

Wykorzystanie komory TEM do ekspozycji na pole elektromagnetyczne obiektów biologicznych

Streszczenie. Komory TEM są wykorzystywane w badaniach biomedycznych do ekspozycji materiału biologicznego na pole elektromagnetyczne. W komorze TEM uzyskuje się quasistacjonarny rozkład pola elektromagnetycznego odpowiadający fali płaskiej. Umieszczenie wewnątrz komory TEM obiektu biologicznego zmienia rozkład pola w jej wnętrzu, co wpływa na SAR. Celem niniejszej pracy jest ocena wpływu zastąpienia ekspozycji w warunkach fali płaskiej ekspozycją w komorze TEM na rozkład SAR w układzie biologicznym.

Abstract. TEM cells are used in biomedical research to expose a biological material to electromagnetic fields. The TEM cell produces quasi stationary electromagnetic field distribution corresponding to a plane wave. The biological material inside the TEM cell changes the electromagnetic field distribution inside the TEM cell, which affects the SAR. The aim of this study is to evaluate, how SAR changes, when the exposure at the plane wave condition is replaced with the exposure inside the TEM cell. (**Exposure of biological material to electromagnetic fields inside a TEM cell**).

Słowa kluczowe: pole elektromagnetyczne, SAR, fala płaska, komora TEM.

Keywords: electromagnetic field, SAR, plane wave, TEM cell.

Wstęp

Komora TEM została pierwotnie opracowana w celu wytwarzania quasistacjonarnego rozkładu pola elektromagnetycznego odpowiadającego fali płaskiej w zakresie częstotliwości, gdzie wymagane jest zastosowanie komór bezdechowych o bardzo dużych rozmiarach [1, 2]. Komora TEM jest przewodniczącą falową i składa się z wykonanego z miedzi przewodu środkowego, którego środkowa część ma kształt prostokąta, a jego końce zbiegają się trapezoidalnie w kierunku portów urządzenia. W równych odstępach od przewodu środkowego znajdują się wykonane z aluminium dwie zewnętrzne ściany urządzenia pełniące rolę przewodu zewnętrznego. Jedną z komór TEM wykorzystywanych w Wojskowym Instytucie Higieny i Epidemiologii przedstawiono na rysunku 1.



Rys.1. Komora TEM

Pomysłodawca urządzenia w swojej oryginalnej pracy opisał urządzenia pracujące w paśmie 0 – 500 MHz wytwarzające natężenie pola elektrycznego do 500 V/m [1]. Urządzenia takie mogą jednak pracować w zakresie wyższych częstotliwości i wytwarzać większe wartości pola elektrycznego [3].

Komory TEM znajdują zastosowanie np. w kompatybilności elektromagnetycznej do testowania odporności urządzeń na zakłócenia elektromagnetyczne, w metrologii pól elektromagnetycznych do wzorcowania mierników pola elektrycznego, ale również w badaniach biomedycznych do ekspozycji materiału biologicznego na pole elektromagnetyczne.

Zaletą komory TEM, jako układu ekspozycyjnego, jest jej szerokie pasmo pracy, niezależność natężenia pola od częstotliwości, możliwość uzyskania dużych wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego przy stosunkowo niewielkiej mocy na wejściu urządzenia oraz

stosunkowo prosty sposób wyznaczenia natężenia pola. Podstawowymi ograniczeniami przy stosowaniu są ograniczenia obszaru roboczego związane z górną częstotliwością pracy oraz sprzężenie z obiektem umieszczonym wewnątrz komory [4].

W ramach badań przy ocenie wpływu pola elektromagnetycznego na organizmy żywe, ekspozycji na pole elektromagnetyczne w komorze TEM mogą być poddawane np. małe zwierzęta, hodowle komórkowe, czy bakterie. Zwierzęta umieszcza się w komorze w przygotowanych do tego pojemnikach, zaś bakterie i hodowle komórkowe w pożywce w naczyniu laboratoryjnym.

