

doi:10.15199/48.2024.10.56

# Skuteczność ekranowania wnętrza małej obudowy z otworem przed subnanosekundowym impulsem EM o polaryzacji równoległej

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań numerycznych pozwalających na wyznaczenie skuteczności ekranowania (SE) wnętrza obudowy ekranującej z otworem przed subnanosekundowymi impulsami elektromagnetycznymi o polaryzacji równoległej. W badaniach zastosowano środowisko CST Studio. Symulacje obejmowały wykonanie obliczeń numerycznych za pomocą solvera w dziedzinie czasu. Obserwacja czasowych charakterystyk pola EM w dwóch charakterystycznych punktach A i B wewnątrz obudowy wykazała, że pola elektryczne i magnetyczne przyjmują postać impulsów wewnętrznych o amplitudach mniejszych niż amplitudy impulsu zaburzającego. Mimo, że amplitudy tych impulsów są mniejsze to czas ich oddziaływania jest znacznie dłuższy niż czas trwania impulsu zaburzającego. Wynika z tego, że oddziaływania słabszych impulsów, ale w wystarczająco długim czasie może powodować poważne szkody w urządzeniach elektronicznych.

**Abstract.** The article presents the results of numerical investigations allowing for the determination of the shielding effectiveness (SE) of the interior of an enclosure with an aperture against subnanosecond electromagnetic pulses with parallel polarization. The research employed the CST Studio environment. The simulations involved performing numerical computations using a time-domain solver. Observation of the temporal characteristics of the EM field at two characteristic points, A and B, inside the enclosure revealed that the electric and magnetic fields took the form of internal impulses with amplitudes smaller than those of the incident pulse. Although the amplitudes of these impulses are smaller, their interaction time is significantly longer than the duration of the disturbing pulse. It follows that the interactions of weaker impulses, but over a sufficiently long period, can cause serious damage to electronic devices. (**The shielding effectiveness of the interior of a small enclosure with an aperture against subnanosecond electromagnetic pulse with parallel polarization**).

**Słowa kluczowe:** ultrakrótki impuls elektromagnetyczny, skuteczność ekranowania, obudowa ekranująca z otworem.

**Keywords:** ultrashort electromagnetic pulse, shielding effectiveness, shielding enclosure with aperture, electromagnetic field shielding.

## Wstęp

Współcześnie realne zagrożenie dla infrastruktury elektronicznej stanowią celowe ataki wykorzystujące promieniowanie elektromagnetyczne (EM) wysokiej mocy. Celem tych ataków nie jest wyłącznie infrastruktura wojskowa, ale także różnorodne sektory elektroniki konsumenckiej, bankowej, przemysłowej oraz służby policyjne, transportowe i ratownicze. Dostępna literatura odnotowuje rosnącą liczbę przypadków ataków EM wykorzystujących stosunkowo łatwo dostępne źródła impulsów EM dużej mocy [1, 2]. Coraz bardziej powszechne zagrożenia atakami EM wymagają intensyfikacji działań mających na celu opracowanie odpowiednich środków zaradczych.

Wysoką skuteczność ochrony przed impulsami EM dużej mocy zapewniają różnego rodzaju metalowe obudowy ekranujące, wewnątrz których można umieścić wrażliwe elementy elektroniczne, na zaburzenia EM. Ściany takich obudów ekranujących wykonane są z metalu. Padające na zamkniętą obudowę ekranującą impulsy EM dużej mocy nie wnikają do jej wnętrza a jedynie powodują powstanie prądu elektrycznego na metalowej powierzchni obudowy. Prąd powierzchniowy absorbowany jest przez uziemienie. Wrażliwa elektronika znajdująca się wewnątrz obudowy jest w ten sposób chroniona przed atakami EM. Podobnie sygnały EM generowane wewnątrz zamkniętej obudowy przez znajdujące się w jej wnętrzu urządzenia elektroniczne są skutecznie chronione przed niekontrolowanym przesyłaniem chronionych informacji na zewnątrz obudowy [2-5].

