

Uboczny wpływ intencjonalnego impulsowego zaburzenia EM na środowisko elektromagnetyczne

Streszczenie. W artykule pokazano po raz pierwszy, że intencjonalne impulsowe zaburzenie elektromagnetyczne (EM) może spowodować nie tylko zakłócenie elektromagnetyczne w wybranym obiekcie (lub obiektach) elektronicznym, ale oddziałuje ono również na środowisko elektromagnetyczne poprzez elektryzowanie napotykanymi obiektami metalowymi, które następnie stają się niepożądanymi źródłami pola elektromagnetycznego, w tym fal elektromagnetycznych w czasie i po przejściu intencjonalnego impulsowego zaburzenia EM. Generacja tych fal przez naelektryzowane obiekty metalowe jest rezultatem redystrybucji swobodnych elektronów w metalowych obiektach w czasie przemieszczania się intencjonalnego impulsowego zaburzenia EM przez te obiekty oraz relaksacji tej redystrybucji po przejściu tego zaburzenia. Relaksacja redystrybucji elektronów w obiektach metalowych trwa stosunkowo długo po przejściu EM impulsu zaburzającego, wytwarzając kolejne zaburzenie EM w postaci pola EM wokół obiektów. W niniejszej pracy demonstracja istnienia ubocznego wpływu intencjonalnego impulsu EM na środowisko elektromagnetyczne została wykonana za pomocą symulacji komputerowej przy użyciu programu obliczeniowego CST Studio.

Abstract. The article presents for the first time that an intentional (EM) electromagnetic interference pulse can not only cause an electromagnetic disturbance in a selected electronic object (or objects) but also interacts with the electromagnetic environment by electrifying encountered metal objects, which then become undesired sources of the electromagnetic field in the form of electromagnetic waves during and after the passage of intentional EM interference. The generation of this unwanted EM field by the electrified metal objects results from the redistribution of free electrons in the metal objects as the intentional pulsed EM passes through them, as well as the relaxation of this redistribution after the passage of the interference. The relaxation of electron redistribution in the metal objects lasts relatively long after the passage of the EM interference pulse, creating the subsequent EM interference in the form of the EM field around the encountered metal objects. In this study, the demonstration of the existence of the side effect of the interaction of intentional EM pulse with the electromagnetic environment was carried out by computer simulation using the CST Studio. (**The side effects of the intentional electromagnetic (EM) interference pulse interaction with the electromagnetic environment.**)

Słowa kluczowe: zaburzenie środowiska elektromagnetycznego, elektryzacja obiektów metalowych, EMC, intencjonalne impulsy EM, CST Studio.

Keywords: electromagnetic interference, electromagnetic environment, metal objects electrification, EMC, intentional electromagnetic interference pulse, CST Studio.

Wstęp

Rosnąca liczba systemów i urządzeń elektronicznych wymusza konieczność zwrócenia większej uwagi na ich ochronę przed różnymi zagrożeniami elektromagnetycznymi (EM). Najpoważniejszym zagrożeniem są tzw. intencjonalnie wytworzone środowiska elektromagnetyczne. Środowiska te charakteryzują się dużą mocą promieniowania EM [1–4]. Wytwarzane są one głównie w postaci krótkotrwałych impulsów [5,6], które wprowadzają najwięcej zakłóceń w działaniu aparatury elektronicznej. Zakłócenia operacyjne i uszkodzenia elementów elektronicznych są spowodowane dużymi potencjałami indukowanymi w urządzeniach elektronicznych przez intencjonalne impulsy zaburzające. Efektem ich działania są fale przepięciowe, wyładowania elektrostatyczne i uszkodzenia złączy półprzewodnikowych [7].

