

## Skuteczność ekranowania ultrakrótkich impulsów elektromagnetycznych przez obudowę z otworem

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań numerycznych pozwalających na określenie skuteczności ekranowania ultrakrótkich impulsów elektromagnetycznych przez obudowę z otworem. W symulacjach numerycznych wykorzystano program CST Studio. Wyniki symulacji zaprezentowane w formie obrazów 2D pola EM wykazały istnienie dwóch faz rozwoju tego pola w obudowie tj.: fazy falowej i fazy interferencyjnej. Obserwacja czasowych zmian pola EM w dwóch charakterystycznych punktach A i B wewnątrz obudowy wykazała, że w obu fazach pola elektryczne i magnetyczne mają postać impulsów falowych przechodzących przez te punkty w czasie znacznie dłuższym niż czas trwania impulsu zaburzającego.

**Abstract** This paper presents results of the numerical simulation of shielding effectiveness of an ultrashort electromagnetic pulses by an enclosure with aperture. The simulation was performed using CST Studio software. In the numerical simulation, the results presented in the form of 2D images of the EM field revealed the existence of two phases of the development of the EM field in the housing: the wave phase and the interference phase. The observation of the changes of the EM field at two characteristic points A and B in an enclosure with aperture showed that induced field is long-lasting compared to the exposure time of the external disturbing pulse. (The shielding effectiveness of an ultrashort EM pulses for enclosure with aperture).

**Słowa kluczowe:** elektromagnetyczny ultrakrótki impuls wysokiej mocy, skuteczność ekranowania, obudowa ekranująca z otworem, obudowa ekranująca, ekranowanie pola elektromagnetycznego, EMI, EMC, CST Studio.

**Keywords:** ultrashort high-power electromagnetic pulse, shielding effectiveness, shielding enclosure with aperture, shielding box, electromagnetic field shielding, EMI, EMC, CST Studio.

### Wstęp

Zaawansowana infrastruktura elektroniczna narażona jest na naturalne i intencjonalne zagrożenia elektromagnetyczne (EM), które mogą powodować jej nieprawidłowe działanie lub trwałe uszkodzenie [1, 2].

Źródłem naturalnych zakłóceń EM są wszelkiego rodzaju atmosferyczne wyładowania elektryczne oraz antropogeniczne zakłócenia EM generowane przez urządzenia i systemy skonstruowane przez człowieka takie, jak np.: układy zapłonowe w silnikach spalinowych, sieci telekomunikacyjne, nadajniki radiowe i telewizyjne oraz sieci elektryczne [3, 4].

Intencjonalne zakłócenia EM generowane są w celu zaburzenia pracy lub zniszczenia infrastruktury elektronicznej. Promieniowanie EM generowane przez takie środowiska ma zwykle większą moc EM niż w środowiskach naturalnych, dlatego nazywa się je promieniowaniem elektromagnetycznym dużej mocy [2].

Obecnie realne zagrożenie dla infrastruktury elektronicznej ze strony intencjonalnych ataków wykorzystujących promieniowanie EM o dużej mocy dotyczy już nie tylko elektronicznej struktury wojskowej, ale także różnych sektorów cywilnych. Dostępna literatura wymienia wiele przypadków ataków EM wykorzystujących stosunkowo łatwo dostępne źródła impulsów EM dużej mocy [5, 6]. Stwierdzono, że celem tych ataków była infrastruktura elektroniczna zabezpieczająca m.in. automaty do gier, sklepy jubilerskie, systemy bankowe, policyjne systemy telekomunikacyjne i systemy antykradzieżowe w luksusowych samochodach. Powszechne zagrożenie atakami EM wymaga wzmoczonego rozwoju odpowiednich środków zaradczych.

