

doi:10.15199/48.2022.09.27

Numeryczna symulacja w domenie częstotliwości efektywności ekranowania wnętrza obudowy z otworem przed ultrakrótkim impulsem elektromagnetycznym dużej mocy

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki symulacji numerycznej zależności skuteczności ekranowania wnętrza obudowy z otworem w funkcji częstotliwości od wyboru punktu obserwacji w tej obudowie. Analizę morfologii modów i zagrożenie EM, jakie stanowią we wnętrzu obudowy podzielono na dwie tematyczne sekcje. W pierwszej sekcji wyznaczono numerycznie częstotliwości rezonansowe i dokonano wizualizacji przestrzennej morfologii poszczególnych modów wewnątrz zamkniętej obudowy. W drugiej sekcji przeanalizowano zależność efektywności ekranowania od położenia punktu obserwacji wewnątrz obudowy z otworem. Wykonana symulacja wykazała, że efektywność ekranowania pola elektrycznego SE^E jest funkcją miejsca w obudowie i częstotliwości. Spotykane w literaturze całościowe oceny skuteczności ekranowania na podstawie symulacji dla jednego punktu obserwacyjnego są zazwyczaj niemiernodajne.

Abstract. The article presents the results of a numerical simulation of the dependence of the shielding effectiveness inside the enclosure with aperture as a function of frequency on the selection of the observation point in this enclosure. The analysis of the morphology of the mods and the EM threat posed inside the enclosure are divided into two thematic sections. In the first section, the resonance frequencies were numerically determined and the spatial morphology of individual modes inside the closed enclosure was visualized. In the second section, the dependence of the shielding effectiveness on the position of the observation point inside the enclosure with aperture was analyzed. The simulation performed showed that the SE^E is a function of the space in the casing and the frequency. The overall assessments of the shielding effectiveness based on simulations for one vantage point, found in the literature, are usually unreliable. (**Numerical simulation in the frequency domain of the shielding effectiveness of the interior of the enclosure with an opening against an ultrashort high power electromagnetic pulse**)

Słowa kluczowe: zaburzenie elektromagnetyczne, elektromagnetyczny ultrakrótki impuls wysokiej mocy, skuteczność ekranowania
Keywords: electromagnetic interference, ultrashort high-power electromagnetic pulse, shielding effectiveness

Wstęp

Lawinowo rosnąca liczba urządzeń elektronicznych i ciągle postępująca technologia informacyjnych powodują konieczność ochrony zaawansowanych systemów elektronicznych przed różnego rodzaju zagrożeniami ze strony środowiska elektromagnetycznego (EM). Jednym z najważniejszych zagrożeń dla infrastruktury elektronicznej są intencjonalne zaburzenia elektromagnetyczne (EM) (IEME - Intentional Electromagnetic Environments) wytworzone w celu zakłócenia jej pracy lub zniszczenia. Zaburzenia intencjonalne charakteryzują się dużą mocą promieniowania EM [1-2] i z tego powodu zalicza się je do środowiska EM dużej mocy HPE (High Power Electromagnetic) a promieniowanie EM charakterystyczne dla tego środowiska nazywane jest promieniowaniem EM dużej mocy (HPEM - High Power Electromagnetic radiation). Promieniowanie EM dużej mocy generowane jest przeważnie w formie impulsów [4, 5]. Największym zagrożeniem dla działania obiektów elektronicznych są krótkotrwałe impulsy o dużej mocy, której odpowiada duże natężenie pola elektrycznego, osiągające wartości rzędu 10^5 - 10^6 V/m [6].

Skala spowodowanych zniszczeń w urządzeniach elektronicznych zależy nie tylko od mocy impulsu, ale również od charakterystyk częstotliwościowych i rozkładów czasowych pola elektrycznego i magnetycznego impulsu. Z tego powodu analizując stopień zagrożenia danej infrastruktury elektronicznej impulsami HPEM należy brać pod uwagę zgodność widma impulsu zaburzającego z częstotliwościowym widmem jej wrażliwości na promieniowanie EM [6].

