

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA

---

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI, INFORMATYKI I  
ELEKTRONIKI  
KATEDRA ELEKTROTECHNIKI I ELEKTROENERGETYKI

**AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

**ANALIZA PARAMETRÓW PRZESTRZENNYCH APLIKATORÓW  
MAŁOGABARYTOWYCH WYKORZYSTYWANYCH W  
MAGNETOTERAPII**

**MGR INŻ. PRZEMYSŁAW SYREK**

Promotor:  
Dr hab. inż. Antoni Cieśla, prof. n. AGH

Kraków, 2010

## WSTĘP

Ogólnie znanym jest, że pole elektromagnetyczne oddziałuje na środowisko. Szczególnie interesujące wydaje się – ze względu na pozytywne efekty – oddziaływanie pola magnetycznego na organizmy żywe (np. tkanki człowieka). Problematyka ta – rozwijana od wielu lat – ma już spore osiągnięcia.

Z wymienionych wyżej względów autor zainteresował się problemem oddziaływania pola magnetycznego zwłaszcza w aspekcie wyznaczania rozkładu pola magnetycznego wzbudzanego przez mobilny aplikator małowabarytowy. Autor współpracował przy uruchomieniu istniejącego modelu takiego aplikatora.

Parametry pola oraz wartości indukcji stosowane w medycynie pozwalają na rozdzielenie i wyróżnienie dwóch metod, do których zaliczane są: magnetoterapia, magnetostymulacja. Pole magnetyczne stosowane w magnetoterapii charakteryzuje się częstotliwością mniejszą od 100 Hz (z reguły 10-20 Hz) i indukcją magnetyczną rzędu mT, tj. indukcją 2-3 rzędy większą od indukcji pola magnetycznego Ziemi, dokładne wartości mieszczą się w przedziale od 0,1 mT do 20 mT. Znacznie mniejsze wartości indukcji, wykorzystywane są w magnetostymulacji, wartości indukcji magnetycznej wynoszą od 1 pT do 100  $\mu$ T, a częstotliwość stosowana mieści się w przedziale od 2 kHz do 3 kHz.

Odrębną grupę ze względu na wartości pola, którą warto wyróżnić, jest stymulacja polem magnetycznym w leczeniu depresji (stymulacja przezczaszkowa). W metodzie tej, wartość indukcji może osiągać nawet 5 T (przy częstotliwości rzędu kilku Hz).

Oprócz wymienionych powyżej metod, dużą popularnością cieszy się elektrostymulacja, stosowana np. przy złamaniach kończyn, a polegająca na zastępowaniu naturalnych prądów czynnościowych w kościach, powstających w wyniku obciążania (chodzenie, ćwiczenia), prądem generowanym przez elektrostymulator. Innym przykładem jest stymulacja elektryczna nerwu błędnego. Tym sposobem leczone są trzy grupy schorzeń: kardiologiczne (arytmia serca), układu nerwowego (epilepsja), fizjologiczne, z których to dwie pierwsze stosowane są od wielu lat, natomiast choroby z trzeciej z wymienionych grup, są w fazie badawczej (np. terapia antyotyłościowa).

## CEL PRACY ORAZ TEZA

Z przeprowadzonych przedmiotowych studiów literaturowych, a także z doświadczeń i obserwacji przy eksploatacji mobilnego (o rozmiarach pozwalających na przenoszenie i stosowanie urządzenia poza gabinetami) aplikatora, Autor formułuje następującą tezę swojej dysertacji:

**Istnieje konieczność dopasowywania i zadawania parametrów terapii pulsującym polem magnetycznym, zapewniających zachowanie wartości gęstości prądów wirowych w części ciała poddanej leczeniu, na odpowiednim z medycznego punktu widzenia poziomie. Odnosi się to zarówno do obszaru uszkodzonego (wartości prądów zapewniających efekt terapeutyczny), jak i obszarów sąsiadujących – eksponowanych w zmiennym polu magnetycznym (wartości prądów, które nie przekraczają poziomu dopuszczalnego).**

Autor, w trakcie realizacji swoich prac badawczych, stara się uzasadnić wyżej sformułowaną tezę stawiając kolejne cele cząstkowe, m.in.:

- opis zagrożeń wynikających z niewłaściwego stosowania urządzeń służących do terapii pulsującym polem magnetycznym,
- określenie wpływu i skutków oddziaływania pola magnetycznego na pacjentów i personel zatrudniony w gabinetach stosujących magnetoterapię,
- wyznaczenie rozkładu pola magnetycznego w otoczeniu aplikatorów w odniesieniu do przepisów prawa pracy obowiązujących w Polsce,
- ocena zagrożeń wynikających z zadawania niewłaściwych parametrów pulsującego pola magnetycznego, które mogą skutkować przekroczeniem lub zbyt małymi wartościami (nieskutecznymi pod względem terapeutycznym) gęstości prądów wirowych w ciele człowieka,
- ocena poprawności zastosowanej metody wyznaczania indukcji pola magnetycznego w otoczeniu aplikatorów do magnetoterapii.

## PRZYJĘTE OGRANICZENIA

Realizacja tak szeroko sformułowanego zakresu pracy wymaga przyjęcia stosownych ograniczeń.

W pracy przyjęto, że pole elektryczne analizowane jest w środowisku (dotyczy to parametrów elektrycznych) składającym się z podobszarów jednorodnych materiałowo, liniowych i izotropowych – w środowisku strefowo jednorodnym. Założono, że do obliczeń prądów wirowych w kończynach uwzględnione są 3 podobszary (odpowiadające 3 składowym kończyny), a więc: kości, tkanka tłuszczowa, skóra.

Przyjęto również, że konduktywność materiałów (z których zbudowane jest ciało człowieka) i częstotliwość pulsującego pola magnetycznego stosowana w magnetoterapii, pozwalają na pominięcie wtórnego pola magnetycznego – powstającego w wyniku przepływu prądów wirowych w ciele człowieka (uzasadnienie w rozdz.6.6.2). Nie uwzględniono przypadków, gdy pacjent ma implanty (materiały o wysokiej konduktywności), ani możliwości ekranowania pola magnetycznego.

Przedstawione ograniczenia mają charakter ogólny, natomiast dla każdego rozpatrywanego zagadnienia przyjęto stosowne założenia upraszczające.

## ROZPATRYWANE ZAGADNIENIA

Niniejsza dysertacja wnosi elementy nowości w rozpatrywane zagadnienia. W ocenie Autora są nimi:

- przeprowadzenie symulacji numerycznych (w rozdziale 7), których celem jest określenie prawidłowego usytuowania aplikatorów, względem uszkodzonej części ciała (szyjki kości ramiennej),
- opis matematyczny uzwojeń kilku rodzajów aplikatorów, umożliwiający uzyskanie z dużą dokładnością indukcji pola magnetycznego wewnątrz aplikatora i w jego otoczeniu.

Własnymi osiągnięciami Autora przy realizacji dysertacji są:

- przedstawienie oceny dokładności obliczania indukcji pola magnetycznego i możliwych do przyjęcia uproszczeń w opisie przebiegu uzwojeń aplikatorów,
- przedstawienie w oparciu o własne oprogramowanie, rozkładu przestrzennego stref oddziaływania pola magnetycznego w otoczeniu aplikatorów,
- ocena wpływu położenia aplikatora na wartości gęstości prądów w miejscach poddanych terapii,
- opracowanie własnego oprogramowania wykorzystującego Metodę Elementów Brzegowych do obliczania rozkładu gęstości prądów wirowych w obszarach o niskiej przewodności elektrycznej.

## STRUKTURA PRACY

Zakres pracy obejmuje zagadnienia związane z oddziaływaniem pola elektromagnetycznego na organizmy żywe, ze szczególnym uwzględnieniem efektów wywoływanych przez pole magnetyczne niskich częstotliwości. Przedstawiono także aparaturę stosowaną w terapii polem magnetycznym, metodę obliczania pola magnetycznego, opis uzwojeń aplikatorów. Dwa ostatnie rozdziały dotyczą: modeli służących do obliczania rozkładu prądów wirowych w obszarach o niskiej przewodności elektrycznej oraz wpływu zastosowanych parametrów terapii na rozkład prądów wirowych w ciele człowieka.

