

DOI: 10.5604/20830157.1194286

## SZACOWANIE MAKSYMALNEGO POŁA ELEKTRYCZNEGO INDUKOWANEGO W CIELE CZŁOWIEKA PRZEZ ZEWNĘTRZNE POŁE MAGNETYCZNE

**Tomasz Lisewski, Agnieszka Mikołajczyk, Stanisław Abramik**

Instytut Elektrotechniki w Gdańsku

**Streszczenie.** Oceniając ekspozycję człowieka na zewnętrzne pole magnetyczne niskich częstotliwości brane pod uwagę jest maksymalne indukowane pole elektryczne w ciele człowieka będące skutkiem pola zewnętrznego. Pole elektryczne indukowane w człowieku nie jest wielkością mierzalną, może ono być jedynie szacowane za pomocą obliczeń analitycznych lub numerycznych. W przypadku obliczeń numerycznych wyznaczona wartość maksymalna obarczona jest błędem wynikającym z dyskretyzacji modelu ciała człowieka. Błąd ten powoduje zawyżenie poziomu ekspozycji. Zalecaną przez ICNIRP metodą redukcji błędów numerycznych jest uśrednianie i rozważanie 99 centyla wartości dla danej tkanki. W przypadku lokalnych źródeł pola prowadzi to z kolei do niedoszacowania poziomu ekspozycji. Niniejszy artykuł prezentuje nową metodę eliminacji błędów numerycznych polegającą na zastosowaniu filtra dolnoprzepustowego. Przedstawiono porównanie wyników uzyskanych bezpośrednio ze środowiska symulacyjnego SEMCAD X, wyników uśrednionych standardowymi metodami oraz wyników uzyskanych po zastosowaniu nowego filtra dolnoprzepustowego.

**Słowa kluczowe:** pole elektryczne, ocena ekspozycji, pole magnetyczne, SEMCAD X

### ASSESSMENT OF THE MAXIMUM ELECTRIC FIELD INDUCED BY AN EXTERNAL MAGNETIC FIELD

**Abstract.** The maximum induced electric field by external low frequency magnetic fields is considered when evaluating exposure of a body to magnetic field. The induced electric field cannot be measured but can only be assessed using analytical or numerical calculations. In the case of numerical simulations results are affected by errors caused by discretization of a body model being exposed. This error causes overestimation of the exposure level. The recommended ICNIRP approach to reduce errors is to average the results over a small cubic volume, and then take into account the 99<sup>th</sup> percentile value for a specific tissue. When evaluating exposure from small or local sources taking into account the 99<sup>th</sup> percentile value leads to underestimation. This paper propose a new method of reducing numerical errors using low pass filter. There is also presented results obtained directly from the simulation platform SEMCAD X compared to averaged values, and to results obtained using the new filtering method.

**Keywords:** electric field, exposure assessment, magnetic field, SEMCAD X

#### Wstęp

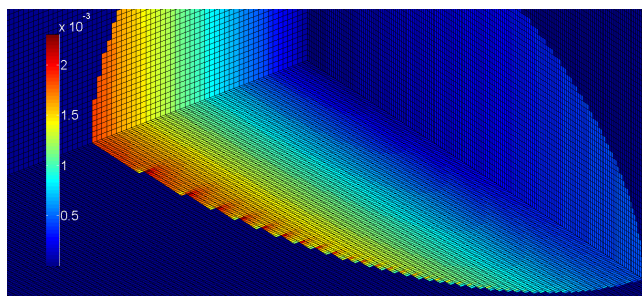
Urządzenia elektryczne, elektroniczne, energetyczne oraz instalacje elektryczne generują pola magnetyczne niskich częstotliwości, które mogą przekraczać dopuszczalne limity. Pierwszym etapem oceny ekspozycji jest wykonanie pomiaru. Jeżeli limit nie jest przekroczony to ekspozycja jest na poziomie nie powodującym bezpośredniej reakcji organizmu. Jednakże jeżeli limit pola zewnętrznego jest przekroczony, to nie oznacza, że poziom ekspozycji jest zbyt wysoki. W kolejnym etapie ocena ekspozycji przeprowadzana jest przy użyciu symulacji komputerowych stosując metody numeryczne. Zgodnie z zaleceniami ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) [3] maksymalna wartość indukowanego pola elektrycznego w ciele człowieka, w zakresie częstotliwości od 1 Hz do 10 MHz, powinna być porównywana z limitami (ograniczeniami podstawowymi) a wynik tego porównania określa poziom ekspozycji.

