

# Analiza wpływu konfiguracji układu pomiarowego w komorze GTEM na wyniki pomiaru skuteczności ekranowania obudowy

Andrzej Rusiecki

PLUM sp. z o.o., ul. Wspólna 19, Ignatki, 16-001 Kleosin

**Streszczenie:** W artykule przedstawione zostały wyniki pomiaru skuteczności ekranowania metalowej obudowy ze szczeliną, uzyskane na stanowisku z komorą GTEM (Gigahertz Transverse Electromagnetic). Przeanalizowany został wpływ ustawienia badanej obudowy w komorze GTEM na kształt częstotliwościowej charakterystyki skuteczności ekranowania. Wyniki pomiarów porównane zostały za pomocą metody Selektywnej Walidacji Wyników FSV (Feature Selective Validation) z wynikami analizy numerycznej przeprowadzonej za pomocą pakietu FEKO.

**Słowa kluczowe:** skuteczność ekranowania, komora GTEM, obudowa ze szczeliną, FEKO, FSV

## 1. Wprowadzenie

Ekranowanie elektromagnetyczne z wykorzystaniem metalowych obudów jest jedną z form redukcji emisji zabudowywanych w ich wnętrzu urządzeń elektronicznych. Wraz z ograniczeniem emisji do otoczenia, możliwe jest podniesienie odporności zabudowanego urządzenia na pola elektromagnetyczne pochodzące od sąsiadujących instalacji i urządzeń.

## 2. Pomiar skuteczności ekranowania z wykorzystaniem komory GTEM

Mimo swoich ograniczeń, takich jak relatywnie niewielka objętość przestrzeni pomiarowej oraz selektywność kierunkowa pomiaru, wymagająca w niektórych przypadkach kłopotliwej, zmiany pozycji badanego urządzenia, komory GTEM mogą być wykorzystywane do pomiarów SE obudów urządzeń elektronicznych [1–3].

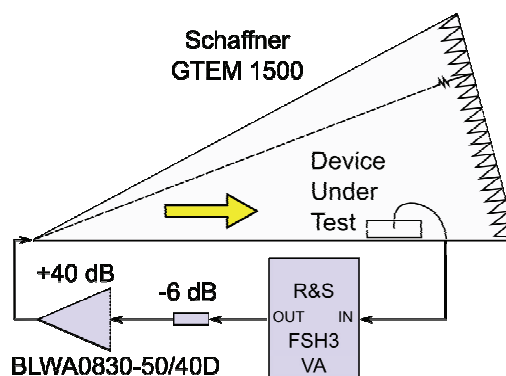
O ile dla dużych obudów, takich jak klatki Faradaya lub pomieszczenia ekranujące, dostępne są znormalizowane metody pomiaru ich SE [4], o tyle nie istnieją zestandaryzowane metody pomiaru dla obudów, których wymiary nie przekraczają kilkudziesięciu centymetrów. Podejmowane są obecnie próby opracowania takich uniwersalnych metod pomiarowych dla mniejszych obudów [5].

Na rys. 1 przedstawiony został schemat układu pomiarowego wykorzystywanego przez autora pracy w laboratorium kompaty-

bilności elektromagnetycznej firmy PLUM sp. z o.o. Składa się on z komory GTEM Schaffner 1500 i analizatora wektorowego Rohde & Schwarz FSH3 z wbudowanym przedwzmacniaczem. W celu zwiększenia zakresu dynamicznego zastosowany został wzmacniacz mocy BLWA0830-50/40/D wykorzystywany standardowo w badaniach odporności urządzeń na zaburzenia promieniowane.

Model badanej obudowy o wymiarach 300 mm × 120 mm × 300 mm, ze szczeliną 100 mm × 5 mm (rys. 2), został zlutowany ze stalowej blachy ocynowanej o grubości 0,34 mm. Wewnątrz obudowy zabudowany został monopól wykonany z drutu miedzianego o średnicy 1,3 mm, zamocowanego do przylutowanego do obudowy gniazda typu „N”. Wybór takiego modelu obudowy podyktowany został dostępnością w literaturze wyników do porównań, tak wyników pomiarów jak i analiz numerycznych.

