

## Szerokopasmowy układ ekspozycyjny pola elektromagnetycznego

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono układ ekspozycyjny pola elektromagnetycznego w paśmie pracy od 200 MHz do 800 MHz do zastosowań biomedycznych. Proponowany układ to otwarta komora GTEM o rozmiarach 50x65x75 cm. Komora nie posiada dwóch ścian bocznych co pozwala na swobodny dostęp do obszaru ekspozycyjnego.

**Abstract.** The paper presents information exposure system used for biomedical applications in a wide range of frequency from 200 to 800 MHz. The proposed system is an open chamber GTEM with dimensions 50x65x75 cm. The chamber does not have two walls which allows to free access to the research area within area of Petri dish. (**Wide-band exposure system for electromagnetic field**)

**Słowa kluczowe:** pole elektromagnetyczne, PEM, układ ekspozycyjny, GTEM

**Keywords:** electromagnetic field, EMF, exposure antenna system, GTEM

### Wstęp

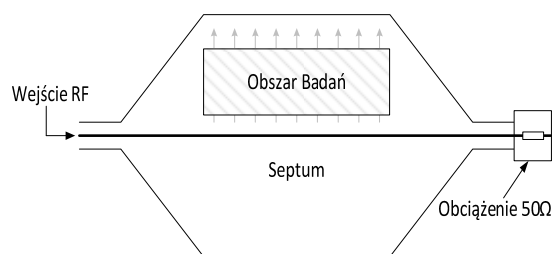
Badania oddziaływania pola elektromagnetycznego (PEM) na organizmy żywe są jedną z istotnych gałęzi badań biomedycznych. Większość tego typu badań prowadzi się z wykorzystaniem dedykowanych układów ekspozycyjnych o stałych i kontrolowanych warunkach ekspozycji na PEM. W zależności od częstotliwości oraz wykorzystywanej składowej (E lub H) pola elektromagnetycznego stosuje się różne typy układów ekspozycyjnych. Dla niskich częstotliwości (np. popularna częstotliwość sieci energetycznej 50 Hz) i pola magnetycznego wykorzystuje się solenoidy bądź cewki Helmholtza [1], a dla pola elektrycznego – kondensatory płaskie. Dla wyższych częstotliwości pola E stosowane są układy z antenami liniowymi lub linie TEM [2]. Każde rozwiązanie ma swoje zalety oraz ograniczenia i zwykle nie ma rozwiązań uniwersalnych. W ramach poszukiwania możliwie najlepszych rozwiązań autorzy proponują zastosowanie układu opartego na konstrukcji zmodyfikowanej komory GTEM, której podstawową zaletą jest swobodny dostęp do obiektu poddawanego ekspozycji poprzez usunięcie dwóch bocznych ścian. Opracowany układ charakteryzuje się niewielkimi rozmiarami zewnętrznymi – największy wymiar to 75cm oraz możliwością uzyskania stosunkowo dużych natężeń pól elektromagnetycznych (do 200V/m przy mocy zasilającej nie przekraczającej 30 W) i szerokim pasmem pracy do 200 MHz przy obciążeniu rezystancyjnym układu i do 800MHz z obciążeniem absorberami przy względnie dobrej jednorodności PEM (1,6 dB dla 800 MHz w obrębie typowej szalki Petriego o średnicy 10cm i wysokości do 3cm. Rozwiązanie to może być alternatywą dla proponowanego przez autorów układu z antena w cieplarni [3,4].

### Komora GTEM jako szerokopasmowy układ ekspozycyjny pola elektromagnetycznego

Komora GTEM jest rozszerzoną wersją linii TEM. Stanowi ona antena odcinek symetrycznej linii transmisyjnej o zmiennej geometrii zakończonej szerokopasmowym obciążeniem dopasowanym o impedancji charakterystycznej linii (typowo 50Ω). Zasadniczą różnicą między komorą TEM (rysunek 1) a GTEM (rysunek 2) jest geometria układu – w komorze TEM obszarem roboczym jest część o stałych wymiarach, w GTEM jest to obszar przejścia, w przekroju przypominający kształtem trójkąt. Drugą różnicą jest sposób obciążenia komory co przedstawiono na rysunku 1 oraz rysunku 2.