Wysoką skuteczność ochrony obiektów elektronicznych przed impulsami EM dużej mocy zapewniają różnego rodzaju metalowe obudowy ekranujące (w formie skrzynek, walizek), w których mogą być umieszczone wrażliwe obiekty elektroniczne. Ścianki obudowy ekranującej wykonane są z metalu o wysokiej przewodności, która pochłania energię EM przechodzących impulsów EM o dużej mocy i powoduje przepływ prądu elektrycznego na powierzchni obudowy [5, 7-9]. Prąd ten jest pochłaniany przez połączenie uziemiające lub wirtualną płaszczyznę

uziemia, dzięki czemu przychodzące impulsy EM o dużej mocy nie docierają do czułej elektroniki przechowywanej wewnątrz obudowy.

Całkowicie szczelne, doskonale przewodzące obudowy ekranujące zapewniają idealną ochronę przed zakłóceniami EM. Jednak takie całkowicie zamknięte skrzynki ekranujące nie są praktyczne ze względu na brak funkcjonalnych struktur, takich jak otwory (np. do wentylacji) i przepusty kablowe do komunikacji wewnątrz-zewnątrz. Z tego powodu ekranowanie promieniowania EM przez praktyczne obudowy z otworami nie może być idealne, a skutki wywołane przez zewnętrzne zakłócenia EM zależą od ich sprzężenia z obudową ekranującą.

W niniejszym artykule badamy skuteczność ekranowania ultrakrótkiego impulsu EM przez obudowę z otworem, analizując wyniki badań numerycznych czasowo-przestrzennych rozkładów pola EM w obudowie ekranującej z otworem po zaburzeniu EM impulsem wysokiej mocy.

### Obudowa ekranująca z otworem

Schemat badanej obudowy ekranującej z otworem przedstawiono na rysunku 1. Wymiary zewnętrzne badanej obudowy wynoszą odpowiednio 455 mm x 50 mm x 463 mm. Zostały one dobrane tak, aby badana obudowa pomieściła standardowy 17-calowy laptop, 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 przepustowego do kabli. Ścianki obudowy o grubości 1 mm wykonane są z materiału o nieskończonej wielkiej przewodności (tzw. Perfect Electric Conductor-PEC).

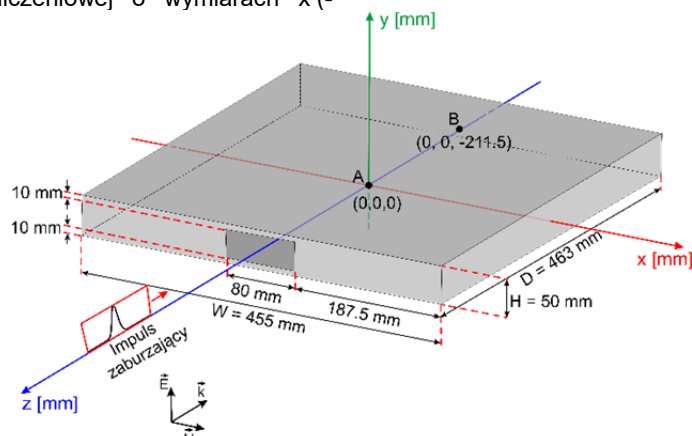
### Metoda symulacyjna

Badania symulacyjne ukierunkowane były na wizualizację rozwoju natężenia pola elektromagnetycznego wewnątrz badanej obudowy dla wybranych czasów po zainicjowaniu impulsu zaburzającego.

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

Symulacja 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).



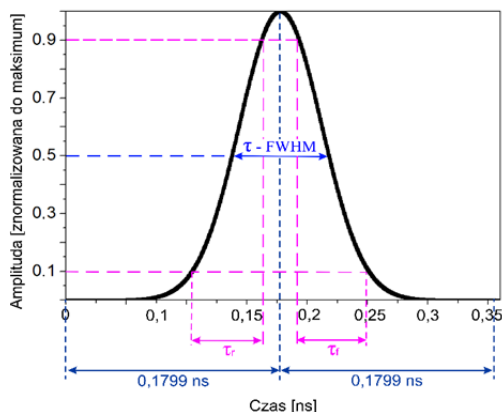
Rys. 1. Schemat badanej obudowy z otworem umieszczonej w prostokątnym układzie współrzędnych. Płaska fala elektromagnetyczna propaguje w kierunku - z. Wektor pola elektrycznego E skierowany jest w kierunku y

### Parametry impulsu zaburzającego

Uważa się, że największym zagrożeniem dla obiektów elektronicznych są krótkotrwałe impulsy EM o dużej gęstości mocy, czyli o dużym natężeniu pola elektrycznego.