W rozdziale pierwszym przedstawiono efekty oddziaływania pola elektromagnetycznego na materię ożywioną, przedstawiono stan prawny obowiązujący obecnie zarówno w Polsce jak i na świecie. Pokazano jak na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat normy dotyczące ochrony ludzi w strefach zamieszkania i na stanowiskach pracy były stopniowo zaostrzane.

Rozdział drugi dotyczy oddziaływania pola magnetycznego w przypadku magnetoterapii i magnetostymulacji, listy chorób w których oddziaływanie pola magnetycznego wywołuje pozytywne efekty – przyspiesza powrót do zdrowia bądź łagodzi skutki chorób, przedstawiono także listę chorób lub stanów zdrowia, w których

oddziaływanie pola magnetycznego jest niewskazane czy wręcz zabronione. Położono szczególny nacisk na omówienie magnetoterapii przy złamaniach kończyn, a więc tam gdzie jest ona najczęściej stosowana. W tym samym rozdziale zestawiono parametry elektryczne tkanek i narządów, które są niezbędne w symulacjach numerycznych rozkładów prądów wirowych w ciele człowieka, przedstawionych w rozdziałach: szóstym i siódmym.

W kolejnym, trzecim rozdziale, przedstawiono aparaturę stosowaną w magnetoterapii i magnetostymulacji: aparaturę stosowaną w gabinetach terapeutycznych, przenośną i stosowaną w psychiatrii.

W czwartym rozdziale przedstawiony jest sposób obliczania indukcji pola magnetycznego. Określono z jaką dokładnością należy stosować numeryczny opis cewki prądowej aplikatora, aby z jednej strony skracać czas koniecznych obliczeń, a z drugiej strony dokonywać obliczeń z określoną dokładnością.

W rozdziale piątym zaprezentowano opis kształtów uzwojeń cewek prądowych aplikatorów, rozkład pola od wybranych aplikatorów, a także w otoczeniu aplikatorów – w gabinetach, w których magnetoterapia jest stosowana. Zaprezentowano zasięg poszczególnych stref bezpieczeństwa.

W szóstym rozdziale zaprezentowany jest wybrany model opisu prądów wirowych w obszarach słaboprzewodzących (w ciele człowieka), a także sposób obliczania rozkładu prądów z użyciem Metody Elementów Brzegowych.

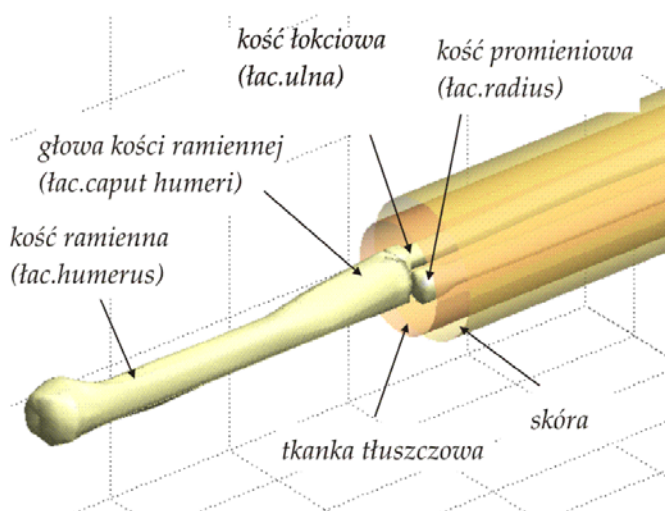
W siódmym, ostatnim rozdziale przedstawiono rozkłady prądów wirowych w kończynach, a także poszukiwanie odpowiednich kształtów – parametrów przestrzennych aplikatorów dających najlepsze parametry zarówno indukcji pola magnetycznego jak i prądów w leczonych fragmentach ciała.

W Podsumowaniu autor zrekapitulował rezultaty swoich prac, wylistował własne osiągnięcia i odniósł się do postawionej na wstępie tezy pracy.

## DOBÓR PARAMETRÓW APLIKATORÓW

Do analizy wpływu kształtu i położenia aplikatora względem wybranego do leczenia fragmentu ciała, jako przykład, wybrano głowę kości ramiennej. Przyjęto, że parametry optymalne aplikatorów poszukiwane będą dla tej składowej kości ramiennej. Na końcu bliższym kości ramiennej (łac. *humerus*) znajduje się głowa kości ramiennej (łac. *caput humeri*), w której również wyróżnia się kilka części składowych,

m.in. tzw. szyjkę chirurgiczną (łac. *collum chirurgicum*) - nazwaną tak, gdyż jest to miejsce częstych złamań. Widok kości ramiennej i jej składowe pokazuje rys.1.



