

DOI: 10.5604/20830157.1130186

NUMERYCZNE MODELOWANIE POLA ELEKTROMAGNETYCZNEGO W UPROSZCZONYM MODELU CZŁOWIEKA

Joanna Podlodowska

Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, Studenckie Koło Naukowe Informatyków przy Katedrze Zastosowań Matematyki i Informatyki

Streszczenie. Artykuł zawiera opis badań, mających na celu przedstawienie numerycznego modelu prądów wirowych indukowanych w uproszczonym modelu człowieka przez zewnętrzne pole magnetyczne o częstotliwości 50 Hz. W pierwszej części pracy zawarto opis wpływu pola elektromagnetycznego na organizm człowieka. Następnie scharakteryzowano model wykorzystany do badania, a ostatnią część poświęcono metodom numerycznym, opisowi matematycznemu modelowi oraz analizie numerycznej i porównaniu wyników z normami obowiązującymi w kraju i UE.

Słowa kluczowe: indukcja elektromagnetyczna, prądy wirowe, pole elektromagnetyczne, częstotliwość, modele numeryczne

NUMERICAL MODELING OF ELECTROMAGNETIC FIELDS IN SIMPLIFIED MODEL OF HUMAN

Abstract. The article contains description of the research works, aimed to present a numerical model of eddy currents induced in a simplified model of a human under influence of 50 Hz external magnetic field. In the first part of the paper the influence of electromagnetic field on the human body has been described. Then, the model used for the research has been characterized. Finally, numerical methods, mathematical description of the model, as well as numerical analysis and comparison of the results referred to the Polish and EU standards have been included in the past part of the paper.

Keywords: electromagnetic induction eddy currents, electromagnetic fields, frequency, numerical models.

Wstęp

Stale rozrastanie się infrastruktury elektroenergetycznej jest powodem realizacji badań dotyczących oddziaływania pola elektromagnetycznego (PEM) na organizmy żywe. Obecnie stworzonych jest wiele źródeł PEM m.in.: stacje i sieci elektryczne, stacje radiowo-telewizyjne, stacje przekaźnikowe telefonii bezprzewodowej. Pole elektromagnetyczne wytwarzane jest również przez instalacje i urządzenia elektryczne używane w przemyśle, w budynkach mieszkalnych czy użytku publicznego a także w środkach transportu.

W zakresie częstotliwości przemysłowych (50 Hz), gdzie dominuje składowa magnetyczna PEM, prądy wirowe są istotnym czynnikiem, mogącym wymusić obserwowalne skutki termiczne w tkankach biologicznych. Względna wielkość tych skutków zależy od elektrycznych właściwości tkanek, tj. przewodności elektrycznej (dotyczącej przepływu prądu elektrycznego) i przenikalności elektrycznej (dotyczącej polaryzacji ładunków). Przewodność i przenikalność elektryczna tkanek ciała człowieka są uzależnione od częstotliwości przyłożonego pola i są różne dla różnych tkanek. Rozkład przestrzenny prądów wirowych zaindukowanych w ciele człowieka zależy m.in. od warunków ekspozycji, wymiarów i kształtu ciała [12].

1. Oddziaływanie pola elektromagnetycznego na organizmy żywe

Konsekwencje biologiczne wywołane oddziaływaniem pola elektromagnetycznego na organizm człowieka są wynikiem funkcji parametrów pola: częstotliwości, wielkości natężenia pola i rozkładu oraz czasu jego oddziaływania na jednostkę. Sposoby oddziaływania pól elektromagnetycznych zostały podzielone na: bezpośredni, pośredni oraz pośredni oddziałujący na najbliższe otoczenie jednostki. Różny jest też mechanizm wpływu pola dla częstotliwości niskich i wysokich.

