek relativnega odstopanja rezultatov predlagane metode od analitične aproksimacije v istih točkah. Številski podatki za ta primer so bili: $I_0 = 100$ A, $f = 50$ Hz, $t = 4$ mm, $y_C = 5$ cm, $w = 4$ m in $\mu = 100\mu_0$. Ob sredini zaslonka je ujemanje solidno (pri manjši prevodnosti zaslonka), vstran pa prihaja do odstopanja analitične aproksimacije, saj ta ne upošteva dane širine zaslonka. Iz primerjav je razvidno tudi, da je predlagana metoda povsem korektna za slabo prevodne, delno pa tudi za prevodne magnetne zaslonke (pri $x = 0$ m in $\gamma = 1$ kS/m je odstopanje približno $-0,02\%$, pri $\gamma = 10$ kS/m je $0,27\%$ in pri $\gamma = 100$ kS/m pa $2,98\%$), kar je gotovo dobrodošlo, saj metoda kot takšna očitno omogoča analizo tudi nekoliko širšega spektra zaslonkih struktur.

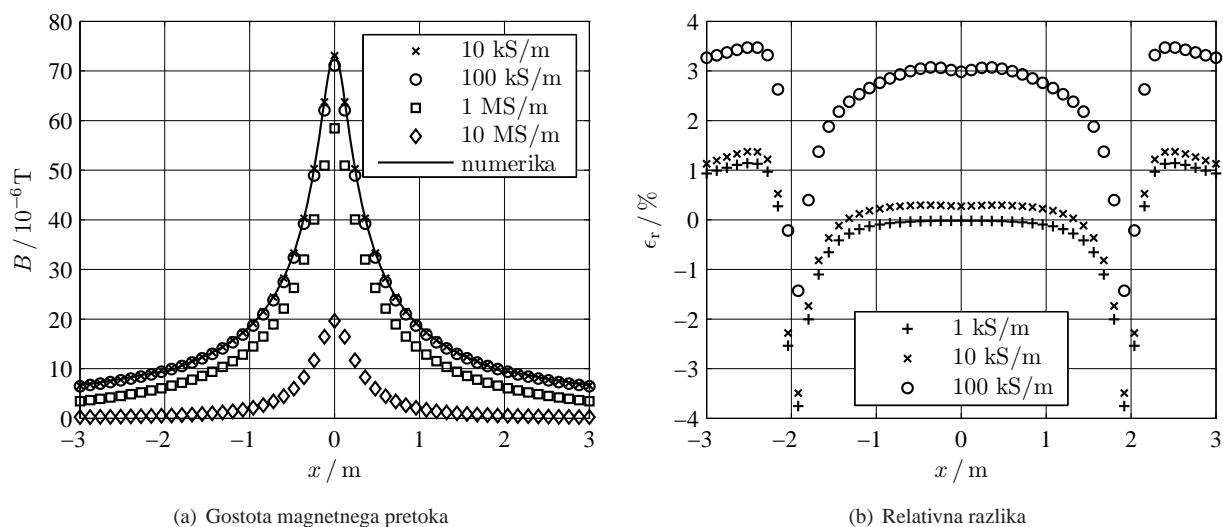
4.2 Večzaslonske strukture

S pomočjo predlagane metode smo preverili učinek zastiranja tridelnega zaslonka profila U (slika 4), ki naj zastira magnetno polje para tokovodnikov oziroma dvovoda medosne razdalje $2d = 10$ cm s tokom $I_0 = 100$ A. Širini rež med posameznimi deli zaslonka sta enaki $s = 3$ mm, širina zgornjega dela je $w = 30$ cm, višina stranskih je $h = 18$ cm in dvig $y_C = 7$ cm.

Da bi rezultate lahko primerjali tudi z rezultati snovno drugačnih zaslonov, smo za prikaz izbrali dve snovi: slabo prevodno magnetno ($\gamma = 1$ kS/m, $\mu = 1000\mu_0$) in prevodno nemagnetno ($\gamma = 30,5$ MS/m, $\mu = \mu_0$). Iz teh materialov smo sestavili štiri različne zaslonke: a) slabo prevodni magnetni zaslon debeline $t = 6$ mm, b) prevodni nemagnetni zaslon enake debeline, c) dvoplastni zaslon, notranje magnetne plasti, debeline $t = 3$ mm, in zunanje enako debele prevodne plasti z medsebojnim razmikom 3 mm in d) dvoplastni zaslon, enak prejšnjemu, le da sta prevodno magnetni plasti zamenjani.