Prawidłowe funkcjonowanie urządzeń i systemów elektronicznych uzależnione jest od trafnej analizy parametrów pola EM wywołanego przez impuls HPEM oraz opracowania skutecznych środków zaradczych eliminujących lub minimalizujących skutki, jakie mogą spowodować impulsy HPEM. Najskuteczniejszą metodą ochrony urządzeń i systemów elektronicznych jest tzw.

ekranowanie EM. Polega ono na umieszczeniu urządzenia elektronicznego w zamkniętej obudowie ekranującej. Ściany komór ekranujących wykonane z metalu o wysokiej przewodności zapewniają doskonałe ekranowanie EM. Obecnie dużym zainteresowaniem cieszą się małowymiarowe obudowy ekranujące mniejsze obiekty elektroniczne, takie jak np. laptopy, telefonu komórkowe, pamięci przenośne, routery itd.

W praktyce jednak, obudowy ekranujące muszą posiadać otwory technologiczne (celem wentylacji oraz zapewnienia zasilania elektrycznego i komunikacji: wnętrze obudowy - zewnątrz), które powodują, że obudowy ekranujące przestają być zamknięte i powstają warunki do wniknięcia impulsu HPEM do ich wnętrza. Z tego powodu w projektowaniu obudów ekranujących ważną rolę odgrywa określenie skutków wnikania impulsu HPEM do obudowy przez otwory technologiczne [7-9].

Niniejsza praca dotyczy badań symulacyjnych wnikania zewnętrznego pola EM do wnętrza małej obudowy z otworem, służącej do ekranowania małych obiektów elektronicznych.

Do oceny jakości ochrony wnętrza obudów ekranujących z otworem technologicznym, przed spodziewanym promieniowaniem EM (w tym impulsów HPEM), stosuje się wielkość zwaną skutecznością ekranowania SE^E dla pola elektrycznego SE^H dla pola magnetycznego SE^{EM} dla pola elektromagnetycznego. Skuteczność ekranowania można wyznaczyć w domenie częstotliwościowej lub czasowej.

W niniejszej pracy zajmujemy się symulacją efektywności ekranowania wnętrza małej obudowy z otworem przed ultrakrótkim impulsem EM w domenie częstotliwości.

Tradycyjnie w domenie częstotliwości efektywność ekranowania danego punktu (x,y,z) przed polem elektrycznym definiuje się jako stosunek amplitudy pola elektrycznego E (lub magnetycznego H) bez obudowy

ekranującej i z obudową ekranującą w tym samym punkcie [10]:

$$(1) SE_{\text{częstotliwość}}^E(f, x, y, z) = 20 \log \frac{E^i(f, x, y, z)}{E^0(f, x, y, z)}$$

gdzie: $SE_{\text{częstotliwość}}^E(f, x, y, z)$ jest efektywnością ekranowania pola elektrycznego E w punkcie (x,y,z) dla częstotliwości f, E^i jest amplitudą pola elektrycznego w punkcie (x,y,z) bez obudowy ekranującej a E^0 jest amplitudą pola elektrycznego w punkcie (x,y,z) z obudową ekranującą. Podobnie dla pola magnetycznego H:

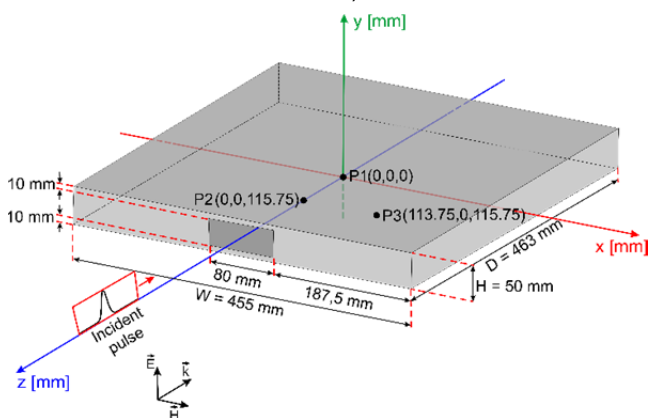
$$(2) SE_{\text{częstotliwość}}^H(f, x, y, z) = 20 \log \frac{H^i(f, x, y, z)}{H^0(f, x, y, z)}$$

