

Symulacja wpływu polaryzacji zaburzającego impulsu EM na wartości pola elektromagnetycznego wewnątrz obudowy z otworem

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki symulacyjnych badań numerycznych polaryzacji zewnętrznego subnanosekundowego impulsu elektromagnetycznego dużej mocy wytworzone przez silne pole elektromagnetyczne (EM) we wnętrzu metalowej obudowy komputerowej z otworem technologicznym. Symulacje numeryczne przeprowadzono w środowisku CST Studio. Zbadano wpływ dwóch polaryzacji zewnętrznego pola EM na wartości pola elektrycznego i magnetycznego wewnątrz obudowy komputerowej z otworem na USB. Przypadek polaryzacji pionowej oznacza, że wektor natężenia pola elektrycznego fali padającej jest skierowany prostopadłe do dłuższych ścianek otworu, natomiast w przypadku polaryzacji poziomej wektor natężenia elektrycznego jest skierowany równoległe do dłuższych ścianek otworu. Przeprowadzono analizę zagrożenia jakie stanowi długotrwałe pole indukowane w obudowie komputerowej z otworem w porównaniu z czasem trwania zewnętrznego impulsu zaburzającego. Wniosek końcowy z symulacji: wartości amplitud natężenia pola elektrycznego wewnątrz impulsów EM są wyższe dla polaryzacji pionowej. Wartości amplitud maleją odpowiednio dla polaryzacji pionowej i poziomej 100 i 250 razy w stosunku do amplitudy padającego impulsu płaskiej fali elektromagnetycznej.

Abstract. The article presents the results of numerical simulation studies of the polarization of an external sub-nanosecond electromagnetic impulse of high power generated by a strong electromagnetic (EM) field inside a metal computer case with a technological aperture. The numerical simulations were carried out in the CST Studio environment. The impact of two external EM field polarizations on the values of the electric and magnetic fields inside the computer case with a USB aperture was investigated. In the case of vertical polarization, the vector of the electric field intensity of the incident wave is directed perpendicularly to the longer walls of the aperture, while in the case of horizontal polarization, the vector is directed parallel to the longer walls of the aperture. The analysis of the threat posed by the prolonged induced field in the computer case with an aperture compared to the duration of the external disturbing pulse was conducted. The final conclusion of the simulation is that the amplitude values of the internal EM impulse electric field are higher for vertical polarization. The amplitude values decrease accordingly for vertical and horizontal polarization by 100 and 250 times, respectively, compared to the amplitude of the incident flat electromagnetic wave pulse. (**Simulation of the impact of EM pulse polarization on electromagnetic field values inside a computer case with an aperture.**)

Słowa kluczowe: elektromagnetyczny ultrakrótki impuls wysokiej mocy, skuteczność ekranowania, obudowa komputerowa z otworem
Keywords: ultrashort high-power electromagnetic pulse, shielding effectiveness, computer case with a technological aperture.

Wstęp

Obecnie poważnym zagrożeniem dla prawidłowego działania szeroko pojętej infrastruktury elektronicznej są celowo wywołane zaburzenia elektromagnetyczne (EM). W literaturze dostępnej publicznie opisano wiele przypadków ataków elektromagnetycznych, wykorzystujących stosunkowo łatwo dostępne źródła impulsów elektromagnetycznych o wysokiej mocy [1, 2]. W związku z tym, w ostatnich latach zintensyfikowano badania oddziaływania intencjonalnych impulsów EM na urządzenia elektroniczne.

Większość urządzeń elektronicznych posiada metalową obudowę. Najczęściej obudowy mają kształt prostopadłościanów z otworami technologicznymi pełniącymi rolę przelotów do kabli czy gniazd USB. Silny zewnętrzny impuls EM sprzężony z wnętrzem metalowej obudowy poprzez jej otwory technologiczne może skutecznie zakłócać pracę a nawet zniszczyć elementy i układy elektroniczne znajdujące się we wnętrzu obudowy.

