

## **Analýza vplyvu rádiovfrekvenčného žiarenia na biologický objekt**

Sedláček Martin · Elektrotechnika, Študentské práce

14.04.2012



Príspevok sa zaoberá analýzou účinkov rádiovfrekvenčného (RF) elektromagnetického vlnenia v biologickom objekte. Prostredníctvom jednoduchých príkladov sú modelované rôzne situácie pôsobenia planárneho elektromagnetického žiarenia s E typom polarizácie.

Výstupom sú rezonančné krivky ilustrujúce veľkosť absorpcie žiarenia v závislosti od rozmerov objektu a frekvencie pôsobiaceho žiarenia.

### **1. Úvod**

V posledných desaťročiach sa vplyvom rádiovfrekvenčného žiarenia na živé organizmy zaoberá okrem iných organizácií hlavne Svetová zdravotnícka organizácia (WHO, World Health Organisation) a Medzinárodná komisia pre ochranu pred neionizujúcim žiarením (ICNIRP, International Commission of Non-Ionizing Radiation Protection). Tieto stanovili limitujúce kritéria pre elektrické zariadenia z dôvodu ich elektromagnetickej kompatibility s ohľadom na minimalizáciu nežiaducich účinkov na človeka [1], [2].

Realizácia a vyhodnocovanie mnohých experimentov pre štúdium biologických účinkov elektromagnetického poľa je komplikovaná hlavne tým, že tieto experimenty nemôžu byť vždy jednoznačne aplikované na ľudí [3]. Z týchto dôvodov je absorpcia RF žiarenia v ľudskom tele skúmaná najmä použitím rôznych modelov, od modelov jednoduchších tvarov [4], použitím štruktúr zložených z viacerých vrstiev [5], až po anatomicky členené modely odvodené z CT, prípadne MRI tomografických meraní (Hugo model, Visible Man model) [6].

### **2. MW dozimetria**

Expozíciou elektromagnetickému žiareniu vznikajú v biologickom prostredí adekvátne elektrické odpovede. Intenzita spolu s priestorovým rozložením indukovaných prúdov sú výsledkom orientácie spomínaných polí a taktiež fyzických vlastností biologického objektu (geometria, hustota atď.) [1]. Pod charakterizáciou biologického systému rozumieme štruktúru, dimenzionálne atribúty a elektrické parametre. Medzi relevantné elektrické vlastnosti patria komplexná permitivita a elektrická vodivosť, ktorej hodnota je závislá od typu analyzovaného tkaniva a frekvencie rádiovfrekvenčného žiarenia.

Biologické dôsledky vystaveniu sa elektromagnetickej radiácii sú v značnej miere závislé na intenzite indukovaných prúdov. Kvantifikovať je však možno iba externé polia, čo je úlohou dozimetrie. Dozimetria je teda vedecká disciplína, vo všeobecnosti sa zaoberajúca interakciou vonkajších elektrických síl a im odpovedajúcich indukovaných prúdov v biologických materiáloch. Tieto, ako veľkosť dávky ožiarovania, popisujú experimentálne následky na laboratórnych zvieratách, čo sa v ďalších fázach výskumu využíva pre predikciu pôsobenia na ľudský organizmus.

V rozsiahlejšom frekvenčnom pásme, t.j. od 300 Hz do 300 GHz, sú v dozimetrii uvažované dva diferencované, vzájomne previazané parametre. Pre oblasť nižších frekvencií (frekvencie menšie ako 100 kHz) je významné kvantum fyziologických reakcií úmerné hodnote prúdovej hustoty v tkanive. Tento parameter vo všeobecnosti popisuje dozimetrickú kvantitu. V oblasti vyšších frekvencií sa pre kvantifikáciu rýchlosti absorpcie energie v hmote používa tzv. špecifická miera absorpcie, SAR [1].