Pomiar SE obudowy w komorze GTEM wykonywany był różnicowo. Wartość SE obliczana była jako różnica dwóch wartości współczynnika S12 schematu przedstawionego na rys. 1. Pierwsza wartość mierzona była w konfiguracji z badaną obudową podłączoną w lokalizacji Device Under Test (DUT). Druga



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego z komorą GTEM  
Fig. 1. Measurement setup with a GTEM cell

### Autor korespondujący:

Andrzej Rusiecki, andrzej.rusiecki@plum.pl

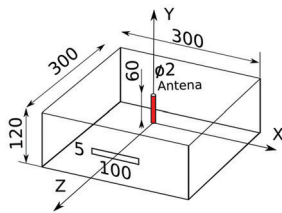
### Artykuł recenzowany

nadesłany 14.01.2015 r., przyjęty do druku 09.03.2015 r.



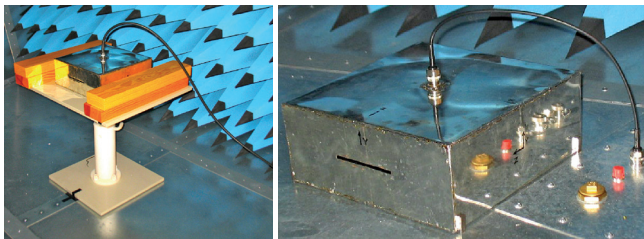
Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

wartość, mierzona była w układzie, w którym zamiast obudowy zastosowany był model odniesienia stanowiący jedną z kilku analizowanych realizacji anteny podobnej do tej zabudowanej w badanej obudowie.



Rys. 2. Wymiary modelu badanej obudowy ze szczeliną  
Fig. 2. Dimensions of slotted enclosure model

Normy opisujące sposób wykorzystania komór TEM i GTEM w pomiarach EMC określają zalecany obszar roboczy takiego stanowiska [1–3]. W przypadku komory GTEM stosuje się dielektryczne stoliki pozwalające ustawić badane urządzenie w przestrzeni roboczej.



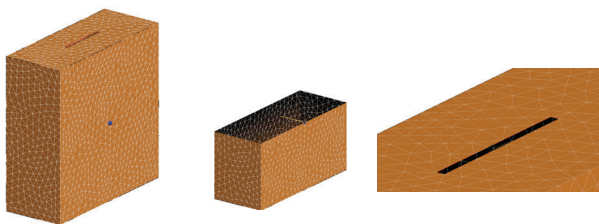
Rys. 3. Badana obudowa na stoliku stanowiska pomiarowego oraz na podłodze komory  
Fig. 3. Enclosure under test on measurement table and on the cell's floor

Podczas pomiarów SE obudowy, wykorzystywane było takie jej ustawienie (rys. 3), jednak w trakcie prac konfiguracja układu pomiarowego została znacząco zmieniona. Prezentowane w pracy wyniki zgromadzone zostały podczas pomiarów wykonywanych w celu dopracowania zgodności modelu fizycznego i numerycznego wykorzystywanego przez autora do analizy wpływu zabudowy na charakterystyki SE obudów ze szczelinami [6].

### 3. Model numeryczny stosowany do oceny wyników pomiarów

W celu przeprowadzenia analizy wpływu konfiguracji układu pomiarowego w komorze GTEM, wykorzystany został pakiet obliczeniowy wykorzystujący metodę momentów (MoM) – FEKO [7].

Siatka modelu obudowy składała się z 4042 elementów trójkątnych o przeciętnej długości boku równej 13 mm. Minimalna i maksymalna długość boku elementu trójkątnego to, odpowiednio 4 mm i 23 mm. Antena modelowana była przy użyciu 8 segmentów o średnicy 2 mm [8].



Rys. 4. Szczegóły realizacji modelu numerycznego FEKO – widok mocowania modelu anteny oraz szczeliny  
Fig. 4. Details of numerical FEKO model - view on antenna placement and a slot