gdzie: $SE_{\text{częstotliwość}}^H(f, x, y, z)$ jest efektywnością ekranowania pola magnetycznego H w punkcie (x,y,z) dla częstotliwości f, H^i i H^0 są amplitudami pola magnetycznego w punkcie (x,y,z) odpowiednio bez obudowy i z obudową ekranującą. Efektywność ekranowania silnie zależy od geometrii obudowy ekranującej, charakterystyki czasowo- częstotliwościowej zaburzającego pola EM oraz kształtu i wymiarów otworu lub otworów w obudowie ekranującej [11-14].

W niniejszej pracy interesowała nas głównie zależność skuteczności ekranowania wnętrza obudowy z otworem w funkcji częstotliwości od wyboru punktu obserwacji w obudowie ekranującej z otworem.

Obudowa ekranująca z otworem

Schemat geometryczny badanej obudowy ekranującej z otworem przedstawiono na rys. 1. Na rys. 1 obudowa została umieszczona w prostokątnym układzie współrzędnych w taki sposób, że jej środek znajduje się na środku układu współrzędnych (punkt P1 (0,0,0)). Wymiary zewnętrzne obudowy wynoszą: szerokość: 455 mm x wysokość: 50 mm x głębokość: 463 mm. Na środku przedniej ściany obudowy znajduje się otwór o wymiarach 30 mm x 80 mm, odpowiadający otworowi technicznemu do wentylacji wnętrza obudowy i przepustu dla kabli. Grubość ścianek obudowy wynosi 1 mm. Obudowa wykonana jest z materiału o nieskończenie wielkiej przewodności (tzw. Perfect Electric Conductor- PEC).



Rys.1. Schemat geometryczny badanej obudowy z otworem umieszczonej w prostokątnym układzie współrzędnych. Płaska fala EM propaguje w kierunku - z. Wektor pola elektrycznego E padającej fali skierowany jest w kierunku +y.

Numeryczne badania symulacyjne skuteczności ekranowania wnętrza obudowy z otworem

W badaniach symulacyjnych zastosowano program CST Studio wyposażony w moduł MW&RF&Optical do

modelowania i kompleksowych symulacji wysokoczęstotliwościowych pól EM obiektów 3D [15].

Badana obudowa jest pewnego rodzaju elektromagnetycznym rezonatorem wnękowym z otworem, w którym po wprowadzeniu do niego impulsu EM mogą zostać wzbudzone oscylacje na częstotliwościach rezonansowych. Są to tzw. mody rezonansowe dwojakiego rodzaju o określonej częstotliwości i geometrii przestrzennej odpowiadającego im pola EM [16]. W przypadku tzw. modów poprzecznych TE składowa wzdłużna pola elektrycznego $E_z = 0$, natomiast dla tzw. modów poprzecznych TM składowa wzdłużna pola magnetycznego $H_z = 0$. Rozkłady przestrzenne pól elektrycznych i magnetycznych modów TE i TM (zwane morfologiami) są różne i charakterystyczne dla danego modu. Każdy z modów wypełnia w różnym stopniu wnętrze obudowy rezonansowej, wskutek czego stanowią one różne zagrożenia dla wnętrza obudowy.

W niniejszej pracy analizę morfologii modów i zagrożenie EM, jakie stanowią we wnętrzu obudowy podzielono na dwie tematyczne sekcje:

1. Numeryczne wyznaczenie częstotliwości rezonansowych i wizualizację przestrzenną poszczególnych modów wewnątrz zamkniętej obudowy tzn. bez otworu (wpływ małego otworu na częstotliwość i morfologię modów jest do zanedbania),
2. Analiza morfologii modów i jej wpływu na efektywność ekranowania wnętrza obudowy z otworem. Wyznaczenie efektywności ekranowania w wybranych punktach obudowy z otworem.