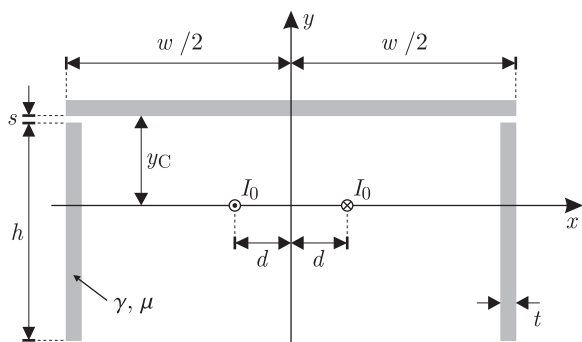
Primer zaslonka a) smo analizirali s predlagano metodo, primer zaslonka b) z metodo vrtničnih tokov, ki je bila predstavljena v [1], primera c) in d) pa z metodo, ki smiselno združuje obe prejšnji, in sicer da se pri določanju vrtničnih tokov v prevodnih nemagnetnih zaslonkih upošteva še elektromagnetno polje ploskovnih tokov na magnetnih zaslonkih, in da se pri določanju teh ploskovnih tokov upošteva tudi magnetno polje omenjenih vrtničnih tokov. Takšna zloženka enačb predstavlja sklopljen sistem integralnih enačb, ki ga rešujemo z momentno metodo.

Na sliki 5 so prikazane gostotnice magnetnega polja v trenutku 0 s za vse štiri konfiguracije (sive so gostotnice primarnega polja). Iz levih dveh slik je razvidno, da mag-



Slika 3. Primerjava absolutnih vrednosti gostot magnetnega pretoka nad širokim ravnim zaslonom, ki je nad vodnikom, izračunanih po numerični metodi in z analitično aproksimacijo

Figure 3. Comparison of the absolute values of the magnetic flux density calculated numerically and with the analytical approximation above an exceedingly wide flat shield placed above the conductor



Slika 4. Večzaslonska struktura profila U ob dvovodu
Figure 4. U-profile multiple shield structure around a bifilar pair of conductors

netni zaslon gostotnice “vsrka” (v literaturi zasledimo pojem “flux shunting” [12, razdelek B.1]), iz desnih, da se gostotnice pod prevodnim zaslonom “stisnejo” k tokovodnikoma, vsakokrat pa pride do občutnega zmanjšanja gostote pretoka izza zaslonov. Pri dvoplastnih zaslonih je očitno prevladujoč učinek dvovodu bližnje plasti.