Niskie częstotliwości wywołują bezpośrednio stymulację tkanki pobudliwej, czyli nerwowej i mięśniowej. Jest to wynikiem przepływu prądów indukowanych w ciele człowieka pod wpływem pola elektromagnetycznego. Dla częstotliwości wysokich tj. powyżej 100 kHz dominują skutki termiczne. Ze względu na pochłanianie części energii pola i zamiany na ciepło dochodzi do bezpośredniego nagrzewania tkanek, co w następstwie prowadzi do podwyższenia temperatury ciała. Długotrwała ekspozycja organizmu może powodować niepożądane następstwa w stanie zdrowia objawiającym się m.in. zaburzeniami układów: nerwowego, sercowo-naczyniowego i odpornościowego, a także rozwojem nowotworów. Pogorszenie

stanu zdrowia może być również wynikiem obaw przed negatywnym wpływem oddziaływania PEM i stresem związanym z użytkowaniem wszelkiego rodzaju urządzeń wytwarzających PEM. Przyjmuje się, iż pola elektromagnetyczne nie są rejestrowane zmysłami człowieka. W pewnych sytuacjach możliwe jest jednak odczuwanie pól elektromagnetycznych np. w silnych polach magnetycznych lub elektrycznych małych częstotliwości (z zakresu kilkunastu do kilkudziesięciu herców). Człowiek może odczuwać wówczas wrażenia wzrokowe tzn. magneto- lub elektrofosfery, a w impulsowych polach mikrofalowych możliwe jest odczuwanie wrażeń słuchowych, tzw. zjawisko Frey'a [2]. Skutkiem oddziaływania energii pól na elementy otoczenia może być miejscowe zwiększenie natężenia PEM wokół struktur przewodzących zlokalizowanych w zasięgu oddziaływania źródła pola oraz przepływ przez ciało człowieka, który dotyka pierwotnych lub wtórnych źródeł pól, prądów elektrycznych tzw. kontaktowych. Prądy kontaktowe i indukowane mogą być powodem zaskoczenia nieprzewidzianym wydarzeniem oraz nagłych reakcji pracowników, które w konsekwencji mogą doprowadzić do wypadku (np. upadek z wysokości, uderzenie) lub nieprawidłowego wykonania czynności. Bezpośrednie i pośrednie oddziaływanie PEM może powodować zakłócenia w pracy urządzeń elektronicznych (np. znajdujących się w samochodzie, maszynach), kontrolno-sterujących (np. implantów medycznych, które mogą spowodować nagłą niedyspozycję fizyczną osoby ekspozowanej) [2, 3].

Gęstość prądów i skutki termiczne występujące w organizmie zwane są miarami wewnętrznymi ekspozycji. Miary zewnętrzne to natężenie pola elektrycznego i magnetycznego. Zewnętrzne, zmienne w czasie, pole magnetyczne jest źródłem prądów wirowych. Przestrzeganie ograniczeń dotyczących dopuszczalnych miar zewnętrznych gwarantuje spełnienie wymagań dotyczących miar wewnętrznych, natomiast przekroczenie dopuszczalnych miar zewnętrznych nie oznacza przekroczenia dopuszczalnych miar wewnętrznych a jedynie potrzebę wykonania bardziej dokładnej analizy ich spełnienia [2].

2. Uproszczony model człowieka

Model został odpowiednio dostosowany do analizy pola elektromagnetycznego. Wyróżniono cztery warstwy tkanek: skóra, tkanka tłuszczowa, tkanka mięśniowa oraz kości. Parametry dielektryczne tkanek zostały zaczerpnięte z bazy danych niskich częstotliwości (przewodności) [13]. Za pomocą średniej ważonej wyliczono konduktywności poszczególnych tkanek. Przyjęto średnie wartości przewodności do obliczeń.

Tabela 1. Parametry modelu człowieka

Rodzaj tkanki (warstwa)	Zawartość procentowa	Konduktywność [S/m]
skóra	15%	0,00067
tkanka tłuszczowa	21%	1,37
tkanka mięśniowa	44%	0,266
kości	20%	0,1325
-	100%	0,43141