Najbardziej efektywnym sposobem ochrony urządzeń i systemów elektronicznych przed intencjonalnymi zaburzeniami EM jest tzw. ekranowanie EM. Ekranowanie EM zapewniają różnego rodzaju zamknięte obudowy metalowe, w których można umieścić wrażliwe obiekty elektroniczne. Niestety, w pełni zamknięte obudowy nie są praktyczne, ponieważ ze względów technologicznych i komunikacyjnych wymagane są w nich różnego rodzaju otwory (wentylacja, przepusty kablowe, itd.) Spełnienie tych wymagań funkcjonalnych oznacza, że ochrona EM nigdy nie będzie idealna. Stopień zakłóceń EM powodowanych przez zewnętrzne zaburzenia EM zależy od ich sprzężenia z obudowami i ich wnętrzem. Problemowi temu poświęcone było wiele publikacji (m.in. [1, 7, 8]).

O ile wiele prac dotyczyło ochrony obiektów stanowiących cel intencjonalnych ataków za pomocą impulsów EM, mało uwagi lub w ogóle poświęcone było zjawiskom, które towarzyszą takim atakom w środowisku, przez które propaguje intencjonalny impuls zaburzający w kierunku celu.

Intencjonalne zaburzenie EM zostaje z zasady wygenerowane w miejscu odległym od atakowanego obiektu. W związku z tym, wygenerowane zaburzenie ma swojej drodze do celu stosunkowo duże wymiary poprzeczne. Napotyka ono zatem na wiele obiektów metalowych, z którymi oddziałuje. Powoduje to redystrybucję swobodnych elektronów w napotykanymi obiektach metalowych. Należy oczekiwać, że w wyniku tej redystrybucji zostanie wytworzone wtórne zaburzenie EM, stanowiące uboczny efekt działania intencjonalnego zaburzenia EM zmierzającego w kierunku celu swojego ataku.

Celem niniejszej pracy jest przeanalizowanie na drodze symulacji komputerowej oddziaływania impulsowego zaburzenia EM z obiektem i określenie skutków, jakie takie oddziaływanie może spowodować w środowisku EM.

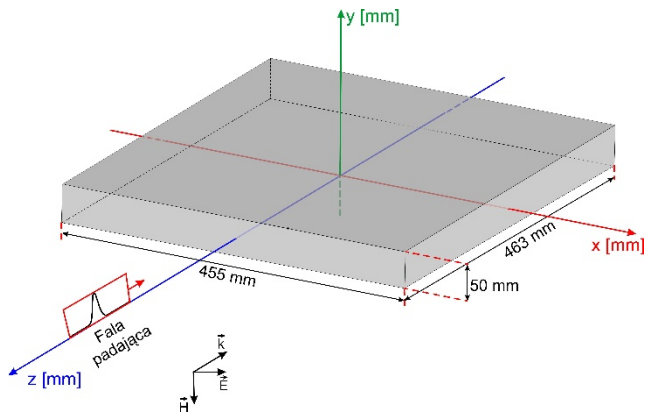
W symulacji przyjęto, że zaburzeniem EM jest impulsowa gaussowska fala płaska o czasie trwania około 0,35 ns i maksymalnej gęstości mocy 2,68 GW/m². Parametry te odpowiadają impulsowi, który jest przewidywany, że może być użyty w ataku EM.

Obiektem jest zamknięte metalowe pudełko o wymiarach typowych dla małych obudów ekranujących.

Symulację wykonano w środowisku CST Studio, które używane jest m.in. do modelowania i kompleksowych symulacji oddziaływania promieniowania elektromagnetycznego z obiektami 3D.

Obudowa komputerowa z otworem

Schemat badanego obiektu metalowego przedstawiono na rys. 1. Wymiary zewnętrzne badanego obiektu wynoszą odpowiednio: szerokość 455 mm x wysokość 50 mm x głębokość 463 mm. Grubość ścianek obiektu wynosi 1 mm. W badaniach symulacyjnych zakładamy, że obiekt wykonany jest z materiału PEC o nieskończonej wielkiej przewodności.



Rys. 1. Schemat badanego obiektu metalowego w prostokątnym układzie współrzędnych. Początek układu współrzędnych znajduje się w geometrycznym środku obudowy. Elektromagnetyczna fala płaska propaguje w kierunku $-z$. Wektor \vec{k} wskazuje kierunek propagacji fali.