Umieszczenie wewnątrz komory TEM obiektu biologicznego zmienia rozkład pola w jej wnętrzu. Ponadto wartość pola elektrycznego w obiekcie biologicznym jest inna niż w jego otoczeniu. Z uwagi na rozmiary hodowli oraz rozmiary umieszczonych w niej komórek nie sposób pomierzyć pola elektrycznego w ich wnętrzu. Można jednak oszacować wartość pola w naczyniu hodowlanym wypełnionym pożywką z hodowanymi komórkami lub wyznaczyć ilość energii pola elektromagnetycznego pochłanianej w jednostce czasu przez jednostkę masy tego obiektu biologicznego (SAR - specific absorption rate). W analizie takiej wykorzystywane są metody numeryczne.

Należy spodziewać się, że rozkład natężenia pola elektrycznego, a tym samym SAR w obiekcie biologicznym ekspozycyonalnym w warunkach fali płaskiej będzie odbiegał od tegoż rozkładu i SAR w obiekcie biologicznym ekspozycyonalnym w komorze TEM.

Celem niniejszej pracy jest ocena wpływu zastąpienia ekspozycji w warunkach fali płaskiej ekspozycją w komorze TEM na rozkład SAR w układzie biologicznym.

Metoda

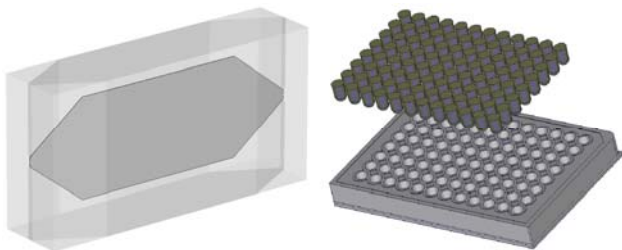
W celu oszacowania, jak zmienia się SAR skutkiem zastąpienia ekspozycji w warunkach fali płaskiej ekspozycją w komorze TEM, posłużyliśmy się metodą numeryczną (FDTD). Dla tych potrzeb w skonstruowaliśmy numeryczny model komory TEM o wymiarach odpowiadających takiemu urządzeniu, które wykorzystujemy do ekspozycji materiału biologicznego. Urządzenie to przedstawiono na rysunku 1, zaś jego numeryczną reprezentację na rysunku 2. Odległość między przewodem środkowym a ścianami urządzenia wynosi 12 cm. Urządzenie zaprojektowano z myślą o paśmie częstotliwości do 300 MHz, jednak w analizie braliśmy pod uwagę również częstotliwości powyżej

pasma pracy urządzenia. Poprawność budowy modelu numerycznego zweryfikowaliśmy porównując wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego w urządzeniu z wynikami obliczeń w modelu numerycznym przy tych samych warunkach wymuszenia, (50 MHz, 150 MHz, 300 MHz, 600 MHz, 900 MHz, z mocą padającą w każdym przypadku 2,88 W). Wyniki tego porównania zawiera tabela 1. Wartości w niej zawarte odpowiadają pomiarom i obliczeniom wartości skutecznej natężenia pola elektrycznego w środku geometrycznym przestrzeni między przewodem środkowym a jedną ze ścian zewnętrznych urządzenia.

Tabela 1. Walidacja modelu numerycznego

Częstotliwość [MHz]	Wartość skuteczna natężenia pola elektrycznego w komorze TEM, E [V/m]	
	Obliczona	Zmierzona
50	102	102
150	95	98
300	98	102
600	354	277
900	41	51

Analogicznie odwzorowaliśmy naczynie, w którym eksponowany jest materiał biologiczny. Jest nim płytka do hodowli z 96 dołkami o okrągłym dnie. Model naczynia przedstawia rysunek 2.



Rys.2. Model komory TEM (po lewej) oraz model naczynia i wypełniającego je obiektu biologicznego (po prawej)

W chwili obecnej nie posiadamy informacji o właściwościach elektrycznych pożywek do hodowli komórkowych, a tym bardziej takich pożywek z komórkami. Dlatego materiał biologiczny wypełniający dołki zastąpiliśmy w modelu numerycznym dielektrykiem o parametrach odpowiadających przenikalności i przewodności elektrycznej krwi [5]. Wartości te zebrano w tabeli 2. Dielektrykowi przypisaliśmy również ciężar właściwy krwi. Modelowi numerycznemu naczynia przypisaliśmy względną przenikalność elektryczną równą 2,5 i zerową przewodność elektryczną. Z uwagi na nasze potrzeby analizę ograniczyliśmy do pasma częstotliwości 150 - 900 MHz.

