Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Elektroniki Morskiej ORCID. 1. 0000-0002-5341-7585, 2. 0000-0002-5173-3592

doi:10.15199/48.2022.03.28

Pole elektromagnetyczne w obudowie ekranującej z otworem technologicznym po zaburzeniu ultrakrótkim impulsem fali płaskiej dużej mocy

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki numerycznej symulacji rozwoju pola elektromagnetycznego (EM) w obudowie ekranującej z otworem po zaburzeniu ultrakrótkim impulsem fali płaskiej dużej mocy. Obliczenia numeryczne wykonano w środowisku CST Studio. Symulacje ujawniły istnienie dwóch dotąd nieznanych faz rozwoju pola EM: fazy falowej i fazy interferencyjnej. W symulacji zastosowano nowe wizualizacyjne podejście do analizy mechanizmów sprzężenia i rozwoju pola elektromagnetycznego indukowanego wewnątrz obudowy ekranującej z otworem przez ultrakrótki elektromagnetyczny impuls fali płaskiej. Z symulacji wynika, że pole indukowane w obudowie jest długotrwałe w porównaniu z rzeczywistym czasem oddziaływania zewnętrznego impulsu zaburzającego i stanowi poważne zagrożenie EM przez czas znacznie dłuższy niż czas

Abstract. This paper presents results of the numerical simulation of development of EM field in shielding enclosure with aperture after interference caused by a subnanosecond ultrashort EM plane wave pulse. The simulation was performed using CST Studio software. Simulations revealed the existence of two unknown phases of the EM field build-up in the enclosure with aperture: the wave phase and the interference phase. The simulation uses a new visualization approach to the analysis of the coupling mechanisms and of development of the EM field induced inside the shielding box with aperture after interference caused by an ultrashort EM plane wave pulse. Simulation shows that the induced field in the shielding box is long-lasting compared to the exposure time of the external disturbing pulse and poses a serious EM hazard for a time much longer than the actual exposure of the disturbing pulse. (The electromagnetic field in a shielding enclosure with aperture caused by a ultrashort high power plane wave pulse).

Słowa kluczowe: obudowa ekranująca z otworem, pole elektromagnetyczne, CST Studio, symulacja numeryczna pola elektromagnetycznego.

Keywords: shielding enclosure with aperture, electromagnetic field, CST Studio, numerical simulation of EM field.

Wstęp

Na świecie ciągle wzrasta liczba produkowanych urządzeń elektronicznych. Wzrost ten należy wiązać z postępującą automatyzacją i wdrażaniem urządzeń i systemów elektronicznych w różnych dziedzinach naszego życia. Urządzenia elektroniczne stały się integralną częścią svstemów tworzących zaawansowana wielu technologicznie infrastrukturę elektroniczną. Prawidłowe działanie infrastruktury wiąże się z koniecznością ochrony modułów elektronicznych przed zagrożeniami środowiskowymi, w tym zakłóceniami elektromagnetycznymi (EME - Electromagnetic Environments). Największym dla zaawansowanej infrastruktury zagrożeniem elektronicznej jest promieniowanie elektromagnetyczne dużej mocy wytwarzane z zamiarem zaburzenia pracy lub zniszczenia infrastruktury elektronicznej [1,2].

Niszcząca energia impulsów EM dużej mocy może przedostać się do obiektów elektronicznych bezpośrednio (np. w obiektach posiadających anteny) lub pośrednio (przez otwory wentylacyjne i przelotowe).

Rozmiar spowodowanych uszkodzeń w urządzeniach elektronicznych zależy od natężenia pola elektrycznego niszczących impulsów, ale również od ich charakterystyk rozkładów częstotliwościowych i czasowych pól elektrycznego i magnetycznego. Z tego powodu analizując stopień zagrożenia infrastruktury elektronicznej impulsami EM dużej mocy należy brać pod uwagę ich widmo częstotliwościowe jego dopasowanie i do częstotliwościowego widma wrażliwości analizowanego obiektu elektronicznego.

