

Mgr inż. Magdalena Budnarowska

**STRESZCZENIE  
ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

**pt.**

**Symulacyjne badania numeryczne wnikania impulsów  
elektromagnetycznych dużej mocy do małej obudowy ekranującej  
z perforacją technologiczną – skuteczność ekranowania wnętrza  
obudowy przed impulsami elektromagnetycznymi**

Promotor: Prof. dr hab. inż. Jerzy Mizeraczyk

Promotor pomocniczy: Dr inż. Ryszard Studański

Gdynia 2024

W niniejszej rozprawie doktorskiej Doktorantka zajmuje się problematyką wnikania subnanosekundowych impulsów elektromagnetycznych (EM) dużej mocy do małych metalowych obudów ekranujących z perforacjami technologicznymi, wychodząc naprzeciw zapotrzebowaniu zarówno na głębsze poznanie mechanizmów oddziaływania zaburzających impulsów EM z obiektami metalowymi służącymi do minimalizacji skutków intencjonalnych ataków EM, jak i na nowe metody ilościowej oceny skuteczności ekranowania urządzeń (i elementów) elektronicznych przez te obiekty. Zgodnie z tą motywacją Doktorantka podejmuje się w rozprawie zadania, którego celem było poznanie procesu wnikania subnanosekundowego impulsu płaskiej fali EM do wnętrza niewysokiej metalowej obudowy ekranującej z perforacją technologiczną, prześledzenie tworzenia się i rozwoju pola elektromagnetycznego we wnętrzu tej obudowy a także opracowanie metody ilościowej oceny skuteczności ekranowania wnętrza obudowy przed intencjonalnymi zaburzeniami EM.

Doktorantka sformułowała następującą tezę badawczą: możliwe jest określenie skuteczności antyelektromagnetycznego ekranowania wnętrza niewysokiej metalowej obudowy z perforacją technologiczną na podstawie analizy symulacji procesu wnikania subnanosekundowego impulsu płaskiej fali EM dużej mocy do jej wnętrza.

Do rozwiązania postawionego skomplikowanego problemu badawczego i udowodnienia tezy rozprawy doktorskiej Doktorantka wybrała metodę symulacji numerycznej.

Obiektem badań Doktorantki jest metalowa niewysoka prostopadłościenna obudowa ekranująca z perforacją technologiczną. Wymiary zewnętrzne badanej obudowy wynoszą: szerokość: 455 mm x wysokość: 50 mm x głębokość: 463 mm. Zostały one tak dobrane, aby obudowa ekranująca pomieściła typowe urządzenia elektroniczne, często wymieniane jako wymagające ochrony antyelektromagnetycznej (standardowy 17 calowy laptop, telefon komórkowy oraz dwie przenośne pamięci komputerowe niewielkich gabarytów). Założono, że ściany prostopadłościanu obudowy ekranującej są doskonałym przewodnikiem (czyli tzw. Perfect Electric Conductor - PEC) o grubości 1 mm. Na środku przedniej ściany obudowy znajduje się prostokątna perforacja technologiczna (nazywana dalej otworem) o wymiarach 30 mm x 80 mm, imitująca otwór wentylacyjny i przepustowy dla przewodów zasilająco-telekomunikacyjnych.

Zaburzającym impulsem EM jest subnanosekundowy impuls płaskiej fali EM o kształcie gaussowskim. Impuls taki jest dobrym przybliżeniem impulsu, jaki najprawdopodobniej zostanie użyty w ewentualnym ataku EM. Przyjęto, że impuls zaburzający pada prostopadle na przednią ścianę obudowy ekranującej, w której znajduje się otwór. Jest to przypadek tzw.

padania normalnego. Badania obejmują analizę dwóch polaryzacji impulsu zaburzającego: pionową i równoległą. W przypadku polaryzacji pionowej wektor natężenia pola elektrycznego normalnie padającego impulsu fali płaskiej jest skierowany prostopadle do największych ścian (dolnej i górnej) obudowy (również do dłuższych krawędzi otworu). W przypadku polaryzacji równoległej wektor natężenia pola elektrycznego normalnie padającego impulsu fali płaskiej jest skierowany równoległe do dolnej i górnej ściany obudowy (również do dłuższych krawędzi otworu). Doktorantka przeprowadziła także krótkie, testowe symulacje dla przypadku impulsu zaburzającego z tzw. polaryzacją skręconą. Wykonane przez nią testy wykazały, że pod względem obliczeniowym środowisko symulacyjne CST Studio „radzi” sobie także z tym przypadkiem. Jednakże otrzymane wyniki okazały się trudne interpretacyjnie i mało przydatne pod względem merytorycznym.

