

Wojciech KRASZEWSKI

PRZESTRZENNY ROZKŁAD POLA MAGNETYCZNEGO WYTWORZONEGO PRZEZ APLIKATOR O ZADANYM KSZTAŁCIE DO ZASTOSOWANIA W MAGNETOTERAPII

STRESZCZENIE Ciągły postęp w medycynie i technologii pozwala na tworzenie nowych urządzeń, które mogą być wykorzystywane przez lekarzy na przykład w magnetoterapii. Dlatego opis matematyczny rozkładu pola magnetycznego jest koniecznym narzędziem do przeprowadzenia symulacji komputerowych. Obejmują one wizualizację pola magnetycznego w miejscu leczonego schorzenia. Będzie to przydatna informacja nie tylko dla lekarzy, ale również dla pacjentów.

Słowa kluczowe: magnetoterapia, wolnozmienne pole magnetyczne, symulacje komputerowe

1. WSTĘP

Przeprowadzone liczne badania [1, 7], przedstawiające efekt oddziaływania zmiennych pól magnetycznych na organizmy żywe, stały się podstawą do zastosowania tychże pól w medycynie przy leczeniu wielu schorzeń.

dr inż. Wojciech KRASZEWSKI

e-mail: wkraszew@agh.edu.pl

Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 258, 2012

Intensywny w ostatnich latach rozwój inżynierii, elektroniki i techniki medycznej pozwolił otworzyć nowe możliwości wykorzystania pól elektromagnetycznych w wielu dyscyplinach klinicznych [6, 9]. Zastosowanie pól magnetycznych w medycynie należy obecnie do najbardziej interdyscyplinarnych kierunków współpracy pomiędzy lekarzami, inżynierami i fizykami, co zapewnia dynamiczny rozwój tej dziedziny medycyny.

Wolnozmiennne pole magnetyczne wykorzystuje się aktualnie w leczeniu następujących schorzeń [7, 8]:

- a) choroby narządu ruchu (stany pourazowe, stawy rzekome, osteoporoza, choroba zwyrodnieniowa oraz stany zapalne stawów);
- b) choroby układu nerwowego (stany po udarach mózgowych, migrena, stwardnienie rozsiane);
- c) choroby skóry i tkanek miękkich (oparzenia, owrzodzenia podudzi, infekcje bakteryjne skóry i tkanek miękkich, odleżyny, gojenie się ran).

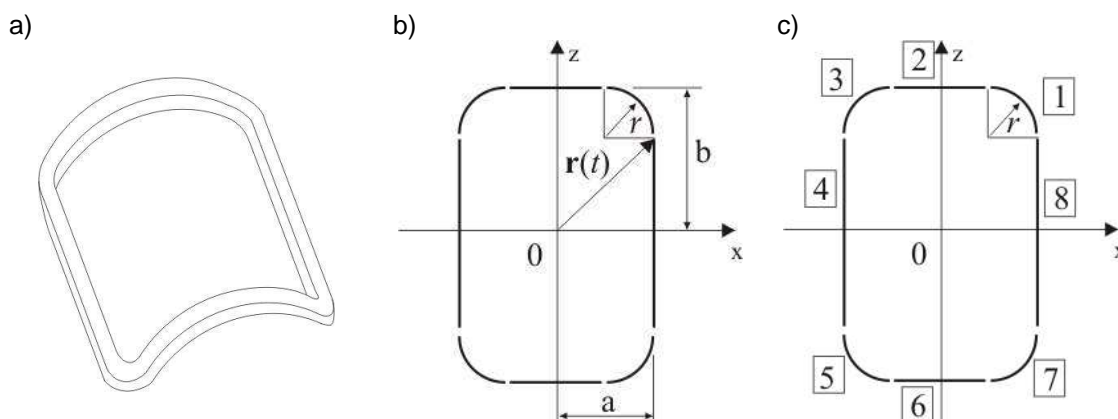
Wymienione powyżej schorzenia nie stanowią pełnej listy zastosowań magnetoterapii. Są to jednak przypadki najczęściej spotykane i udokumentowane badaniami klinicznymi.