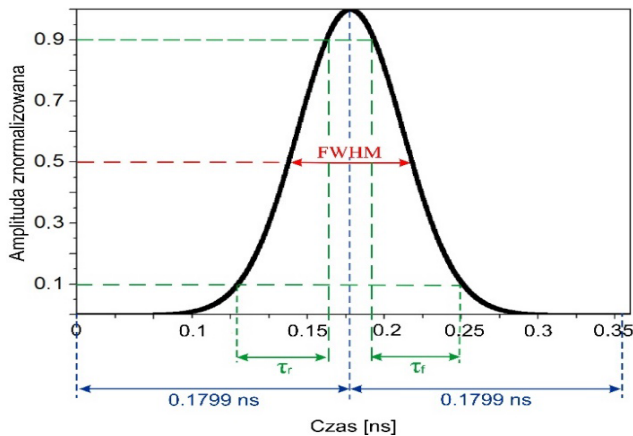
Metoda symulacyjna

W badaniach symulacyjnych zastosowano program CST Studio do modelowania i kompleksowych symulacji pól elektromagnetycznych obiektów 3D w dziedzinie czasu i częstotliwości [9].

Symulacja obejmowała wykonanie obliczeń numerycznych w dziedzinie czasu za pomocą Time Domain Solver. Pole EM wyznaczano w przestrzeni obliczeniowej o wymiarach x ($-447,5$ mm, $+447,5$ mm), y (-245 mm, $+245$ mm), z ($-1651,5$ mm, $+451,5$ mm), w której umieszczono badany obiekt metalowy.

Parametry impulsu zaburzającego

Zaburzeniem jest impuls płaskiej fali EM o kształcie gaussowskim. Jego kształt pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Impuls płaskiej fali EM o kształcie gaussowskim w funkcji czasu τ .

Czas τ (ns)

Impuls płaskiej fali E_{lv} pada prostopadle na ścianę frontową badanej obudowy komputerowej. Wektor natężenia pola elektrycznego \vec{E} ma kierunek $+x$ a wektor natężenia pola magnetycznego \vec{H} kierunek $-y$ (rys. 1). Wektor Poyntinga $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$ padającej fali ma kierunek $-z$.

Parametry impulsu płaskiej fali EM są następujące: amplituda natężenia pola elektrycznego \vec{E} - 10^6 V/m (dla $\tau = 0,1779$ ns), amplituda natężenia pola magnetycznego \vec{H} - $2,68 \cdot 10^3$ A/m (dla $\tau = 0,1779$ ns), połówkowy czas trwania impulsu FWHM - $0,08$ ns, czas trwania impulsu - $2 \times 0,1779$ ns, czas narastania impulsu - $\tau_r = 0,058$ ns, czas opadania impulsu - $\tau_f = 0,058$ ns, maksymalna gęstość mocy impulsu (dla $\tau = 0,1779$ ns) - $2,65$ GW/m².

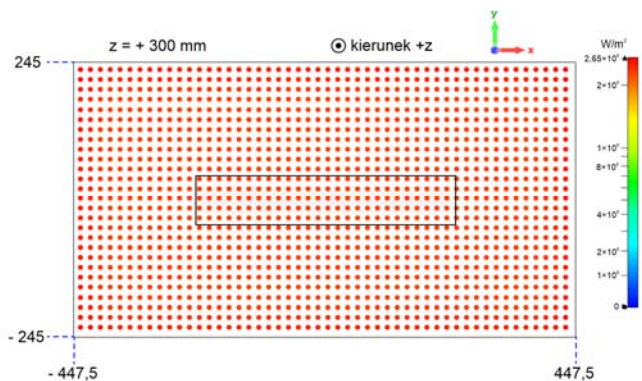
Położenie impulsu płaskiej fali EM względem metalowego obiektu określamy położeniem maksimum jej amplitudy. Moment pojawienia się maksimum amplitudy impulsu płaskiej fali EM w płaszczyźnie ściany frontowej (płaszczyzna wejściowa) badanego obiektu metalowego ($z = +231,5$ mm) przyjmujemy za czas $t = 0$. Czas $t < 0$ znaczy, że maksimum amplitudy impulsu płaskiej fali EM znajduje się przed płaszczyzną wejściową ściany frontowej obiektu.