Przedmiotem badań wykonanych przez Doktorantkę jest czasowy i przestrzenny rozkład pola elektrycznego i pola magnetycznego wewnątrz obudowy ekranującej po wniknięciu do niej elektromagnetycznego impulsu zaburzającego dużej mocy oraz skuteczność ekranowania wnętrza obudowy przed tym zaburzeniem.

Rozprawa doktorska składa się z 11 rozdziałów:

Rozdział 1 jest wprowadzeniem do tematyki badawczej rozprawy. Składa się on z 3 podrozdziałów.

Podrozdział 1.1 zawiera klasyfikację naturalnych i intencjonalnych zaburzeń elektromagnetycznych dużej mocy, opis metod ekranowania promieniowania EM z ukierunkowaniem na obudowy ekranujące oraz omówienie parametrów stosowanych do opisu skuteczności ekranowania obiektów przed promieniowaniem EM. W tym podrozdziale została także wprowadzona i omówiona autorska definicja tzw. globalnej skuteczności ekranowania.

W podrozdziale 1.2 przedstawiony jest problem badawczy. Jest nim przeanalizowanie przydatności niewysokiej prostopadłościenną metalowej obudowy z perforacją technologiczną do ekranowania wrażliwych urządzeń (lub elementów) elektronicznych przed atakiem intencjonalnych EM impulsów zaburzających. W podrozdziale tym sprecyzowane zostały cel oraz teza rozprawy doktorskiej. Postawiony problem naukowy Doktorantka postanowiła zrealizować za pomocą numerycznej symulacji procesu wnikania EM impulsu zaburzającego do wnętrza obudowy.

W następnym podrozdziale 1.3 przedstawiona została struktura rozprawy doktorskiej.

W rozdziale 2 opisana została wybrana numeryczna metoda symulacyjna. Metoda ta opiera się na zastosowaniu komercyjnego środowiska CST Studio Suite do symulacji oddziaływania promieniowania elektromagnetycznego z obiektami trójwymiarowymi (3D).

W rozdziale 3 zaprezentowano prostopadłościenną metalową obudowę ekranującą z perforacją technologiczną o kształcie prostokątnego otworu w przedniej ścianie obudowy, wybraną jako obiekt symulowanego ataku subnanosekundowego impulsu płaskiej fali EM.

W rozdziale 4 przedstawiono zaburzający subnanosekundowy impuls płaskiej fali EM, którego, według literatury, parametry są zbliżone do parametrów najbardziej prawdopodobnych intencjonalnych zaburzeń EM.

Rozdział 5 jest krótkim wprowadzeniem do następnych rozdziałów rozprawy doktorskiej. Przedstawiono w nim model fizyczny oddziaływania impulsu EM z powierzchniami metalowymi, opracowany zgodnie z literaturową wiedzą empiryczną. Z modelu tego Doktorantka wywnioskowała, że podstawowym efektem oddziaływania pola EM z powierzchniami metalowymi jest redystrybucja elektronów swobodnych na tych powierzchniach. Wymuszona polem EM migracja elektronów swobodnych skutkuje powstaniem na powierzchniach metalowych obszarów o odmiennej polarności elektrycznej, które stają się wtórnymi źródłami pola elektrycznego kształtującymi pole EM w obudowie i w jej otoczeniu. Doktorantka postawiła hipotezę, że śledzenie migracji elektronów swobodnych na zewnętrznych i wewnętrznych powierzchniach metalowej obudowy ekranującej może być kluczowe dla analizy innych zjawisk wynikających z oddziaływania pola EM z metalową obudową (np. dla analizy przepływu prądu na powierzchniach obudowy). Zgodnie z tą hipotezą badanie migracji elektronów swobodnych na powierzchniach obudowy ekranującej stały się ważnym elementem niniejszej rozprawy doktorskiej.

Rozdział 6 zawiera 4 podrozdziały, w których Doktorantka prezentuje wyniki własnych badań symulacyjnych procesu wnikania zaburzającego impulsu EM do metalowej obudowy oraz rozwoju pola EM w jej wnętrzu dla przypadku impulsu zaburzającego o polaryzacji pionowej.