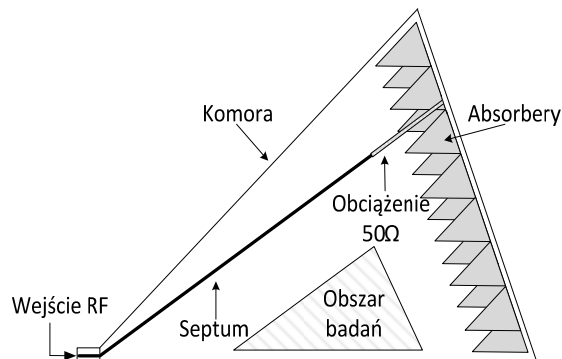
Komora TEM obciążana jest na wyjściu skupionym obciążeniem rezystancyjnym, natomiast komora GTEM ma obciążenie rezystancyjne rozproszone na tylnej ścianie a

dotąd dla wysokich częstotliwości dopasowanie zapewniają absorbery pochłaniając energię docierającą do ściany tylnej komory (Rys. 2.). Pozwala to na uzyskanie znacznie szerszego pasma pracy w zachowaniu modu TEM – nawet do częstotliwości kilku – kilkunastu GHz.



Rys.1

Rzut poprzeczny komory TEM



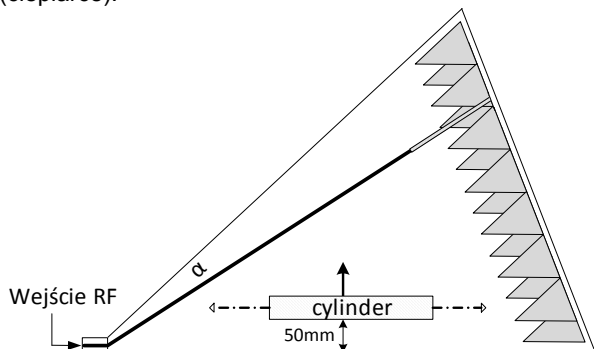
Rys.2 Rzut poprzeczny komory GTEM

Głównym zadaniem układu ekspozycyjnego, niezależnie od zastosowania, jest wytworzenie w określonym obszarze PEM o znanych i kontrolowanych parametrach. Komory TEM z założenia konstrukcyjnego posiadają jednorodne pole w obrębie obszaru badań w paśmie pracy komory – to jest dla częstotliwości znacznie poniżej rezonansu i dla spełnionego warunku, że największy wymiar komory jest znacznie mniejszy od długości fali wykorzystywanej w badaniach. Dla komór GTEM, ze względu na geometrię, zależność taka nie obowiązuje wprost, a badania i symulacje wskazują, że zmiany natężenia pola w obszarze ekspozycyjnym mogą sięgać nawet kilkunastu dB, zwłaszcza, jeżeli występują sprzężenia komory z obiektem badanym. Podczas badań wykorzystując symulacje numeryczne można zoptymalizować zarówno geometrię komory jak i położenie obiektu badanego dla uzyskania możliwie najlepszej jednorodności pola dla jak największego obszaru.

### Prototyp układu ekspozycyjnego.

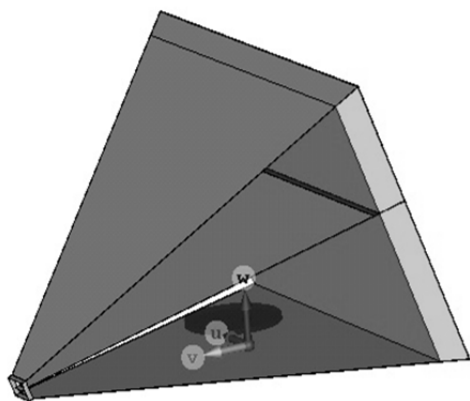
Przystępując do projektowania analizowanego układu ekspozycyjnego, brano pod uwagę trzy główne czynniki:

- równomierność generowanego PEM w jak największej jednostce objętości badanego obiektu,
- swoboda dostępu do obiektu oraz stosunkowo niewielkie rozmiary układu ekspozycyjnego
- ograniczenie wymiarów geometrycznych z możliwością umieszczenia całego układu w komorze klimatycznej (cieplarnie).