## 4. Wyniki pomiaru skuteczności ekranowania obudowy w komorze GTEM

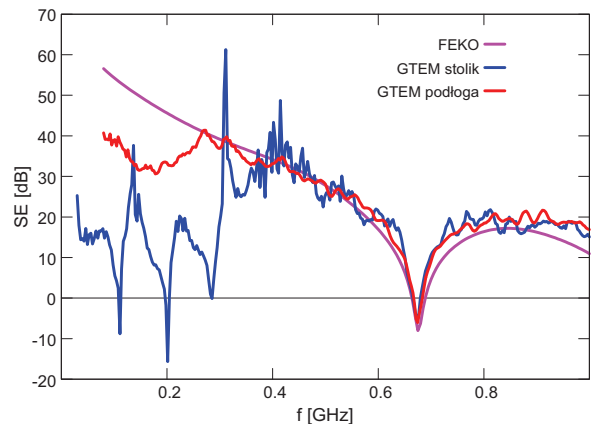
Analizując dostępne w literaturze wyniki pomiarów i analiz częstotliwościowych charakterystyk SE obudów, łatwo dostrzec zasadniczą różnicę między wynikami pomiarów i symulacji. O ile wyniki symulacji stanowią gładkie krzywe, zmieniające się w punktach rezonansów własnych wynikających z konstrukcji obudowy, o tyle w porównaniu do nich wyniki pomiarów są zazwyczaj silnie zaszumione [9–13].

Na rys. 5 widoczny jest istotny wpływ konfiguracji układu pomiarowego na charakterystykę SE w zakresie częstotliwości poniżej 500 MHz.

Zmiana układu pomiarowego, polegająca na ustawieniu obudowy na podłodze komory GTEM, pozwoliła uzyskać łatwo zauważalną poprawę kształtu zmierzonej charakterystyki. Ustawienie to pozwoliło zminimalizować wpływ układu rezonansowego, jaki stanowiła we wnętrzu komory badana obudowa, połączona z jej podłogą przy użyciu ekranu zastosowanego przewodu koncentrycznego.

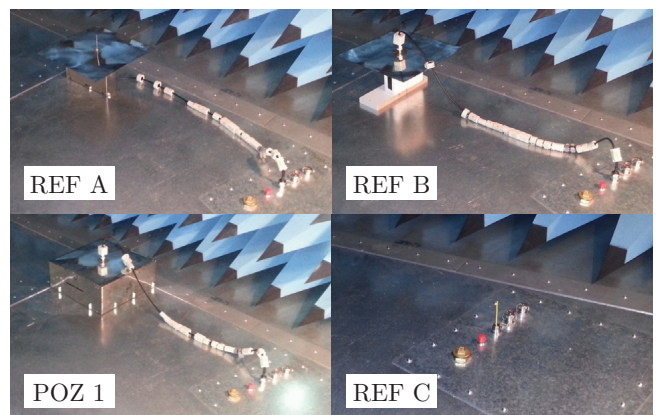
Podczas pomiarów wykorzystywane były różne modele układu odniesienia. Układy te przedstawione zostały wraz z fotografią ustawienia badanej obudowy na rys. 6.

O ile układy odniesienia oznaczone na rys. 6 jako REF A oraz REF B, są bliższe układowi odniesienia wykorzystywanemu w trakcie analizy numerycznej, układ oznaczony jako REF C jest znacznie prostszy w realizacji.



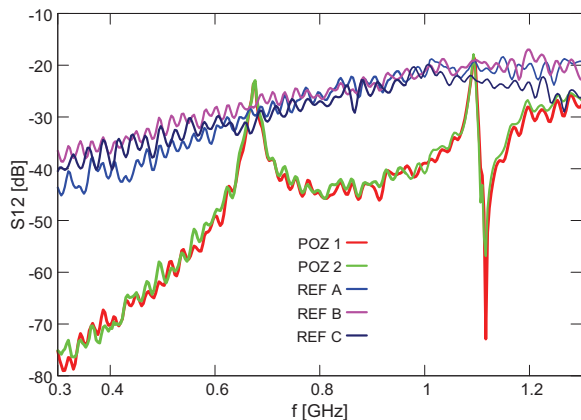
Rys. 5. Charakterystyki SE badanej obudowy dla różnych ustawień w komorze GTEM

Fig. 5. SE characteristics of tested enclosure for different placement in GTEM cell



Rys. 6. Analizowane ustawienia obudowy i konstrukcje układów odniesienia wykorzystywane w pomiarach

Fig. 6. Setup of enclosure and reference plates used for measurement



**Rys. 7. Charakterystyki parametru S12 układu pomiarowego zawierającego badaną obudowę oraz modele odniesienia**  
 Fig. 7. Characteristics of S12 parameter of the measurement setup with enclosure and different reference plates

Na rys. 7 przedstawione zostały wyniki pomiarów cząstkowych, których różnica stanowi zmierzoną charakterystykę SE badanej obudowy. Zauważalne są równomierne zafalowania tak wyników pomiarów obudowy, jak i poszczególnych układów odniesienia. Zafalowania te osiągają wartość nawet 6 dB. W przypadku pomiaru różnicowego, zafalowania charakterystyki