W pierwszej sekcji, do numerycznego wyznaczenia częstotliwości rezonansowych i wizualizacji przestrzennej morfologii poszczególnych modów wewnątrz zamkniętej obudowy użyto Eigenmode Solver w programie CST Studio. Ze względu na ograniczenia redakcyjne, w niniejszej pracy przedstawiono tylko mody występujące w paśmie do 2 GHz. W paśmie tym generowane są jedynie mody poprzeczne TE.

W drugiej sekcji przeanalizowano zależność efektywności ekranowania od położenia punktu obserwacji wewnątrz obudowy z otworem. W tych badaniach zaburzenie EM stanowił subnanosekundowy impuls fali płaskiej o rozkładzie gaussowskim [17]. Obliczenia charakterystyk częstotliwościowych efektywności ekranowania wykonano dla czasu 90 ns liczonego od momentu wnikięcia impulsu zaburzającego do obudowy. Punkty obserwacji (P1, P2 i P3) wewnątrz obudowy z otworem, w których dokonano symulacji numerycznej efektywności ekranowania zaznaczono na rys. 2. Punkt P1 znajdujący się w środku obudowy ekranującej jest najczęściej wybieranym punktem do określania efektywności ekranowania. Punkty P2 (0, 0, 115.75) i P3 (113.75, 0, 115.75) wybrano dlatego, że w tych punktach znajdują się maksima pól elektrycznych modów TE_{102} i TE_{203} , które jednocześnie posiadają minima w punkcie P1 (czyli na środku obudowy ekranującej).

Wyniki badań

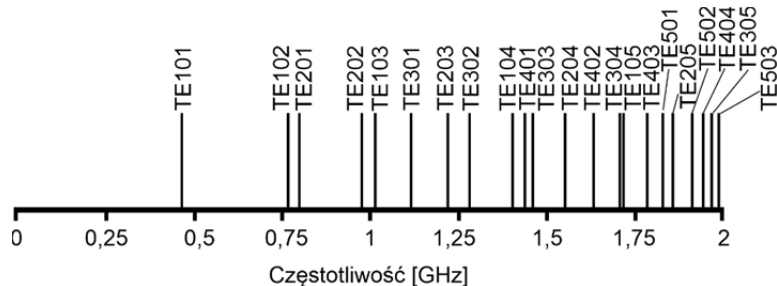
Wyniki numerycznych badań symulacyjnych, ograniczone do pasma częstotliwości 0-2 GHz, w którym występują tylko mody poprzeczne TE zaprezentowano na rys. 3-5. Warto dodać, że pierwszy mod poprzeczny TM_{110} występuje dopiero przy częstotliwości 3,016 GHz.

Rys. 3 przedstawia częstotliwości pierwszych 23 modów poprzecznych TE w paśmie 0-2 GHz występujących w zamkniętej obudowie. Podstawowym modem jest mod TE_{101} , którego częstotliwość rezonansowa wynosi 0,494 GHz.

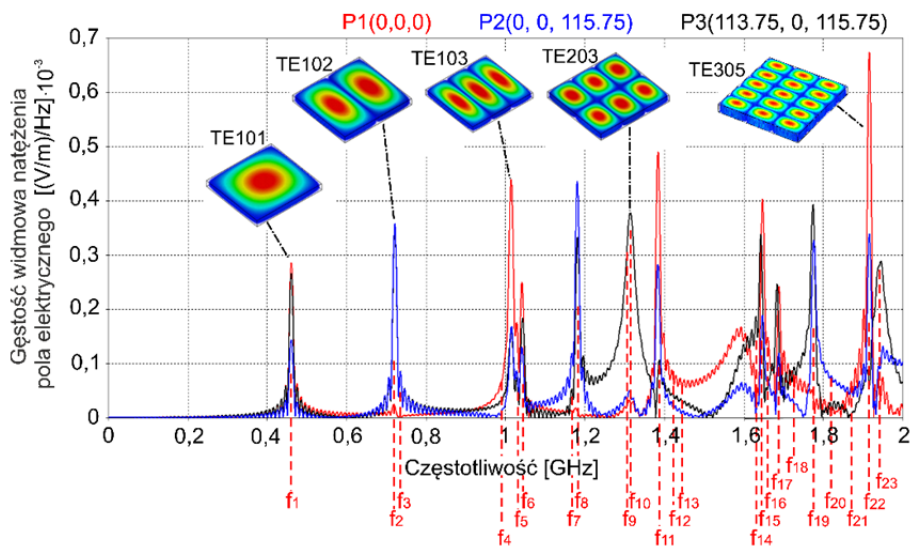
W niniejszej pracy nie przedstawiono ze względu na ograniczenia redakcyjne wyników symulacji efektywności ekranowania pola magnetycznego SE^H , zdefiniowanej w równaniu (2). Wyniki tych symulacji potwierdzają wnioski, jakie wynikają z analizy przedstawionych w niniejszej pracy wyników dotyczących ekranowania pola elektrycznego SE^E .