Rys.3 Przesuwanie cylindra wewnątrz komory dla pierwszego oraz drugiego scenariusza.

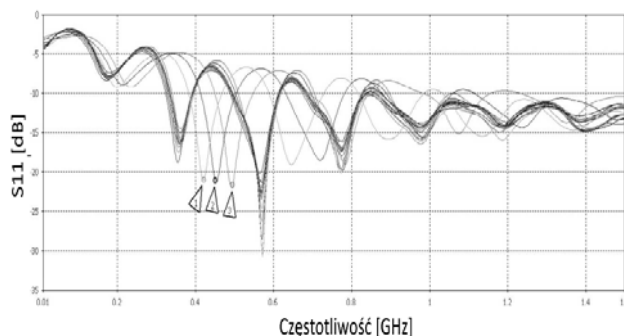
Do analiz przyjęto następujące założenia: komora GTEM w kształcie ostrosłupa czworokątnego o podstawie 50x65cm i wysokości 75cm z usuniętymi ścianami bocznymi i niesymetrycznym usytuowaniem septum względem osi całego układu. Septum zamodelowano zgodnie z danymi literaturowymi a dopasowanie impedancyjne 50Ω zamodelowano jako liniowy rezystor zgodnie z [6,7] co w rezultacie pozwoliło zapewnić szersze pasmo pracy komory. W obszarze badań (wg rysunku 2) umieszczony został odpowiednik szalki petriego - cylinder wody o średnicy 10cm oraz wysokości 1cm (o parametrach odpowiednio  $\epsilon=78$ ,  $\sigma=1,56$  S/m,  $C=4.2$  kJ/K/kg).



Rys.4 Model symulacyjny z programu CST MWS proponowanej komory GTEM wraz z absorberami.

Analizy przeprowadzone zostały wg następujących scenariuszy:

- 1) analiza rozkładów PEM na zmiany wysokości cylindra wody względem septum; (Rys.3)
- 2) analiza rozkładów PEM na zmiany położenia cylindra wody wzdłuż septum; (Rys.3)
- 3) analiza zmiany wysokości septum na parametry obwodowe proponowanej komory.
- 4) porównanie rozkładów PEM komory otwartej z absorberem oraz bez absorberów;
- 5) porównanie dopasowania impedancyjnego komory dla ww. scenariuszy.



Rys.5. Wykresy parametrów S11 dla scenariuszy 1) 2) 3)

### Symulacje parametrów obwodowych w funkcji kąta pochylenia septum

Kąt pochylenia septum wpływa jedynie na zmiany częstotliwości rezonansowej układu [8], nie wpływając zasadniczo na dopasowanie impedancyjne całości układu. Nie zaobserwowano również efektów sprzęgania się obiektu badanego z komorą. Trzy markery zaznaczone na Rysunku 5 określają częstotliwości rezonanse dla różnych kątów nachylenia septum - odpowiednio dla  $\alpha=20, 40, 60$  stopni. Nie zauważono również znaczących zmian parametrów obwodowych pod względem usytuowania obiektu wewnątrz komory (zgodnie ze scenariuszami 1 oraz 2), co wskazuje na właściwe oddalenie obiektu badanego od elementów komory.