Duże obudowy ekranujące zazwyczaj są używane do ochrony złożonych systemów elektronicznych w organizacjach rządowych, policji, wojsku, agencjach wywiadowczych czy systemach bankowych. Ostatnio użytkownicy małych urządzeń elektronicznych (takich jak laptopy, tablety, smartfony, karty identyfikacyjne, klucze samochodowe, itp.) wykazują coraz większe zainteresowanie małymi obudowami ekranującymi,

w których mogliby umieścić swoje urządzenia celem ochrony przed atakami EM [6].

Zamknięta, doskonale przewodząca obudowa ekranująca stanowi idealną ochronę przed atakami EM. Niestety zamknięte obudowy ekranujące nie są praktyczne ze względu na potrzebę komunikacji ekranowanych urządzeń elektronicznych ze światem zewnętrznym oraz konieczność wentylacji wnętrza obudowy i stabilizacji jego temperatury. Te potrzeby funkcjonalne skutkują umieszczeniem otworów technologicznych w ścianach obudowy ekranującej. Obudowy z otworami technologicznymi przestają być idealnymi ekranami elektromagnetycznymi. Istnienie otworów technologicznych w obudowach umożliwia bowiem niepożądane wnikanie zewnętrznych zaburzeń EM do ich wnętrza. Wówczas ochrona przed zaburzeniami EM elektroniki umieszczonej we wnętrzu obudowy z otworem zależy od stopnia wnikania zaburzenia EM przez otwory technologiczne oraz podatności chronionych urządzeń elektronicznych na czasowe, przestrzenne i częstotliwościowe charakterystyki wnikającego zaburzenia.

Stopień ochrony wnętrza obudowy z otworem technologicznym dokonuje się na podstawie badań tzw. skuteczności ekranowania (SE) [7].

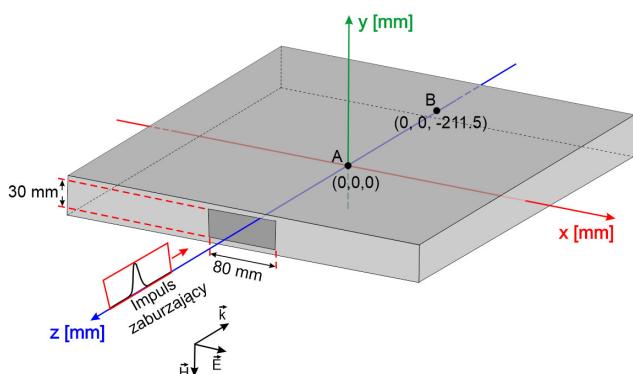
Największe szkody w urządzeniach elektronicznych powodują impulsy EM o ultrakrótkim czasie trwania a tym samym o szybko zmieniających się wartościach natężenia pola elektrycznego i magnetycznego [2]. Wynika to z tego, że ultraszybko zmieniające się silne pola elektrycznego impulsów EM indukują wysokie potencjały w ścieżkach elektronicznych i w złączach półprzewodnikowych urządzeń elektronicznych, które są przyczyną przebiegów elektrycznych i wyładowań elektrostatycznych. Efekty te w najłagodniejszym przypadku są przyczyną występowania zakłóceń w działaniu urządzeń elektronicznych, a w najgorszym do ich trwałego uszkodzenia. Istnieje opinia, że ultrakrótkie i szybkie impulsy zaburzające o dużych amplitudach natężenia pola elektrycznego, a więc o

dużych mocach chwilowych a stosunkowo małych energiach są najskuteczniejszym sposobem przeprowadzania ataku EM. Zastosowanie do ataku EM impulsów o większych energiach wynikających raczej z długiego ich trwania niż wysokiej amplitudy natężenia pola elektrycznego jest mniej efektywne i bardziej kosztowne. Energia tych impulsów jest przekształcana w atakowanej elektronice w ciepło zwykle o akceptowalnym poziomie.

Z tych powodów analizę skuteczności ekranowania wnętrza obudów z otworami należy przede wszystkim wykonać dla przypadku zaburzenia EM ultrakrótkimi impulsami wysokiej mocy.