Przyjęto, że obudowa z otworem została napromieniowana gaussowskim impulsem płaskiej fali EM (rysunek 2).

Parametry impulsu płaskiej fali EM były następujące: amplituda natężenia pola elektrycznego -  $10^6$  V/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/m<sup>2</sup>.



Rys. 2. Gaussowski impuls płaskiej fali elektromagnetycznej – rozkład czasowy natężenia pola elektrycznego

### Wyniki badań symulacyjnych

W wyniku przeprowadzonych symulacji numerycznych uzyskano dwuwymiarowe rozkłady pól elektrycznego i magnetycznego wewnątrz obudowy w przedziale czasu od 0 ns do 90 ns po pojawieniu się impulsu zaburzającego.

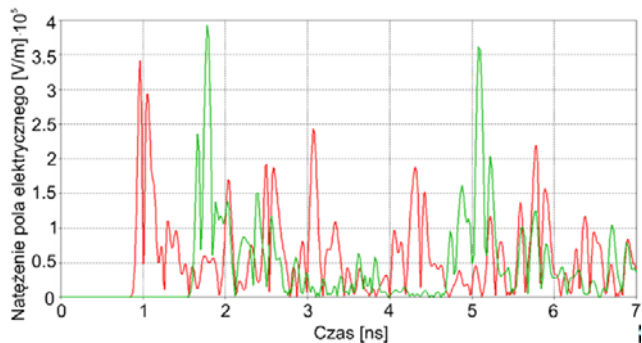
Na rysunku 3 przedstawiono rozkłady pola elektrycznego i magnetycznego w przekroju  $y = 0$  dla wybranych czasów z przedziału 0 - 90 ns.

Z rysunku 3 wynika, że po zainicjowaniu zaburzenia w obudowie ekranującej z otworem powstają dwie fazy rozwoju pola EM: faza falowa i faza interferencyjna. Faza falowa, reprezentowana przez tzw. fale pierwotne i wtórne (odbite od ścian obudowy) trwa w przybliżeniu do momentu odbicia pierwszej fali pierwotnej od tylnej ściany (tj. do około  $t = 1,54$  ns). Z kolei faza interferencyjna następuje po fazie

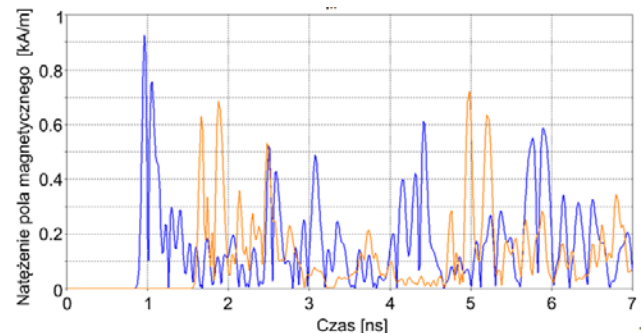
falowej i jest monitorowana po zajściu zaburzenia do czasu  $t = 90$  ns.

Z symulacji wynika, że czas trwania pola EM w obudowie jest długi w porównaniu z rzeczywistym czasem oddziaływania zewnętrznego impulsu zaburzającego, który faktycznie oddziałuje z obudową tylko przez 1,5 ns.

