

# Relaksacja elektryzacji metalowego obiektu po zakłóceniu intencjonalnym impulsowym zaburzeniem elektromagnetycznym

**Streszczenie.** W artykule opisano przeanalizowany na drodze symulacji komputerowej proces relaksacji elektryzacji metalowego obiektu po zakłóceniu intencjonalnym impulsowym zaburzeniem elektromagnetycznym (EM). Oddziaływanie EM impulsu zaburzającego na metalowy obiekt powoduje przemieszczenie się swobodnych elektronów na jego powierzchni i elektryzację obiektu. W wyniku elektryzacji na powierzchni obiektu powstają obszary elektrycznie neutralne oraz obszary o różnej polarności elektrycznej. Proces elektryzacji oraz relaksacji obiektu analizowano na podstawie zmian składowej normalnej pola elektrycznego generowanego przez obszary elektrycznie naładowane na powierzchniach obiektu. Badania wykazują, że po ustaniu oddziaływania impulsu zaburzającego na obiekt istnieje regularność w zaniku składowej normalnej pola elektrycznego na powierzchni obiektu. Relaksacja elektryzacji obiektu trwa około 20 nanosekund i obejmuje przejście przez serię modów, zmniejszając stopniowo jego naelektryzowanie i przywracając neutralność elektryczną.

**Abstract.** The article describes the computer simulation-based analysis of the relaxation process of the electrification of a metallic object following intentional impulse electromagnetic (EM) disturbances. The interaction of the EM impulse disturbance with the metallic object causes the displacement of free electrons on its surface and electrification of the object. As a result of electrification, electrically neutral areas and areas of different electrical polarity are formed on the object's surface. The process of electrification and relaxation of the object was analyzed based on changes in the normal component of the electric field generated by the electrically charged areas on the object's surfaces. The research indicates that after the cessation of the disturbing impulse's interaction with the object, there is a regularity in the decay of the normal component of the electric field on the object's surface. The relaxation of the object's electrification takes about 20 nanoseconds and involves transitioning through a series of modes, gradually reducing its electrification and restoring electrical neutrality. (**The relaxation of the electrification of a metallic object following intentional impulse electromagnetic disturbance.**)

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

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

## Wstęp

Rosnąca liczba systemów i urządzeń elektronicznych zwiększa potrzebę skupienia się na ich ochronie przed różnymi zagrożeniami elektromagnetycznymi (EM). Najpoważniejszymi z nich są tzw. intencjonalnie wytworzone środowiska elektromagnetyczne w postaci krótkotrwałych impulsów o wysokiej mocy promieniowania EM [1–6]. Środowiska te wprowadzają najwięcej zakłóceń w działaniu aparatury elektronicznej. Zakłócenia operacyjne i uszkodzenia elementów elektronicznych są efektem dużych potencjałów indukowanych w urządzeniach elektronicznych przez intencjonalne impulsy zaburzające. Skutkiem ich działania są fale przepięciowe, wyładowania elektrostatyczne i uszkodzenia złączy półprzewodnikowych.

Najefektywniejszym sposobem ochrony urządzeń i systemów elektronicznych przed intencjonalnymi zaburzeniami EM jest tzw. ekranowanie EM. Ekranowanie EM może być realizowane przy pomocy różnego rodzaju metalowych obudów, w których umieszcza się wrażliwe urządzenia elektroniczne. Niestety, pełne obudowy nie są praktyczne, ponieważ bardzo często umieszczone w nich urządzenia elektroniczne wymagają wentylacji i dostępu do zasilania, co sprawia, że ochrona EM nie jest idealna. Stopień zakłóceń EM spowodowanych przez zewnętrzne zaburzenia EM zależy od sposobu ich sprężenia z obudowami i wnętrzem urządzeń. Problem ten został opisany w wielu publikacjach (m.in. [1, 7, 8]).

Choć wiele prac skupiło się na ochronie obiektów przed celowymi atakami za pomocą impulsów EM, mało uwagi lub w ogóle poświęcono zjawiskom towarzyszącym takim atakom w środowisku, przez które porusza się intencjonalny impuls zaburzający.