Rys.1. Kość ramienna

Dobór odpowiednich parametrów aplikatorów – zapewniający odpowiednie wartości pola magnetycznego – jest istotny w przypadku wielu schorzeń, w tym złamań. Jednak szczególnie istotne jest zapewnienie korzystnych wartości prądów wirowych w leczonych miejscach. Jest to zagadnienie skomplikowane, wymagające numerycznego rozwiązywania równań różniczkowych cząstkowych. Dotyczy to szczególnie schorzeń ortopedycznych, gdyż przy leczeniu złamań, prądy decydują o przyspieszeniu zrostania kości.

Zgodnie z danymi przytoczonymi w jednym z rozdziałów dysertacji, przyjęto następujące wartości przewodności elektrycznej:

- skóra  $\gamma = 0.1$  S/m
- tkanka tłuszczowa  $\gamma = 0.04$  S/m
- kość  $\gamma = 0.02$  S/m

Do oceny skuteczności aplikatorów przyjęto następujące wartości:

- $J_{\max WO}$  - maksymalna wartość skuteczna gęstości prądu jaki występuje w wybranym obszarze (WO – wybrany obszar), tutaj: głowa kości ramiennej
- $J_{\min WO}$  - minimalna wartość skuteczna gęstości prądu jaki występuje w wybranym obszarze

- $J_{\max C}$  - maksymalna wartość skuteczna gęstości prądu występująca w całym analizowanym obszarze
- $J_{\min C}$  - minimalna wartość skuteczna gęstości prądu występująca w całym analizowanym obszarze

Wartości przedstawione powyżej określają zdolność danego aplikatora (lub jego użytkownika) do wywołania określonych wartości prądu w interesującym obszarze, przy zachowaniu bezpiecznego poziomu (poniżej  $J_{\max C}$ ) np. we fragmentach tkanki tłuszczowej lub skóry będących w najbliższym sąsiedztwie aplikatora. W pracach dotyczących magnetoterapii i prądów w ciele człowieka, dopuszczalna wartość gęstości prądu jest ustalona na poziomie 100 [mA/m<sup>2</sup>].

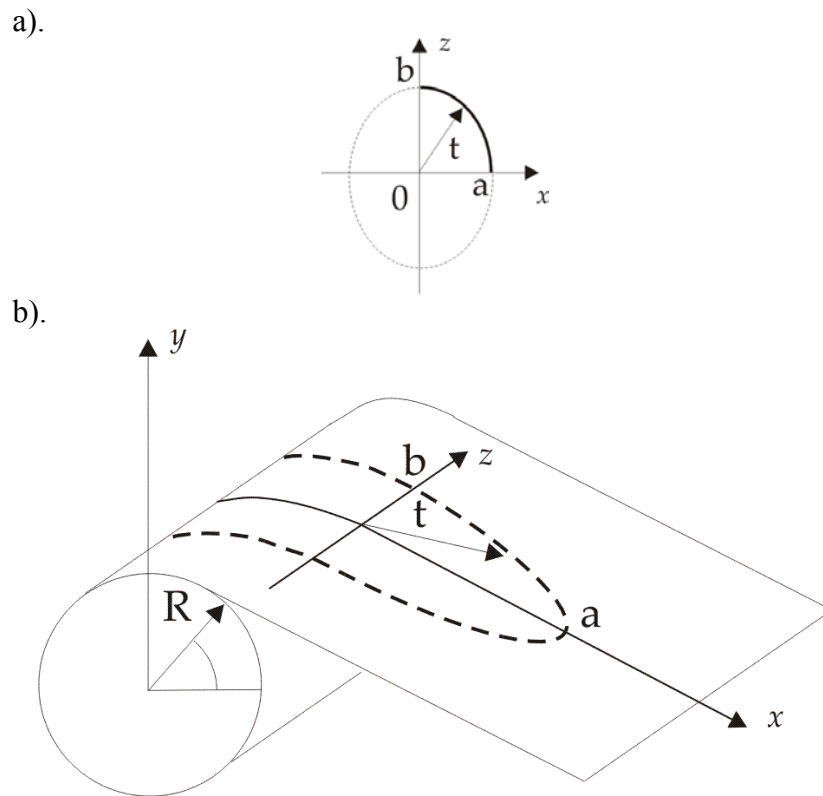
Jednocześnie maksymalna indukcja pola magnetycznego występująca w symulowanym obszarze wynosi dokładnie 10 mT a częstotliwość przyjęta w symulacjach wynosi 50 Hz.