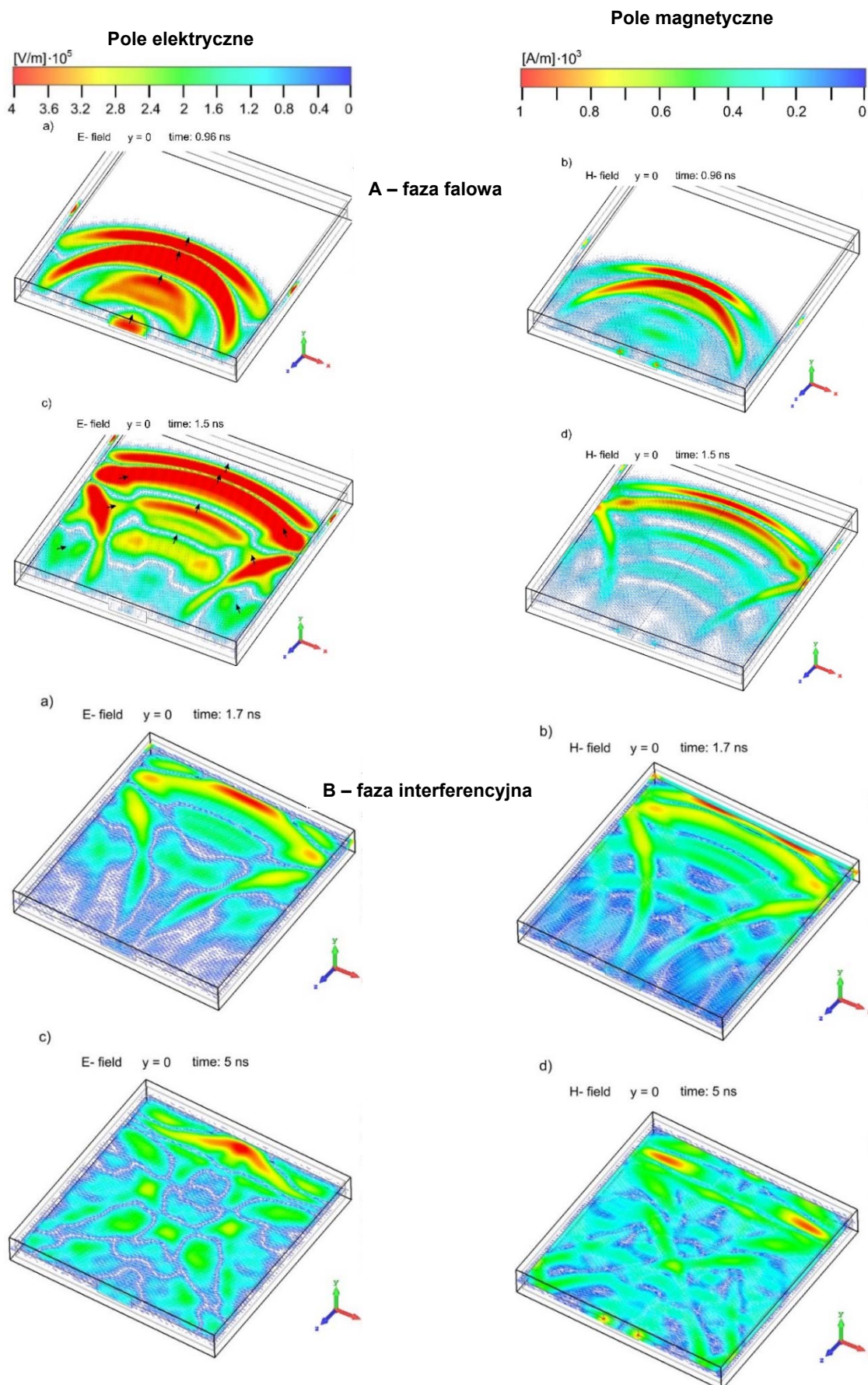
Po inicjacji pole EM w obudowie maleje monotonnie z powodu upływu energii pola EM przez otwór. Po czasie 90 ns amplitudy pól elektrycznego i magnetycznego zmniejszają się około 30 krotnie w porównaniu z odpowiednimi amplitudami padającego impulsu EM (rysunki 4-5). Jednak nadal mają one stosunkowo duże wartości: dla pola elektrycznego-  $3,5 \cdot 10^4$  V/m i magnetycznego-  $1,5 \cdot 10^2$  A/m