Model człowieka, do przeprowadzenia symulacji, został stworzony za pomocą konstruktywnych geometrii brył – CSG (z ang. *Constructive Solid Geometry*) jako złożenie logiczne kuli i prostopadłościanu w dowolnym układzie współrzędnych z wykorzystaniem operatorów AND, NOT. Poniżej zamieszczony jest uproszczony algorytm człowieka:

```
#jednostka = [m]
algebraic3d
solid air = orthobrick (-1.2, -1, -1; 1.2, 1, 2.5) -maxh=0.5;
solid glowa = sphere (0, 0, 1.82; 0.18);
solid szyja = cylinder (0, 0, 1.66; 0, 0, 0.06)
and plane (0, 0, 1.66; 0, 0, 1)
and plane (0, 0, 1.59; 0, 0, -1)-maxh = 0.1;
solid tulow = cylinder (0, 0, 1.60; 0, 0, 0.8; 0.25)
and plane (0, 0, 1.60; 0, 0, 1)
and plane (0, 0, 0.8; 0, 0, -1)-maxh = 0.1;
solid nogaL = cylinder(-0.16, 0, 0; -0.16, 0, 0.81; 0.09)
and plane (0, 0, 0.81; 0, 0, 1)
and plane (0, 0, 0; 0, 0, -1)-maxh = 0.1;
solid nogaP = cylinder(0.16, 0, 0; 0.16, 0, 0.81; 0.09)
and plane (0, 0, 0.81; 0, 0, 1)
and plane (0, 0, 0; 0, 0, -1)-maxh = 0.1;
solid rekaL = cylinder (-0.165, 0, 1.57; -0.6, 0, -0.1; 0.07)
and plane (0, 0, 1.57; 0, 0, 1)
and plane (0, 0, 0.65; 0, 0, -1)-maxh = 0.1;
solid rekaP = cylinder (0.165, 0, 1.57; 0.6, 0, -0.1; 0.07)
and plane (0, 0, 1.57; 0, 0, 1)
and plane (0, 0, 0.65; 0, 0, -1)-maxh = 0.1;
tlo air -col=[0,1,0]-transparent;
tlo glowa -col=[1,1,0];
tlo szyja -col=[1,1,0];
tlo tulow -col=[1,1,0];
tlo nogaL -col=[1,1,0];
tlo nogaP -col=[1,1,0];
tlo rekaL -col=[1,1,0];
tlo rekaP -col=[1,1,0];
```

Opis geometrii modelu został dostosowany do notacji programu Netgen [9,10], co umożliwiło poprawną interpretację modelu. Netgen służy do generowania siatek 2D i 3D, a jego celem jest dyskretyzacja, czyli podział na elementarne podobszary opisywanego obszaru lub przestrzeni. Na płaszczyźnie są to trójkąty, natomiast w przestrzeni - czworościany. Podział umożliwia zastosowanie analizy numerycznej i symulacji, zarówno na płaszczyźnie, jak również w przestrzeni. W pracy przedstawiono obliczenia rozkładu gęstości prądów wirowych za pomocą trójwymiarowej siatkowej metody analizy PEM.

Proces generowania siatki 3D przez program Netgen został podzielony na następujące części:

- zbudowanie modelu geometrycznego,
- obliczanie punktów charakterystycznych,
- obliczanie krawędzi,
- generowanie siatki na powierzchniach ograniczających (2D),
- generowanie siatki w objętości (3D) [9].

3. Numeryczne modelowanie pola elektromagnetycznego w organizmie ludzkim

Modelowanie numeryczne obecnie jest alternatywną możliwością rozwiązania danego problemu względem metod doświadczalnych. Stale rozwijająca się dziedzina inżynierii jest szeroko stosowana w praktycznych badaniach naukowych,

projektach inżynieryjno – technicznych oraz przemysłowych. Tworzenie modeli komputerowych pozwala obecnie na ulepszenie bądź zastąpienie prototypowych modeli fizycznych. Symulacje komputerowe wymagają ustalenia parametrów wejściowych.

Przyjęto założenia, że modelowany obszar jest słabo przewodzący, jednorodny magnetycznie, a wymuszające pole - wolnozmiennie. Symulacje tego zjawiska można podzielić na następujące etapy:

1. proces budowy modelu człowieka,
2. sformułowanie równań polowych,
3. definiowanie warunków brzegowych,
4. wybór metody rozwiązywania wraz z oceną wyników [3].