## 2.1 Základné veličiny používané v dozimetrii

Špecifická miera absorpcie SAR je definovaná ako prírastok energie  $W_e$  za čas  $dt$  (prepočítané na jednotku času) a v elemente objemu tkaniva  $dV$  s elementom hmotnosti  $dm$  (prepočítané na jednotku hmotnosti) [7] :

$$SAR = \frac{d}{dt} \left( \frac{dW_e}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{\rho} \frac{dW_e}{dV} \right) \quad (1)$$

kde  $\rho$  je špecifická hustota tkaniva [ $\text{kg/m}^3$ ]. Špecifická miera absorpcie je udávaná v jednotkách [ $\text{W/kg}$ ]. Hustota elektrického prúdu, intenzita elektrického pola a špecifická miera absorpcie vo všetkých bodoch exponovaného biologického organizmu spolu interagujú podľa nasledujúcich vzťahov:

$$SAR = \frac{\sigma E_{rms}^2}{\rho} \quad (2)$$

kde  $E_{rms}$  je efektívna (rms) hodnota celkového indukovaného elektrického pola [ $\text{V/m}$ ] a  $\sigma$  je elektrická konduktivita tkaniva [ $\text{S/m}$ ],

$$SAR = \frac{J^2}{\sigma \rho} \quad (3)$$

kde  $J$  je hustota elektrického prúdu v danom mieste [ $\text{A/m}^2$ ]. Z uvedeného vyplýva, že SAR je lokálnym parametrom. Exaktné vyjadrenie tohto parametra je definované presnosťou výpočtu elektrofyzikálnych veličín špecifickej hustoty objektu, menovitej konduktivity a indukovaného elektrického pola. Energia odovzdávaná elektromagnetickým vlnením jednotkovej ploche kolmej na smer šírenia sa vlnenia, je definovaná ako hustota toku energie. Zodpovedá hodnote Poyntingovho vektora:

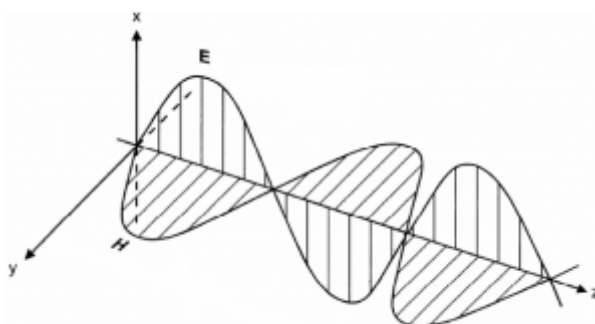
$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (4)$$

kde  $\vec{S}$  je Poyntingov vektor, označovaný aj  $\vec{V}$  [ $\text{W/m}^2$ ],  $\vec{E}$  je vektor intenzity elektrickej zložky vlnenia [ $\text{V/m}$ ] a  $\vec{H}$  je vektor intenzity magnetickej zložky vlnenia [ $\text{H/m}$ ]. Pri planárnom elektromagnetickom vlnení možno hustotu toku energie určiť z intenzity  $E$

elektrickej zložky alebo z intenzity  $H$  magnetickej zložky, alebo z magnetickej indukcie  $B$  s použitím impedancie vákua  $Z_0 = 377 \Omega$  [7]. Platí:

$$S = \frac{E^2}{Z_0} = H^2 Z_0 \quad (5)$$

Na obrázku (obr. 1) je vyobrazené transversálne elektromagnetické vlnenie, postupujúce v smere osi  $z$  spolu s elektrickou a magneticou zložkou. Je zrejmé, že elektrická zložka, magneticá zložka a smer šírenia sa vlnenia, sú vzájomne na seba kolmé.

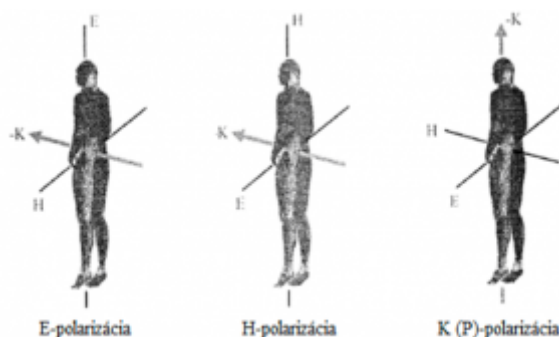


Obr. 1. Šírenie planárneho elektromagnetického vlnenia [8].