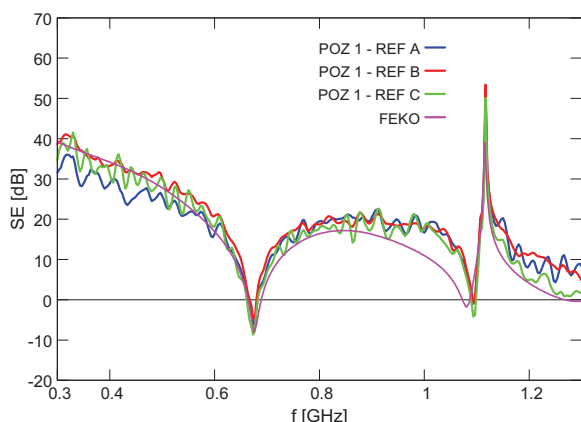
wynikowej mogą po złożeniu dochodzić nawet do kilkunastu dB. Częstotliwości występowania tych zniekształceń powiązać można z odległością układu badanego od stożka komory. Charakterystyka opisana na rys. 7 jako „POZ 2” została zmierzona w konfiguracji, w której badana obudowa przesunięta została w kierunku stożka komory o 50 cm.

Wynikowe charakterystyki SE, uzyskane dla obu pozycji ustawienia badanej obudowy, przedstawione zostały na rys. 8 i 9. Zauważalne jest, że zmiana pozycji ustawienia obudowy w zakresie 50 cm, nie wpłynęła w zauważalny sposób na gładkość charakterystyki.

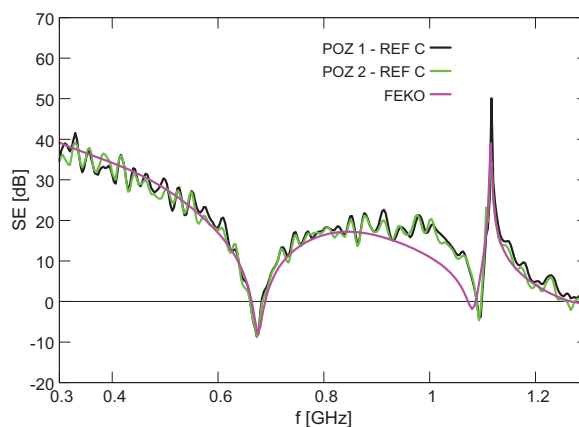
Najmniejsze zafalowania obserwowane są w układzie pomiarowym, w którym układ odniesienia znajdował się dokładnie w takiej samej pozycji jak badana obudowa (rys. 8 – POZ1 – REF B). W przypadku tak prostego modelu obudowy, możliwe jest uzyskanie powtarzalnych wyników pomiarów częstotliwościowej charakterystyki SE obudowy o zafalowaniach mniejszych niż 3 dB. W przypadku obudów o bardziej złożonych kształtach, dobór układu odniesienia może nie być procesem tak prostym.

Z tego powodu przeprowadzona została analiza porównawcza częstotliwościowych charakterystyk SE obudowy umieszczonej w dwóch różnych miejscach (POZ 1 i POZ 2), obliczana względem wspólnego układu odniesienia będącego monopolem zamocowanym bezpośrednio w podłodze komory GTEM (REF C na rys. 6). Zestawienie takie przedstawione zostało na rys. 10.

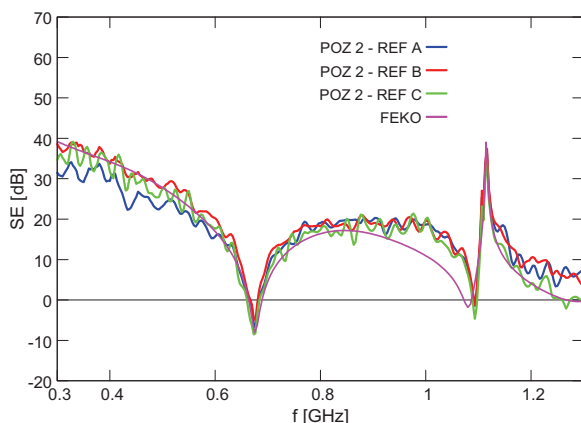
Licząc się ze stosunkowo dużym poziomem zafalowań uzyskanej charakterystyki, będącym wynikiem odmiennej konfiguracji