Istnieje uzasadnione przekonanie, że największe zaburzenia pracy urządzeń elektronicznych spowodowane są przez krótkie impulsy EM o szybko zmieniającej się amplitudzie pola elektromagnetycznego [2]. Takie krótkie impulsy EM mogą skutkować wysokimi potencjałami elektrycznymi, przepięciami a nawet wyładowaniami elektrostatycznymi prowadzącymi do zakłóceń w pracy urządzeń elektronicznych, a nawet do trwałych ich uszkodzeń [3].

Parametrem uważanym za kluczowy w określaniu stopnia zagrożenia promieniowania EM dla urządzeń elektronicznych jest amplituda pola elektrycznego tego promieniowania. Tabela 1 przedstawia szacunkowe zakresy natężenia pola elektrycznego odpowiadające za różne nieprawidłowości w działaniu elektroniki [3].

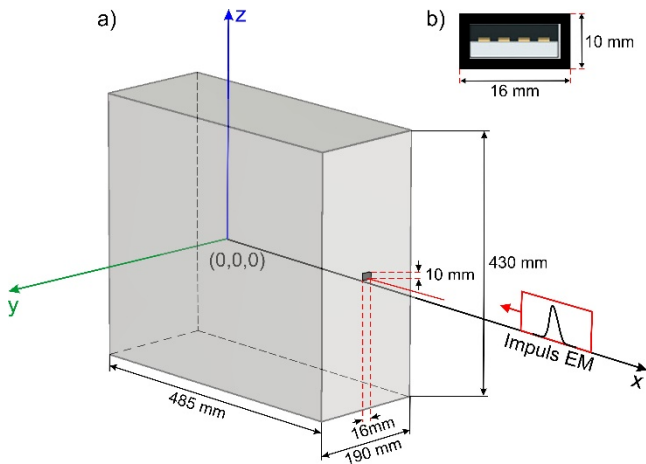
Tabela 1. Zakresy natężenia pola elektrycznego wywołujące nieprawidłowości w działaniu urządzeń elektronicznych [3].

Natężenie pola E	Uszkodzenia
0,19 - 1,9 [V/m]	Zakłócenia sygnałów
$0,19 \cdot 10^3$ - $1,9 \cdot 10^3$ [V/m]	Uszkodzenia układów scalonych
$6 \cdot 10^3$ - $19 \cdot 10^3$ [V/m]	Uszkodzenia komponentów komputera i układów logicznych
$60 \cdot 10^3$ - $190 \cdot 10^3$ [V/m]	Nieodwracalne uszkodzenie komputera

W niniejszej pracy przedstawiamy wyniki numerycznych badań symulacyjnych wpływu polaryzacji impulsu EM na wartości pola elektrycznego i magnetycznego wewnątrz obudowy komputerowej z otworem USB. Na podstawie uzyskanych danych dokonano analizy zagrożenia jakie stanowi długotrwałe pole indukowane w obudowie z otworem w porównaniu z czasem trwania zewnętrznego impulsu zaburzającego.

Obudowa komputerowa z otworem

Schemat badanej obudowy komputerowej z otworem USB przedstawiono na rysunku 1a. Wymiary zewnętrzne badanej obudowy są typowe komputerów stacjonarnych. Wynoszą odpowiednio 310 mm x 100 mm x 290 mm. Odpowiadają one wymiarom rzeczywistej standardowej obudowy komputera stacjonarnego CA-F244. Na środku przedniej ściany obudowy znajduje się otwór o wymiarach 19 mm x 10 mm. Jego wymiary odpowiadają wymiarom otworu na standardowe gniazdo USB w obudowie komputerowej (rys. 1b). Grubość ścianek obudowy wynosi 1 mm. W badaniach symulacyjnych zakładamy, że obudowa komputerowa z otworem wykonana jest z materiału PEC o nieskończenie wielkiej przewodności (ang. Perfect Electric Conductor).