W swoich poprzednich pracach [8-10] przeprowadziliśmy badania wnikania subnanosekundowego impulsu EM wysokiej mocy o polaryzacji pionowej do wnętrza małej obudowy z otworem i skuteczności ekranowania tego rodzaju promieniowania. Z otrzymanych rezultatów wynika, że pole EM powstające w obudowie trwa długi czas w porównaniu z rzeczywistym czasem trwania zewnętrznego impulsu zaburzającego. Charakterystyki czasowe pól elektrycznego i magnetycznego wykazują poważne zagrożenie EM, jakie istnieje wewnątrz obudowy ekranującej przez czas znacznie dłuższy niż rzeczywisty czas trwania zakłócenia zewnętrznego. Przeprowadzone badania ujawniły również istnienie dwóch nieznanymi faz rozwoju pola EM w obudowie z otworem: fazy falowej i interferencyjnej.

W niniejszej pracy badaliśmy skuteczność ekranowania wnętrza małej obudowy z otworem dla przypadku subnanosekundowego impulsu EM o polaryzacji równoległej. Skuteczność ekranowania wnętrza obudowy z otworem wykonano metodą symulacji numerycznej w środowisku CST Studio.



Rys. 1. Schemat obudowy z otworem, umieszczonej w prostokątnym układzie współrzędnych. Impuls zaburzający propaguje w kierunku -z. Wektor pola elektrycznego skierowany jest w kierunku +x

### Obudowa ekranująca z otworem

Rys. 1 przedstawia geometrię obudowy ekranującej z otworem. Dla celów obliczeń symulacyjnych obudowa została umieszczona w układzie współrzędnych prostokątnych tak, aby jej punkt środek, oznaczony jako punkt A, znajdował się w środku układu współrzędnych, czyli w punkcie (0, 0, 0). Zewnętrzne wymiary obudowy wynoszą 455 mm x 50 mm x 463 mm (szerokość x wysokość x głębokość). Na ścianie frontowej znajduje się prostokątny otwór o wymiarach 30 mm x 80 mm. Grubość ścian obudowy wynosi 1 mm. Ściany obudowy wykonane są z materiału o nieskończonej przewodności (czyli są idealnym przewodnikiem – Perfect Electric Conductor PEC). Zakładamy, że elektromagnetyczny impuls zaburzający propaguje prostopadłe do ściany frontowej obudowy w kierunku -z. Wektor natężenia pola

elektrycznego impulsu zaburzającego jest skierowany w kierunku +x (wektor natężenia pola magnetycznego był skierowany w kierunku -y), tj. równoległe do dłuższych krawędzi otworu (oraz do górnej i dolnej ściany obudowy). Mówimy, że padający impuls zaburzający jest spolaryzowany równoległe.

### Metoda symulacyjna

Celem numerycznych badań symulacyjnych było wyznaczenie skuteczności ekranowania (SE) wnętrza obudowy ekranującej z otworem. W dziedzinie czasu skuteczność ekranowania danego punktu P(x,y,z) przed polem elektrycznym (lub magnetycznym) definiuje się jako stosunek amplitudy pola elektrycznego E (lub magnetycznego H) bez obudowy ekranującej i z obudową ekranującą w tym samym punkcie. Skuteczność ekranowania pól elektrycznego (1) i magnetycznego (2) można wyznaczyć z zależności [11]:

$$(1) \quad SE_{pr}^e = 20 \log \frac{E_{max}^{in}(t)}{E_{max}^s(t)} \Big|_{P=const}$$

oraz

$$(2) \quad SE_{pr}^m = 20 \log \frac{H_{max}^{in}(t)}{H_{max}^s(t)} \Big|_{P=const}$$

gdzie:  $SE_{max}^{in}(t)$  i  $H_{max}^{in}(t)$  są maksymalnymi amplitudami odpowiednio pola elektrycznego i magnetycznego impulsu zaburzającego w punkcie P (x,y,z) bez ekranowania w czasie t,