Maksymalna wartość pola uzyskana w drodze symulacji może być nieprawidłowa ze względu na błędy obliczeń numerycznych [1]. W związku tym, zgodnie z zaleceniami ICNIRP, wyniki rozkładu pola elektrycznego powinny być uśredniane w obrębie sześciannu o wielkości 2 mm × 2 mm × 2 mm. Ponieważ uśrednianie nie jest wystarczające do wyeliminowania błędów, zalecane jest przyjmowanie jako wartość maksymalną wartości odpowiadającej 99 centylowi dla danej tkanki. Oznacza to, że 1% punktów o największych wartościach jest odrzucany jako błędny. W przypadku niewielkich źródeł pola, ciało człowieka jest narażone tylko miejscowo, wówczas procedura zalecana przez ICNIRP powoduje eliminację wartości nie będących błędami i tym samym niedoszacowanie poziomu ekspozycji. Inne podejście do eliminacji błędów numerycznych prezentowane jest w publikacji [5], w której opisano metodę polegającą na rozmywaniu konduktywności tkanek. Sposób ten pozwala na zmniejszenie błędów numerycznych, jednakże zmiana parametrów elektrycznych poszczególnych tkanek wpływa na wartość prawdziwą indukowanego pola elektrycznego. Istnieje także możliwość modyfikacji metod numerycznych tak aby zminimalizować błędy numeryczne [4, 6]. Takie podejście nie jest możliwe do wykorzystania przez końcowego użytkownika oprogramowania symulacyjnego.

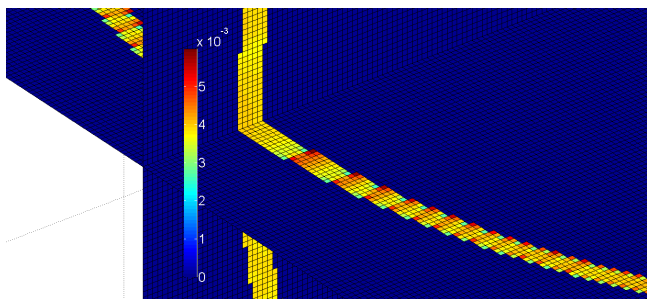
Celem prowadzonych prac było opracowanie metody eliminacji błędów numerycznych opartej o filtrację cyfrową wyników symulacji. Dzięki czemu metoda może być zastosowana przez końcowego użytkownika oprogramowania. Proponowana metoda nie wpływa na wartość konduktywności tkanek a także nie eliminuje jednego procenta największych wartości jak w przypadku rozważania 99 centyla. W artykule przedstawiono porównanie wyników uzyskanych bezpośrednio ze środowiska symulacyjnego SEMCAD X, wyników uśrednionych standardową metodą oraz wyników uzyskanych po zastosowaniu nowego filtra dolnoprzepustowego.

#### 1. Metoda

W wynikach rozkładu pola elektrycznego indukowanego przez zewnętrzne pole magnetyczne niskiej częstotliwości uzyskanych bezpośrednio ze środowiska symulacyjnego SEMCAD X [2] widoczne są oscylacje wartości pola elektrycznego na krawędzi obiektu rys. 1 oraz rys. 2. Obiektami są elipsoida oraz warstwa sferyczna o konduktywności skóry pokrywająca kulę o konduktywności tłuszczu. Wyniki obliczeń analitycznych dla rozważanych obiektów pozbawione są owych oscylacji. Posłużono się zależnościami (1) dla elipsoidy oraz zależnościami (2) dla warstwy sferycznej.



Rys. 1. Rozkład pola elektrycznego w elipsoidzie znajdującej się w polu magnetycznym, wynik bezpośrednio ze środowiska symulacyjnego



Rys. 2. Rozkład pola elektrycznego w skórze pokrywającej kulę tłuszczu znajdującej się w polu magnetycznym, wynik bezpośrednio ze środowiska symulacyjnego

$$E_e = \frac{\omega B}{b^2 + c^2} \sqrt{b^4 z^2 + c^4 y^2} \quad (1)$$

gdzie:  $E_e$  – indukowane pole elektryczne w elipsoidzie;  $B$  – zewnętrzne pole magnetyczne o kierunku zgodnym z osią  $x$ ;  $\omega$  – pulsacja pola magnetycznego;  $y, z$  – współrzędne punktu, w którym wyznaczane jest pole elektryczne;  $b, c$  – półosie elipsoidy w kierunku osi  $y$  i  $z$ .