### 3. Absorpčné atribúty ľudského organizmu

Orientácia smeru šírenia sa mikrovlnného žiarenia, prípadne jednej z jeho zložiek (elektrická s intenzitou  $E$ , magneticá s intenzitou  $H$ ), v porovnaní s orientáciou osi situovanej v pozdĺžnom smere ľudského tela, je smerodajná pre vyhodnotenie typu polarizácie. Existujú nasledovné tri typy polarizácie [1]:

- E typ polarizácie - orientácia smeru šírenia sa elektrickej zložky je totožná s orientáciou osi situovanej v pozdĺžnom smere ľudského tela
- H typ polarizácie - orientácia smeru šírenia sa magnetickej zložky je totožná s orientáciou osi situovanej v pozdĺžnom smere ľudského tela
- K (P) typ polarizácie - orientácia smeru šírenia sa celkového mikrovlnného žiarenia je totožná s orientáciou osi situovanej v pozdĺžnom smere ľudského tela



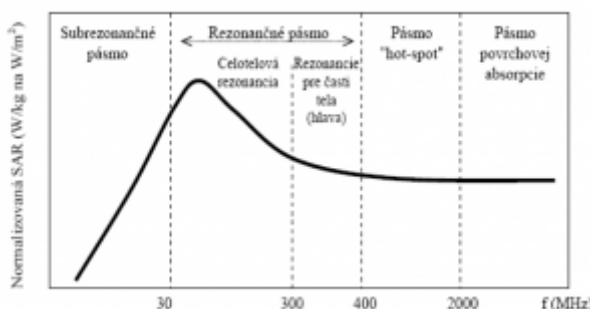
Obr. 2. Grafická ilustrácia uvedených typov polarizácie [6].

Rádiofrekvenčnú oblasť môžeme z dôvodu absorpčných atribútov ľudského organizmu rozčleniť na štyri frekvenčné pásma (viď. obr. 3.) [1]:

- **Sub-rezonančné pásmo**, je frekvenčná oblasť rozliehajúca sa pod 30 MHz,

charakteristická dominanciou povrchovej absorpcie radiácie pre torzo, nepôsobiacou však pre dolné končatiny a šiju. Príznačný je prudký vzostup hodnôt absorpcie vyžiarenej energie so zvyšujúcou sa frekvenciou.

- **Rezonančné pásmo**, je frekvenčná oblasť v rozmedzí od 30 MHz až do približne 300 MHz, s vplyvom na celé telo. Pri vzniku rezonancií v menších častiach tela (hlavne hlava) je horná frekvenčná medza situovaná v oblasti vyšších frekvencií (400 MHz).
- **Pásmo „hot spot“** je signifikantné pre frekvenčné rozmedzie od 400 MHz po približne 2-3 GHz. Hustota toku energie s hodnotou okolo 100 W/m<sup>2</sup> je príznačná pre lokálnu absorpciu energie, ktorá klesá so vzrastajúcou frekvenciou. Veľkosť horúcich miest (hot-spots) je dimenzovaná v rozsahu niekoľkých centimetrov pre 915 MHz až po 1 cm pre 3 GHz.
- **Pásmo povrchovej absorpcie**, je frekvenčná oblasť okolo 2-3 GHz, kde je zvýšenie teploty lokalizované a limitované výhradne na povrch tela.



Obr. 3. Normalizovaná hodnota parametra SAR v závislosti od frekvencie a rozdelenie rádiových pásiem podľa absorpčných vlastností človeka [7].

#### 4. Simulácia RF žiarenia v elipsoidnom modeli

V prostredí CST Microwave Studio budeme riešiť rozloženie elektromagnetického poľa v elipsoidnom modeli ľudského tela. Všestranný programový produkt CST Microwave Studio je určený pre elektromagnetické analýzy a návrh v mikrovlnnej oblasti. Zjednodušuje proces tvorby jednotlivých štruktúr poskytnutím efektívneho priestorového spôsobu modelovania. Výrazná grafická odozva dokonca ešte viac zjednodušuje samotnú konštrukciu požadovaného modelu. Po dokončení modelu komponentu, vstupuje do procesu ešte pred spustením simulácie, plne automatická procedúra, ktorá rozdelí štruktúru komponentu na jednotlivé bunky.

CST Microwave Studio využíva numerické metódy založené na integrálnej metóde elementov (FIT). Tento programový balík obsahuje tri rozdielne metódy numerických riešičov (solverov), t.j. riešenie v časovej oblasti (transient), riešenie vo frekvenčnej oblasti (frequency domain) a riešenie pomocou vlastných čísel (eigenmode solver). Pre účely našej simulácie sme používali transient solver [9].