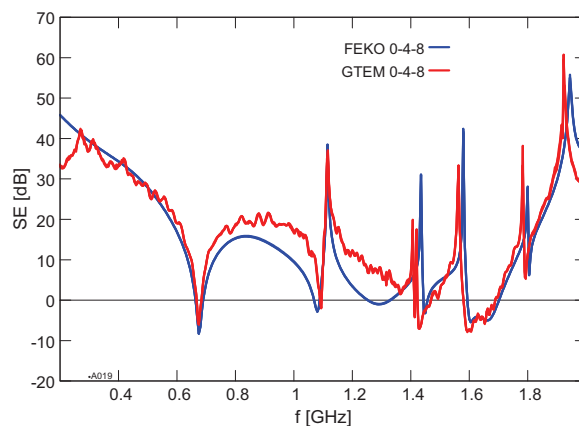
**Rys. 8. Charakterystyki SE obudowy w pozycji POZ 1 dla różnych układów odniesienia (REF), z charakterystyką uzyskaną numerycznie (FEKO)**  
 Fig. 8. SE characteristics of the enclosure in POZ 1 position for various reference platest (REF), with numerical results (FEKO)



**Rys. 10. Charakterystyki SE obudowy w dwóch różnych pozycjach względem wspólnego układu odniesienia REF C**  
 Fig. 10. SE characteristics of the enclosure in two different positions relative to the common reference plate (REF C)



**Rys. 9. Charakterystyki SE obudowy w pozycji POZ 2 dla różnych układów odniesienia**  
 Fig. 9. SE characteristics for the enclosure in POZ 2 position for various reference plates (REF)



**Rys. 11. Grupy zmierzonych i obliczonych charakterystyk SE obudowy dla trzech kątów jej odchylenia wokół osi Y**  
 Fig. 11. Groups of the measured and calculated SE characteristics of the enclosure for three angles of its deviation around the axis Y

układu odniesienia, można z dobrym przybliżeniem przyjąć, że ustawienie badanej obudowy w komorze GTEM nie wpływa w sposób istotny na jakość uzyskiwanych wyników.

Na rys. 11 przedstawiony został zmierzony oraz przeanalizowany numerycznie wpływ odchylenia obudowy od osi Z komory. Odchylenie analizowane było jako obrót wokół osi Y o 4° i 8°. Zakres zmienności kształtu uzyskanej charakterystyki jest w tym przypadku na tyle niewielki, że wpływ odchylenia osi obudowy na kształt częstotliwościowej charakterystyki SE badanej obudowy można praktycznie zaniedbać.

### 5. Ocena wyników pomiarów z wykorzystaniem Selekttywnej Walidacji Wyników (FSV)

Metoda Selekttywnej Walidacji Wyników [14, 15] opracowana została w oparciu o wyniki eksperymentów polegających na wzrokowym porównaniu charakterystyk uzyskiwanych w pomiarach EMC, przez wybraną grupę inżynierów posiadających doświadczenie w analizie tego typu pomiarów. Metoda ta pozwala ocenić zgodność wyników pomiarów z wykorzystaniem trzech funkcji: GDM (ang. *Global Difference Measure*), ADM (ang. *Amplitude Difference Measure*) oraz FDM (ang. *Feature Difference Measure*). ADM odpowiada zgodności trendu i obwiedni porównywanych danych, podczas gdy FDM skupia się na cechach związanych z szybkimi i gwałtownymi zmianami, reprezentujących zwykle zmiany w częstotliwościach rezonansowych układu. GDM jest wartością wypadkową ADM i FDM wg zależności (1).