Rys. 1. Schemat badanej obudowy komputerowej z otworem umieszczonej w prostokątnym układzie współrzędnych (a). Początek układu współrzędnych znajduje się w geometrycznym środku obudowy. Płaska fala elektromagnetyczna propaguje w kierunku $-x$. Wymiary standardowego otworu z gniazdem USB (b).

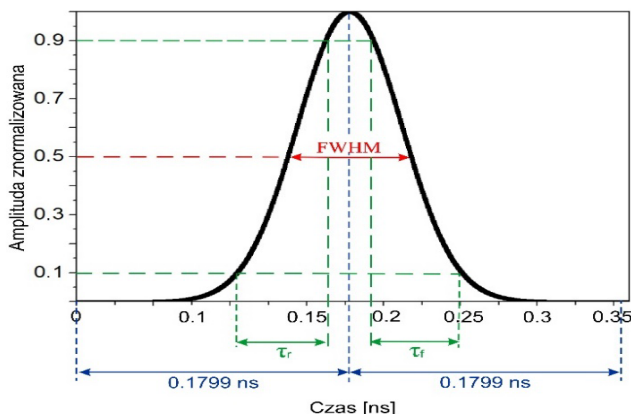
Metoda symulacyjna

W badaniach symulacyjnych zastosowano program CST Studio wyposażony w moduł MW&RF&Optical do modelowania i kompleksowych symulacji wysokoczęstotliwościowych pól elektromagnetycznych obiektów 3D [4].

Symulacja obejmowała wykonanie obliczeń numerycznych za pomocą Frequency Domain Solver. Pole EM wyznaczano w komórce obliczeniowej o wymiarach x ($-317,5$ mm, $+317,5$ mm), y (-170 mm, $+170$ mm), z (-290 mm, $+290$ mm), w której umieszczono badaną obudowę z otworem.

Parametry impulsu zaburzającego

Impuls płaskiej fali EM o kształcie gaussowskim pokazano na rys. 2.

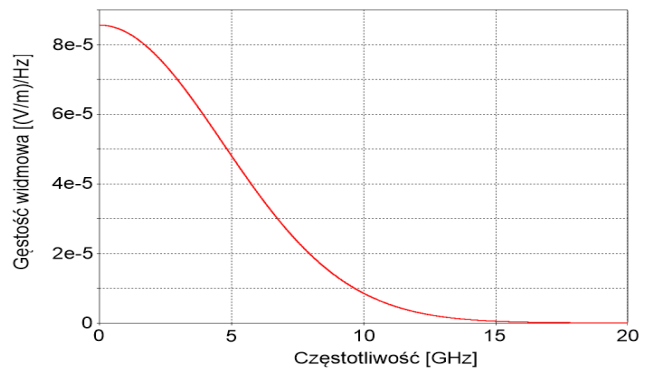


Rys. 2. Impuls płaskiej fali elektromagnetycznej o kształcie gaussowskim.

Impuls płaskiej fali EM pada prostopadle na ścianę frontową badanej obudowy komputerowej. Symulacje wykonano dla dwóch polaryzacji: pionowej i poziomej, które można rozpatrywać jako składowe każdej innej ewentualnej polaryzacji impulsu padającego. Przyjmujemy, że w przypadku polaryzacji pionowej wektor natężenia pola elektrycznego fali padającej skierowany jest prostopadle do dłuższych ścianek otworu, natomiast w przypadku polaryzacji poziomej wektor natężenia pola elektrycznego skierowany jest równoległe do dłuższych ścianek otworu.

W przyjętym układzie współrzędnych wektor natężenia pola elektrycznego \mathbf{E} impulsu dla polaryzacji pionowej skierowany jest w kierunku $+z$ a wektor natężenia pola magnetycznego \mathbf{H} skierowany jest w kierunku $+y$. Natomiast dla polaryzacji poziomej wektor natężenia pola elektrycznego \mathbf{E} skierowany jest w kierunku $+y$ a wektor natężenia pola magnetycznego \mathbf{H} w kierunku $-z$ (rys. 1).