Analiza numeryczna rozkładu PEM w ciele człowieka pozwala na zbadanie wpływu pól niskich częstotliwości na organizm ludzki. Do badania przyjęto linie wysokiego napięcia o wartości 410 kV, w których płynie prąd o natężeniu równym 2,2 kA. Założono, że prąd jest trójfazowy, przesunięty o kąt $\varphi = 120^\circ$, a podłoże jest uziemione. Model człowieka modelowany jest jako dielektryk stratny, a wszystkie elementy linii napowietrznej są idealnym przewodnikiem.

3.1. Wybór metody numerycznego modelowania

Obecnie w badaniach bioelektromagnetycznych są dostępne trzy metody modelowania pól:

- metoda różnic skończonych – MRS (z ang. FDM, *finite difference method*),
- metoda elementów skończonych – MES (z ang. FEM, *finite element method*),
- metoda elementów brzegowych – MEB (z ang. BEM, *boundary element method*).

Metoda różnic skończonych jest najstarszą, a zarazem uważaną za jedną z najprostszych metod numerycznego rozwiązywania zagadnień opisanych przez układy równań różniczkowych. MRS polega na zastąpieniu pochodnych występujących w równaniach przez odpowiednie ilorazy różnicowe. Na obszar, w którym ma być spełnione równanie, nakładana jest siatka punktów węzłowych. Konieczny jest równomierny podział, czyli także duża liczba węzłów. Wartości poszukiwanej funkcji w węzłach siatki stanowią zbiór niewiadomych. Następnie wyznaczane są odpowiedniego rzędu równania ilorazy różnicowe, które pozwalają przekształcić równanie różniczkowe na układ równań algebraicznych. Przy zastosowaniu tej metody pojawiają się problemy z warunkami brzegowymi, nieregularnym kształtem brzegu, dopasowaniem siatki do obszaru oraz z możliwością utraty wymaganej dokładności [11]. Poprawa dokładności obliczeń możliwa jest tylko przez zagęszczenie podziału. MRS można stosować do ośrodków niejednorodnych i anizotropowych oraz do ośrodków nieliniowych. Konstruowanie siatki jest prostym procesem, wykorzystywane są łatwe wzory dla siatki ze stałym krokiem.

Metoda elementów skończonych, w przeciwieństwie do MRS, jest uważana za metodę trudną w implementacji numerycznej, ale posiada większy zakres możliwości przy rozwiązywaniu problemów nieliniowych dla obszarów o kształtach jedno-, dwu-, lub trójwymiarowych. MES charakteryzuje podział analizowanego obszaru, czyli dyskretyzacja na pewną skończoną liczbę mniejszych podobszarów. Elementy te mają węzły w wierzchołkach, a także na bokach. Węzły będące wspólnymi dla elementów sąsiadnych po procesie dyskretyzacji tworzą na danym obszarze tzw. siatkę. Wielkość pola znane lub szukane są punktami siatki związanymi z węzłami. W procesie dyskretyzacji do obszarów dwuwymiarowych stosuje się zazwyczaj elementy trójkątne lub prostokątne, natomiast do obszarów trójwymiarowych używane są elementy czworościenne lub sześciocienne (prostopadłościenne) [9, 17]. Obecnie MES ma szerokie zastosowanie w mechanice komputerowej: bada się wytrzymałość konstrukcji, symuluje odkształcenia, naprężenia, przemieszczenia, przepływ ciepła, przepływ cieczy, dynamikę, kinematykę i statykę maszyn a także oddziaływania elektrostatyczne, magneto statyczne i elektromagnetyczne [15].