## APLIKATOR PRZENOŚNY - MAŁOGABARYTOWY

Ten typ aplikatorów zbudowany jest w taki sposób, że obudowa z materiału umożliwia nakładanie urządzenia na dowolną powierzchnię ciała: nogi, ręce, tułów. Odpowiedni opis cewki zastosowanej w tym przypadku, umożliwia dobieranie parametrów przestrzennych do konkretnego urazu.

Kształt uzwojenia w aplikatorze opisany jest za pomocą elipsy (rys.2a), która nakładana zostaje na powierzchnię boczną walca (rys.2b). Takie podejście ułatwia analizę przypadków związanych z magnetoterapią złamań, gdzie najczęściej aplikator zakładany jest na kończyny. Nie wyklucza to również innych przypadków, należy jednak odpowiednio dobierać rozmiary aplikatora.





Rys.2. Schematyczne przedstawienie aplikatora przenośnego, a) elipsa o półosiach  $a$  i  $b$  na płaszczyźnie  $Oxz$ , b) uzwojenie w kształcie elipsy nałożone na walec o promieniu  $R$

Elipsa na płaszczyźnie  $Oxz$  w postaci parametrycznej dana jest:

$$\vec{r}'(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \cdot \cos t \\ b \cdot \sin t \end{bmatrix} \quad (1)$$

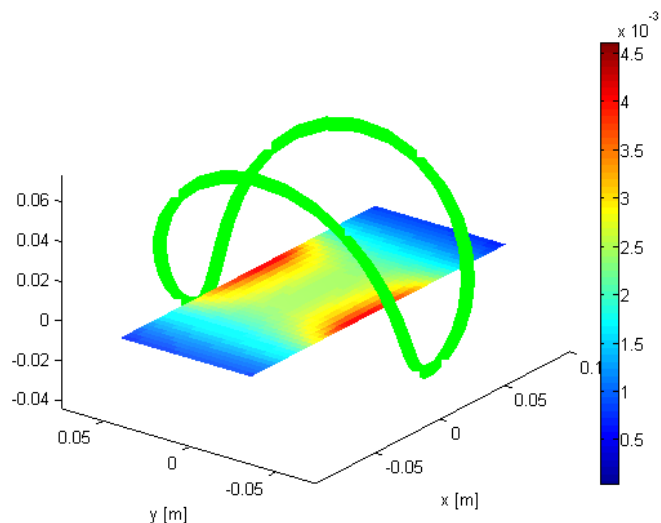
Po nawinięciu uzwojenia opisanego za pomocą elipsy (wzór 1) na walec o promieniu  $R$ , we współrzędnych kartezjańskich, uzwojenie aplikatora opisuje zależność:

$$\vec{r}'(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{a \cdot \cos t}{R}\right) \\ R \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{a \cdot \cos t}{R}\right) \\ b \cdot \sin t \end{bmatrix} \quad (2)$$

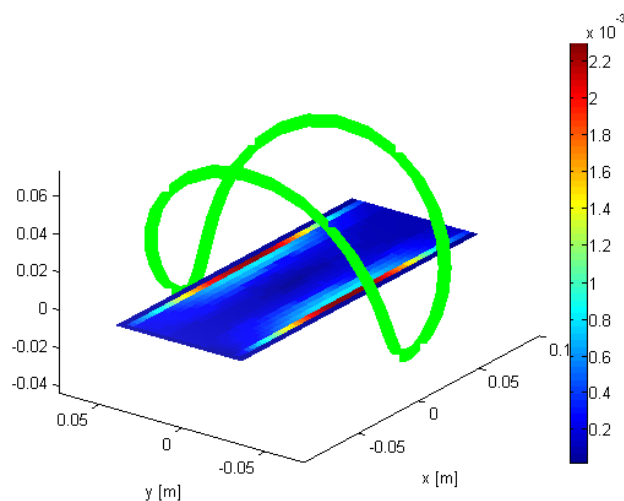
gdzie:

$a, b$  – półosie elipsy

a).



b).