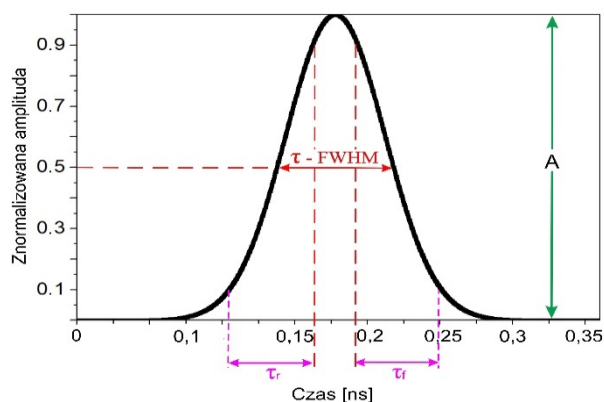
$SE_{max}^s(t)$  i  $H_{max}^s(t)$  są maksymalnymi amplitudami odpowiednio pola elektrycznego i magnetycznego impulsu zaburzającego w punkcie P (x,y,z) z ekranowaniem w czasie t.

W badaniach symulacyjnych zastosowano środowisko CST Studio, które jest uznanym przez specjalistów środowiskiem symulacyjnym do modelowania i kompleksowych analiz wysokoczęstotliwościowych pól elektromagnetycznych obiektów 3D [12].

Symulacja obejmowała wykonanie obliczeń numerycznych za pomocą Time Domain Solver, czyli solwera w dziedzinie czasu.

### Parametry impulsu zaburzającego

Jak wcześniej już wspomniano, największym zagrożeniem dla urządzeń elektronicznych są ultrakrótkie impulsy EM wysokiej mocy.



Rys. 2. Gaussowski impuls zaburzający – rozkład czasowy natężenia pól elektrycznego i magnetycznego

W niniejszych badaniach symulacyjnych zaburzenie EM stanowi subnanosekundowy impuls płaskiej fali EM o rozkładzie gaussowskim natężeń pól elektrycznego

i magnetycznego (Rys. 2). Parametry impulsu EM są następujące: maksymalna amplituda natężenia pola elektrycznego -  $10^6$  V/m, maksymalna amplituda natężenia pola magnetycznego -  $2,68 \cdot 10^3$  A/m, czas, w którym amplituda natężenia pola elektrycznego (lub magnetycznego) osiąga maksymalną wartość -  $t_{max} = 0,1779$  ns, szerokość połowkowa (FWHM) impulsu EM -  $\tau = 0,0804$  ns, czas narastania impulsu -  $\tau_r = 0,058$  ns, czas opadania impulsu -  $\tau_f = 0,058$  ns.

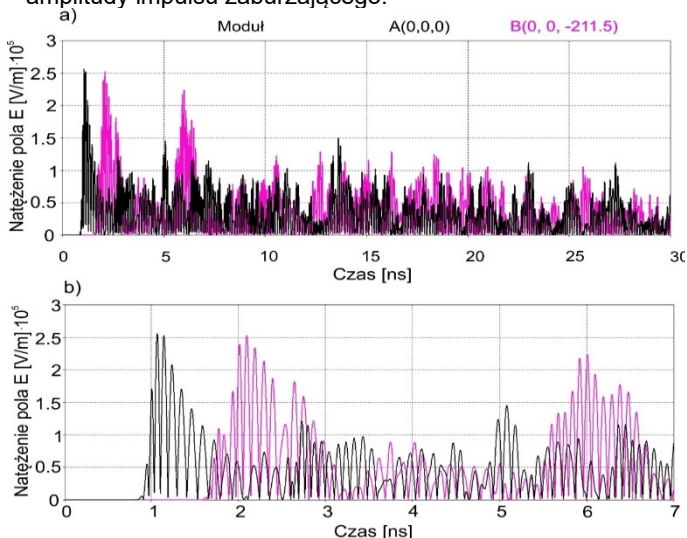
### Wyniki badań symulacyjnych

W wyniku przeprowadzonych symulacji numerycznych uzyskano charakterystyki czasowe modułu natężenia pola elektrycznego (rys. 3) i magnetycznego (rys. 4) w wybranych punktach obudowy (rys. 5) oraz charakterystyki skuteczności ekranowania pola elektrycznego (rys. 6) i magnetycznego w tych punktach. Zależności czasowe określono w dwóch charakterystycznych punktach obudowy (rys. 1):