### Charakterystyki PEM wewnątrz komory z obiektem

Rozkład pola elektromagnetycznego w komorze GTEM zależy od wielkości elektrycznej komory i staje się coraz mniej jednorodny wraz ze zwiększaniem tej wielkości. Dodatkowym czynnikiem zaburzającym rozkład pola jest dopasowanie końca komory i eliminacja odbić. Przeanalizowano dwie wersje - obciążenie czysto rezystancyjne i rezystancja wraz z absorberami. Podejście takie miało na celu oszacowanie możliwości zastosowania rozwiązań uproszczonych w zależności od oczekiwanej jednorodności i częstotliwości generowanego pola. Do symulacji komputerowej wykorzystano oprogramowanie CST Microwave Studio. Zaimplementowany model komory przedstawia rysunek 4. Analizie poddano wersję z absorberami oraz bez absorberów. Dla każdego z przypadków obliczono SAR dla cylindra wody w celu określenia ilości pochłoniętej energii w badanej przestrzeni. Rysunek 6. Przedstawia rzut poprzeczny rozkładów pól elektromagnetycznych pomiędzy septum a ścianami zewnętrznymi układu. Dla częstotliwości do 200MHz wpływ absorberów był całkowicie pomijalny, w zakresie 200-500 MHz różnice nie przekraczały kilkunastu procent, ale dla 500MHz w przypadku braku absorberów niejednorodność pola w obszarze badanym wzrastała już do ponad 20% i rosła z częstotliwością.

Tabela 1. Wartość procentowa odniesiona do zmian PEM wewnątrz cylindra

Częstotliwość [MHz]	200	800	1000	1500
GTEM z absorberami	100%	100%	100%	100%
GTEM bez absorberów	100%	114%	118%	121%

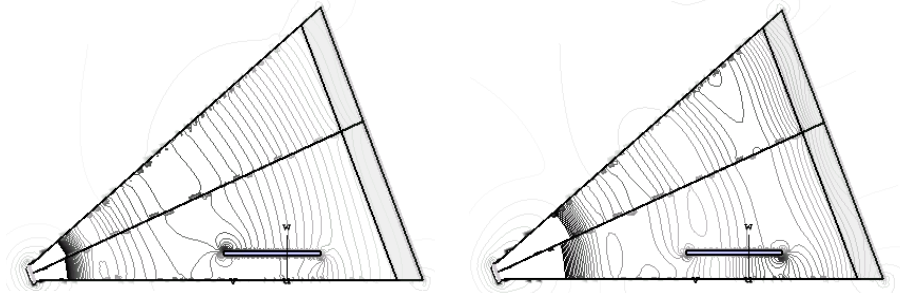
Tabela 2. Obliczone wartości SAR cylindra wody

Częstotliwość [MHz]	200		800		1000		1500	
	min	max	min	max	min	max	min	max
SAR [mW/kg]	0,9	1,0	5,2	7,0	0,6	7,6	15,0	55,1
Max/min [dB]	0,45		1,29		11,03		5,65	

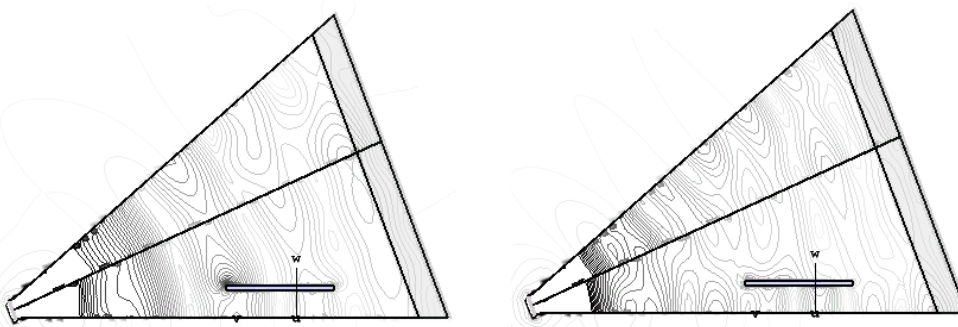
Rysunek 7 przedstawia przekrój poprzeczny komory GTEM dla dwóch częstotliwości, odpowiednio 200MHz oraz 800MHz. Dla każdego z nich określono, że wartości PEM w

okolicach cylindra, tutaj różnice w rozkładach PEM wewnątrz sięgają 23%. Natomiast w przypadku rozkładów PEM dla wyższych częstotliwości widać zdecydowanie różnicę i wartości PEM w obrębie szalki sięgające prawie 40% (dla 1 GHz) oraz 60% w przypadku 1.5 GHz (Rysunek