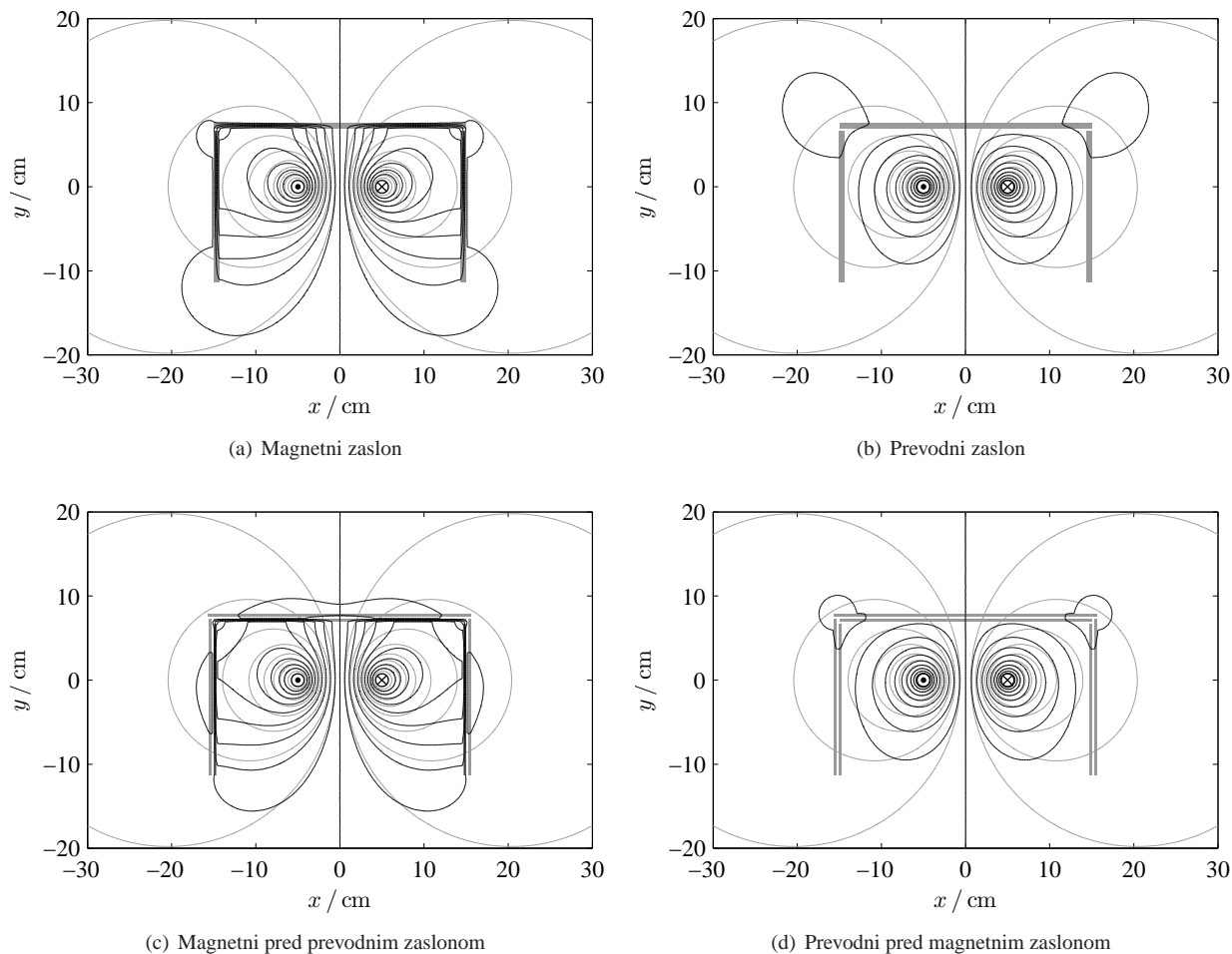
Slika 6 prikazuje porazdelitev faktorja zastiranja v okolici zaslonov. Pri zgornjih dveh zaslonih opazimo, da je zastiranje magnetnega zaslona boljše le neposredno za njim, sicer pa je povsod drugje boljše zastiranje prevodnega zaslona. Faktor zastiranja se občutno poveča pri spodnjih, dvoplastnih zaslonih, še posebej pri slednjem.

5 Sklep

Primerjava rezultatov predstavljene numerične metode in analitične rešitve za primer “neskončno” razsežnega zaslona kaže, da so njeni rezultati verodostojni. Izračun in prikaz polja ob zaslonih, ki ga omogoča metoda, je primerna podlaga za učinkovito dizajniranje le-teh. Metoda ne postavlja omejitev glede oblike in števila zaslonov in omogoča kombiniranje z metodo [1], kar rezultira v eni bolj splošnih za analizo 2D zaslonov. Pomanjkljivost tako sestavljene metode je gotovo v tem, da ne omogoča analize zaslonov, ki so hkrati prevodni in magnetni. No, o tem bomo poročali v prihodnjem sestavku.