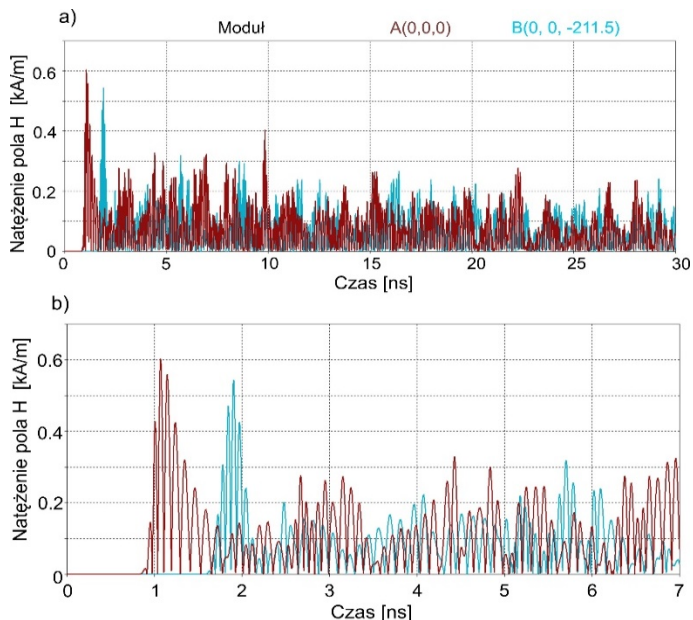
- w geometrycznym środku obudowy, punkt A (0,0,0),
- w punkcie, w którym pole EM ulega wzmocnieniu interferencyjnemu, punkt B (0,0,-211,5).

Z otrzymanych charakterystyk wynika, że pola elektryczne i magnetyczne w punktach A i B mają postać serii ultrakrótkich impulsów EM. Powstające ultrakrótkie impulsy EM rejestrowane w punktach A i B w obudowie nazywalismy wewnętrznymi impulsami EM. Jak widać na rys. 3 i 4 amplitudy wewnętrznych impulsów pól elektrycznego i magnetycznego w wybranych punktach obudowy maleją w czasie. Jest to spowodowane coraz równomierniejszym rozkładem pól elektrycznego i magnetycznego w objętości obudowy oraz, jak to ilustruje rysunek 7, wyciekaniem energii EM przez otwór.

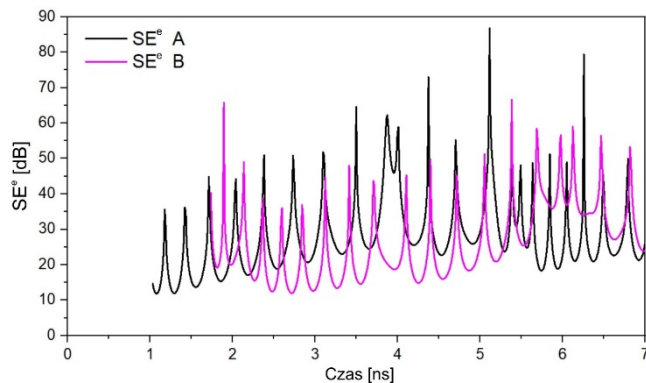
Największe amplitudy impulsów wewnętrznych pola elektrycznego w punkcie A wynoszą około  $3,5 \cdot 10^5$  V/m, co jest wartością trzykrotnie niższą niż amplituda pola elektrycznego impulsu zaburzającego ( $10^6$  V/m). Natomiast największe amplitudy impulsów wewnętrznych pola magnetycznego w tym punkcie wynoszą około 0,6 kA/m, co stanowi 4-krotny spadek względem maksymalnej amplitudy impulsu zaburzającego. Podobnie w punkcie B, największe amplitudy wewnętrznych impulsów pola elektrycznego i magnetycznego maleją odpowiednio do ok.  $2,5 \cdot 10^5$  V/m i 0,55 kA/m, co również stanowi 3-krotny i 4-krotny spadek wartości względem maksymalnej amplitudy impulsu zaburzającego.