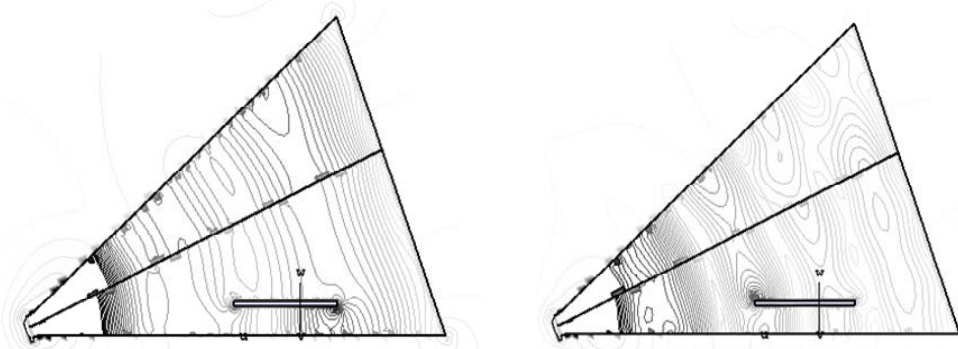
7), co w rezultacie nie pozwoli na przeprowadzenia miarodajnych badań dla ww. częstotliwości. Kolejnym istotnym aspektem jest rozkład SAR wewnątrz całego cylindra, wyniki rozkładów wartości maksymalnych i minimalnych pokazano w tabeli 2.



Rys.6. Rzut poprzeczny rozkładu pola elektromagnetycznego wewnątrz otwartej komory z absorberami dla 200MHz (lewa komora) oraz 800MHz (prawa komora).



Rys.7. Rzut poprzeczny rozkładu pola elektromagnetycznego wewnątrz otwartej komory z absorberami dla 1GHz (lewa komora) oraz 1,5GHz (prawa komora).



Rys.8. Rzut poprzeczny rozkładu pola elektromagnetycznego wewnątrz otwartej komory bez absorberów dla 200MHz (lewa linia) oraz 800MHz (prawa linia).

Tabela 2 przedstawia ilość energii pochłoniętej w całej objętości cylindra o średnicy 10cm i wysokości 1cm dla mocy doprowadzonej do komory równej 1W. Wyznaczono również względne różnice minimalnej i maksymalnej wartości miejscowego SAR dla uśredniania za 1 gram masy. Dla niższych częstotliwości różnice wynoszą 0,45 dB (10%) natomiast powyżej 1000MHz można zauważyć skok, znaczący wzrost niejednorodności SAR nawet do 11dB, co praktycznie uniemożliwia stosowanie tego układu do badań biomedycznych. W następnej faz porównano rozkłady pól elektromagnetycznych dla komory z absorberami oraz bez absorberów. W przypadku częstotliwości 200MHz nie zaobserwowano większych różnic w liniach pola elektromagnetycznego, , ale już od 500MHz, dla komory bez absorberów zauważono zmiany

rozkładu pól elektromagnetycznych co przedstawiono na Rysunku 8. Porównując rozkłady pól elektromagnetycznych rysunku 6 z 8 można zauważyć, że w przypadku komory bez absorberów wyniki dla 200MHz są zbliżone do wyników z 800MHz dla komory z absorberami. W przypadku częstotliwości powyżej 1GHz wartości PEM w obrębie cylindra miały zmiany sięgające 150%. Zatem, można stwierdzić, że zamodelowany, warstwowy model absorberów [8] pozwolił na zwiększenie częstotliwości pracy komory przy zachowaniu odpowiednich rozkładów pól elektromagnetycznych.