Zależność gęstości widmowej natężenia pola elektrycznego od częstotliwości w wybranych punktach wewnątrz obudowy przedstawia rys. 4. Na rys. 4 pokazano

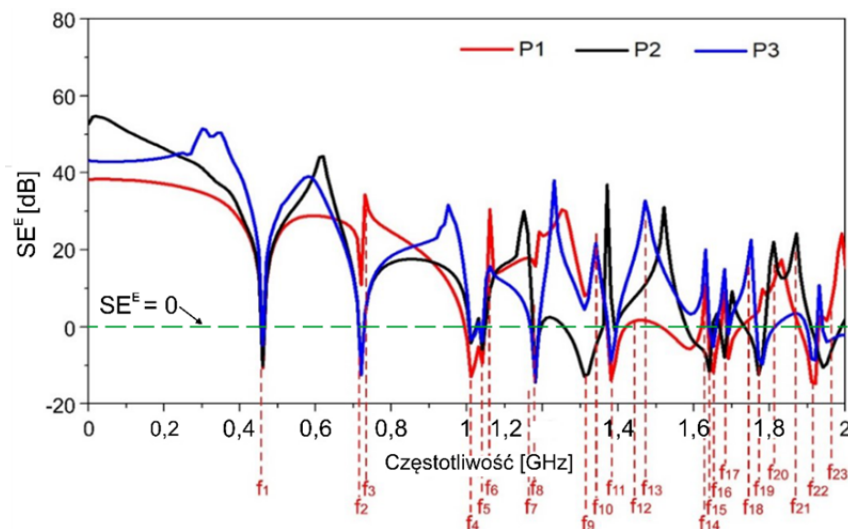
morfologie modów TE_{101} , TE_{102} , TE_{103} , TE_{203} i TE_{305} o częstotliwościach odpowiednio f_1 , f_2 , f_5 , f_7 i f_{22} . Warto zauważyć, że przy częstotliwości $f_2 = 0,77$ GHz pik gęstości natężenia pola elektrycznego występuje tylko w punkcie P2 (jest to maksimum modu TE_{102}), natomiast przy częstotliwości $f_7 = 1,3$ GHz, tylko w punkcie P3 (jest to maksimum modu TE_{203}). Wyniki te potwierdzają fakt, że rozkład przestrzenny pola EM w obudowie nie jest równomierny.



Rys. 3. Częstotliwości rezonansowe pierwszych 23 modów poprzecznych TE występujących w zamkniętej obudowie.



Rys. 4. Gęstość widmowa natężenia pola elektrycznego wewnątrz obudowy z otworem w punktach P1(0, 0, 0), P2 (0, 0, 115.75) i P3 (113.75, 0, 115.75) w funkcji częstotliwości w zakresie częstotliwości 0-2 GHz. f_1, f_2, \dots, f_{23} – częstotliwości modów poprzecznych TE.