##### 4.1. Definovanie vlastností modelu a elektromagnetického vlnenia

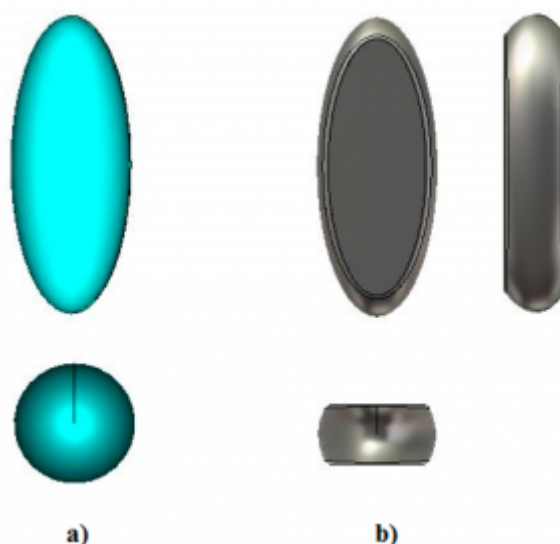
Budeme uvažovať planárne elektromagnetické vlnenie, t.j. exponovaný biologický objekt sa nachádza vo väčšej vzdialenosti od zdroja žiarenia, v tzv. oblasti vzdialenej zóny. Teda vektory elektrickej zložky a magnetickej zložky poľa sú navzájom kolmé a ležia v rovine kolmej na smer šírenia vlny. Smer šírenia sa vlnenia volíme tak, aby elektrická zložka vlny bola rovnobežná s pozdĺžnou osou elipsoidu, teda ide o E

polarizáciu.

Dôležité je správne nastaviť vlastnosti okolitého prostredia. Rovinná elektromagnetická vlna sa bude v našom prípade šíriť voľným prostredím, vzduchom (relatívna permitivita  $\epsilon_r = 1$  a relatívna permeabilita  $\mu_r = 1$ ). Hustotu toku elektromagnetickej energie sme si zvolili  $S = 1 \text{ W/m}^2$  a po úprave vzťahu (5) pre rovinné elektromagnetické vlnenie dostávame:

$$E = \sqrt{SZ_0} = \sqrt{377} = 19,42\text{V/m} \quad (6)$$

Okrajové podmienky rovinnnej elektromagnetickej vlny zdefinujeme ako otvorený priestor vo všetkých smeroch. Boli použité štyri trojdimenzionálne modely vzpriameného ľudského tela. Prvým modelom je elipsoidný model (obr. 4a) s rozmermi: x-ový polomer je  $x = 0,2 \text{ m}$  a y-ový polomer je  $y = 0,5 \text{ m}$  (t.j. výška modelu je  $1 \text{ m}$  a šírka modelu je  $0,4 \text{ m}$ ). Druhý analyzovaný model (obr. 4b) vznikol z prvého orezaním, t.j. z-ový polomer je  $0,1 \text{ m}$ . Tento model bol ožarovaný dvomi spôsobmi: z čelnej strany a z bočnej strany. Pre názornosť situácie boli použité i ďalšie dva elipsoidné modely s rozmermi polomerov  $x = 0,2 \text{ m}$ ;  $y = 1 \text{ m}$  a  $x = 0,1 \text{ m}$ ;  $y = 0,5 \text{ m}$ . Modely boli vytvorené z materiálu sval.



Obr. 4. Grafické zobrazenie analyzovaných modelov: a) štandardný elipsoid, b) orezaný elipsoid.

Pre jednotlivé simulované frekvencie nastavujeme vždy rôzne hodnoty elektrických parametrov materiálu sval ako sú elektrická konduktivita a relatívna permitivita. Hodnoty týchto parametrov pre zvolené frekvenčné rozpätie od  $50 \text{ MHz}$  po  $300 \text{ MHz}$  sú uvedené v nasledujúcej tabuľke (tab. 1). Konštantná ostáva samozrejme hodnota hustoty svalu  $1030 \text{ kg/m}^3$ .