Precyzyjne określenie rozkładu oraz wartości pola magnetycznego w ciele ludzkim jest warunkiem koniecznym do uzyskania pożądanego efektu terapeutycznego. Zaproponowany kształt cewki pozwoli uzyskać pożądaną, dla określonego typu schorzenia, wartość natężenia pola magnetycznego na wybranej powierzchni kończyny tak, aby stymulowane było przede wszystkim miejsce poddawane leczeniu (urazy kości, choroby skórne). Rozwiązanie to zapewni skuteczne i precyzyjne docieranie pola magnetycznego do stymulowanej części ciała pacjenta i pozwoli dokładniej określić indukcję magnetyczną od zadanego kształtu cewki aplikatora. Wydaje się, więc koniecznym zapisanie modelu matematycznego, który dałby możliwość uzyskania precyzyjnego opisu rozkładu pola magnetycznego dla szczególnego kształtu aplikatora małogabarytowego.

2. KSZTAŁT APLIKATORA

Zaproponowany nowy kształt precyzyjniej odzwierciedla rzeczywisty aplikator, który został zbudowany w Instytucie Elektrotechniki w Warszawie [5].

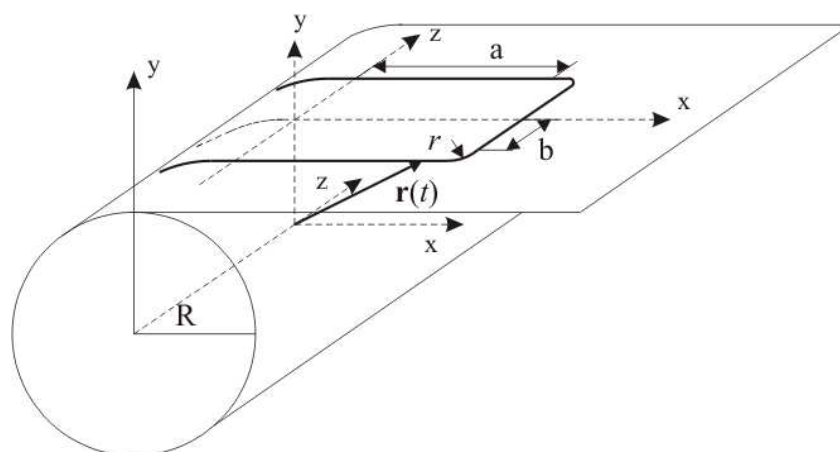
W związku z tym, że omawiana cewka małogabarytowa przypomina ramkę prostokątną, która nakładana jest na leczoną kończynę, do analizy i symulacji komputerowych został przyjęty model kształtu aplikatora przedstawiony na rysunku 1a.



Rys. 1: a) rysunek poglądowy rzeczywistego aplikatora małowabarytowego, b) opis geometryczny, c) numeracja krawędzi [2]

Na płaszczyźnie, w kartezjańskim układzie współrzędnych, kolejne odcinki aplikatora dane są zależnościami zgodnie z rysunkiem 1c. Do matematycznego opisu modelu aplikatora małowabarytowego wykorzystano krzywe parametryczne. Sposób ten polega na wprowadzeniu odwzorowania przyporządkowującego punktom dziedziny (zbiorowi parametrów) punkty przestrzeni, w której leży rozpatrywana figura [9]. W tym przypadku figurą jest krzywa określona przez kształt cewki aplikatora.

Po nałożeniu opisanej płaszczyzny na powierzchnię walca (imitującego kończynę) o promieniu R (rys. 2), przedstawiono w dalszej części wzory opisujące krzywą w przestrzeni trójwymiarowej.



Rys. 2. Sposób nałożenia cewki o kształcie ramki prostokątnej na powierzchnię walca [2]

Opis parametryczny krzywej w przestrzeni trójwymiarowej wymaga określenia trzech funkcji. W celu ułatwienia obliczeń, zależności zapisano w kartezjańskim układzie współrzędnych. W uproszczonym zapisie, wykorzystując funkcję signum, równania na łuki (rys. 1b, c) sformułowano w postaci:

$$\mathbf{r}(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \cos \left(\operatorname{sgn} \left(\sin \left(t - \frac{\pi}{2} \right) \right) \cdot \frac{(a-r)}{R} + \frac{\pi}{2} - \frac{r}{R} \cos t \right) \\ R \sin \left(\operatorname{sgn} \left(\sin \left(t - \frac{\pi}{2} \right) \right) \cdot \frac{(a-r)}{R} + \frac{\pi}{2} - \frac{r}{R} \cos t \right) \\ r \sin(t) + \operatorname{sgn}(\sin(t)) \cdot (b-r) \end{bmatrix} \quad (1)$$

gdzie $t \in \langle 0, 2\pi \rangle$.