Parametry impulsu płaskiej fali EM były następujące: amplituda natężenia pola elektrycznego \mathbf{E} - 10^6 V/m (dla $t = 1,779$ ns), amplituda natężenia pola magnetycznego \mathbf{H} - $2,68 \cdot 10^3$ A/m (dla $t = 1,779$ ns) czas trwania impulsu - $\tau = 0,08$ ns, czas narastania - $\tau_r = 0,058$ ns, czas opadania - $\tau_f = 0,058$ ns, maksymalna gęstość mocy impulsu (dla $t = 1,779$ ns) - $2,65$ GW/m². Widmo częstotliwościowe impulsu użytego w symulacji przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Gęstość widmowa impulsu EM.

Wyniki badań symulacyjnych

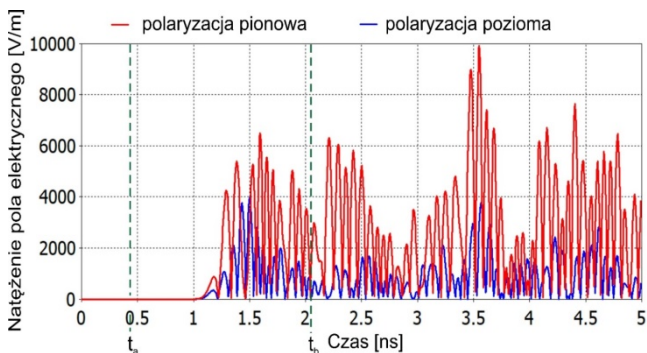
W ramach badań numerycznych dokonano analizy natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w wybranym punkcie obserwacyjnym badanej obudowy. Punkt ten znajduje się na środku badanej obudowy o współrzędnych prostokątnych $(0,0,0)$. Wybór geometrycznego środka badanej obudowy jako punktu obserwacyjnego jest najczęściej przyjmowanym punktem jako reprezentacyjny przez różnych autorów publikacji i jest zalecany przez normy IEEE Std 299™-2006 [5].

Obliczenia numeryczne ograniczyliśmy do pierwszych 5 ns po wystąpieniu impulsu EM.

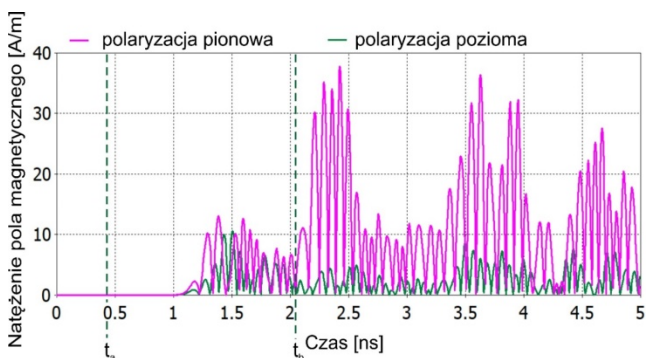
Zależność natężenia pola elektrycznego od czasu w geometrycznym środku obudowy dla polaryzacji pionowej i poziomej przedstawiają rys. 4 i 5.

W przypadku obu polaryzacji pole elektryczne i magnetyczne generowane wewnątrz obudowy przybiera formę subnanosekundowych impulsów, nazywanych dalej wewnętrznymi impulsami EM. Amplitudy natężenia pola elektrycznego i magnetycznego tych impulsów generalnie maleją w czasie. Wynika to z faktu utraty części energii pola EM zawartej w obudowie przez otwór w ścianie frontowej. Największe wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wewnętrznych impulsów EM osiągają odpowiednio wartości rzędu $1 \cdot 10^4$ V/m i 38 A/m dla polaryzacji pionowej oraz $4 \cdot 10^3$ V/m i 10 A/m dla polaryzacji poziomej. Wartości tych amplitud są mniejsze odpowiednio 100 i 70 oraz 250 i 268 razy od amplitud zaburzającego impulsu EM. Tak duża różnica między amplitudami impulsów wewnętrznych a amplitudami impulsu zaburzającego spowodowana jest przede wszystkim małymi wymiarami otworu USB. W przypadku większych otworów technologicznych ta różnica jest znacznie mniejsza [6,7]. Mimo tego, impulsy wewnętrzne wygenerowane w obudowie z otworem USB są na tyle „silne”, że nadal możliwe byłoby poważne uszkodzenie elektronicznych komponentów znajdujących się w takiej obudowie.