Intencjonalne zaburzenie EM zostaje z zasady wygenerowane w miejscu odległym od atakowanego obiektu. Można przyjąć, że dostatecznie daleko od generatora zaburzenie EM ma postać elektromagnetycznego impulsu fali „płaskiej” o stosunkowo dużych wymiarach poprzecznych. Na drodze do celu impuls

ten może oddziaływać „przypadkowo” z obiektami metalowymi, które znajdują się w jego zasięgu. Oddziaływanie to spowoduje elektryzację tych obiektów, polegającą na redystrybucji swobodnych elektronów na ich metalowych powierzchniach. Obiekty te przestają być elektrycznie neutralne. W publikacji [KKE 2023] pokazaliśmy, że obiekty metalowe naelektryzowane impulsem EM stają się źródłami wtórnych zaburzeń EM, stanowiących uboczny efekt działania intencjonalnego zaburzenia EM zmierzającego w kierunku celu swojego ataku. Wtórne zaburzenia EM są generowane nie tylko w czasie oddziaływania zaburzającego impulsu EM z obiektem. Po minięciu obiektu przez impuls zaburzający, czyli po ustaniu bezpośredniej interakcji impulsu zaburzającego z obiektem, obiekt jest nadal naelektryzowany. Zaczyna się proces relaksacji elektryzacji obiektu i powrotu do stanu neutralności elektrycznej. W czasie tego procesu obiekt jest nadal zdolny do generacji wtórnych zaburzeń EM do otoczenia.

Celem niniejszej pracy jest przeanalizowanie na drodze symulacji komputerowej procesu relaksacji elektryzacji metalowego obiektu po zakłóceniu intencjonalnym impulsowym zaburzeniem elektromagnetycznym.

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/m<sup>2</sup>. Parametry te są typowe dla impulsów, który są przewidywane, że mogą być użyte w ataku EM.

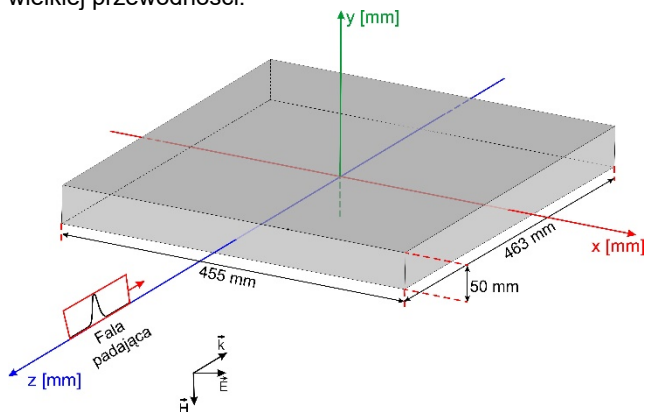
Obiektem jest zamknięte metalowe pudełko o wymiarach typowych dla małych obudów ekranujących [1, 7, 8].

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

## Zamknięty obiekt metalowy

Schemat badanego obiektu metalowego przedstawiono na rys. 1. Wymiary zewnętrzne prostopadłościennego

objektu wynoszą odpowiednio: szerokość 455 mm x wysokość 50 mm x głębokość 463 mm. Grubość ścianek obiektu wynosi 1 mm. W badaniach symulacyjnych przyjęto, 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 obiektu. Elektromagnetyczna fala płaska propaguje w kierunku  $-z$ . Wektor  $\vec{k}$  wskazuje kierunek propagacji fali.

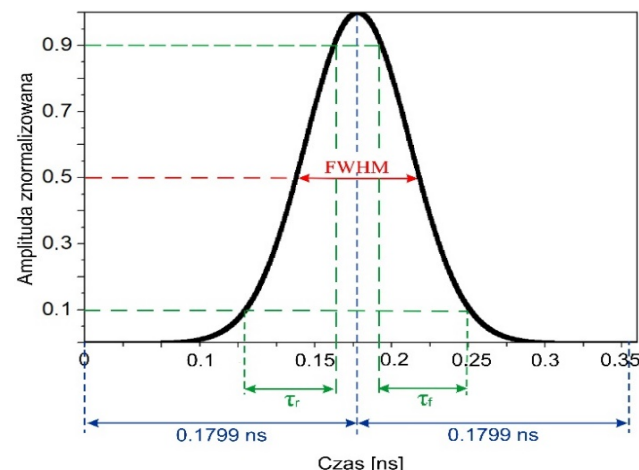
### Metoda symulacyjna

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  $t$

Impuls płaskiej fali EM pada prostopadle na ścianę frontową badanego obiektu. Wektor natężenia pola elektrycznego  $E$  ma kierunek  $+x$  a wektor natężenia pola magnetycznego  $H$  - kierunek  $-y$  (rys. 1). Wektor Poyntinga padającej fali ma kierunek  $-z$ . Ponieważ wektor natężenia pola elektrycznego  $E$  ma kierunek równoległy do górnej i dolnej ściany obiektu, mówimy, że padająca fala ma polaryzację równoległą.