Rys. 5. Zależność efektywności ekranowania pola elektromagnetycznego SE^E (w dB) od częstotliwości w obudowie w punktach P1(0, 0, 0), P2 (0, 0, 115.75) i P3 (113.75, 0, 115.75). Ujemne wartości SE^E znaczą, że natężenie pola z obudową E^0 w danym punkcie jest większe niż natężenie pola E^1 w tym punkcie bez obudowy.

Zależność skuteczności ekranowania SE^E od częstotliwości w wybranych punktach wewnątrz obudowy przedstawia rys. 5. Jak należało oczekiwać po analizie wyników przedstawionych na rys. 4, przedstawiona na rys. 6 skuteczność ekranowania SE^E także zależy od wybranego punktu obserwacji w obudowie. Wynika stąd, że aby dokonać całościowej oceny skuteczności ekranowania wewnątrz obudowy konieczne jest wykonanie obliczeń SE^E w funkcji częstotliwości dla olbrzymiej ilości punktów w obudowie, co jest niepraktyczne. Ograniczenie się do oceny skuteczności ekranowania wewnątrz obudowy na podstawie obliczeń SE^E tylko w kilku arbitralnie wybranych punktach obserwacyjnych może skutkować błędną oceną całościowej skuteczności ekranowania danej obudowy ekranującej.

Z rys. 5 wynika, że efektywność ekranowania SE^E ma silny charakter rezonansowy, co wynika z rezonansowych właściwości obudowy ekranującej. Widać, że przy częstotliwościach modowych promieniowanie EM, które wniknęło do obudowy doznaje efektów „wzmocnienia” w takim sensie, że SE^E staje się ujemne, czyli przy częstotliwości rezonansowej natężenie pola elektrycznego z obudową jest większe niż bez obudowy. Wynika to stąd, że po wniknięciu ultrakrótkiego impulsu EM (o szerokim ciągłym widmie częstotliwości) do obudowy przez stosunkowo mały otwór, pole EM impulsu rozkłada się w całej objętości obudowy i zaczyna organizować się w mody rezonansowe obudowy, w których skupia się energia pola EM impulsu.

Podsumowanie

Zagrożenie intencjonalnymi zaburzeniami EM, w tym impulsem HPEM, rodzi konieczność stosowania obudów ekranujących zaawansowane systemy i urządzenia elektroniczne. Opracowanie obudów o wysokiej skuteczności ekranowania zależy od prawidłowej analizy procesu wnikania impulsów E do wnętrza obudowy i dalszego ich rozwoju.

Wykonana w domenie częstotliwości numeryczna symulacja efektywności ekranowania wewnątrz obudowy z otworem technologicznym przed ultrakrótkim impulsem EM wykazała, że efektywność ekranowania pola elektrycznego SE^E jest funkcją miejsca w obudowie i częstotliwości. Całościowe ocenie stopnia ekranowania dla danej obudowy wymaga zatem wykonania olbrzymiej ilości symulacji. Im więcej punktów obserwacyjnych będzie uwzględnionych w symulacjach, tym większa jest szansa wydania wiarygodnej opinii na temat zalet i wad obudowy ekranującej. Spotykane w literaturze całościowe oceny skuteczności ekranowania na podstawie symulacji dla jednego punktu obserwacyjnego są zazwyczaj niemiernodajne. Wyznaczenie a priori kilku reprezentacyjnych miejsc obserwacyjnych do wykonania symulacji SE^E jest także mało praktyczne z powodu trudności w logicznym uzasadnieniu wyboru właśnie tych miejsc. W przypadku, kiedy charakterystyki częstotliwościowe SE^E nie są przedmiotem zainteresowania, ocenę efektywności ekranowania wewnątrz obudowy można dokonać w domenie czasu na podstawie rozwoju pola EM po wtargnięciu impulsu EM do obudowy [17].

Wykonana symulacja numeryczna efektywności ekranowania pola EM w dziedzinie częstotliwości zadowoli zainteresowanych odpowiedzią na pytanie, jaka jest efektywność ekranowania pola EM w danym miejscu obudowy dla wybranych częstotliwości. Jeżeli jednak przedmiotem zainteresowania nie są zagadnienia częstotliwościowe, alternatywą są symulacje numeryczne efektywności ekranowania pola EM w dziedzinie czasu. Pozwala ona na prześledzenie czasowo-przestrzennych zmian efektywności ekranowania we wnętrzu obudowy.