Podrozdział 6.1 dotyczy wizualizacji 3D i 2D procesu wnikania i rozwoju pola elektromagnetycznego wewnątrz obudowy dla przypadku pionowej polaryzacji zewnętrznego impulsu zaburzającego. Prezentowane są w nim mapy 3D i 2D rozkładów sprzężonych ze sobą pól: pola elektrycznego i pola magnetycznego. Rozwój pola EM wewnątrz obudowy przebiega w taki sposób, że można go podzielić na dwie fazy: fazę falową i fazę interferencyjną. W pierwszej, falowej fazie (rys. 6) rozwoju pola elektromagnetycznego wewnątrz obudowy powstają najpierw pierwotne a potem wtórne (np. po odbiciu się fal pierwotnych od ścian

bocznych obudowy) fale elektromagnetyczne składające się ze sprzężonych fal elektrycznych i magnetycznych o kształcie niepełnych pierścieni o przekroju podłużnym podobnym do sierpa Księżyca i prostokątnym przekroju poprzecznym (np. rys. 6Ei i 6Hi oraz rys. 7Ei i 7Hi). W następnej, interferencyjnej fazie pole EM wewnątrz obudowy wyrażone przez moduły pola elektrycznego i magnetycznego ma postać skomplikowanych przestrzennych form geometrycznych, trudnych do zobrazowania (rys. 6). W takiej sytuacji wygodnie jest opisać pole EM wewnątrz obudowy, przedstawiając je na wybranych przekrojach (2D) wnętrza obudowy. Otrzymuje się wówczas dwuwymiarowe rozkłady pola EM we wnętrzu obudowy nazwane ze względu na zazwyczaj nietypową geometrię mozaikami interferencyjnymi pola elektrycznego i magnetycznego (rys. 7). Fale pierwotne i wtórne oraz mozaiki interferencyjne pola elektrycznego i magnetycznego przemieszczają się od przedniej do tylnej ściany obudowy, doznając od nich kolejnych odbić. Część energii tego oscylującego pola EM „wypływa” z obudowy przez otwór przy kolejnych odbiciach od ściany przedniej, wskutek czego natężenie pola elektrycznego i magnetycznego wewnątrz obudowy maleje w czasie. W obu fazach rozwoju rozkłady pola elektrycznego i magnetycznego we wnętrzu obudowy są symetryczne względem osi z.

Zgodnie z motywacją przedstawioną w rozdziale 5 w podrozdziale 6.2 zaprezentowano i przeanalizowano rozkłady powierzchniowego ładunku elektrycznego na wewnętrznych ścianach obudowy, śledząc migrację elektronów swobodnych na tych powierzchniach. Powierzchniowe gęstości ładunku elektrycznego na ścianach obudowy, wyznaczone zostały ze składowej normalnej pola elektrycznego, korzystając z proporcjonalności między tymi wielkościami. Z analizy wykonanych symulacji wynika, że wskutek migracji elektronów swobodnych powstają lokalnie na wewnętrznych ścianach obudowy pary obszarów („wysp”) ładunku elektrycznego o przeciwnych polarnościach, dodatniej i ujemnej. Pary te zostały nazwane w tej rozprawie „parami wysp komplementarnych ładunków elektrycznych”. Stają się one razem z tą częścią impulsu zaburzającego, która bezpośrednio wnika przez otwór do obudowy współzródłem pola EM we wnętrzu obudowy. We wczesnej fazie wnikania impulsu zaburzającego do wnętrza obudowy pary wysp komplementarnych ładunków elektrycznych pojawiają się w obszarach przy dłuższych krawędziach otworu na wewnętrznej stronie przedniej ściany obudowy. Wyspy tworzące pary położone są po przeciwnych stronach otworu. W miarę wnikania impulsu zaburzającego w głąb obudowy powierzchnie istniejących par wysp komplementarnych ładunków elektrycznych rosną, obejmując swoim obszarem wewnętrzne powierzchnie dolnej i górnej ściany obudowy. Równocześnie przy dłuższych krawędziach otworu na wewnętrznej stronie przedniej ściany obudowy powstają nowe pary wysp