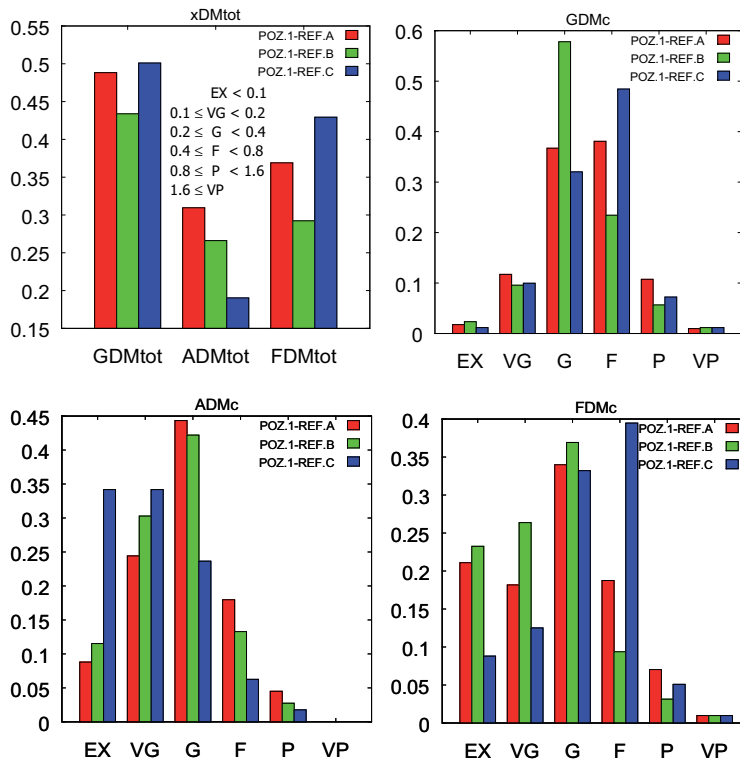
$$GDM(x) = \sqrt{ADM(x)^2 + FDM(x)^2} \quad (1)$$

Wartościom funkcji GDM, ADM oraz FDM przypisane są deskryptory oceny zgodności wg tabeli 1. Wartości te prezentowane są zwykle w postaci histogramów bądź miar całkowitych GDMtot, ADMtot oraz FDMtot będących uśrednionymi wartościami tych funkcji.

Na rysunkach 12 i 13 przedstawione zostały histogramy wartości średnich oraz skumulowane wartości poszczególnych funkcji oceny FSV. Ocena wyników pomiarów przeprowadzona została w odniesieniu do wyników symulacji. Analiza FSV pozwala numerycznie określić poziom odkształceń zmierzonej charakterystyki SE obudowy w zależności od jej ustawienia w komorze i wyboru układu odniesienia.

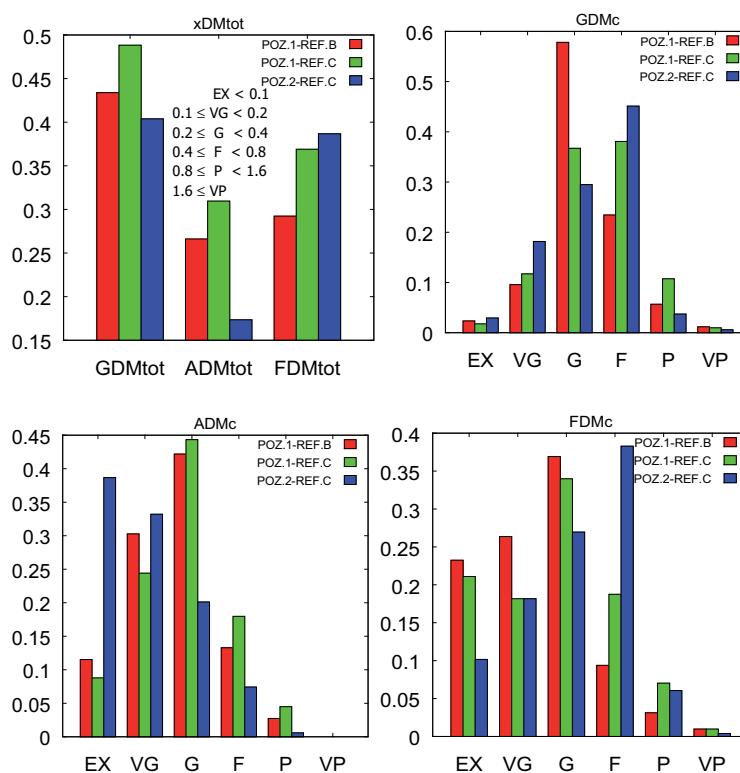
Oceniając stopień odkształcenia charakterystyki zmierzonej od uzyskanej numerycznie, spowodowany zafalowaniami mającymi swoje źródło w konfiguracji układu pomiarowego, należy wziąć pod uwagę wartości osiągane przez funkcję FDM. Jej uśredniona wartość jest najniższa dla układu POZ.1-REF.B będącego próbą najdokładniejszego pozycjonowania obudowy i układu odniesienia (rys. 6).