Z kolei długości odcinków zapisano następującymi zależnościami:

Dla odcinka 2:

$$\mathbf{r}(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \cos \left(\frac{\pi}{2} + t \right) \\ R \sin \left(\frac{\pi}{2} + t \right) \\ b \end{bmatrix} \quad (2)$$

gdzie $t \in \langle -\frac{a-r}{R}, \frac{a-r}{R} \rangle$.

Dla odcinka 4:

$$\mathbf{r}(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \cos \left(\frac{\pi}{2} + \frac{a}{R} \right) \\ R \sin \left(\frac{\pi}{2} + \frac{a}{R} \right) \\ t \end{bmatrix} \quad (3)$$

gdzie $t \in \langle -b-r, -(b-r) \rangle$.

Analogicznie należy zapisać równania dla kolejnych odcinków (6 i 8) [4].

Przedstawiony opis za pomocą krzywych parametrycznych jest szczególnie przydatny podczas doboru odpowiednich rozmiarów aplikatora, zapewniając rozkład pola o optymalnych z medycznego punktu widzenia parametrach.

3. MODEL MATEMATYCZNY

Mając zadany kształt aplikatora, wyznaczono potencjał wektorowy w punkcie dla każdego nieskończenie małego elementu liniowego cewki; następnie zsumowano potencjały na wszystkich segmentach i zapisano [10]:

$$\mathbf{A} \approx \sum_{j=1}^K \mathbf{A}_j = \frac{\mu I}{4\pi} \sum_{j=1}^K \int_{\mathbf{r}_j}^{\mathbf{r}_{j+1}} \frac{d\mathbf{r}'}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} \quad (4)$$

gdzie $\mathbf{r}_j, \mathbf{r}_{j+1}$ (dla $j = 1, \dots, K$) zdefiniowane są odpowiednio jako wektor wodzący początku i końca skierowanego elementu liniowego cewki.

Wektor wodzący \mathbf{r}' elementu prądowego $I d\mathbf{r}'$ na odcinku $\overline{\mathbf{r}_j \mathbf{r}_{j+1}}$ oraz nieskończenie małe przemieszczenie $d\mathbf{r}'$ wzdłuż odcinka $\overline{\mathbf{r}_j \mathbf{r}_{j+1}}$, są opisane następującymi równaniami [4]:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}' &= \mathbf{r}_j + (\mathbf{r}_{j+1} - \mathbf{r}_j)t', \quad 0 \leq t' < 1 \\ d\mathbf{r}' &= (\mathbf{r}_{j+1} - \mathbf{r}_j)dt' \end{aligned} \quad (5)$$

przy czym t' służy do aproksymacji odcinka liniowego o końcach \mathbf{r}_j i \mathbf{r}_{j+1} . Zatem całka z równania (4) przyjmuje postać:

$$\int_{\mathbf{r}_j}^{\mathbf{r}_{j+1}} \frac{d\mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} = \int_0^1 \left(\frac{d\mathbf{r}'}{dt'} \right) \frac{dt'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} = (\mathbf{r}_{j+1} - \mathbf{r}_j) \int_0^1 \frac{dt'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} \quad (6)$$

gdzie odległość między elementem prądowym $I d\mathbf{r}'$ i punktem P dana jest równaniem:

$$|\mathbf{r} - \mathbf{r}'| \equiv \sqrt{\{x - [x_j + (x_{j+1} - x_j)t']\}^2 + \{y - [y_j + (y_{j+1} - y_j)t']\}^2 + \{z - [z_j + (z_{j+1} - z_j)t']\}^2} \quad (7)$$

a

$$\begin{aligned} \mathbf{r} &= [x, y, z] \\ \mathbf{r}_{j+1} &= [x_{j+1}, y_{j+1}, z_{j+1}] \\ \mathbf{r}_j &= [x_j, y_j, z_j] \end{aligned}$$

dla $j = 1, \dots, K$.

W celu obliczenia indukcji pola magnetycznego w punkcie P zapisano jako rotację otrzymanego potencjału wektorowego:

$$\mathbf{B} \approx \sum_{j=1}^K \mathbf{B}_j = \text{rot } \mathbf{A} \quad (8)$$

Przedstawiony tok rozumowania pozwala określić wektor indukcji magnetycznej w punkcie P [4, 5].