Metoda elementów brzegowych nie jest metodą obszarową jak MES czy MRS. Numeryczna dyskretyzacja dokonuje się przy zredukowanej wymiarowości przestrzeni, w której pozostaje rozpatrywany obiekt. W przestrzeni 3D dyskretyzowana jest tylko powierzchnia brzegowa natomiast w przypadku 2D jedynie linia brzegowa. Redukcja wymiarowości zadań, skutkuje zmniejszeniem liniowych układów równań, czyli mniejszych wymagań dotyczących pamięci operacyjnej komputera i bardziej efektywnych obliczeń. MEB cechuje wysoka dokładność wyznaczania gradientu funkcji stanu np. potencjału elektrycznego. Metoda obarczona jest jednak pewnymi wadami. W obliczeniach stosowane są całki, również osobliwe, które mają istotny wpływ na dokładność rozwiązania. Obszary cienkie są źle rozwiązywane również ze względu na istnienie całek prawie osobliwych. Zastosowanie MEB wymusza istnienie i znajomość rozwiązania fundamentalnego np. równania Boltzmana. Dyskretyzacja wnętrza wymaga uwzględnienia wielu zagadnień np. nieliniowości materiałowej, równania Poissona. Pełna, niesymetryczna i niedodatnio określona macierz obejmuje mniejszy zakres zagadnień jak np. MES [17].

Analiza numeryczna badanego modelu człowieka została przeprowadzona metodą elementów skończonych (MES). Wyniki symulacji rozkładu pola elektromagnetycznego osiągnięto wykorzystując oprogramowanie SEMCAD X [16], zaś do zobrazowania prądów wirowych zastosowano program ParaView [14].

3.2. Opis matematyczny modelu [4]

Pole magnetyczne może być wyrażone przez magnetyczny potencjał wektorowy A :

$$-\nabla^2 A = \mu_0 J_c, \quad (1)$$

gdzie: J_c – wektor gęstości prądu wzbudzającego, μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni.

Natężenie pola magnetycznego, H , wartość indukcji magnetycznej, B , gęstość prądów wirowych, J oraz objętościową gęstość mocy, P , są obliczane na podstawie kolejnych równań:

$$H = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times A, \quad (2)$$

$$B = \mu_0 \cdot H, \quad (3)$$

$$J = -\sigma \nabla u - \sigma(2\pi f A), \quad (4)$$

gdzie: σ – konduktywność, f – częstotliwość natężenia pola magnetycznego [4]

$$P = \frac{1}{\sigma} J^2. \quad (5)$$

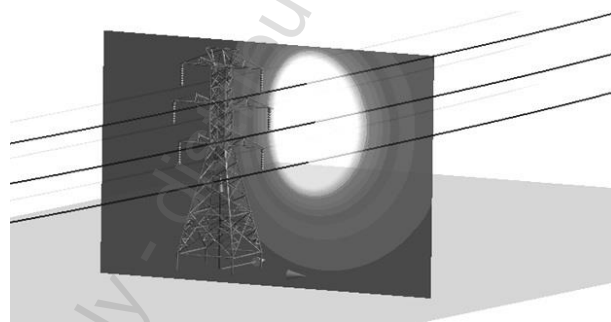
3.3. Numeryczne modelowanie rozkładu pola magnetycznego w świetle norm polskich i UE [4]

Wpływ natężenia PEM zmniejsza się proporcjonalnie do kwadratu jego odległości, dlatego też najlepszym zabezpieczeniem jest zachowanie odpowiedniego dystansu od źródła promieniowania. Normy zarówno krajowe [6, 7, 8] jak i te obowiązujące w całej Unii Europejskiej [1] określają dopuszczalne wartości natężenia pola elektromagnetycznego dla ekspozycji zawodowej oraz osobne dla ogółu ludności. Dla jednostkowych pracowników dopuszczalne są stosunkowo większe wartości oddziałującego PEM i krótszy czas ekspozycji (8 godzin), a dla ogółu ludności zezwala się na mniejsze wartości oddziałującego pola i jest to zwykle dłuższy czas ekspozycji. Według Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) dopuszczalna wartość emisji pola magnetycznego to 80 A/m dla ekspozycji pozazawodowej (24 h/dobę). Pole magnetyczne o częstotliwości 50 Hz jest uważane za źródło niskiej aktywności biologicznej, nie posiadające zdolności do trwałego upośledzenia układów fizjologicznych organizmu. Pole magnetyczne działając na organizmy żywe powoduje wytwarzanie w nich prądów, które płyną w strukturach organizmu [1].

Wielkość PEM wyraża się poprzez natężenie pola, mierzone w jednostkach amper na metr (A/m), którego rozkład zobrazowano na rysunku 1.