Średnia wartość funkcji ADM (ADMtot) wskazuje na najlepszą zgodność pomiaru układu POZ.1-REF.C (rys. 12) i symulacji w zakresie obwiedni. Wpływ FDM jest jednak na tyle duży, że wynikiowy GDMtot również wskazuje najlepszą zgodność



Rys. 12. Histogramy uśrednionych oraz skumulowanych wartości poszczególnych deskryptorów analizy FSV, porównanie wyników pomiarów uzyskanych dla różnych układów odniesienia z charakterystyką obliczoną numerycznie

Fig. 12. Bar charts of average and cumulative values of individual FSV metrics, comparison of measurements for different reference plates with numerical results



Rys. 13. Histogramy uśrednionych oraz skumulowanych wartości deskryptorów analizy FSV porównania wyników pomiarów uzyskanych dla wybranej jako najlepsza (REF B) oraz dwóch najłatwiejszych w zastosowaniu konfiguracji (REF C) układów odniesienia z charakterystyką obliczoną numerycznie

Fig. 13. Bar charts of average and cumulative values of individual FSV metrics for comparison of selected as the best measurement setup (REF B) and two easiest to implement reference plates (REF C) with numerical results



Tabela 1. Deskrytory ocen wartości funkcji FSV  
Table 1. Qualitative descriptors of FSV metrics

xDM	deskryptor
< 0.1	Excellent (EX) – doskonała
0,1–0,2	Very Good (VG) – bardzo dobra
0,2–0,4	Good (G) – dobra
0,4–0,6	Fair (F) – dostateczna
0,6 –1,6	Poor (P) – słaba
> 1,6	Very Poor (VP) – bardzo słaba

dla tego samego układu pomiarowego. Wartość skumulowana GDM wykazuje dla tego układu większość próbek ocenionych na dobrym poziomie (G).

W przypadku układu pomiarowego w którym obudowa została przesunięta o 50 cm (POZ.2), wykorzystanie uproszczonego układu odniesienia (REF.C) pozwoliło uzyskać lepszą zgodność całkowitą GDM<sub>tot</sub> niż było to w przypadku POZ.1-REF.B (rys. 13).

Przy porównaniu wpływu zmiany lokalizacji badanej obudowy przy wykorzystaniu wspólnego uproszczonego punktu odniesienia (REF.C) widoczny jest silny wpływ zgodności wykazywanej przez obwiednię ADM<sub>tot</sub> na ocenę całkowitą GDM<sub>tot</sub>. Wartości FDM<sub>tot</sub> w obydwu przypadkach są zbliżone sugerując niewielki wpływ przesunięcia obudowy na zmianę zgodności spowodowaną zafalowaniami charakterystyki.

Najlepszą zgodność pomiarów z symulacją uzyskano w układzie POZ.1-REF.B, co odpowiada subiektywnej ocenie gładkości uzyskanej charakterystyki przedstawionej na rys. 8. Zmiana układu odniesienia na REF.C spowodowała co prawda pogorszenie zgodności, jednak w przypadkach niewymagających najwyższej dokładności, znacząco ułatwić wykonywanie pomiarów SE obudów. Dalsze drobne zmiany układu pomiarowego, takie jak zmiana pozycji obudowy nie prowadzą do tak radykalnych zmian w jakości uzyskiwanych wyników pomiarów.

## 6. Podsumowanie

W artykule przedstawiona została metoda pomiaru skuteczności ekranowania obudów urządzeń w komorze GTEM. Pomiaru wykonane zostały dla prostego modelu metalowej obudowy ze szczeliną. Przeanalizowane zostały czynniki mające wpływ na uzyskiwane wyniki w zakresie gładkości wyznaczanej charakterystyki będącej wynikiem różnicowego pomiaru SE. Zakres analizy objął stosowanie różnych modeli układu odniesienia, względem którego wyznaczana była charakterystyka SE badanej obudowy.

Wyniki pomiarów na potrzeby oceny ich jakości porównane zostały z wynikami obliczeń numerycznych wykonanych z wykorzystaniem pakietu obliczeniowego FEKO.

Analiza porównawcza charakterystyk SE badanego modelu obudowy została przeprowadzona z wykorzystaniem metody selektywnej walidacji wyników.

Przeprowadzona w niniejszej pracy analiza pozwala zlokalizować przyczyny zniekształceń charakterystyk SE zmierzonych w GTEM. Stanowi ona element składowy opracowywanej przez autora metody pomiaru SE obudów urządzeń z wykorzystaniem wbudowanych mieszadeł [6].