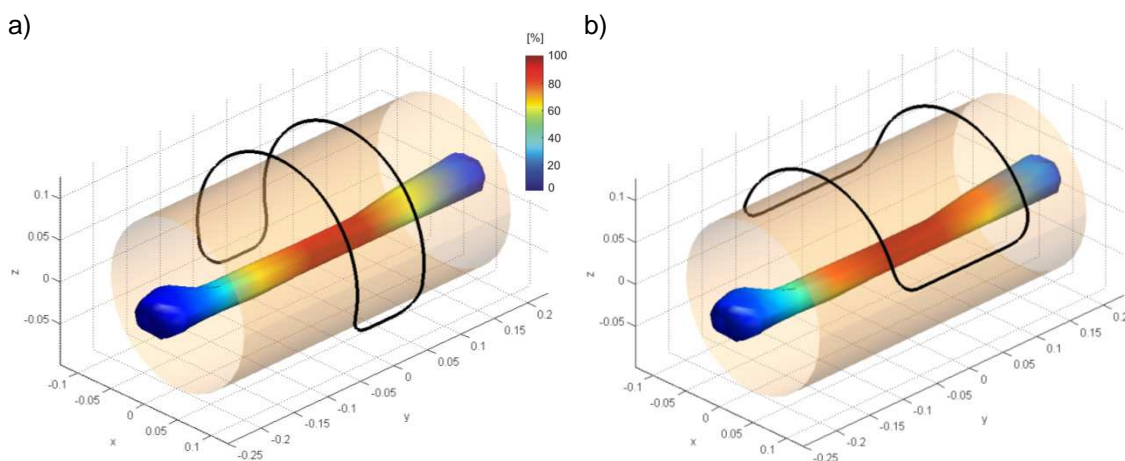
4. WYNIKI SYMULACJI

W zależności od rodzaju schorzenia (np. złamanie kończyny lub problemy skórne), należy tak dobrać kształt aplikatora i parametry pola magnetycznego, aby rozkład indukcji magnetycznej w pożądanym miejscu leczenia miał zakładane wartości. Z terapeutycznego punktu widzenia, rozkład ten w miejscu schorzenia powinien mieć równe wartości w całym otoczeniu.

Należy wspomnieć, że przedstawione wyniki mają charakter jakościowy.

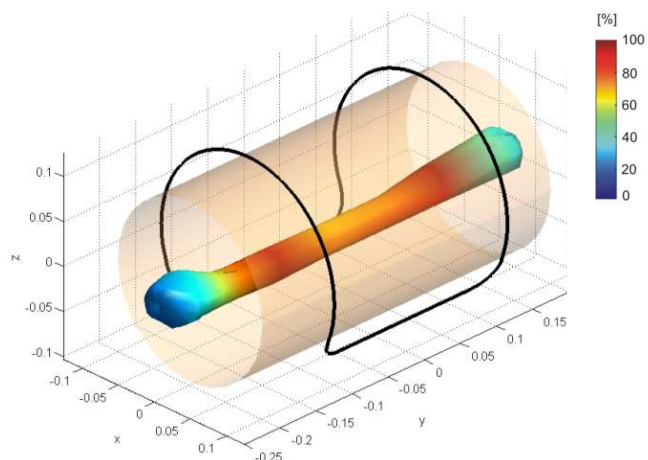
4.1. Rozkład indukcji pola magnetycznego na powierzchni kości

Rysunek 3 przedstawia rozkład indukcji pola magnetycznego wokół aplikatora na kości. Symulacje ilustrują przypadek złamania pojedynczego. Maksymalna, dla rozpatrywanego schorzenia, pożądana wartość indukcji magnetycznej, skupiona jest na środku kości w miejscu złamania. Dla skomplikowanych złamań (w kilku miejscach kończyny) można zastosować ten sam aplikator, zmieniając jego kształt [operując odpowiednio parametrami a i b (z rysunku 1)] tak, aby pole magnetyczne docierało do większego obszaru kości (rys. 3b).