Tabela 2. Parametry elektryczne modelu materiału biologicznego

Częstotliwość [MHz]	Względna przenikalność elektryczna ϵ	Przewodność elektryczna σ [S/m]
150	71,3	1,26
300	65,6	1,32
600	62,6	1,42
900	61,4	1,54

W tak przygotowanym modelu przeprowadziliśmy obliczenia rozkładu przestrzennego SAR , wyznaczyliśmy SAR średni dla całego obiektu biologicznego oraz obliczyliśmy maksymalny SAR lokalny. Rozdzielczość modelu obiektu biologicznego wynosiła 0,5 mm, największy SAR lokalny był uśredniany za masę 0,01 g.

Obliczenia przeprowadziliśmy dla czterech częstotliwości (150, 300, 600 i 900 MHz) w warunkach fali płaskiej. W tym przypadku wektor propagacji był normalny do płaszczyzny zawierającej w sobie dwa dłuższe boki płytki do hodowli, zaś wektor natężenia pola elektrycznego był prostopadły do jej najdłuższego boku. Wartość skuteczną natężenia pola elektrycznego fali płaskiej dla każdej częstotliwości dobrano tak, by była równa wartości obliczonej w komorze TEM przy mocy padającej na wejście komory równej 2,88 W (tabela 1). W kolejnym kroku obliczyliśmy SAR umieszczając model obiektu biologicznego wewnątrz komory TEM. W tym wypadku zachowaliśmy to samo położenie obiektu biologicznego w stosunku do kierunku propagacji i polaryzacji fali, jak w przypadku fali płaskiej. Obliczenia wykonaliśmy na tych samych częstotliwościach pracy układu przy mocy padającej na wejście komory TEM równej 2,88 W.

Wyniki

Wyniki SAR obliczone w obiekcie biologicznym eksponowanym w warunkach fali płaskiej zestawiliśmy z odpowiadającymi im wynikami obliczeń dla ekspozycji w komorze TEM. Wyniki obliczeń SAR średniego zawiera tabela 3, zaś wyniki obliczeń SAR największego lokalnego zebrano w tabeli 4.

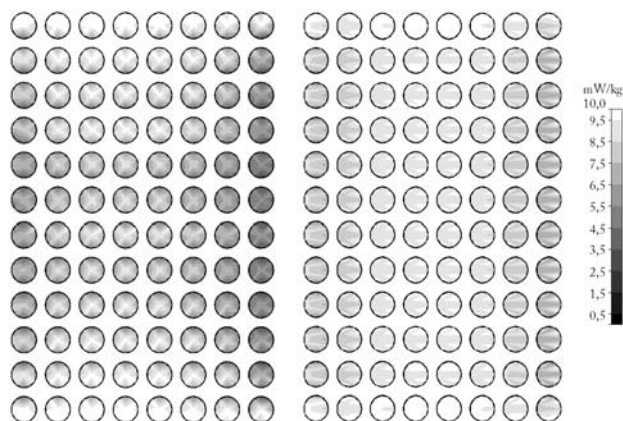
Tabela 3. Porównanie SAR średniego

Częstotliwość [MHz]	SAR średni [W/kg]	
	Ekspozycja w komorze TEM	Ekspozycja w warunkach fali płaskiej
150	0,031	0,024
300	0,085	0,077
600	1,363	1,856
900	0,032	0,038

Tabela 4. Porównanie SAR największego lokalnego

Częstotliwość [MHz]	SAR największy lokalny [W/kg]	
	Ekspozycja w komorze TEM	Ekspozycja w warunkach fali płaskiej
150	0,044	0,031
300	0,095	0,099
600	1,461	2,148
900	0,033	0,042

Porównanie rozkładów SAR w jednej z warstw obiektu biologicznego eksponowanego w warunkach fali płaskiej oraz w komorze TEM dla częstotliwości 900 MHz przedstawiono na rysunku 3.