Wyniki badań symulacyjnych

Nasze badania symulacyjne wykazały, że impulsowe zaburzenie EM w czasie przejścia przez obiekt metalowy powoduje redystrybucję elektronów swobodnych w obudowie metalowej, zakłócając jej neutralność elektryczną. Po przejściu impulsowego zaburzenia EM przez obiekt, jej oddziaływanie na obiekt się kończy. Następuje relaksacja stanu naelektryzowania obiektu - obiekt samoistnie wraca do neutralności elektrycznej. Redystrybucję elektronów w obudowie metalowej w czasie i po przejściu impulsowego zaburzenia EM opisujemy w innym artykule.

W niniejszym artykule przedstawiamy elektromagnetyczne skutki tej redystrybucji. Wyniki symulacji pokazały bowiem, że redystrybucja i relaksacja swobodnych elektronów w obiekcie metalowym powoduje, że obiekt ten staje się źródłem promieniowania EM w czasie i po przejściu impulsowego zaburzenia EM. Właściwości metalowego obiektu jako źródła promieniowania EM spowodowane intencjonalnym zaburzeniem EM przedstawiamy w niniejszym artykule za pomocą dwuwymiarowych pól wektora Poyntinga, które określają gęstość mocy promieniowania EM ($\frac{W}{m^2}$) oraz kierunek jego propagacji wokół metalowego obiektu.

Na rys. 3 pokazano jednorodne pole modułów wektora Poyntinga elektromagnetycznego impulsu zaburzającego w odległości $68,5$ mm przed metalowym obiektem ($z = +300$ mm).



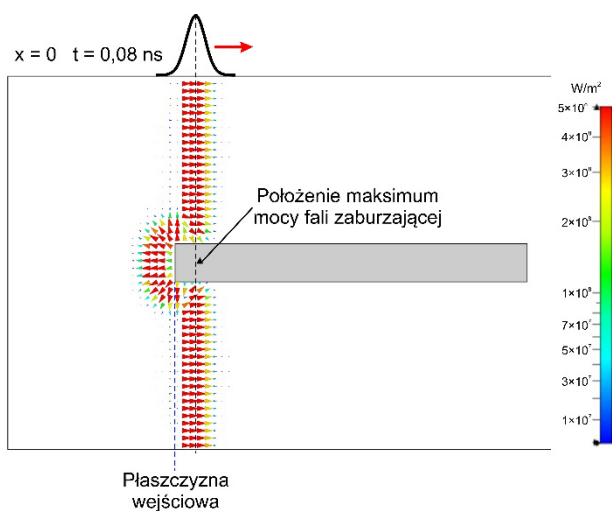
Rys. 3. Pole modułów wektora Poyntinga \vec{S} elektromagnetycznego impulsu zaburzającego (gaussowska płaska fala EM) padającego na metalowy obiekt w przekroju przez maksimum gęstości mocy $|\vec{S}|_{max}$. Widok z kierunku $+z$ w płaszczyźnie $z = +300$ mm (odległość tej płaszczyzny od płyty czołowej obiektu wynosi $68,5$ mm), $t = -0,2283$ ns. Pole jednorodne - $|\vec{S}| = 2,65 \frac{GW}{m^2}$. Wektory \vec{S} skierowane są w kierunku $-z$. Zaznaczone są kontury metalowego obiektu.

Rys. 4. przedstawia pole modułów wektora Poyntinga \vec{S} pola EM w płaszczyźnie $x = 0$ w czasie $t = 0,08$ ns, czyli w momencie odbijania się fali impulsu zaburzającego od przedniej ściany metalowego obiektu (maksimum gęstości mocy $|\vec{S}|_{max}$ impulsu zaburzającego znajduje się 24 mm za