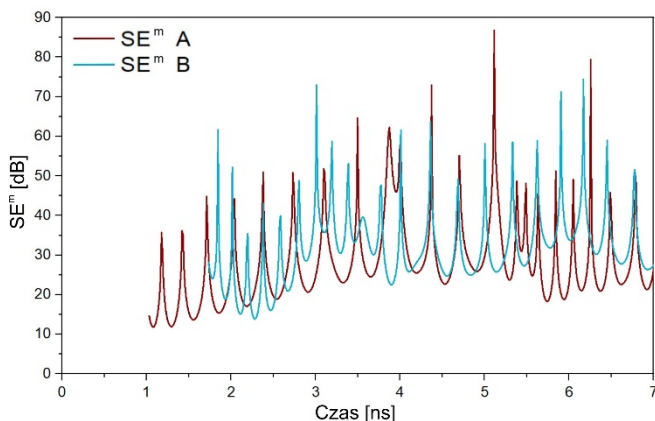
Rys. 3. Zależność czasowa amplitudy natężenia pola elektrycznego w punktach: A (0, 0, 0) i B (0; 0; -211,5) po przejściu impulsu zaburzającego o polaryzacji równoległej w czasie 0 - 30 ns (a) i 0 - 7 ns (b)



Rys. 4. Zależność czasowa amplitudy natężenia pola magnetycznego w punktach: A (0, 0, 0) i B (0; 0; -211,5) po przejściu impulsu zaburzającego o polaryzacji równoległej w czasie 0 - 30 ns (a) i 0 - 7 ns (b)



Rys. 5. Zależność czasowa skuteczności ekranowania pola elektrycznego  $SE^e$  w punktach A (0, 0, 0) i B (0, 0, -211,5) w czasie 0 - 7 ns dla przypadku polaryzacji równoległej

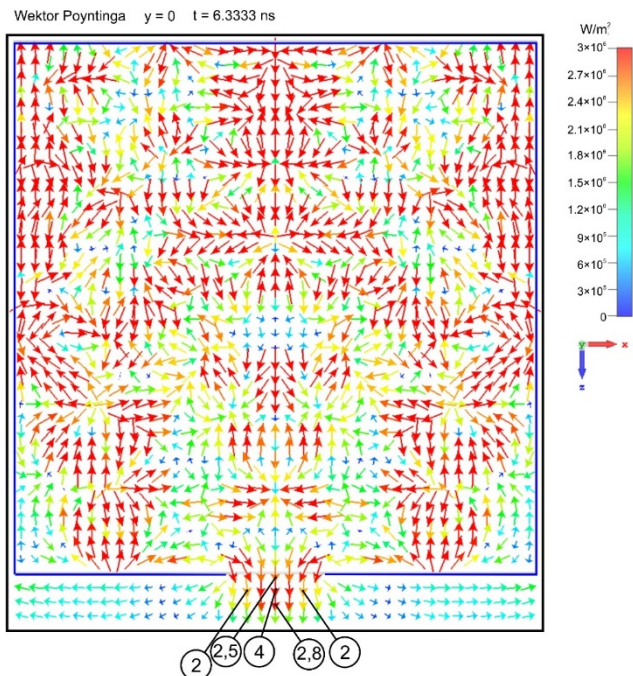


Rys. 6. Zależność czasowa skuteczności ekranowania pola magnetycznego  $SE^m$  w punktach A (0, 0, 0) i B (0, 0, -211,5) w czasie 0 - 7 ns dla przypadku polaryzacji równoległej

Amplitudy wewnętrznych impulsów pola elektrycznego w punktach A i B maleją do ok.  $0,8 \cdot 10^5$  V/m w chwili  $t = 30$  ns, a pola magnetycznego do ok. 0,15 A/m. Oznacza to, że pomimo ekranowania amplitudy wewnętrznych impulsów EM są wystarczająco wysokie, aby spowodować poważne zakłócenia w elementach elektronicznych.