Rys.3. Aplikator przenośny, rozkład a) indukcji pola magnetycznego w [T],  
b) modułu gęstości prądu w [A/m<sup>2</sup>]

Rysunek 3 przedstawia rozkład indukcji pola magnetycznego oraz gęstości prądów wirowych w przekroju kończyny (z rys.1), o promieniu 0,04 m (w przybliżeniu promień ręki w okolicach stawu łokciowego). Parametry aplikatora:  $R = 0,08$  m,  $a = 0,6 \cdot \pi \cdot R$  [m],  $b = 0,05$  [m].

$J_{\max WO}$	$J_{\min WO}$	$J_{\max C}$	$J_{\min C}$
$0,288 \cdot 10^{-3}$	$0,123 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	0

Tab.1 Wartości maksymalne i minimalne gęstości prądu w całym oraz wybranym obszarze (tutaj: głowa kości ramiennej) w [A/m<sup>2</sup>]

## WNIOSKI I PODSUMOWANIE

Zgodnie ze sformułowaną we wprowadzeniu tezą dysertacji i postawionymi celami, Autor chcąc dowieść jej słuszności, zrealizował następujące zadania:

- określił wpływ i skutki oddziaływania pola magnetycznego na pacjentów i personel zatrudniony w gabinetach stosujących magnetoterapię,
- wyznaczył rozkład pola magnetycznego w otoczeniu aplikatorów w odniesieniu do przepisów prawa pracy obowiązujących w Polsce,
- ocenił zagrożenia wynikające z zadawania niewłaściwych parametrów pulsującego pola magnetycznego oraz ocenił poprawność zastosowanej metody wyznaczania indukcji pola magnetycznego w otoczeniu aplikatorów do magnetoterapii.

Przedstawione w rozdziale 3 (w dysertacji rozdział 7) wyniki przemawiają za koniecznością odpowiedniego dostosowywania rozmiarów, położenia aplikatorów i parametrów pola magnetycznego stosowanego w czasie terapii złamań. Odpowiednie usytuowanie przestrzenne aplikatora powoduje, że stosunek wartości gęstości prądu w miejscu leczonym do wartości maksymalnej w całym poddanym ekspozycji fragmencie ciała, zwiększa się. Dzięki temu, z terapeutycznego punktu widzenia, powiększa się pole oddziaływania – zwiększa się górna granica zakresu prądu jaki można w leczonym miejscu zadawać. A odbywa się to przy jednoczesnym zachowaniu na stałym poziomie wartości prądu maksymalnego w całym, eksponowanym obszarze. Prądy o gęstości powyżej  $100 \text{ mA/m}^2$  mogą stanowić zagrożenie dla zdrowia, a powyżej  $1000 \text{ mA/m}^2$  zagrożenie dla życia.

Odnosząc się do wartości maksymalnej prądu w całym analizowanym obszarze, należy zaznaczyć, że przedstawione wyniki dotyczą pulsującego pola magnetycznego o częstotliwości 50 Hz i maksymalnej wartości skutecznej indukcji pola magnetycznego (w całym, poddanym ekspozycji obszarze) wynoszącej dokładnie 10 mT. Aby każdorazowo dostosować wartość maksymalną gęstości prądu do przyjętego poziomu bezpieczeństwa (np. do  $100 \text{ mA/m}^2$ ), należy odpowiednio dobrać (zwiększać) wartość indukcji i częstotliwość pulsującego pola magnetycznego.