Rys.3. Porównanie rozkładów SAR w jednej z warstw obiektu biologicznego eksponowanego w komorze TEM (po lewej) oraz warunkach fali płaskiej (po prawej) dla częstotliwości 900 MHz

Wnioski

Zgodnie z naszymi przypuszczeniami rozkład natężenia pola elektrycznego, a tym samym SAR w obiekcie biologicznym eksponowanym w komorze TEM odbiega od odpowiadających im rozkładów przy ekspozycji w warunkach fali płaskiej.

Rozbieżności te łatwo wyrazić w mierze procentowej wyznaczając różnice SAR w materiale biologicznym eksponowanym w warunkach fali płaskiej oraz w komorze TEM i odnosząc je do wartości SAR obliczonego w warunkach fali płaskiej. Rozbieżności te zawiera tabela 5.

Tabela 5. Rozbieżność względna SAR średniego oraz rozbieżność względna SAR największego lokalnego w materiale biologicznym eksponowanym w warunkach fali płaskiej oraz w komorze TEM

Częstotliwość [MHz]	Rozbieżność względna δ [%]	
	SAR średni	SAR największy lokalny
150	29	42
300	10	4
600	27	32
900	16	21

Objętość materiału biologicznego umieszczonego w płytce do hodowli jest znikoma w porównaniu z objętością przestrzeni między przewodem środkowym a ścianą zewnętrzną komory TEM. Wystarczy to jednak, by SAR średni w rozpatrywanym przedziale częstotliwości różnił się do 30 %, a SAR największy lokalny przeszło o 40 % w stosunku do ekspozycji w warunkach fali płaskiej. Nie można też wskazać, inaczej niż przy pomocy metod numerycznych, czy SAR średni oraz największy lokalny będzie większy, czy mniejszy w przypadku wykorzystania komory TEM w miejsce fali płaskiej. Wartości te mogą różnić się w zależności od użytej pożywki, rodzaju hodowanych w niej komórek oraz rodzaju i rozmiarów wykorzystywanej do hodowli płytki. Podobny wpływ ma rozmiar komory TEM wykorzystywanej w eksperymencie, a w szczególności odległość między przewodem środkowym

a ścianami zewnętrznymi komory. Należy się również spodziewać, że uzyskane w powyższej analizie rozbieżności będą rosły, gdy w komorze TEM będzie eksponowana jednocześnie większa objętość materiału biologicznego, np. skutkiem umieszczenia w mniej kilku płytek.

LITERATURA

- [1] Crawford ML., Generation of Standard EM Fields Using TEM Transmission Cells, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, EMC-16 (1974), nr.4, 189-195
- [2] Roach WP., ed., Radio frequency radiation dosimetry handbook (fifth edition). AFRL-RH-BR-TR-2010-0065. Brooks City-Base, TX: Air Force Research Laboratory, Human Effectiveness Directorate, 2009
- [3] Weston D., Electromagnetic Compatibility: Principles and Applications (Second Edition), CRC Press, Boca Raton, 2001
- [4] Długosz T., Wzajemne oddziaływanie linii transmisyjnej TEM i badanego w niej obiektu (Rozprawa doktorska), Politechnika Wrocławska, Wrocław, 2007, dostępny w Internecie http://www.dbc.wroc.pl/Content/1775/dlugosz_wzajemne_PhD.pdf
- [5] Andreuccetti D., Fossi R., Petrucci C., An Internet resource for the calculation of the dielectric properties of body tissues in the frequency range 10 Hz - 100 GHz, dostępny w Internecie <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/>. IFAC-CNR, Florence (Italy), 1997. Based on data published by C.Gabriel et al. in 1996

Autorzy: dr inż. Jaromir Sobiech, Wojskowy Instytut Higieny i Epidemiologii, ul. Kozielska 4, 01-163 Warszawa, E-mail: jaromirsobiech@gmail.com; dr inż. Jarosław Kieliszek, Wojskowy Instytut Higieny i Epidemiologii, ul. Kozielska 4, 01-163 Warszawa, E-mail: jarekkel@wp.pl; mgr inż. Robert Puta, Wojskowy Instytut Higieny i Epidemiologii, ul. Kozielska 4, 01-163 Warszawa, E-mail: putarobert@poczta.onet.pl; dr hab. n. med. Wanda Stankiewicz, Wojskowy Instytut Higieny i Epidemiologii, ul. Kozielska 4, 01-163 Warszawa, E-mail: wanda.stankiewicz@gmail.com.