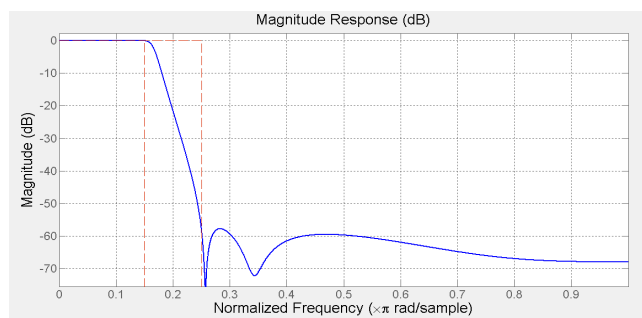
$$E_s = 0,5\omega Br \quad (2)$$

gdzie:  $E_s$  – indukowane pole elektryczne w sferycznej powłoce;  $\omega$  – pulsacja zewnętrznego pola magnetycznego;  $B$  – indukcja magnetyczna o kierunku zgodnym z osią  $x$ ;  $r$  – odległość od osi  $x$  punktu, w którym wyznaczane jest pole elektryczne.

Dodatkowo zauważono, że wartość prawdziwa zmienia się znacznie wolniej niż wartości błędne. W związku z tym, zaproponowano zastosowanie cyfrowego filtra dolnoprzepustowego. Filtrowane są wyniki rozkładu pola elektrycznego na kolejnych zewnętrznych warstwach analizowanego obiektu. Wykorzystany jest jednowymiarowy filtr cyfrowy. Wektor poddany filtracji powstaje z obwodu przekroju bryły. Filtracji poddawane są kolejne przekroje obiektu niezależnie w trzech prostopadłych płaszczyznach. Aby uniknąć wpływu oscylacji powstałych na skutek odpowiedzi filtru na skok wartości wejściowych, filtrowany wektor zbudowany jest z wielokrotnego złożenia tego samego wektora dla danego obwodu przekroju. Ostatecznie, jako odfiltrowany wynik, rozważana jest środkowa część wektora wyjściowego filtra.

Filtracja, oprócz niepożądanego wpływu odpowiedzi na skok, cechuje się także przesunięciem fazowym. Uniknięcie tego efektu możliwe jest dzięki ponownemu filtrowaniu wektora zbudowanego z elementów ustawionych w odwrotnej kolejności i ponownemu odwróceniu kolejności elementów wektora.

W analizowanych przypadkach zastosowano filtr dolnoprzepustowy szóstego rzędu o nieskończonej odpowiedzi impulsowej i charakterystyce amplitudowej jak na rys. 3. Wektor filtrowany został wydłużony poprzez pięciokrotne łączenie tego samego wektora, który następnie kolejny raz został poddany filtracji lecz dla odwrotnej kolejności jego elementów.



Rys. 3. Charakterystyka filtra dolnoprzepustowego użytego do eliminacji błędów numerycznych

Obliczenia numeryczne rozkładu pola elektrycznego wykonane zostały w środowisku symulacyjnym SEMCAD X wykorzystującym aproksymację quasi-statyczną równań Maxwella. Wyniki symulacji zostały wyeksportowane i poddane filtracji i analizie w programie Matlab.

Proponowana metoda filtracji została porównana z metodą przedstawioną w zaleceniach ICNIRP. Polega ona na wyznaczaniu pola elektrycznego w dowolnym punkcie jako średnią wektorową wartości w obrębie sześcienu o wymiarach  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ . Jeżeli obszar o objętości  $8 \text{ mm}^3$  nie jest osiągalna ze względu na kształt analizowanego obiektu, wówczas uśrednianie odbywa się w mniejszej objętości.

## 2. Walidacja metody

Metoda została zastosowana dla dwóch przypadków:

- 1) elipsoida o konduktywności tłuszczu umieszczona w polu magnetycznym jednorodnym o częstotliwości 50 Hz, dwie półosie mają tę samą długość a trzecia jest dwukrotnie dłuższa,
- 2) kula o konduktywności tłuszczu pokryta warstwą sferyczną o konduktywności skóry umieszczona w polu magnetycznym jednorodnym o częstotliwości 50 Hz, stosunek grubości skóry do promienia całego obiektu wynosił 1/36.

Wyniki referencyjne uzyskano poprzez obliczenia analityczne rozkładu pola elektrycznego w wymienionych wyżej obiektach wykorzystując zależności (1) oraz (2). Następnie wykonano symulacje komputerowe rozkładu pola elektrycznego dla wcześniej wspomnianych obiektów. Weryfikacja metody eliminacji błędów polegała na przeprowadzeniu kolejnych symulacji rozkładu pola elektrycznego dla różnych proporcji rozdzielczości siatki do wielkości obiektu. Porównywano maksymalne wartości pola elektrycznego obliczone analitycznie z obliczonymi numerycznie.