Parametry impulsu płaskiej fali EM są następujące: amplituda natężenia pola elektrycznego  $E$  -  $10^6$  V/m (dla  $t = 0,1779$  ns), amplituda natężenia pola magnetycznego  $H$  -  $2,68 \cdot 10^3$  A/m (dla  $t = 0,1779$  ns), połowkowy 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  $t = 0,1779$  ns) -  $2,65$  GW/m<sup>2</sup>.

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) obiektu metalowego ( $z = +231,5$  mm) przyjmujemy za czas  $t = 0$ . W czasie około  $t = 1,54$  ns maksimum amplitudy impulsu płaskiej fali EM znajduje się w płaszczyźnie wyjściowej ściany tylnej obiektu. Znaczy to, że impuls mijają badany obiekt.

### Wyniki badań symulacyjnych

Oddziaływanie zaburzającego subnanosekundowego elektromagnetycznego (EM) impulsu fali płaskiej na metalowy obiekt powoduje przemieszczenie (migrację) swobodnych elektronów na powierzchni obiektu, wskutek czego dokonuje się jego elektryzacja, polegająca na powstaniu na powierzchni obiektu trzech rodzajów obszarów: elektrycznie neutralnych i obszarów o odmiennej polarności elektrycznej, ujemnej i dodatniej.

Procesy elektryzacji obiektu a następnie jego powrotu do neutralności elektrycznej, fizycznie wyrażające się migracją swobodnych elektronów, można śledzić obserwując składową normalną pola elektrycznego generowanego przez obszary elektrycznie naładowane na powierzchniach obiektu. Wynika to stąd, że moduł składowej normalnej pola elektrycznego  $E_n$  jest proporcjonalny do gęstości powierzchniowej ładunku elektrycznego  $\sigma_s$  ( $E_n = \frac{\sigma_s}{\epsilon_0}$ , gdzie  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  F/m jest przenikalnością elektryczną próżni) na powierzchni metalowego obiektu. Rysunki przedstawiające rozkład wektorów modułu składowej normalnej pola elektrycznego  $E_n$  na powierzchni obiektu pokazują także, jaki jest rozkład ładunku elektrycznego na tej powierzchni.

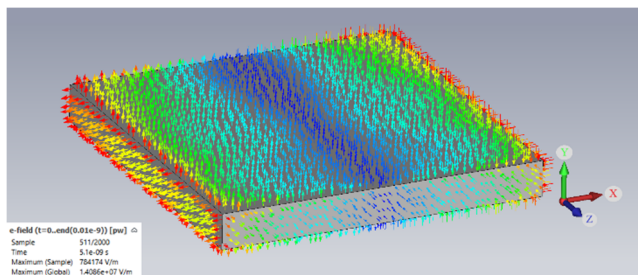
Proces relaksacji elektryzacji obiektu zaczyna się po przejściu impulsu zaburzającego przez obiekt, tj. po czasie około  $t = 1,54$  ns. W tym momencie ładunek elektryczny jest rozłożony na powierzchniach obiektu bardzo nierównomiernie. Skutkuje to powstaniem sił elektrycznych, które starają się doprowadzić obiekt do stanu neutralności elektrycznej.

Z obserwacji zachowania się składowej normalnej pola elektrycznego na powierzchni obiektu wynika, że po czasie około 4 ns po ustaniu oddziaływania impulsu na obiekt zachodzi pewna regularność w zaniku składowej normalnej pola elektrycznego (i obszarów elektronów swobodnych) na powierzchni obiektu. Regularność ta objawia się tym, że powrót obiektu do stanu neutralności elektrycznej poprzez powtarzające się transformacje tzw. charakterystycznych powierzchniowych struktur składowej normalnej pola elektrycznego (i rozkładów powierzchniowej gęstości elektronów swobodnych), nazwanych przez nas modami.