Zgodnie z obowiązującym w Polsce rozporządzeniem Ministra Pracy i Polityki Socjalnej dotyczącej najwyższych natężeń pól magnetycznych stałych i o częstotliwości 50 Hz [8] przyjmuje się strefy ochronne:

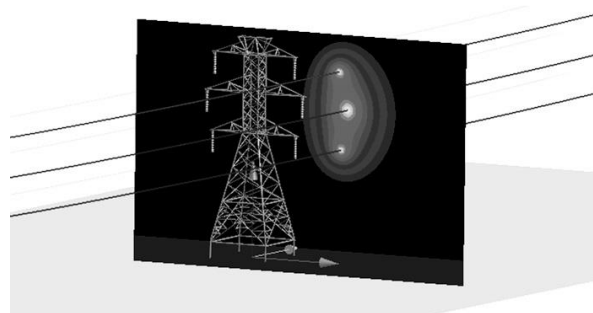
- strefa bezpieczna – w której bez ograniczeń może przebywać ludność, a najwyższa wartość natężenia pola magnetycznego na danym obszarze wynosi 66,6 A/m;
- strefa pośrednia – w której przebywanie pracowników jest dozwolone w ciągu jednej zmiany roboczej (8 godz.), wartość natężenia pola magnetycznego mieści się w granicach $66,6 \div 200$ A/m;
- strefa zagrożenia – w której dopuszczalny czas przebywania zależy od natężenia pola magnetycznego, a jego wartość zawiera się w granicach: $200 \div 2000$ A/m;
- strefa niebezpieczna – to obszar, w którym nie wolno przebywać, gdyż wartość natężenia pola magnetycznego może przekraczać 2000 A/m [1, 3].



Rys. 1. Rozkład przestrzenny natężenia pola magnetycznego (H)

Podczas analizy numerycznej najwyższa wartość natężenia pola magnetycznego osiągnęła $H_{max}=1,95$ kA/m. W Polsce wielkość tę kwalifikuje się do strefy niebezpiecznej dla człowieka.

Natężenie pola wyraża zdolność do wytworzenia indukcji pola magnetycznego, B . Gęstość linii sił pola magnetycznego, zwaną indukcją magnetyczną mierzy się w teslach (T).



Rys. 2. Rozkład przestrzenny indukcji magnetycznej (B)

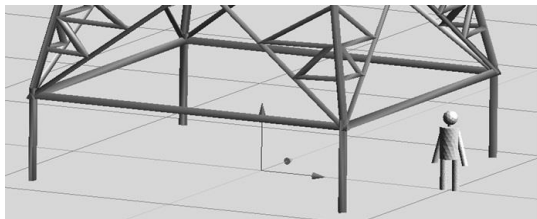
Maksymalna wartość w badaniu rozkładu przestrzennego indukcji magnetycznej (rysunek 2) wyniosła $B_{max}=2,45$ mT.

Według Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) dopuszczalna wartość indukcji magnetycznej to 100 μ T. W Polsce oraz wg norm ogólnowiatowych dopuszczalna jest różna wartość ze względu na środowisko występowania: do 100 μ T dla miejsca publicznego i nawet do 500 μ T dla ekspozycji zawodowej [3].

Obecnie obowiązujące normy w Polsce i na świecie znacznie się różnią. Powoduje to konieczność stworzenia przepisów określających graniczne poziomy ekspozycji człowieka na PEM. Szczególnie istotne jest zapewnienie przestrzegania tych przepisów w celu zapobiegania występowania szkodliwych efektów powodowanych faktem przebywania w PEM o określonym natężeniu. Żywy organizm jest nazywany „skomplikowaną maszyną”, posiadającą większe lub mniejsze zdolności przystosowawcze [3].

W efekcie prowadzi to do niejednoznaczności rezultatów doświadczeń oraz trudności określenia progu, powyżej którego mechanizmy obronnościowe organizmu przestają działać i pola elektromagnetyczne mogą być niebezpieczne.

W celu wyliczenia prądów wirowych w organizmie ludzkim umieszczono numeryczny model człowieka pod liniami wysokiego napięcia o wartości 410 kV (rysunek 3).