Z symulacji wynika, że istnieją stosunkowo duże różnice amplitud impulsów wewnętrznych dla obu polaryzacji. Wynoszą one nawet 60% dla pola elektrycznego (np. dla czasu 3,6 ns) i 84% dla pola magnetycznego (np. dla czasu 2,4 ns) - rys. 4 i 5. Nie istnieje w tej chwili zadowalające wyjaśnienie przyczyny tej różnicy. Prowadzimy badania celem określenia tej przyczyny



Rys. 4. Natężenia pola elektrycznego w funkcji czasu w wybranym punkcie obserwacyjnym na środku badanej obudowy komputerowej z otworem dla polaryzacji pionowej (kolor czerwony) i poziomej (kolor niebieski). t_a – czas, kiedy maksimum impulsu zaburzającego jest w płaszczyźnie otworu, t_b - czas, kiedy maksimum impulsu zaburzającego jest w płaszczyźnie tylnej ściany obudowy.



Rys. 5. Natężenia pola magnetycznego w funkcji czasu w wybranym punkcie obserwacyjnym na środku badanej obudowy komputerowej z otworem dla polaryzacji pionowej (kolor różowy) i poziomej (kolor zielony). t_a – czas, kiedy maksimum impulsu zaburzającego jest w płaszczyźnie otworu, t_b - czas, kiedy maksimum impulsu zaburzającego jest w płaszczyźnie tylnej ściany obudowy

Podsumowanie

Badania zależności czasowych pola elektrycznego i magnetycznego w środku badanej obudowy komputerowej z otworem USB wykazały, że dla obu polaryzacji pole elektryczne i magnetyczne mają formę wewnętrznych impulsów EM, które istnieją długo po przejściu impulsu zaburzającego. Mimo że amplitudy tych impulsów są mniejsze od 100 do 250 razy dla pola elektrycznego oraz od 70 do 268 razy dla pola magnetycznego niż amplitudy impulsu zaburzającego to stanowią poważne zagrożenie EM.

W przypadku bezpośredniego działania subnanosekundowego impulsu EM o dużym natężeniu pola elektrycznego i magnetycznego na niezabezpieczony punkt w przestrzeni, oddziaływanie tego impulsu jest działaniem jednorazowym, tj. silne pole EM oddziałuje na ten punkt tylko raz. Natomiast w przypadku obudowy komputerowej z otworem USB czas oddziaływania impulsów pola EM wytworzonych w obudowie na dany punkt znacznie się wydłuża. Może zatem okazać się, że w pewnych przypadkach długotrwałe oddziaływanie słabszych impulsów także może powodować poważne szkody.

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] Kopp C., Pose R., The Impact of Electromagnetic Radiation Considerations on Computer System Architecture, *Dept. of Computer Science*, Monash University, Clayton, Victoria, Australia, (2016)
- [2] Sabath F., Threads of Electromagnetic Terrorism, EUROEM 2012 – ONERA, Toulouse, France, (2012)
- [3] Xie F., Cao B., Liu C. L., Damage efficiency research of PCB components under strong electromagnetic pulse, *In Applied Mechanics and Materials*, 130, 1383-1386, (2012)
- [4] www.cst.com (dostęp: 18.04.2023)
- [5] 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
- [6] 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*, 14(13), 3884, (2021)
- [7] Budnarowska M., Mizeraczyk, J., Bargiel K., Development of the EM Field in a Shielding Enclosure with Aperture after Interference Caused by a Subnanosecond High-Power Parallely Polarized EM Plane Wave Pulse. *Energies*, 16(2), 585, (2023)