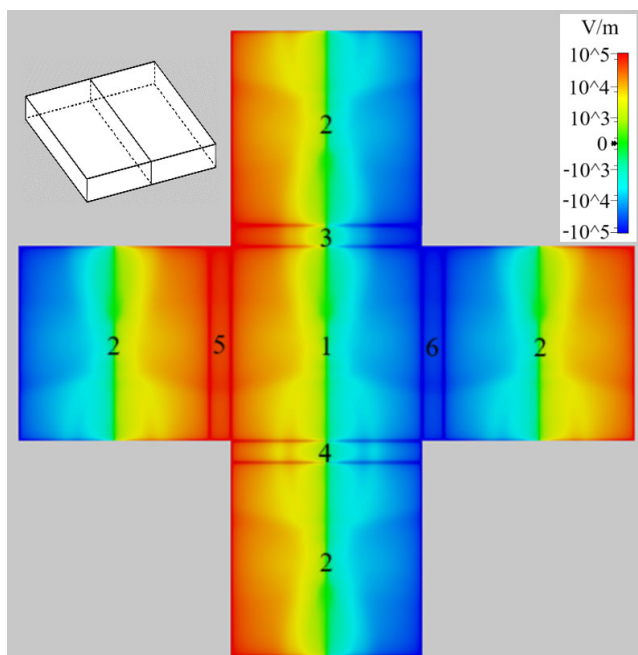
Na rys. 3 przedstawiona jest pierwsza charakterystyczna struktura rozkładu składowej normalnej pola elektrycznego (a także ładunku elektrycznego) na powierzchni obiektu. Występuje ona w czasie  $t = 4,37$  ns.

Z pierwszej charakterystycznej struktury rozkładu składowej normalnej pola elektrycznego występująca na powierzchni obiektu w chwili  $t = 4,37$  ns (rys 3 i 4) wynika, że rozkład ładunków elektrycznych na powierzchni obiektu jest taki, że przemieszczone elektrony swobodne zdominowały pod względem elektrycznym prawą połowę

obiektu (powierzchnie ze współzrędnymi  $x > 0$ ), czyniąc z niej obszar o ujemnym ładunku elektrycznym. Zubożona w elektrony swobodne lewa połowa obiektu jest elektrycznie dodatnia.



Rys. 3 Rozkład składowej normalnej pola elektrycznego  $E$  na powierzchni obiektu w czasie  $t = 4,37$  ns. W wersji elektronicznej po powiększeniu rysunku wyraźnie widać obszary o ładunku ujemnym (zgromadzone elektrony swobodne, wektory  $E$  skierowane do powierzchni) i obszary o ładunku ujemnym (zubożone w elektrony swobodne, wektory  $E$  skierowane do powierzchni).

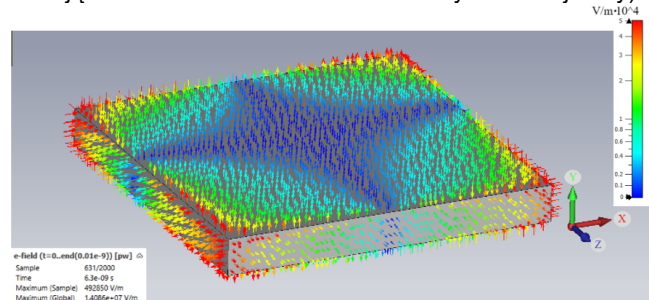


Rys. 4 Rozkład składowej normalnej pola elektrycznego (i ładunku w czasie  $t = 4,37$  ns na powierzchniach obiektu rozłożonego na ściany. Widok z góry na ścianę górną – 1. 2 – ściana dolna, 3 – ściana tylna, 4 – ściana frontowa, 5 – ściana lewa boczna, 6 – ściana prawa boczna. Obszary w odcieniach zielono-niebieskich – ładunek ujemny, obszary w odcieniach żółto-czerwonych – ładunek dodatni.