W przypadku elipsoidy filtrowano 3 zewnętrzne warstwy bryły. Natomiast w przypadku kuli filtrowano 9 zewnętrznych warstw skóry biorąc kolejne przekroje bryły we wszystkich trzech płaszczyznach. Było to konieczne ponieważ błędy numeryczne występowały zarówno na granicy skóra-powietrze jak i na granicy skóra-tłuszcz. Dla sfery, w przypadku nieciągłości obwodu przekroju dla kolejnej wewnętrznej warstwy, brakujące wartości były uzupełniane przez wartości z poprzedniej warstwy, która była już filtrowana.

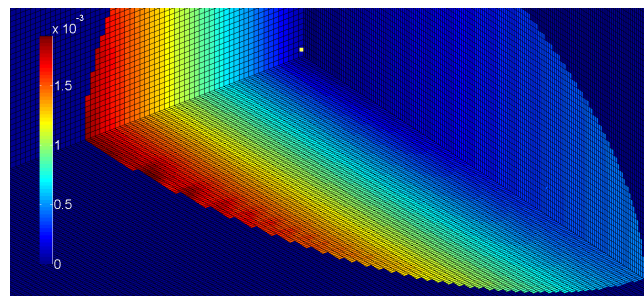
## 3. Wyniki

Rozkłady pola po filtracji dla elipsoidy i kuli zostały zaprezentowane na rys. 4 oraz rys. 5.

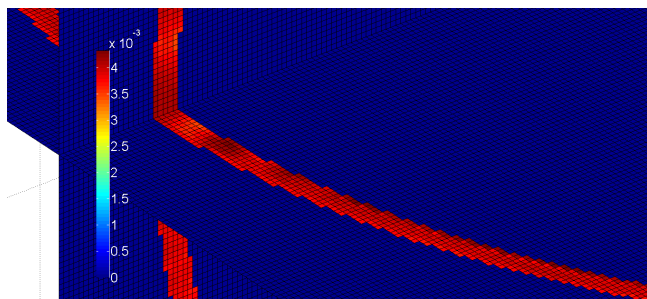
Estymację wartości maksymalnego pola elektrycznego wykonano wykorzystując następujące podejścia:

- wynik bezpośrednio ze środowiska symulacyjnego,
- wartość 99 centyla z wyników bezpośrednio z symulacji,
- uśrednianie wektorowe zgodne z zaleceniami ICNIRP,
- wartość 99 centyla z wyników po uśrednianiu zgodnym z zaleceniami ICNIRP,
- stosując filtr dolnoprzepustowy.

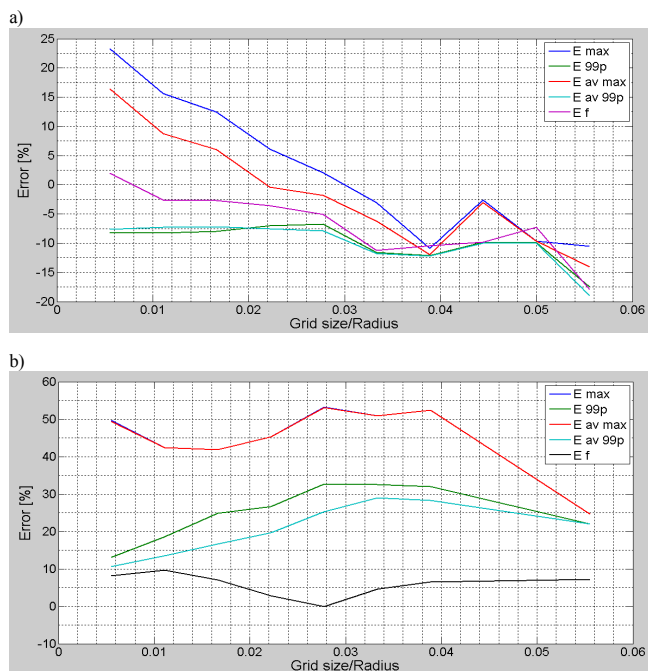
Wyniki uzyskane dla wyżej wymienionych metod porównano między sobą na rys. 6.