Rys. 4. Impulsy pola elektrycznego w punktach A (0, 0, 0) - kolor czerwony i B (0, 0, - 211.5) – kolor zielony wewnątrz obudowy ekranującej z otworem w przedziale czasu od 0 do 7 ns



Rys. 5. Impulsy natężenia pola magnetycznego w punktach A (0, 0, 0) – kolor niebieski i B (0, 0, - 211.5) – kolor pomarańczowy wewnątrz obudowy ekranującej z otworem w przedziale czasu od 0 do 7 ns



Rys. 3. Wizualizacja 2D rozwoju pól elektrycznego i magnetycznego w obudowie ekranującej z otworem (przekrój  $y = 0$ ). Lewa kolumna - amplituda natężenia pola elektrycznego, prawa kolumna - amplituda natężenia pola magnetycznego. A – faza falowa, B – faza interferencyjna.

## Podsumowanie

Badania symulacyjne ujawniły istnienie dwóch faz rozwoju pola EM w obudowie ekranującej: fazy falowej i interferencyjnej. W fazie falowej pole EM generowane jest w postaci pierwotnych i odbitych impulsów falowych, biegnącej od otworu w kierunku tylnej ścianki obudowy. W fazie interferencyjnej pole EM ma postać zmiennych w czasie i przestrzeni mozaik interferencyjnych sprzężonych pól elektrycznego i magnetycznego.

Badania zależności czasowej pól elektrycznego i magnetycznego w dwóch charakterystycznych punktach A i B wewnątrz obudowy wykazały, że w obu fazach pola elektryczne i magnetyczne w punktach A i B mają formę impulsów subnanosekundowych. Mimo że amplitudy tych impulsów są od 3 do 20 razy mniejsze niż amplituda impulsu padającego, mogą one stanowić poważne zagrożenie EM.

Wynika z powyższego, że zastosowanie obudowy ekranującej z otworem może być pozorną ochroną przed zewnętrznym subnanosekundowym impulsem EM. Zatem w przypadku bezpośredniego działania ultrakrótkiego impulsu EM o dużej energii na niezabezpieczony punkt w przestrzeni, oddziaływanie tego impulsu jest działaniem jednorazowym. Natomiast po zastosowaniu obudowy ekranującej z otworem czas oddziaływania impulsów pola EM wytworzonych w obudowie na dany punkt znacznie się wydłuża. Amplitudy tych impulsów są co prawda mniejsze, ale czas ich działania jest znacznie dłuższy niż czas trwania impulsu zaburzającego.

*Projekt finansowany w ramach programu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego pod nazwą „Regionalna Inicjatywa Doskonałości” w latach 2019 - 2022 nr projektu 006/RID/2018/19 kwota finansowania 11 870 000 zł.*

**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. Damian Bisewski, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: d.bisewski@we.umg.edu.pl;

## LITERATURA

- [1] 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] Giri, D.V.; Tesche, F.M. An Overview of High-Power Electromagnetic (HPEM) Radiating and Conducting Systems, Circuit and Elec-tromagnetic Notes, Note 50, 1-19, 2006.
- [5] Kopp, C.; Pose, R. The Impact of Electromagnetic Radiation Considerations on Computer System Architecture, Dept. of Computer Science, Monash University, Clayton, Victoria, Australia, 2016.
- [6] Sabath, F. Threads of Electromagnetic Terrorism, EUROEM 2012, Book of abstracts, EUROEM 2012 – ONERA, Toulouse, France, 2012.
- [7] High Power Microwave Technology and Effects, University of Maryland, Short Course Presented to MSIC Redstone Arsenal, Alabama August 8-12, 2005.
- [8] Hwang, S. M.; Hong, J. I.; Huh, C. S. Characterization of the susceptibility of integrated circuits with induction caused by high power microwaves, Progress In Electromagnetics Research, PIER, vol. 81, pp. 61-72, 2008.
- [9] Fei, X.; Bing, C.; Chenglong, L. Damage efficiency research of PCB components under strong electromagnetic pulse, Applied Mechanics and Materials, vol. 130-134, pp. 1383-1386, 2012
- [10] [www.cst.com](http://www.cst.com).