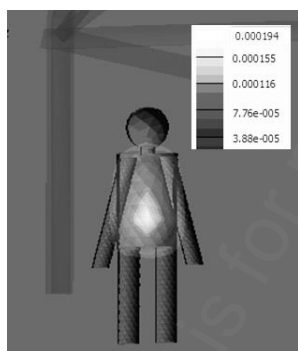
Rys. 3. Numeryczny model człowieka w strefie narażenia

Według wymogów Unii Europejskiej, podstawowym ograniczeniem dla pola elektromagnetycznego o częstotliwości poniżej 100 kHz (w badanym przypadku jest to 50 Hz) jest maksymalna wartość gęstości prądu, aby zapobiegać jego wpływowi na funkcjonowanie systemu nerwowego. Wartość ta ogólnie obowiązująca dla UE została ustalona na $J_{dop}=2 \text{ mA/m}^2$.

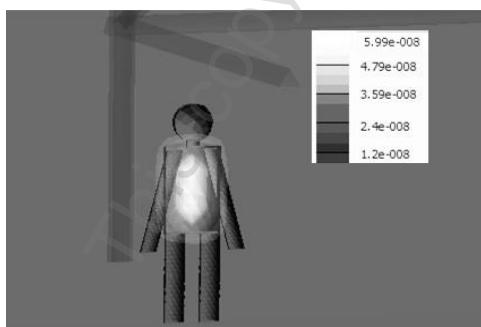
Gęstość prądu, J , jest wielkością wektorową. Opisuje przepływ ładunku przez jednostkową powierzchnię, a rozkład przestrzenny gęstości prądu nazywa się polem gęstości prądu. Jednostką gęstości prądu jest amper na metr kwadratowy (A/m^2).

U człowieka zdrowego nie występują żadne zauważalne negatywne efekty działania przepływającego przez ciało prądu sinusoidalnego o gęstości $1\div 10 \text{ mA/m}^2$. Oddziaływanie prądów o gęstości w zakresie $10\div 100 \text{ mA/m}^2$ zależy od częstotliwości. Nie jest ono uważane za szkodliwe, ale może istotnie wpływać na bezpieczeństwo pracy. Może utrudniać pracownikom wykonywanie czynności zawodowych poprzez skutki wzrokowe (magnetofosfeny), czy też negatywny wpływ na układ nerwowy. Prądy o gęstości $100\div 1000 \text{ mA/m}^2$ wywołują już pobudzenie tkanek (centralny system nerwowy) i mogą niekorzystnie oddziaływać na zdrowie. Prądy o gęstości większej od 1 A/m^2 mogą zakłócać pracę serca, powodując dodatkowe skurcze, migotanie komór serca i w końcowym efekcie stwarzać poważne zagrożenie dla życia człowieka [2, 12].

Rozkład przestrzenny gęstości powierzchniowej prądów wirowych w ciele człowieka znajdującego się pod linią wysokiego napięcia zobrazowano na rysunku 4.



Rys. 4. Rozkład gęstości powierzchniowej prądów wirowych (J) w modelu człowieka



Rys. 5. Rozkład gęstości objętościowej mocy (P) wydzielonej w tkankach

W wyniku analizy rozkładu gęstości prądu została uzyskana maksymalna wartość $J_{max}=0,194 \text{ mA/m}^2$. Jest to wielkość zadowalająco niska, ponad 10-krotnie mniejsza od minimalnej dopuszczalnej wartości objętej normą.

Ostatnią badaną wielkością jest objętościowa gęstość mocy, wyrażona w Watach na metr sześcienny (W/m^3). W wyniku analizy rozkładu (rysunek 5) gęstość objętościowa mocy osiągnęła najwyższą wartość równą zaledwie $5,99e-008 \text{ W/m}^3$.