#### Podsumowanie

W pracy przedstawiono propozycje komory GTEM jako szerokopasmowego układu ekspozycyjnego optymalizowa-

nego pod kątem badań biomedycznych obiektów o rozmiarze szalki Petriego (tj. 10cm średnicy i 1 cm wysokości). Przeanalizowano komorę z absorberami oraz bez absorberów. Wykazano, że dla częstotliwości poniżej 500MHz można stosować układ uproszczony – bez absorberów. Dla częstotliwości wyższych brak absorberów spowoduje nieakceptowany wzrost (nie)jednorodności pola. Do 1000MHz uzyskano zadowalające wyniki z punktu widzenia parametrów polowych jak i obwodowych dla przedstawionych scenariuszy, ponieważ obszar (nie)jednorodności generowanego pola elektromagnetycznego wynosi 18% w obrębie szalki a współczynnik WFS jest nie większy niż 2,5 w paśmie od 200MHz do 1,5GHz. Prezentowany projekt jest kolejnym krokiem w kierunku rozwoju możliwie prostych układów ekspozycyjnych dla wysokich częstotliwości.

**Autorzy:** dr hab. inż. Paweł Bieńkowski prof. PWR, Politechnika Wroclawska, Katedra Telekomunikacji i Teleinformatyki, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław,  
E-mail: [pawel.bienkowski@pwr.edu.pl](mailto:pawel.bienkowski@pwr.edu.pl);  
mgr inż. Paweł Cała, Politechnika Wroclawska, Katedra Telekomunikacji i Teleinformatyki, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: [pawel.cala@pwr.edu.pl](mailto:pawel.cala@pwr.edu.pl);

#### LITERATURA

- [1] Bieńkowski Paweł, Wyszowska Joanna, Techniczne aspekty ekspozycji na pole magnetyczne ekstremalnie niskich częstotliwości (ELF) w badaniach biomedycznych, Medycyna Pracy, 2015, vol 66, nr 2, s. 185-197
- [2] Bieńkowski Paweł, Cała Paweł, Wyszowska Joanna, Zubrzak Bartłomiej, Układy ekspozycyjne PEM w badaniach biomedycznych. Przegląd Telekomunikacyjny, Wiadomości Telekomunikacyjne. 2015, R. 88, nr 4, s. 510-514.
- [3] Bieńkowski Paweł, Cała Paweł, Kieliszek Jarosław, Wyszowska Joanna, Ekspozycja na PEM w eksperymentach bioelektromagnetycznych – rozwiązania układowe, Zastosowanie elektromagnetyzmu w nowoczesnych technikach i medycynie: XXV Sympozjum Środowiskowe PTZE, 2015, Wieliczka, Polskie Towarzystwo Zastosowań Elektromagnetyzmu 41-43
- [4] Bieńkowski Paweł, Cała Paweł, Anteny układów ekspozycyjnych do badań biomedycznych z pasm GSM900, UMTS2100 i ISM 2.4GHz, Przegląd Elektrotechniczny, 2016, R. 92, nr 1, s. 75-77
- [5] Manfred Shmidt, Numerical Simulation of GTEM cells by Microwave Studio, EMC lab., <https://www.cst.com/Content/Events/UGM2009/6-1-2-Numerical-Simulation-of-GTEM-Cells-by-CST-MWS.pdf>
- [6] Vitawat Sittakul, Sirivat Hongthong, Sarinya Pasakawee, Design and Analysis of GTEM cell using the ferrite-tile and pyramid absorbers for EMC test in National Institute of Metrology, IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA), Nov 2015, Thailand
- [7] ZHANG Junru , ZHU Wensi , YU Mengxia , WANG Yuanyuan2, Design of Ultra-Wide band transition Connector for GTEM Cell, International Conference of Electronics, Communications and Control (ICECC), 2011
- [8] Holger Thye, Gunnar Armbrecht and Michael Koch, Aspects of Modelling a GTEM cell using CST, 3<sup>rd</sup> European CST user, Group Meeting Tegernsee, 13-14 September 2007, <https://www.cst.com/Content/Events/UGM2007/03-Thye.pdf>