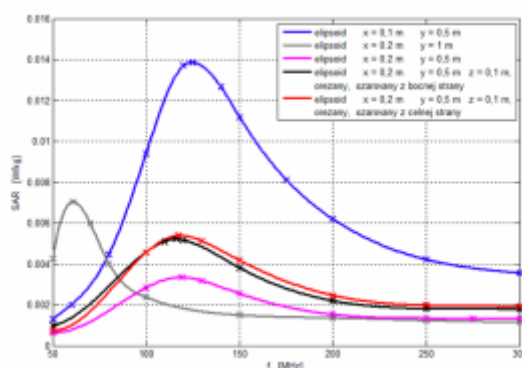
Tab. 1. Elektrické vlastnosti svalu pre zvolené frekvenčné rozpätie [10].

| Frekvencia [MHz] | Konduktivita [S/m] | Relatívna permitivita | Hĺbka vniku [m] |
|------------------|--------------------|-----------------------|-----------------|
| 50               | 0,67808            | 77,063                | 0,10098         |
| 100              | 0,70759            | 65,972                | 0,076742        |

|     |         |        |          |
|-----|---------|--------|----------|
| 150 | 0,72719 | 62,179 | 0,067153 |
| 200 | 0,74307 | 60,228 | 0,061904 |
| 250 | 0,75722 | 59,025 | 0,058515 |
| 300 | 0,77052 | 58,201 | 0,056077 |

#### 4.2. Spracované výsledky absorpcie RF žiarenia

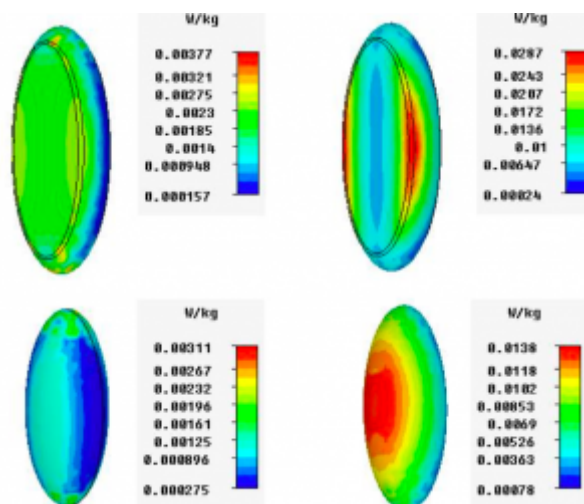
Výsledná absorpcia elektromagnetického žiarenia v elipsoidnom modeli ľudského tela je spracovaná vo forme grafického zobrazenia, t.j. ako rezonančná krivka. Ide o závislosť rms hodnoty parametra SAR spriemerovanej cez celý objem tela od frekvencie rovinatej elektromagnetickej vlny s E typom polarizácie.



Obr. 5. Rezonančné krivky pre jednotlivé modelované situácie

Z uvedených rezonančných kriviek vidno, že najvyššia efektívna hodnota parametra SAR sa dosahuje v prípade najužšieho elipsoidného modelu a najnižšia hodnota parametra SAR sa dosahuje v prípade najširšieho elipsoidného modelu. V prípade orezaného elipsoidu je absorpcia o niečo vyššia pri pôsobení elektromagnetického vlnenia z čelnej strany modelu.

Pri dvojnásobne vyššom modeli bola rezonančná frekvencia približne dvojnásobne nižšia. Tento záver nachádza samozrejme svoje opodstatnenie v teoretických poznatkoch. Absorpcia rádiokvencného žiarenia závisí od niekoľkých objektívnych parametrov. Z fyzikálneho hľadiska sú to predovšetkým intenzita, frekvenčné rozpätie a doba pôsobenia rádiokvencného žiarenia. Ďalšími podstatnými kritériami sú rozmery, hustota a s ňou súvisiaca hmotnosť objektu a podobne.



Obr. 6. Ilustrácia distribúcie parametra SAR v orezanom elipsoide pri pôsobení elektromagnetického žiarenia z čelnej strany s frekvenciami 50 MHz a 120 MHz, a identický prípad analyzovanej situácie pre štandardný elipsoidný model ( $x = 0,2$  m,  $y = 0,5$  m) v prostredí CST Microwave Studio.