komplementarnych ładunków elektrycznych. Istniejące i nowotworzące się pary wysp komplementarnych ładunków elektrycznych przemieszczają się w głąb obudowy (rys. 11 i 12). Pola elektryczne wytworzone przez pary wysp komplementarnych ładunków elektrycznych tworzą razem z tą częścią pola elektrycznego impulsu zaburzającego, która bezpośrednio wnika do obudowy charakterystyczne falowe struktury elektryczne o geometrii niepełnych pierścieni. Pierścienie te w przekroju podłużnym mają kształt sierpa Księżyca a w przekroju poprzecznym – prostokąta. Istnienie fal o takim kształcie zostało już zauważone i opisane wcześniej w podrozdziale 6.1 dotyczącym wizualizacji 3D i 2D rozwoju pola EM w obudowie. Wybrane przykłady charakterystycznych struktur elektrycznych we wczesnej fazie rozwoju pola EM we wnętrzu obudowy przedstawione są na rys. 25 i 26. Warto je skonfrontować ze strukturami przedstawionymi odpowiednio na rys. 6Ed (lub 6Ee) i 6Eg w podrozdziale 6.1. Wyjaśnienie w podrozdziale 6.2 związku między ładunkiem elektrycznym na wewnętrznych ścianach obudowy a polem EM we wnętrzu obudowy jest potwierdzeniem przewidywań ważności śledzenia zachowania się ładunku elektrycznego na wewnętrznych powierzchniach obudowy, przedstawionych w rozdziale 5.

W podrozdziale 6.3 zaprezentowano wyniki badań rozkładów normalnego pola elektrycznego (subpodrozdział 6.3.1), stycznego pola magnetycznego (subpodrozdział 6.3.2) oraz ładunku elektrycznego i prądu powierzchniowego (subpodrozdział 6.3.3) na zewnętrznych ścianach obudowy. Badania tych parametrów EM na zewnętrznych ścianach obudowy były motywowane owocnymi wynikami śledzenia rozkładów ładunku elektrycznego na wewnętrznych ścianach obudowy (podrozdział 6.2). Należało bowiem oczekiwać, że również zjawiska elektromagnetyczne zachodzące na zewnętrznych ścianach obudowy, a w szczególności na powierzchniach przyległych do otworu, mogą mieć wpływ na procesy elektromagnetyczne we wnętrzu obudowy.

Z prezentowanych w subpodrozdziale 6.3.1 rozkładów pola elektrycznego na zewnętrznych powierzchniach obudowy wynika, że impuls zaburzający powoduje powstanie składowej normalnej pola elektrycznego na zewnętrznych powierzchniach górnej i dolnej ściany obudowy. Wektory składowej normalnej pola elektrycznego na tych powierzchniach układają się w wąski „pas” wektorów pola elektrycznego o profilu gaussowskim w swoim przekroju poprzecznym. Rozciąga się on od lewej do prawej ściany bocznej obudowy. Pas ten przemieszcza się po górnej i dolnej ścianie obudowy (rys. 13a-13h) w kierunku  $-z$ , podobnie jak impuls zaburzający. Oprócz charakterystycznego pasa pola elektrycznego warto zwrócić uwagę na względnie duże wartości składowej normalnej pola elektrycznego, szczególnie w początkowej fazie oddziaływania impulsu zaburzającego z obudową, na dolnej i górnej

krawędzi przedniej ściany obudowy, dolnej i górnej krawędzi otworu oraz na rogach ściany przedniej. Natężenie składowej normalnej pola elektrycznego w tych obszarach rośnie w miarę zbliżania się maksimum impulsu zaburzającego do płaszczyzny ściany przedniej i maleje, kiedy maksimum impulsu zaburzającego oddala się od ściany przedniej obudowy.

W subpodrozdziale 6.3.2 zaprezentowano rozkłady stycznego pola magnetycznego na powierzchni obudowy, które towarzyszy polu elektrycznemu opisanemu w poprzednim podrozdziale. Główną formą stycznego pola magnetycznego na zewnętrznych powierzchniach obudowy jest tak jak w przypadku pola elektrycznego wąski pas gaussowski rozciągający się od lewej do prawej ściany bocznej, który przemieszcza się w kierunku  $-z$ , zgodnie z kierunkiem impulsu zaburzającego. Podobnie jak w przypadku pola elektrycznego największe styczne pole magnetyczne występuje na powierzchni ściany przedniej w pobliżu otworu w momencie, kiedy impuls zaburzający przemieszcza się przez płaszczyznę ściany przedniej. Styczne pole magnetyczne utrzymuje się w tym obszarze nawet po tym, jak impuls zaburzający oddala się od ściany przedniej na odległość równą połowie długości obudowy.