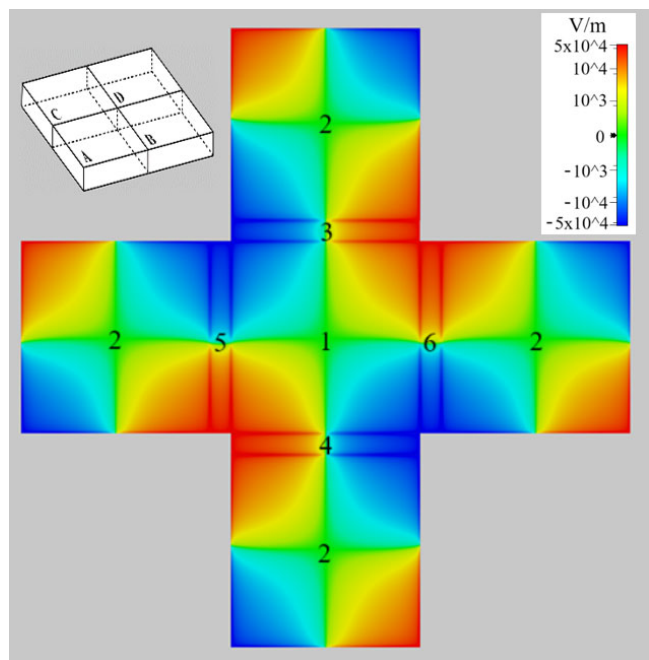
Strukturę rozkładu składowej normalnej pola elektrycznego występująca na powierzchni obiektu w chwili  $t = 4,37$  ns nazwaliśmy modem z lewą połową obiektu o dodatniej elektryczności i prawą połową o ujemnej elektryczności (lub krótko modem  $+50/-50$ ).

Po czasie  $t = 4,37$  ns kontynuowany był proces relaksacji elektryzacji obiektu. Następowala transformacja modu  $+50/-50$  w następny mod charakterystyczny, którego struktura jest przedstawiona na rys. 5 i 6. W czasie od  $t = 4,37$  ns do czasu  $t = 5,57$  ns elektrony swobodne, przemieściły się w taki sposób, że prostopadłościenny obiekt pod względem elektrycznym podzielił się w przybliżeniu na 4 kwazi-kwadranty A, B, C i D (4 prostokąty o zbliżonej długości). W czasie  $t = 5,57$  ns kwazi-kwadranty A i D mają ładunek dodatni a kwazi-kwadranty B i C – ładunek ujemny, o największej gęstości

na powierzchniach przy swoich zewnętrznych rogach. Pomiędzy tymi obszarami o wyraźnej polarności elektrycznej znajdują się wąskie powierzchnie elektryczne kwazineutralne, tworzące strefę przejściową między powierzchniami o przeciwnych polarnościach elektrycznych. Widać więc, że w czasie od  $t = 4,37$  ns do czasu  $t = 5,57$  ns nastąpiła transformacja modu charakterystycznego  $+50/-50$  w nowy mod charakteryzujący się kwazi-kwadrantowym rozkładem polarności elektrycznej. Ten nowy mod nazwaliśmy modem kwazi-kwadrantowym o dodatnio naładowanym lewym frontowym rogu (kwazi-kwadranty A i D mają ładunek dodatni a kwazi-kwadranty B i C – ujemny).



Rys. 5 Rozkład składowej normalnej pola elektrycznego  $E$  na powierzchni obiektu w czasie  $t = 5,57$  ns:



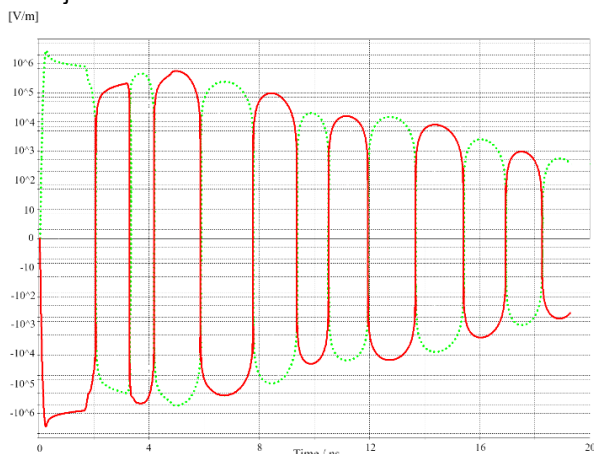
Rys. 6 Rozkład składowej normalnej pola elektrycznego (i ładunku w czasie  $t = 5,57$  ns na powierzchniach obiektu rozłożonego na ściany. Inne informacje jak na rys. 4.

Z dalszej obserwacji relaksacji naelektryzowania obiektu wynika, że mod kwazi-kwadrantowy o dodatnio naładowanym lewym frontowym rogu ( $t = 4,47$  ns) transformuje w nowy mod, nazwany przez nas modem kwazi-kwadrantowy o ujemnie naładowanym lewym frontowym rogu ( $t = 6,52$  ns). Inaczej mówiąc, następuje przeładowanie kwazi-kwadrantów (kwadranty A i D mają ładunek ujemny a kwazi-kwadranty B i C – dodatni).