Autorzy: mgr inż. Magdalena Budnarowska, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: m.budnarowska@we.umg.edu.pl;
prof. dr hab. inż. Jerzy Mizeraczyk, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: j.mizeraczyk@we.umg.edu.pl;

LITERATURA

- [1] Sabath F., System oriented view on high-power electromagnetic (HPEM) effects and intentional electromagnetic interference (IEMI), *Proceedings of the XXIX URSI General Assembly*, 2008
- [2] Giri D.V., Tesche F.M., Classification of Intentional Electromagnetic Environments (IEME), *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 46, no.3, pp. 322 - 328, 2004
- [3] IEC 61000-2-13, Electromagnetic compatibility (EMC) –Part 2-13: Environment – High-power electromagnetic (HPEM) environments – Radiated and conducted, First edition 2005-03
- [4] Sabath F., Threats of Electromagnetic Terrorism, *EUROEM 2012 – ONERA*, Toulouse, France, pp.17, 2012
- [5] Shubitidze P., Jobava R., Karkashadze D., Beria R., Pommerenke D. and Frei S., Numerical study of the coupling of transient fields of ESD into a cavity, in *Proc. Conf. Direct Inverse Probl. Electromagn. Acoust. Wave Theory*, pp. 108–110, 1998
- [6] Celozzi S. and Araneo R., Alternative definitions for the time-domain shielding effectiveness of enclosures, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 56, no. 2, pp. 482-485, 2014
- [7] Azizi H., Belkacem F. T., Moussaoui D., Moulai H., Bendaoud A., Bensetti M., Electromagnetic interference from shielding effectiveness of a rectangular enclosure with apertures—circuit approach, FDTD and FIT modeling, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 28, no. 4, pp. 494–514, 2014
- [8] Ziolkowski R.W., FDTD modelling of Gaussian beam interactions with metallic and dielectric nanostructures, in *Proc. URSI Electromagnetic Theory Symposium*, Pisa, Italy, pp. 27–32, 2004
- [9] 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. and Christopoulos C., Shielding effectiveness of a rectangular enclosure with a rectangular aperture, *Electron. Lett.*, vol. 32, no. 17, pp. 1559–1560, 1996
- [10] IEEE Standard Method for Measuring the Shielding Effectiveness of Enclosures and Boxes Having all Dimensions between 0.1 m and 2 m, *IEEE Standard 299.1-2013*, 2014
- [11] Basyigit I. B., Caglar M.F. and Helhel S., Magnetic shielding effectiveness and simulation analysis of metallic enclosures with apertures, *Proceedings of the 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, Bursa, Turkey, pp. 328–331, 2015
- [12] Dehkhoda P., Tavakoli A., Azadifar M., Shielding effectiveness of an enclosure with finite wall thickness and perforated opposing walls at oblique incidence and arbitrary polarization by GMMoM, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 54, no. 4, pp. 792–805, 2012
- [13] Nie B. L., Du P. A., An efficient and reliable circuit model for the shielding effectiveness prediction of an enclosure with an aperture, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 57, no. 3, pp. 357–364, 2015
- [14] Hao C. and Li D., Simplified model of shielding effectiveness of a cavity with apertures on different sides, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 56, no. 2, pp. 335–342, 2014
- [15] Microwave Studio Computer Simulation Technology (CST), [Online] Available: <http://www.cst.com>, 2022
- [16] Pozar D. M., Microwave engineering, *John wiley & sons, Inc.*, 3rd ed., pp. 278, 2005
- [17] Budnarowska M., Mizeraczyk, J., Temporal and Spatial Development of the EM Field in a Shielding Enclosure with Aperture after Transient Interference Caused by a Subnanosecond High-Energy EM Plane Wave Pulse, *Energies*, vol. 14, no. 13, 3884, 2021