Prawidłowe funkcjonowanie urządzeń i systemów elektronicznych uzależnione jest od opracowania skutecznych środków zaradczych eliminujących lub minimalizujących skutki, jakie mogą spowodować impulsy EM dużej mocy. Najskuteczniejszą metodą ochrony urządzeń i systemów elektronicznych jest ekranowanie elektromagnetyczne. Polega ono na umieszczeniu mniejszego urządzenia elektronicznego w obudowie

większego systemu ekranuiacei lub w dużvm pomieszczeniu (komorze) ekranowanym. Ściany obudów i komór ekranujących wykonane są z metalu o wysokiej dzięki przewodności, czemu zapewniają doskonałe ekranowanie elektromagnetyczne [4-7]. Obecnie dużym zainteresowaniem cieszą się obudowy ekranujące mniejsze obiekty elektroniczne, takie jak np. laptopy, telefony przenośne, routery itd. [8,9]. komórkowe, pamięci W praktyce obudowy takie muszą posiadać otwory wentylacyjne i przelotowe, co skutkuje możliwością wniknięcia impulsu EM dużej mocy do ich środka. Przy projektowaniu obudów ekranujących kluczową rolę odgrywa określenie skutków termicznych i elektromagnetycznych, jakie powoduje impuls EM dużej energii. Oceniając skuteczność zagrożenia spodziewanym impulsem EM dużej energii należy nie tylko porównać wspomnianą wcześniej częstotliwościową charakterystykę impulsu HPFM z charakterystyką częstotliwościową wrażliwości obiektu elektronicznego na zagrożenie promieniowaniem EM dużej mocy, ale trzeba również rozważyć czasowy rozkład pola elektromagnetycznego wewnątrz badanego obiektu.

Jak wspomniano wcześniej, przy ocenie zagrożenia impulsem EM dużej mocy analizuje się widmo impulsu częstotliwościowego dopasowanie do widma i ieao wrażliwości analizowanej obudowy. Należy uwzględnić również czasowe rozkłady pola elektromagnetycznego wewnątrz analizowanej obudowy w czasie. Takie podejście wynika z faktu, że największe negatywne skutki dla obiektów elektronicznych powodują krótkotrwałe impulsy o dużej gęstości mocy, czyli o dużym natężeniu pola elektrycznego. Wysokie potencjały indukowane w obiektach elektronicznych są przyczyną powstawania fal przebić elektrycznych przepięciowych, i wyładowań elektrostatycznych mogących skutkować ich uszkodzeniem. Dlatego maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego a nie energia impulsów EM dużej mocy uważana jest za jeden z najważniejszych parametrów oceny stopnia zagrożenia obiektów elektronicznych. Najczęściej rozważa się wartość natężenia pola elektrycznego na środku badanej struktury [np. 5, 6].

W niniejszym artykule przedstawiamy wyniki badań symulacyjnych rozwoju pola elektromagnetycznego wewnątrz wybranej obudowy ekranującej z otworem po wystąpieniu subnanosekundowego impulsu EM dużej mocy.

Obudowa ekranująca z otworem

Schemat geometryczny badanej obudowy ekranującej z otworem przedstawiono na rys. 1. Na rys. 1 badana obudowa została umieszczona w prostokątnym układzie współrzędnych w taki sposób, że jej środek znajduje się na środku układu współrzędnych (punkt (0,0,0)). Wymiary zewnętrzne badanej obudowy wynoszą: szerokość: 455 mm x wysokość: 50 mm x głębokość: 463 mm. Zostały dobrane w taki sposób, aby badana obudowa ekranująca pomieściła standardowy laptop 17 calowy, telefon komórkowy oraz dwie przenośne pamięci komputerowe. Na środku przedniej ściany obudowy znajduje się otwór o wymiarach 30 mm x 80 mm pełniący rolę otworu wentylacyjnego i przelotowego do kabli. Grubość ścianek 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 skierowany jest w kierunku +y

Metoda symulacyjna

W badaniach symulacyjnych zastosowano program CST Studio wyposażony w moduł MW&RF&Optical do modelowania i kompleksowych symulacji wysokoczęstotliwościowych pól elektromagnetycznych obiektów 3D [10].