6 Literatura

- [1] E. Bulić. “Izračun magnetnega polja okrog dolgih prevodnih nemagnetnih zaslonov.” *Elektrotehniški vestnik*, letn. 76, št. 1-2, str. 31–37, 2009.
- [2] J. F. Hoburg. “A Computational Methodology and Results for Quasistatic Multilayered Magnetic Shielding.” *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 38, no. 1, pp. 92–103, Feb. 1996.
- [3] W. M. Frix and G. G. Karady. “A Circuitual Approach to Estimate the Magnetic Field Reduction of Nonferrous Metal Shields.” *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 39, no. 1, pp. 24–32, Feb. 1997.
- [4] R. B. Schulz, V. C. Plantz, and D. R. Brush. “Shielding Theory and Practice.” *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 30, no. 3, pp. 187–201, Aug. 1988. Originally published in *Proc. 9th Tri-Service Conf. on Electromagnetic Compatibility*, Oct. 1963.
- [5] J. F. Hoburg. “Principles of Quasistatic Magnetic Shielding with Cylindrical and Spherical Shields.” *IEEE Trans.*



Slika 5. Gostotnice magnetnega polja v primeru tridelnega zaslona profila U iz različnih materialov, ki zastira polje dvovoda. Sive črte prikazujejo gostotnice primarnega polja.

Figure 5. Magnetic-flux lines in the case of the U-profile three-piece shield made of different materials and placed around the bifilar pair of conductors. Grey lines represent the magnetic-flux lines of the primary field.

Electromagn. Compat., vol. 37, no. 4, pp. 574–579, Nov. 1995.

[6] R. G. Olsen, M. Istenič, and P. Žunko. “On Simple Methods for Calculating ELF Shielding of Infinite Planar Shields.” *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 45, no. 3, pp. 538–547, Aug. 2003.

[7] L. Sandrolini, A. Massarini, and U. Reggiani. “Transform Method for Calculating Low-Frequency Shielding Effectiveness of Planar Linear Multilayered Shields.” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 36, no. 6, pp. 3910–3919, Nov. 2000.

[8] M. Istenič. *Zaščita pred magnetnim poljem ekstremno nizkih frekvenc z magnetnimi zasloni končnih dimenzij*. Doktorska disertacija, Fakulteta za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, 2003.

[9] W. P. Legros and P. G. Scarpa. “Fast Computation of Magnetic Field in Rotationally Symmetric Structures.” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 21, no. 6, pp. 2644–2651, Nov. 1985.

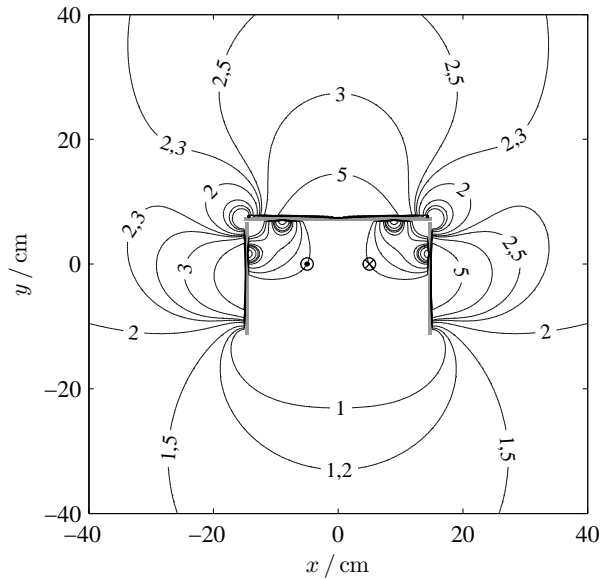
[10] A. R. Sinigoj. *ELMG polje*. Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 1996.

[11] J. R. Carson. “Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return.” *Bell System Technical Journal*, vol. 5, pp. 539–554, Oct. 1926.