W terapii polem magnetycznym, odpowiednie dobieranie wartości indukcji pola magnetycznego nie jest działaniem wystarczającym. W instrukcjach obsługi aplikatorów, dla konkretnych schorzeń, producenci określają zakres możliwych do stosowania wartości indukcji, dodając jeszcze do tego kształt impulsu tego pola lub częstotliwość. W takim podejściu, brakuje związku pomiędzy parametrami stosowanymi podczas terapii a konkretnym usytuowaniem aplikatora, parametrami przestrzennymi schorzenia i całego obszaru poddanego działaniu pola magnetycznego. Nawet zawężając zastosowanie aplikatorów jedynie do urazów ortopedycznych, konieczne jest rozpatrywanie kilku rodzajów złamań, ze względu na jego rodzaj (skośne, poprzeczne, spiralne, wieloodłamowe) – o zróżnicowanych rozmiarach szczeliny złamania. W zależności od płci, wieku, kondycji organizmu, rozmiary kończyn i kości różnią się znacząco. Wszystkie wymienione przesłanki przemawiają za koniecznością dobierania aplikatorów i parametrów terapii do konkretnych przypadków. Umieszczenie intuicyjne aplikatora (lub kończyn wewnątrz aplikatora) według zasady „jak najbliżej urazu” jest podejściem niewłaściwym, mogącym przynosić niepożądane efekty lub nie powodować żadnych efektów (w tym brak jakiegokolwiek poprawy powodowanej magnetoterapią).

Za własne osiągnięcia Autor uważa:

- ocenę dokładności obliczania rozkładu indukcji pola magnetycznego i możliwych do przyjęcia uproszczeń w opisie przebiegu uzwojeń aplikatorów (w rozdziale 4),
- przedstawienie w oparciu o własne oprogramowanie, rozkładu przestrzennego stref oddziaływania pola magnetycznego w otoczeniu aplikatorów (rozdział 5.3),
- ocenę wpływu położenia aplikatora na wartości gęstości prądów w miejscach poddanych terapii (rozdział 7),
- opracowanie własnego oprogramowania wykorzystującego Metodę Elementów Brzegowych do obliczania rozkładu gęstości prądów wirowych w obszarach o niskiej przewodności elektrycznej.

Teza pracy odnosi się do konieczności dopasowywania i zadawania parametrów terapii pulsującym polem magnetycznym, zapewniających zachowanie wartości gęstości prądów wirowych w części ciała poddanej leczeniu, na odpowiednim z medycznego punktu widzenia poziomie.

Zatem – według Autora – teza pracy została w niniejszej pracy pozytywnie zweryfikowana, a postawione cele osiągnięte.

## LITERATURA

Chodak A., Najgebauer M., Krawczyk A.: *Metodyka i historia powstawania systemu normatywnego w ograniczaniu pola elektromagnetycznego*, XIX Sympozjum PTZE, Worliny, 2009, s.43-44.

Cieśla A., Kraszewski W., Skowron M., Syrek P.: *Nowa koncepcja uzwojenia wzbudzającego pole magnetyczne w zastosowaniu do magnetoterapii*, Agrolaser 2006, III Międzynarodowa Konferencja Naukowa Oddziaływanie pól elektromagnetycznych na środowisko rolnicze, 05 – 07.09.2006 Lublin ; Referaty i doniesienia / Polskie Towarzystwo Agrofizyczne – Lublin 2006 ; ISBN 83–89969–80–7; 2006, s. 21–25.

Kraszewski W., Syrek P.: *Magnetoterapia – zastosowanie pola magnetycznego w leczeniu oraz zagrożenia z nim związane*, Prace Instytutu Elektrotechniki, z.248, t.57, 2010, s.213-228.

Krawczyk A.: *Bioelektromagnetyzm*, Instytut Naukowo-Badawczy ZTUREK, Warszawa, czerwiec 2002.

Krawczyk A., Wiak S., Drzymała P., Zyss T.: *Modelling of eddy currents applied to human brain*, IEEE Transactions on Magnetics, 1998, 34, 5, s. 3471-3474.

Sieroń A., Cieślak G., Kawczyk-Krupka A., Biniszkiewicz T., Biliska-Urban A., Adamek M.: *Zastosowanie pól magnetycznych w medycynie*. II wyd., α-medica press, Bielsko-Biała, 2002.

Szewczenko J.: *Bezpieczeństwo elektrostymulacji zrostu kostnego w aspekcie korozji implantów ze stali austenitycznej*, Przegląd Elektrotechniczny, 2008/01, s. 94-97.

Zyss T., Zięba A., Dudek D., Datka W., Grabski B., Siwek M., Wróbel A., Mączka G.: *Stymulacja magnetyczna w leczeniu depresji*, Przegląd Elektrotechniczny, 2005/12, s. 75-78.