Symulacia obejmowała wykonanie obliczeń numerycznych za pomocą Time Domain Solver. Procedura symulacyjna polegała na umieszczeniu badanej obudowy z otworem w komórce obliczeniowej o wymiarach x (- 235 mm, +235 mm), y (-32,5 mm, + 32,5 mm), z (- 239 mm, + 239 mm). Źródłem promieniowania elektromagnetycznego był ultrakrótki (subnanosekundowy) impuls fali płaskiej, który wnika przez otwór o wymiarach 30 mm x 80 mm. Uzyskane wyniki umożliwiły wykonanie wizualizacji 3D rozwoju natężenia pola ΕM (pól elektrycznego i magnetycznego) wewnątrz badanej obudowy dla wybranych czasów.

Parametry impulsu zaburzającego

Uważa się, że największym zagrożeniem dla działania obiektów elektronicznych są krótkotrwałe impulsy o dużej gęstości mocy, czyli o dużym natężeniu pola elektrycznego [1, 2]. Kierując się powyższym, w symulacji zaburzeniem EM był impuls dużej mocy o rozkładzie gaussowskim i subnanosekundowym czasie trwania.

Przyjęto, że wektor natężenia pola elektrycznego **E** o maksymalnej amplitudzie 10^6 V/m skierowany jest w kierunku +y a wektor natężenia pola magnetycznego **H** o maksymalnej amplitudzie 2,65 \cdot 10³ A/m skierowany jest w kierunku +x.

Badana obudowa została napromieniowana impulsem płaskiej fali elektromagnetycznej (rys. 2). Parametry impulsu płaskiej fali elektromagnetycznej były następujące: maksymalna amplituda natężenia pola elektrycznego - 10^6 V/m (dla t = 0,2 ns), czas trwania impulsu - τ = 0,08 ns, czas narastania - τ_r = 0,058 ns, czas opadania - τ_f = 0,058 ns, maksymalna gęstość mocy impulsu (dla t = 0,2 ns) - 2,65 GW/m².



Rys. 2. Impuls płaskiej fali elektromagnetycznej – rozkład czasowy natężenia pola elektrycznego (rozkład natężenia pola magnetycznego był analogiczny)

Wyniki badań symulacyjnych

Wyniki badań symulacyjnych zaprezentowane są na rys.3. W wyniku symulacji numerycznych uzyskano przestrzenne i czasowe rozkłady pól elektrycznego i magnetycznego wewnątrz obudowy w przedziale czasu 0 -90 ns po pojawieniu się impulsu zaburzającego.

Wyniki powstawania pola EM w obudowie ekranującej z otworem wykazały istnienie dwóch faz rozwoju tego pola: fazy falowej i fazy interferencyjnej. W fazie falowej powstają fale pierwotne i odbite (lewe i prawe) oznaczone na rys. 3 literami P i S. Natomiast pozostałości fal pierwotnych i odbitvch powstawania są przyczyną mozaiki interferencyjnej w dalszej fazie rozwoju pola elektromagnetycznego wewnątrz obudowy.

Czas trwania powstającego pola EM w obudowie pole elektromagnetyczne jest długi w porównaniu z rzeczywistym czasem oddziaływania zewnętrznego impulsu zaburzającego, który faktycznie oddziałuje z obudową tylko przez 1,5 ns.