## Bibliografia

- IEC 61000-4-20, Ed. 2.0, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-20: Testing and measurement techniques – Emission and immunity testing in transverse electromagnetic (TEM) waveguides, 2010.
- IEC 61000-4-21, Ed. 2.0, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-21: Testing and measurement techniques – Reverberation chamber test methods, 2011.
- IEC 61967-2, Integrated circuits – Measurement of electromagnetic emissions, 150 kHz to 1 GHz – Part 2: Measurement of radiated emissions – TEM cell and wideband TEM cell method, 2005.
- IEEE Std 299-2006, IEEE Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures, Feb. 2007
- IEEE Std P299.1/D4 Draft Standard Method for Measuring the Shielding Effectiveness of Enclosures and Boxes Having All Dimensions between 0.1 m and 2 m, March 2011.
- Rusiecki A., Aniserowicz K., *Evaluation of Shielding Effectiveness of Slotted Enclosures by Internal Stirring*, [w:] 20<sup>th</sup> International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications, MIKON 2014, 240–243.
- FEKO User's Manual, EM Software & Systems-S.A. (Pty) Ltd, 2009.
- Rusiecki A., Aniserowicz K., *Analysis of Differences in Results of Measurements and Calculations of Slotted Enclosure Shielding Effectiveness*, 20<sup>th</sup> International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications, MIKON 2014, 244–247, DOI: 10.1109/MIKON.2014.6899864.
- Robinson M.P., Turner J.D., Thomas D.W.P., Dawson J.F., Ganley M.D., Marvin A.C., Porter S.J., Benson T.M., Christopoulos C., *Shielding effectiveness of a rectangular enclosure with a rectangular aperture*, "Electronics Letters", Vol. 32, No. 17, 15<sup>th</sup> Aug. 1996, 1559–1560, DOI: 10.1049/el:19961030.
- Robinson M.P., Benson T.M., Christopoulos C., Dawson J.F., Ganley M.D., Marvin A.C., Porter S.J., Thomas D.W.P., *Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures*, IEEE Trans. Electromagn. Compat., Vol. 40, No. 3, Aug. 1998, 240–248, DOI: 10.1109/15.709422.
- Feng C., Shen Z., *A hybrid FD-MoM technique for predicting shielding effectiveness of metallic enclosures with apertures*, "IEEE Trans. Electromagn. Compat.", Vol. 47, No. 3, Aug. 2005, 456–462.
- Wallyn W., De Zutter D., Laermans E., *Fast shielding effectiveness prediction for realistic rectangular enclosures*, "IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility", Vol. 45, No. 4, Nov. 2003, 639–643, DOI: 10.1109/TEMC.2003.819063.
- Liu Q.-F., Yin W.-Y., Mao J.-F., Chen Z., *Accurate characterization of shielding effectiveness of metallic enclosures with thin wires and thin slots*, "IEEE Trans. Electromagn. Compat.", Vol. 51, No. 2, May 2009, 293–300, DOI: 10.1109/TEMC.2008.927942.
- Duffy A.P., Martin A.J., Orlandi A., Antonini G., Benson T.M., Woolfson M.S., *Feature Selective Validation (FSV) for Validation of Computational Electromagnetics (CEM). Part I – The FSV Method*, "IEEE Trans. on Electromagn. Compat.", Vol. 48, No. 3, August 2006, 449–459.
- Orlandi A., Duffy A.P., Archambeault B., et al., *Feature Selective Validation (FSV) for Validation of Computational Electromagnetics (CEM). Part II – Assessment of FSV Performance*, "IEEE Trans. on Electromagn. Compat.", Vol. 48, No. 3, August 2006, 460–467, DOI: 10.1109/TEMC.2006.879360.

# Impact of the Measurement Setup on Shielding Effectiveness Measurement of Enclosure in GTEM Cell

**Abstract:** Results of Shielding Effectiveness measurements of metal slotted enclosure in GTEM cell are presented. Impact of measurement setup inside GTEM cell on measured shielding effectiveness characteristics was considered and analysed. Results were validated using Feature Selective Validation (FSV) with numerically calculated values obtained using FEKO suite.

**Keywords:** Shielding Effectiveness, GTEM cell, slotted enclosure, FEKO, FSV

//////

**mgr inż. Andrzej Rusiecki**

andrzej.rusiecki@plum.pl

Absolwent i doktorant Politechniki Białostockiej. Konstruktor elektronik w firmie PLUM sp. z o.o.