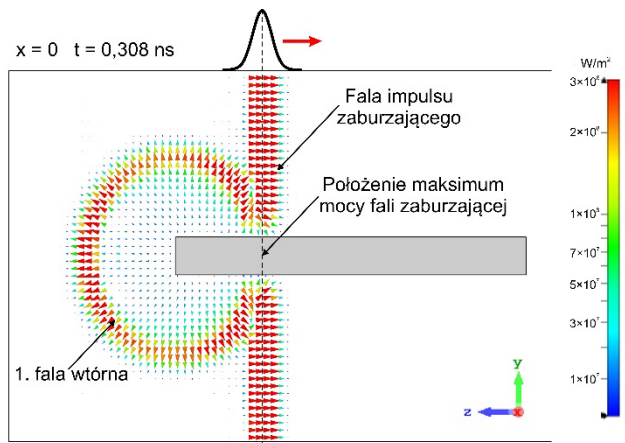
przednią ścianą metalowego obiektu. Z rys. 4 można wywnioskować, że interakcja fali impulsu zaburzącego z przednią ścianą metalowego obiektu skutkuje klasycznym odbiciem fali płaskiej od metalowej płaszczyzny (reprezentują ten fakt wektory \vec{S} prostopadłe do ściany frontowej obiektu, skierowane w kierunku $+z$) oraz emisją promieniowania EM przez przednią część obiektu a w szczególności przez jego rogi, w których następuje dynamiczna redystrybucja swobodnych elektronów. Emitowane promieniowanie ma formę sferyczną i przemieszcza się radialnie od miejsca swojego powstawania, także w kierunku propagacji impulsu zaburzącego (rys. 5). Z upływem czasu coraz wyraźniej widać, że za falą impulsu zaburzącego podąża wtórna fala EM (którą nazywamy pierwszą falą wtórną), wytworzona przez redystrybucję ładunków elektrycznych w przedniej części obudowy (rys. 6). Niesie ona w kierunku $(-z)$ część energii fali EM wyemitowanej przez przednią część obudowy w czasie około $t = 0$ ns (rys. 4). Rys. 7 pokazuje falę zaburzącą i pierwszą falą wtórną w momencie przechodzenia przez płaszczyznę ściany tylnej obiektu (płaszczyzna wyjściowa). Widoczne są straty energetyczne, jakią falą zaburząca poniosła przy przechodzeniu przez obiekt. Po czasie $t = 1,58$ ns kończy się wpływ fali zaburzącej i pierwszej fali wtórnej na obiekt.

Jednakże w momencie przechodzenia fali zaburzącej i pierwszej fali wtórnej przez tylną część obiektu, czyli w czasie około $t = 1,58$ ns, dynamicznie zmieniający się na niej ładunek elektryczny powoduje emisję promieniowania EM w formie niejednorodnej fali sferycznej. Przekrój przez tę strukturę w płaszczyźnie $y = 0$ dla czasu $t = 1,98$ ns przedstawia rys. 8. Od czasu $t = 1,58$ ns w kierunku $-z$ propagują 3 fale: fala zaburząca, pierwsza fala wtórna wytworzona przez część przednią obiektu w czasie około $t = 0$ ns i druga fala wtórna wytworzona przez część tylną obiektu w czasie około $t = 1,58$ ns.

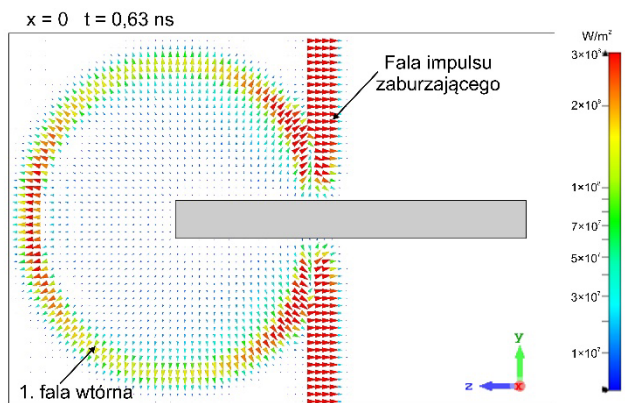
Po oddaleniu się wyżej wymienionych fal, obiekt z zakłóconą neutralnością elektryczną zaczyna wracać do stanu pierwotnego, sprzed wystąpienia zaburzenia elektromagnetycznego (następuje tzw. czas relaksacji). W tym czasie przemieszczające się wolne elektrony wytwarzają zmienne pole elektryczne i magnetyczne wokół obiektu, zaburzające w pobliżu środowisko elektromagnetyczne.