Rys. 3. Wizualizacja 3D rozwoju pól elektrycznego i magnetycznego w obudowie ekranującej z otworem. Lewa kolumna- amplituda natężenia pola elektrycznego, prawa kolumna- amplituda natężenia pola magnetycznego. A – faza falowa, B- faza interferencyjna

Wnioski

Rozkłady pola elektrycznego i pola magnetycznego otrzymane w wyniku wykonanej symulacji numerycznej w środowisku CST Studio umożliwiły lepsze zrozumienie mechanizmów oddziaływania ultrakrótkich przejściowych impulsów EM dużej mocy z małymi osłonami ekranującymi posiadającymi otwory technologiczne. Znajomość tych mechanizmów jest dość słaba i wymaga dalszych badań, aby lepiej zrozumieć mechanizmy sprzężenia i rozwoju pola elektromagnetycznego indukowanego przez zewnętrzny ultrakrótki impuls wewnątrz obudowy ekranującej z otworem.

Nowością niniejszych badań są obrazy 3D, które po raz pierwszy wizualizują czasowy i przestrzenny rozwój pól elektrycznego i magnetycznego w małej obudowie ekranującej w ciągu 90 ns po ustaniu impulsu zaburzającego. Faktycznie impuls zaburzający oddziałuje z obudową tylko przez 1,5 ns, co jest równe czasowi potrzebnemu do pełnego przejścia impulsu przez obudowę.

Otrzymane obrazy ujawniły istnienie dwóch nieznanych faz rozwoju pola EM w obudowie z otworem: fazy falowej i interferencyjnej.

Pole EM powstające w obudowie trwa długi czas w porównaniu z rzeczywistym czasem trwania zewnętrznego impulsu zaburzającego. Charakterystyki czasowe amplitud impulsów pól elektrycznego i magnetycznego wykazują poważne zagrożenie EM, jakie istnieje wewnątrz obudowy ekranującej przez czas znacznie dłuższy niż rzeczywisty czas trwania zakłócenia zewnętrznego.

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; dr inż. Ryszard Studański, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E- mail: r.studanski@we.umg.edu.pl;

LITERATURA

- Sabath, F. (2008). System oriented view on high-power electromagnetic (HPEM) effects and intentional electromagnetic interference (IEMI). Proceedings of the XXIX URSI General Assembly.
- [2] D.V. Giri, F.M. Tesche, Classification of Intentional Electromagnetic Environments (IEME), IEEE Transactions on Electro-magnetic Compatibility (Volume: 46, Issue: 3, Aug. 2004, pp. 322 - 328.
- [3] Norma IEC 61000-2-13, Electromagnetic compatibility (EMC) Part 2-13: Environment – High-power electromagnetic (HPEM) environments – Radiated and conducted, First edition 2005-03.
- [4] Azizi H, Belkacem FT, Moussaoui D, Moulai H, Bendaoud A, Bensetti M. 2014. Electromagnetic interference from shielding effectiveness of a rectangular enclosure with apertures– circuital approach, FDTD and FIT modeling. J Electromagnet Wave. 28(4): 494–514.
- [5] Basyigit IB, Caglar MF, Helhel S. 2015. Magnetic shielding effectiveness and simulation analysis of metalic enclosures with apertures. Proceedings of the 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa, Turkey, pp. 328–331.
- [6] Dehkhoda P, Tavakoli A, Azadifar M. 2012. Shielding effectiveness of an enclosure with finite wall thickness and perforated opposing walls at oblique incidence and arbitrary polarization by GMMoM. IEEE Trans Electromagn Compat. 54(4):792–805.
- [7] Nie B. L, Du P.A. 2015. An efficient and reliable circuit model for the shielding effectiveness prediction of an enclosure with an aperture. IEEE Trans Electromagn Compat. 57(3): 357–364.
- [8] Hao, C. and D. Li, "Simplified model of shielding effectiveness of a cavity with apertures on different sides," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 56, No. 2, 335–342, 2014.
- [9] Solin J. R., "Formula for the field excited in a rectangular cavity with an aperture and lossy walls," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 57, No. 2, 203–209, 2015.
 [10] www.cst.com.