Na uvedených ilustráciách orezaného elipsoidu (obr. 6 hore), pri pôsobení rovinného elektromagnetického vlnenia z čelnej strany, vidno rozloženie parametra SAR. Pri frekvencii 120 MHz, čo je frekvencia veľmi blízka rezonančnej pre danú situáciu, dosahujú hodnoty parametra SAR približne desaťnásobok hodnôt získaných pri frekvencii 50 MHz. Najvyššia miera absorpcie sa vyskytuje v oblastiach s malými rozmermi, t.j. po hranách orezaného elipsoidného modelu.

## 5. Záver

Cieľom tohto príspevku bolo analýza a riešenie rozloženia rádiofrekvenčného elektromagnetického poľa v elipsoidnom modeli biologického objektu. Pri simuláciách sme uvažovali rovinný charakter elektromagnetického vlnenia. Veľkosť absorpcie elektromagnetického vlnenia je vyjadrená parametrom SAR, ktorého celotelovú spriemerovanú hodnotu sme v závislosti od frekvencie spomínaného vlnenia vynášali do grafu. Analýzu a simuláciu rozloženia elektromagnetického poľa v časovej oblasti v prostredí CST Microwave Studio sme uskutočnili pre rôzne modelové situácie.

Výsledkom bolo potvrdenie skutočnosti, že veľkosť absorpcie značne závisí od rozmerov elipsoidného modelu a od smeru šírenia sa rovinnej elektromagnetickej vlny, pre zvolený spoločný typ tkaniva (sval). Pričom najvyššia hodnota parametra SAR sa dosahuje v prípade najužšieho elipsoidného modelu a najnižšia hodnota parametra SAR sa dosahuje v prípade najširšieho elipsoidného modelu. Pre prípad orezaného elipsoidu sa najvyššia miera absorpcie žiarenia dosahuje pri pôsobení vlnenia z čelnej strany modelu. Uvedené výsledky sú však ilustratívne, a to z dôvodu aproximácie ľudského tela homogénnym elipsoidným modelom, kde boli zanedbané jednotlivé typy tkanív a detailnejšie vypracovanie modelu.

## 6. Literatúra

1. WHO: Electromagnetic fields (300 Hz to 300 GHz). Environmental Health Criteria 137. World Health Organization, Geneva, 1993, ISBN 92 4 157137 3
2. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: Guidelines for limiting

- exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). In: Health Physics, Vol. 74, 1998, pp. 494-522
3. Cabanova, Z.: Biologické účinky elektromagnetického poľa, Advances in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 3, 2004, pp. 24-29
  4. Hirata, A. - Ito, N. - Fujiwara, O. - Nagaoka, T. - Watanabe, S.: Conservative estimation of whole-body-averaged SARs in infants with a homogeneous and simple-shaped phantom in the GHz region. In: Physics in Medicine and Biology, Vol. 53, N. 24, doi:10.1088/0031-9155/53/24/014, 2008
  5. Isteníková, K. - Faktorová, D.: Numerical simulation of transmission and reflection coefficients in layered biological structures. In: Proceedings of YBERC 2010 Conference. Košice, Slovakia, 1.-3. July, 2010. Košice: TU, 2011, ISBN 978-80-5-3-0596-7.CD-ROM
  6. Gjonaj, E. - Bartsch, M. - Clemens, M. - Schupp, S. - Weiland, T.: High-resolution human anatomy models for advanced electromagnetic field computations. In: IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 38, N. 2, pp. 357 - 360, 2002
  7. Cocherová, E. - Štofanič, V.: Numerické metódy riešenia bioelektromagnetických polí. Nakladateľstvo STU, Bratislava, 2010. ISBN 978-80-227-3272-7
  8. Tirpák, A.: Elektromagnetizmus. 1999, ISBN 80-88780-26-8
  9. [9] [online], [20.11.2009], <<http://www.ee.bgu.ac.il/~microwav/CST/Getting%20Started.pdf>>
  10. [online], [18.02.2010], <<http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/htmlclie/htmlclie.htm>>
- 

Spoluautorom článku je Ing. Peter Kupec, Ústav elektroniky a fotoniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave

---

Práca bola prezentovaná na Študentskej vedeckej a odbornej činnosti (ŠVOČ 2011) v sekcii Biomedicínske inžinierstvo a získala Cenu IEEE, ISBN 978-80-227-3508-7

---