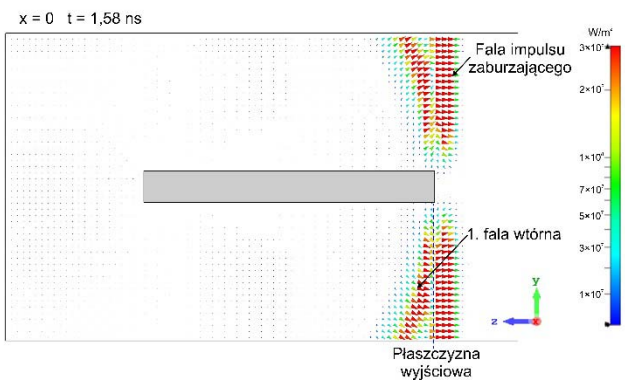
Rys. 4. Ilustracja powstawania pierwszej fali wtórnej. Pole wektorów Poyntinga pola EM w płaszczyźnie $x = 0$ w czasie $t = 0,08$ ns (moment odbijania się fali impulsu zaburzącego od przedniej ściany metalowego obiektu). Zaznaczono położenie płaszczyzny wyjściowej i maksimum impulsu zaburzącego.



Rys. 5. Rozwój pierwszej fali wtórnej. Pole wektorów Poyntinga pola EM w płaszczyźnie $x = 0$ w czasie $t = 0,308$ ns. Sferyczna fala EM wytworzona w wyniku interakcji fali impulsu zaburzącego z przednią częścią metalowego obiektu oddaliła się od miejsca swojego powstania o około 114 mm.



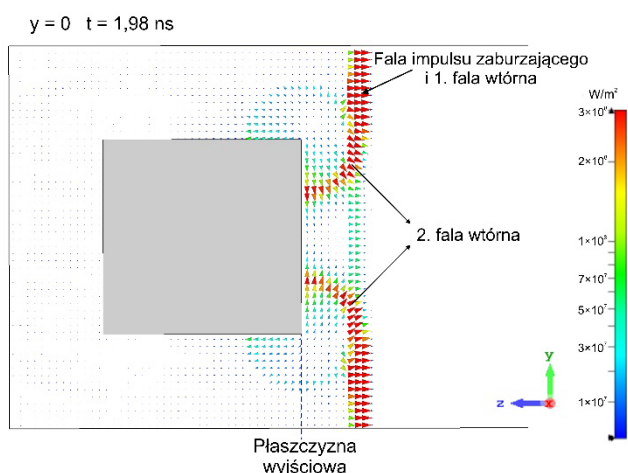
Rys. 6. Rysunek ilustrujący, że za falą impulsu zaburzącego podąża pierwsza fala wtórna wyemitowana przez przednią część obiektu w momencie interakcji z nią fali zaburzącej (w czasie około $t = 0$ ns). Czas $t = 0,63$ ns.



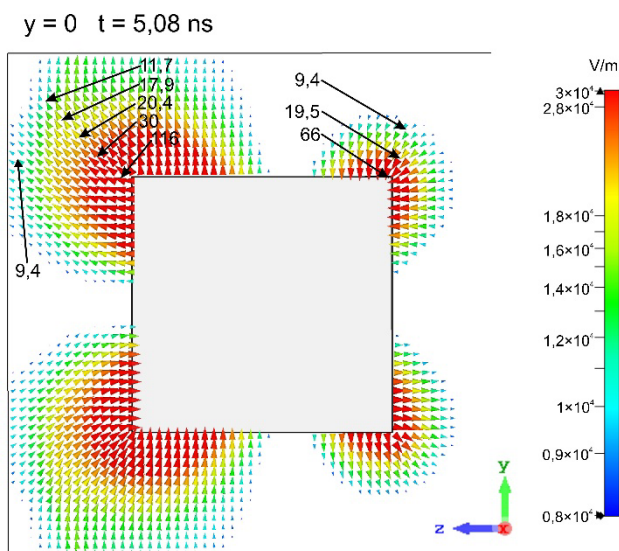
Rys. 7. Fala zaburząca i pierwsza fala wtórna w momencie przekroczenia przez płaszczyznę ściany tylnej obiektu. Czas przechodzenia $t = 1,58$ ns.