Jak wynika z rys. 7, w obu rozważanych punktach obudowy skuteczność ekranowania impulsu zaburzającego wynosi co najmniej 8 dB. Skuteczność ekranowania pola elektrycznego i magnetycznego rośnie z upływem czasu. Tendencja ta wynika z faktu bardziej równomiernego rozłożenia się pola EM w całej objętości obudowy i w następstwie tego ze zmniejszania się wartości amplitud pól elektrycznego i magnetycznego w obudowie.



Rys. 7. Mapa wektorowa rozkładu wektorów Poyntinga w czasie  $t = 6,33$  ns ilustrująca upływ energii EM przez otwór. Wektory Poyntinga wychodzące przez otwór z wnętrza obudowy reprezentują gęstość mocy pola EM opuszczającą obudowę. Amplitudy wektora Poyntinga (w okręgach) podano w  $10^6$  W/m<sup>2</sup>

### Podsumowanie

Badania zależności czasowych pola elektrycznego i magnetycznego w dwóch charakterystycznych punktach A i B wewnątrz obudowy wykazały, że pola elektryczne i magnetyczne w tych punktach przyjmują formę wewnętrznych impulsów EM. Impulsy te były monitorowane przez 30 ns po zainicjowaniu zaburzenia EM. Mimo że najwyższe amplitudy impulsów wewnętrznych są ok. 3-krotnie (dla pola elektrycznego) i 4-krotnie (dla pola magnetycznego) mniejsze niż odpowiednie amplitudy impulsu zaburzającego to stanowią one poważne zagrożenie EM. Mimo, że amplitudy wewnętrznych impulsów EM są mniejsze to czas ich oddziaływania jest znacznie dłuższy niż czas trwania impulsu zaburzającego. Może zatem okazać się, że oddziaływania słabszych impulsów, ale w wystarczająco długim czasie może

powodować poważne szkody w urządzeniach elektronicznych.

Podobnie w przypadku oddziaływania impulsu zaburzającego o polaryzacji pionowej na obudowę z otworem, otrzymane wyniki wykazały, że amplitudy wewnętrznych impulsów pól elektrycznego i magnetycznego maleją w czasie. Wynika z powyższego, że zastosowanie obudowy ekranującej z otworem może być pozorną ochroną przed zewnętrznym zaburzeniem EM.

**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, Book of abstracts, EUROEM 2012 – ONERA, Toulouse, France, 2012.
- [3] High Power Microwave Technology and Effects, University of Maryland, Short Course Presented to MSIC Redstone Arsenal, Alabama August 8-12, 2005.
- [4] 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.
- [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] Nitsch, D.; Sabath, F.; Schmidt, H.-U.; Braun, C. Comparison of the HPM and UWB Susceptibility of Modern Microprocessor Boards, System Design and Assessment, Note 36, 2002.
- [7] 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.
- [8] Budnarowska, M.; Mizeraczyk, J. Determination of Shielding Effectiveness of a Subnanosecond High-Power EM Interference by an Enclosure with Aperture Using Time Domain Approach. Energies, 16(4), 1931, 2023.
- [9] Budnarowska, M.; Mizeraczyk, J., Studański, R. Pole elektromagnetyczne w obudowie ekranującej z otworem technologicznym po zaburzeniu ultrakrótkim impulsem fali płaskiej dużej mocy. Przegląd Elektrotechniczny, 98(3), 2022.
- [10] 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.
- [11] Budnarowska, M.; Mizeraczyk, J. Determination of Shielding Effectiveness of a Subnanosecond High-Power EM Interference by an Enclosure with Aperture Using Time Domain Approach. Energies, 16(4), 1931, 2023.
- [12] www.cst.com