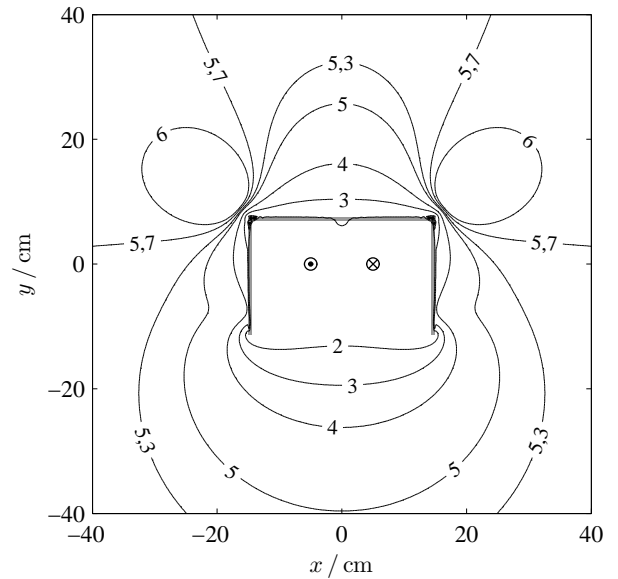
[12] S. Celozzi, R. Araneo, and G. Lovat. *Electromagnetic Shielding*. Wiley Series in Microwave and Optical Engineering. John Wiley & Sons, Hoboken, 2008.

Edi Bulič je diplomiral leta 1997, magistriral leta 2000 in doktoriral leta 2009, vse na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Od leta 1997 je na isti fakulteti zaposlen kot asistent. Raziskovalno se ukvarja z numeričnimi metodami za izračun elektromagnetnega polja.

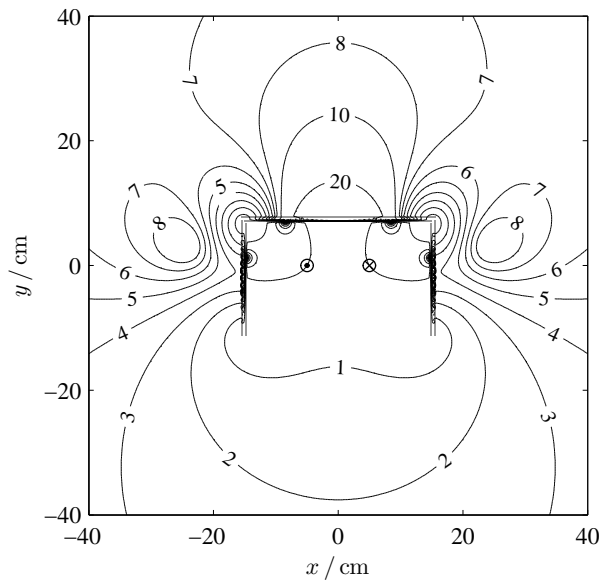
Anton R. Sinigoj je diplomiral leta 1978, magistriral leta 1981 in doktoriral leta 1989, vse na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Na fakulteti predava predmete Osnove elektrotehnike I in II in Elektromagnetiko. Ukvarja se s teorijo elektromagnetnega polja in numeričnimi metodami v elektromagnetiki.



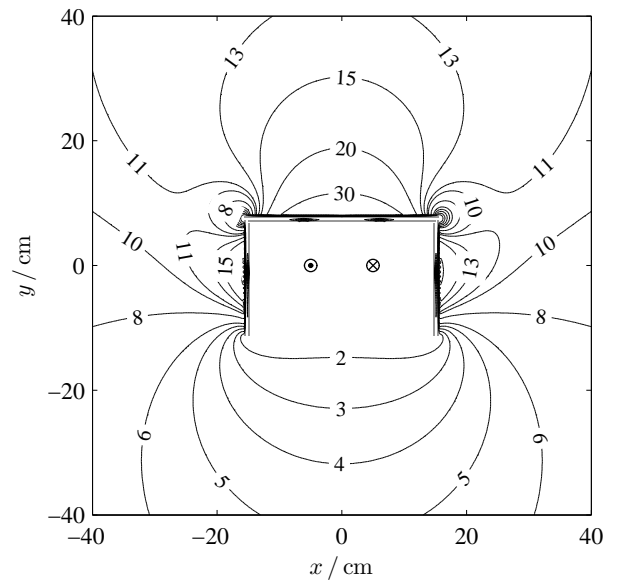
(a) Magnetni zaslon



(b) Prevodni zaslon



(c) Magnetni pred prevodnim zaslonom



(d) Prevodni pred magnetnim zaslonom

Slika 6. Faktor zastiranja okoli tridelnega zaslona profila U iz različnih materialov, ki zastira polje dvovoda
 Figure 6. Shielding factor around the U-profile three-piece shield made of different materials and placed around the bifilar pair of conductors