Po czasie  $t = 6,52$  ns kontynuowana jest periodyczność transformacji modów kwazi-kwadrantowych w sekwencji: mod o ujemnie naładowanym lewym rogu - mod o dodatnio naładowanym lewym rogu - mod o ujemnie naładowanym lewym rogu itd. Proces ten prześledziliśmy do czasu około  $t = 20$  ns.

Podczas transformacji każdego modu charakterystycznego w następny zachodzi migracja części elektronów swobodnych do poprzednio opuszczonych miejsc na powierzchni obiektu. Skutkuje to stopniowym zmniejszeniem elektryfikacji obiektu i powrotem obiektu do stanu neutralności elektrycznej.

Proces stopniowego zmniejszenia elektryfikacji obiektu i powrotu obiektu do stanu neutralności elektrycznej wygodnie jest zilustrować za pomocą wykresu zmian czasowych składowej normalnej pola elektrycznego w rogach kwazi-kwadrantów. Na rys. 7 przedstawione jest natężenie pola elektrycznego (i proporcjonalnie gęstość ładunku elektrycznego) w rogach kwazi-kwadrantów A i B w funkcji czasu.



Rys. 7 Natężenie pola elektrycznego w rogach kwazi-kwadrantów A i B w funkcji czasu. Linia czerwona- kwazi-kwadrant A, linia zielona – kwazi-kwadrant B.

Z analizy wykresów przedstawionych na rys. 7 wynika, że po czasie około 4,50 ns (początek okresowego zaniku naelektryzowania obiektu) natężenie pola elektrycznego na rogach kwadrantów A i B maleje w przybliżeniu wykładniczo ze stałą czasową zaniku  $\tau_z = 2,44$  ns. Znaczący to, że dopiero po czasie około 19 ns po interakcji impulsu zaburzającego z obiektem elektryzacja maleje o 70 dB, czyli obiekt staje się prawie elektrycznie neutralny. Należy jednak uznać, że przynajmniej w ciągu kilku nanosekund po ustaniu interakcji impulsu zaburzającego z obiektem, obiekt naelektryzowany przez impuls będzie źródłem stosunkowo silnego zaburzenia polem elektrycznym, zanieczyszczającym środowisko elektromagnetyczne co najmniej w odległościach porównywalnych z wymiarami obiektu (rys. 8).

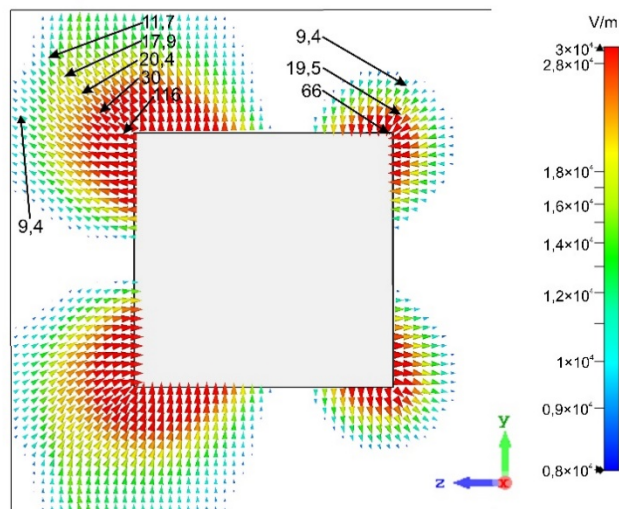
### Podsumowanie

W poprzedniej publikacji [KKE 2023] przedstawiliśmy, że intencjonalne impulsowe zaburzenie EM powoduje nie tylko zakłócenie elektromagnetyczne w obiekcie 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.

W niniejszej pracy, bazując na wynikach symulacji numerycznej prześledziliśmy przebieg relaksacji elektryzacji obiektu metalowego. Relaksacja ta trwa co najmniej około 20 ns po ustaniu interakcji impulsu zaburzającego z obiektem, czyli znacznie dłużej niż czas trwania samego impulsu zaburzającego. Wykonane badania symulacyjne odślniły bardzo interesujący mechanizm relaksacji

elektryzacji obiektu metalowego, polegający na okresowej transformacji tzw. modów kwazi-kwadrantowych rozkładu pola elektrycznego (i ładunku elektrycznego) na powierzchniach obiektu. Wyniki te są nowością w zakresie elektryzacji obiektów metalowych.

$y = 0 \quad t = 5,08$  ns



Rys. 8. 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

**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)