Rys. 3. Rozkład modułu indukcji pola magnetycznego na kości dla:
a) pojedynczego złamania na środku długości kończyny; b) złożonego złamania kończyny

Na rysunku 4 przedstawiono rozkład modułu indukcji pola magnetycznego na kości z niewłaściwie dobranymi parametrami a i b . Pacjent ze złamaniem pojedynczym w środku długości kości powinien mieć dobrany mniejszy aplikator. Przykład ten pokazuje, jak istotny wpływ ma kształt i ułożenie aplikatora na kończynie.

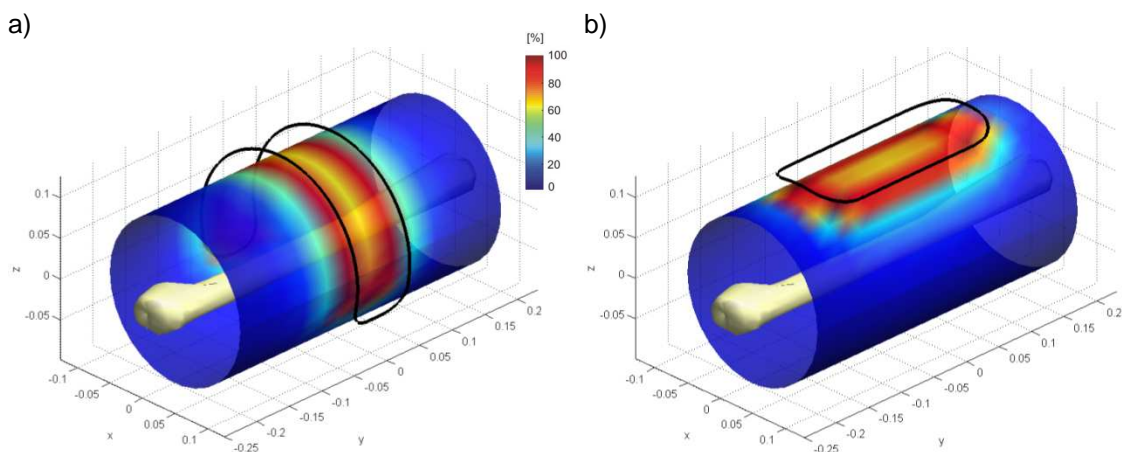


Rys. 4. Rozkład modułu indukcji pola magnetycznego na kości dla błędnie dobranej wielkości aplikatora do schorzenia

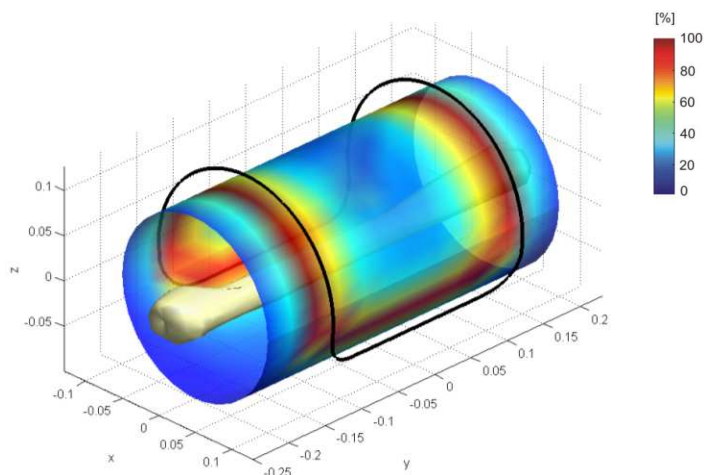
4.2. Rozkład indukcji pola magnetycznego na powierzchni skóry

Magnetoterapia to nie tylko złamania, ale i leczenie ciężko gojących się ran, oparzeń, chorób skóry itp. Na rysunku 5 przedstawiono rozkład modułu indukcji pola magnetycznego na powierzchni skóry. W zależności od miejsca, wielkości oraz rozłożystości schorzenia, dobierany jest inny kształt aplikatora. Nieprawidłowe ułożenie i wielkość cewki, przy zachowaniu tych samych parametrów pola, spowoduje brak efektu terapeutycznego leczenia. Na rysunku 6 przedstawiono przykład symulacji, gdy pole magnetyczne nie dociera do schorzenia zlokalizowanego na środku długości kończyny, ponieważ została dobrana zła wielkość aplikatora.

Przedstawione przykłady wskazują na istotność doboru parametrów pola magnetycznego, jak również kształtu samego aplikatora [4].