W pracy przedstawiono numeryczną analizę prądów wirowych w uproszczonym modelu człowieka. Obecny brak istnienia niepodważalnego poglądu na temat wpływu PEM na organizmy żywe inspiruje i zmusza do przeprowadzania kolejnych badań, obliczeń i analiz. Normy obowiązujące w Polsce są uznawane za dość rygorystyczne, natomiast rzeczywiste efekty oddziaływań PEM nadal nieznane. Przeprowadzanie kolejnych badań skutkuje coraz większym zasobem wiedzy w zakresie potencjalnego narażenia i umożliwia wprowadzenie optymalnych ograniczeń ekspozycji na PEM oraz racjonalnego podejścia ludzi do problemu. Numeryczne modelowanie metodą elementów skończonych pozwala na symulację właściwości tkanek ludzkich podczas ekspozycji oraz zjawisk fizycznych. Możliwe jest rozwiązywanie i analizowanie trudnych do uchwycenia metodą doświadczalną procesów zachodzących w strukturach organizmów żywych. Wyniki analizy numerycznego modelowania PEM mogą być podstawą do przeprowadzania badań medycznych.

Literatura

- [1] Jaworski M.: Przegląd norm i przepisów w zakresie ochrony przed oddziaływaniem pól elektromagnetycznych 50 Hz obowiązujących w różnych krajach, Poznań, 2003.
- [2] Karpowicz J., Gryz K.: Zasady oceny zagrożeń elektromagnetycznych związanych z występowaniem prądów indukowanych i kontaktowych, Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy, 4(58), 2008.
- [3] Krawczyk A.: Bioelektromagnetyzm, Komitet Elektrotechniki PAN, PTZE, Warszawa, czerwiec 2002, 2-25.
- [4] Miaskowski A., Krawczyk A., Ishihara Y.: Computer modelling of magnetotherapy in orthopedic treatments, COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 29 Iss: 4, 2010, pp. 1015 – 1021.
- [5] Pluta W.: Oddziaływanie linii wysokiego napięcia prądu stałego na środowisko, Wrocław, 1994.
- [6] PN-80/Z-08052: Ochrona pracy. Niebezpieczne i szkodliwe czynniki występujące w procesie pracy. Klasyfikacja.
- [7] PN-N-18002:2000: Systemy zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy. Ogólne wytyczne do oceny ryzyka zawodowego.
- [8] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 2 stycznia 2001 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy, Dz.U. nr 4, poz. 36.
- [9] Sawicki B.: Modelowanie prądów wirowych w środowisku słabo przewodzącym z wykorzystaniem wektorowego potencjału elektrycznego T, Rozprawa doktorska, Warszawa, 2003.
- [10] Schöberl J.: NETGEN - 4.X, tutorial, March 3, 2010, dostępne na stronie: <http://www.hpem.jku.at/netgen/>.
- [11] Serwis internetowy: akropolis.pol.lublin.pl/users/jpkmb/MRS.pdf.
- [12] Serwis internetowy: Gryz K., Karpowicz J.: Pola elektromagnetyczne, Centralny Instytut Ochrony Pracy, Państwowy Instytut Badawczy, dostępne na stronie: http://nop.ciop.pl/m6-5/m6-5_4.htm.
- [13] Serwis internetowy: <http://itis.ethz.ch/itis-for-health/tissue-properties/database/low-frequency-conductivity>.
- [14] Serwis internetowy: <http://paraview.org>.
- [15] Serwis internetowy, <http://pl.wikipedia.org>.
- [16] Serwis internetowy: <http://speag.com/products/semcad/overview>.
- [17] Sikora J.: Numeryczne metody rozwiązywania zagadnień brzegowych, Politechnika Lubelska, Lublin, 2011.

Joanna Podlodowska

e-mail: joanna086@interia.eu

Studentka czwartego roku Edukacji Techniczno-Informatycznej na Wydziale Inżynierii Produkcji Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie. Czynnice uczestniczy w Studenckim Kole Naukowym Informatyków. Posiada certyfikat Inventor Basic. 21 maja 2013 roku otrzymała wyróżnienie na XLII Międzynarodowym Seminarium Kół Naukowych w Olsztynie. Interesuje się tematyką sieci komputerowych oraz programowaniem aplikacji użytkowych w języku C++.



otrzymano/received: 2013.11.19

przyjęto do druku/accepted: 2014.02.18