Rys. 4. Rozkład pola elektrycznego w elipsoidzie znajdującej się w polu magnetycznym, wynik po zastosowaniu filtra dolnoprzepustowego



Rys. 5. Rozkład pola elektrycznego w skórze pokrywającej kulę tuszczu znajdującej się w polu magnetycznym, wynik po zastosowaniu filtra dolnoprzepustowego



Rys. 6. Błąd wartości maksymalnej pola elektrycznego w zależności od stosunku rozdzielczości siatki do promienia kuli/dłuższej półosi elipsoidy dla różnych wielkości opisujących poziom ekspozycji ( $E_{max}$  – błąd bezpośrednio z symulacji,  $E_{99p}$  – błąd przyjmując jako wartość maksymalną wartość 99 centyla z wyników bezpośrednio z symulacji,  $E_{av\ max}$  – błąd po uśrednieniu wektorowym zgodnym z ICNIRP,  $E_{av\ 99p}$  – błąd przyjmując jako wartość maksymalną wartość 99 centyla z wyników po uśrednieniu ICNIRP,  $E_f$  – błąd po zastosowaniu filtra dolnoprzepustowego), a) wyniki dla elipsoidy, b) wyniki dla kuli tuszczu pokrytej warstwą skóry

#### 4. Podsumowanie

W artykule zaprezentowano nowe podejście do eliminacji błędów numerycznych związanych z dyskretyzacją modelu symulacyjnego, polegające na zastosowaniu filtra dolnoprzepustowego.

Proponowana metoda eliminacji błędów numerycznych pozwala na uzyskanie mniejszego błędu estymacji wartości maksymalnej, jednocześnie nie eliminując wyników mogących być skutkiem ekspozycji miejscowej.

Przyszłe prace powinny koncentrować się na optymalizacji filtracji w celu skrócenia czasu obliczeń. Metoda powinna także zostać przetestowana na wynikach rozkładu pola elektrycznego w modelu ciała człowieka.

#### Literatura

- [1] De Santis V., Chen X. L., Douglas M. G., Kuster N.: Issues of ICNIRP guidelines when determining compliance with LF exposure limits, Proceedings of EMC Europe Conference, September 17-21, 2012, Rome, Italy, 1–4.
- [2] Electromagnetic/thermal simulation platform. SEMCAD-X V.14.8, 2013, [Online]. Available: <http://semcad.com>
- [3] ICNIRP Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (1 Hz – 100 kHz), Health Physics 99(6), 2010, 818–836.
- [4] Kuzuoglu Mustafa, Ozgun Ozlem: Reduction of the Staircasing Error in Finite Methods by Using Transformation Media, Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, Moscow, Russia 2012.
- [5] Laakso I., Hirata A.: Reducing the staircasing error in computational dosimetry of low-frequency electromagnetic fields, Physics in Medicine and Biology, vol. 57, no. 4, N25–N34.
- [6] Tian Xiao, Qing Huo Liu: A Staggered Upwind Embedded Boundary (SUEB) Method to Eliminate the FDTD Staircasing Error, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 52, no. 3, March 2004.

#### Mgr inż. Tomasz Lisewski

e-mail: [tomasz.lisewski@iel.gda.pl](mailto:tomasz.lisewski@iel.gda.pl)

Urodzony w 1984 roku w Malborku. Uzyskał tytuł zawodowy magistra inżyniera na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej w 2011 roku. Aktualnie jest doktorantem na Politechnice Gdańskiej.

W latach 2010–2012 pracował jako specjalista do spraw badań w firmie SIMEX. Od roku 2012 kontynuuje karierę zawodową w Instytucie Elektrotechniki Oddział w Gdańsku, gdzie pełni funkcję kierownika laboratorium EMC. Jego zainteresowania naukowe skoncentrowane są głównie na pomiarach pól elektromagnetycznych i ocenie bezpieczeństwa.



#### Agnieszka Mikołajczyk

e-mail: [mikolajczyk.agnieszka@gmail.com](mailto:mikolajczyk.agnieszka@gmail.com)

Urodzona w Mrągowie w roku 1993. Obecnie jest studentką na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Od roku 2013 podjęła współpracę z Instytutem Elektrotechniki Oddział w Gdańsku i jest stażystką w laboratorium kompatybilności elektromagnetycznej.



#### Dr inż. Stanisław Abramik

e-mail: [stanislaw.abramik@iel.gda.pl](mailto:stanislaw.abramik@iel.gda.pl)

Uzyskał tytuł zawodowy mgr inż. w 1997 roku na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. W 2003 roku uzyskał stopień naukowy doktora na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej oraz Politechniki w Tuluzie. Od 2004 roku pracuje w dziedzinie odnawialnych źródeł energii energetycznej, oświetlenia LED i pojazdów elektrycznych w Instytucie Elektrotechniki Oddział w Gdańsku.



otrzymano/received: 08.12.2015

przyjęto do druku/accepted: 15.12.2015