Rys. 5. Rozkład modułu indukcji pola magnetycznego na powierzchni skóry dla:
a) ciężko gojących się ran wokół kończyny; b) schorzenia miejscowego



Rys. 6. Rozkład modułu indukcji pola magnetycznego na powierzchni skóry dla błędnie dobranego kształtu aplikatora

5. PODSUMOWANIE

Z terapeutycznego punktu widzenia osiągnięto satysfakcjonujące wyniki rozkładu modułu indukcji pola magnetycznego. Przeprowadzone symulacje przemawiają za koniecznością odpowiedniego dopasowania rozmiaru, położenia aplikatora oraz parametrów (częstotliwość, natężenie, czas ekspozycji, przebieg i kształt impulsu) pola magnetycznego stosowanego podczas magnetoterapii. Prawidłowo dobrany kształt aplikatora oraz parametry mogą wpłynąć na skrócenie czasu leczonego schorzenia. Przedstawiony kształt aplikatora wraz z aparaturą będzie spełniać wymagania nie tylko terapeutyczne i techniczne, ale przede wszystkim oczekiwania pacjentów i ich lekarzy.

Matematyczny opis pola magnetycznego oraz kształtu cewki aplikatora pozwala na wykonanie symulacji numerycznych. Daje to możliwość precyzyjnego doboru parametrów aplikatorów i dokładniejsze wyznaczenie okolic stymulowanych kończyn. Obliczenia przedstawione w sposób graficzny będą bardziej zrozumiałe i przejrzyste dla pacjentów, a co najważniejsze – pole magnetyczne generowane od aplikatorów małego gabarytów będzie skupione w miejscu, które ma być poddawane jego działaniu.

LITERATURA

1. Aaron R.A., Ciombor D.M., Simon B.J.: Treatment of nonunions with electric and electromagnetic fields, Clin. Orthop., 2004, 419: 9-21.
2. Cieśla A., Kraszewski W., Skowron M., Syrek P.: Pole magnetyczne wytworzone przez jednolicie namagnesowaną sferoidę spłaszczoną, IC-SPETO 2011, 34th International Conference on Fundamentals of Electrotechnics and Circuit Theory, Gliwice-Ustroń, 18-21.05.2011, t. 1, s. 29-30.

3. Kiciak P.: Podstawy modelowania krzywych i powierzchni – zastosowania w grafice komputerowej, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2005.
4. Kraszewski W.: Rozkład pola magnetycznego o niskiej częstotliwości wytworzonego przez małowabarytowe aplikatory dla magnetoterapii, Rozprawa Doktorska, Kraków 2011.
5. Kraszewski W., Syrek P.: Pole magnetyczne wytworzone przez urządzenie z cewką małowabarytową do zastosowania w magnetoterapii, Prace Instytutu Elektrotechniki, 2010, t. 57, z. 248, s. 115-123.
6. Markov M. S.: Pulsed electromagnetic field therapy history, state of the art and future, Springer Science+Business Media, LLC 2007.
7. Sieroń A.: Zastosowanie pól magnetycznych w medycynie, α -medica Press, Bielsko-Biała, 2002.
8. Sieroń A., Bilska A.: Pola magnetyczne w medycynie, www.polaelektromagnetyczne.pl.
9. Sieroń A., Mucha R., Pasek J.: Magnetoterapia, Rehabilitacja w Praktyce, 3/2006, s. 29-32.
10. Zborowski M, Midura R.J., et al.: Magnetic field visualization in applications to pulsed electromagnetic field stimulation of tissues, Biomedical Engineering Society 2003, vol. 31, pp.195-206.

Rękopis dostarczono dnia 17.05.2012 r.

SPATIAL DISTRIBUTION OF THE MAGNETIC FIELD GENERATED BY THE APPLICATOR OF THE NEW SHAPE APPLIED IN THE MAGNETOTHERAPY

Wojciech KRASZEWSKI

ABSTRACT *The continuous progress in medicine and technology allows to create new devices which can be applied by doctors for instance in magnetotherapy. Therefore the mathematical description of magnetic field distribution can be considered as an useful tool in execution of the numerical simulations which will include 3D visualization of magnetic field in treated injuries. It would be beneficial not only for doctors but may be also helpful for patients if small-size applicators could be even used at home. The proposed model accurately reflects the real applicator.*

Keywords: *magnetotherapy, low frequency magnetic field, computer simulations*