Rys. 9 przedstawia przekrój w płaszczyźnie $y = 0$ przez pole elektryczne wytwarzane przez relaksujący obiekt w czasie $t = 5,08$ ns. Dla przejrzystości, na rysunku pokazano tylko wektory pola E , których amplituda była większa od 15 kV/m. Jak widać z tego rysunku, stosunkowo silnego zaburzenia polem elektrycznym można się spodziewać w odległościach porównywalnych z wymiarami obiektu.

Z symulacji wynika, że relaksacja obiektu do stanu jego neutralności elektrycznej trwa co najmniej 30 ns po przejściu zaburzenia.



Rys. 8. Ilustracja powstawania drugiej fali wtórnej. Przekrój $y = 0$ przedstawiający falę EM wyemitowaną przez tylną część obiektu dla czasu $t = 1,98$ ns.



Rys. 9. Rysunek ilustrujący zasięg zaburzenia polem elektrycznym wytwarzanym przez obiekt w czasie jego relaksacji po przejściu zaburzenia elektromagnetycznego. Czas $t = 5,08$ ns. Wartości amplitudy pola elektrycznego w wybranych punktach są w kV/m.

Wnioski

Z wykonanej symulacji wynika, że intencjonalne impulsowe zaburzenie EM powoduje nie tylko zakłócenie elektromagnetyczne w obiekcie (lub obiektach) elektronicznym wybranym do ataku, ale oddziałuje również na środowisko elektromagnetyczne poprzez elektryzowanie innych obiektów metalowych napotkanych na drodze swojej propagacji. Te naelektryzowane obiekty mogą stać się

niepożądanymi źródłami pola EM, w tym wtórnych fal EM w czasie i po przejściu intencjonalnego impulsowego zaburzenia EM. Po przejściu Intencjonalnego zaburzenia EM naelektryzowane obiekty relaksują do stanu neutralności elektrycznej. Relaksacja ta trwa stosunkowo długo (około 30 ns) w porównaniu z czasem trwania samego impulsu zaburzącego. W tym czasie relaksujące obiekty wytwarzają wokół siebie pole elektromagnetyczne, stwarzając po intencjonalnym zaburzeniu i wywołanych przez niego wtórnych falach EM kolejne zagrożenie elektromagnetyczne dla środowiska. Niniejszy artykuł zwraca uwagę na istnienie możliwości wystąpienia tych wszystkich efektów ubocznych podczas ataków realizowanych za pomocą intencjonalnych impulsowych zaburzeń EM.

Autorzy: Jerzy Mizeraczyk, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: j.mizeraczyk@we.umg.edu.pl,
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,
Filip Falkowski, student, Uniwersytet Morski w Gdyni, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: ffalkowski@wtc.lv.

LITERATURA

- [1] 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*, 2021, 14(13), 3884
- [2] Sabath F., System oriented view on high-power electromagnetic (HPEM) effects and intentional electromagnetic interference (IEMI), *Proceedings of the XXIX URSI General Assembly*, 2008
- [3] Giri D.V., Tesche F.M. Classification of Intentional Electromagnetic Environments (IEME), *IEEE Transactions on Electro-magnetic Compatibility*, 2004, 46, no.3, pp. 322 – 328
- [4] IEC 61000-2-13, Electromagnetic compatibility (EMC) –Part 2-13: Environment – High-power electromagnetic (HPEM) environments – Radiated and conducted, First edition 2005-03
- [5] Sabath F., Threats of Electromagnetic Terrorism, *EUROEM 2012 – ONERA*, Toulouse, France, 2012, pp.17
- [6] 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*, 1998, pp. 108–110
- [7] Budnarowska M., Mizeraczyk J., Bargieł, 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, 2023, *Energies*, 16(2), 585
- [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), 2023
- [9] Microwave Studio Computer Simulation Technology (CST). Online: <http://www.cst.com> (dostęp: 1.04.2023)