W subpodrozdziale 6.3.3 zostały przedstawione rozkłady ładunków elektrycznych i prądu powierzchniowego na zewnętrznych powierzchniach obudowy. Umożliwiają one razem z rozkładami pola elektrycznego i magnetycznego opisanymi w poprzednich subpodrozdziałach 6.3.1 i 6.3.2 na pełniejsze zrozumienie korelacji między polem elektrycznym, polem magnetycznym, powierzchniową gęstością ładunku elektrycznego i prądem powierzchniowym na zewnętrznych powierzchniach obudowy.

Korzystając z wyników otrzymanych we wcześniejszych podrozdziałach, w podrozdziale 6.4 przedstawiono autorski model wnikania impulsu elektromagnetycznego o polaryzacji pionowej do wnętrza obudowy. Zgodnie z tym modelem część impulsu zaburzającego wnika przez otwór do wnętrza obudowy, inicjując powstanie i rozwój par wysp komplementarnych ładunków elektrycznych na wewnętrznych powierzchniach obudowy, które generują pole elektryczne we wnętrzu obudowy. We wczesnym etapie wnikania impulsu zaburzającego pole elektryczne, które wnika do wnętrza obudowy przez otwór oraz pole elektryczne wytworzone przez pary wysp komplementarnych ładunków elektrycznych tworzą we wnętrzu obudowy charakterystyczne falowe struktury elektryczne o geometrii niepełnego pierścienia o przekroju podłużnym podobnym do sierpa Księżyca i prostokątnym przekroju poprzecznym. Podstawami tego pierścienia jest para wysp komplementarnych ładunków elektrycznych (rys. 25 i 26). Fale te poruszają się w głąb obudowy. W sformułowaniu powyższego modelu owocną rolę odegrała analiza migracji elektronów swobodnych na powierzchniach obudowy.

W rozdziale 7 zaprezentowano wyniki własnych badań symulacyjnych procesu wnikania i rozwoju pola EM we wnętrzu obudowy z otworem dla przypadku impulsu zaburzającego o polaryzacji równoległej. Rozdział ten składa się z 4 podrozdziałów.

Podrozdział 7.1 dotyczy wizualizacji 3D i 2D procesu wnikania i rozwoju pola EM wewnątrz obudowy. Z zaprezentowanych map 3D i 2D rozkładów pola elektrycznego i pola magnetycznego wynika, że analogicznie jak w przypadku polaryzacji pionowej rozwój pola EM we wnętrzu obudowy można podzielić na dwie fazy: falową i interferencyjną. W fazie falowej impuls zaburzący wnikający przez otwór do wnętrza obudowy inicjuje w jej wnętrzu pierwotne i wtórne fale pola EM o geometrii ukształtowanego walca o owalnym przekroju poprzecznym z podstawami walca zaczynającymi się i kończącymi na wewnętrznej powierzchni przedniej ściany obudowy (np. rys. 27Ei i 27Hi oraz 28Ei i 28Hi). Fale te różnią się one zatem kształtem przestrzennym od kształtu fal powstających w przypadku polaryzacji pionowej (podrozdział 6.1). W fazie interferencyjnej, podobnie jak w przypadku polaryzacji pionowej, pole EM przyjmuje postać skomplikowanych przestrzennych form geometrycznych (rys. 27), trudnych do zobrazowania. W tym przypadku łatwiejszy dla percepcji obraz pola EM we wnętrzu obudowy można otrzymać, prezentując dwuwymiarowe rozkłady pola EM w wybranych przekrojach wnętrza obudowy. Rozkłady pola EM przedstawione na tych przekrojach nazywane są ze względu na nietypową geometrię mozaikami interferencyjnymi pola elektrycznego i magnetycznego (rys. 28). Fale pierwotne i wtórne oraz mozaiki interferencyjne pola elektrycznego i magnetycznego poruszają się między przednią i tylną ścianą obudowy ulegając kolejnym odbiciom od tych ścian a także od ścian bocznych obudowy. Pola te doznają strat energetycznych na otworze przy kolejnych odbiciach od ściany przedniej. Pole EM we wnętrzu obudowy wykazuje symetrię osiową względem osi z.

W podrozdziale 7.2 zaprezentowano i opisano powstawanie ładunku elektrycznego i jego rozkłady na wewnętrznych ścianach obudowy spowodowane tą częścią impulsu zaburzającego o polaryzacji równoległej, która wnika przez otwór do wnętrza obudowy. W początkowej fazie wnikania impulsu zaburzającego do obudowy ładunki elektryczne na wewnętrznej powierzchni przedniej ściany obudowy gromadzą się głównie w obszarach przy krótszych krawędziach otworu. Podobnie jak w przypadku polaryzacji pionowej, powstające obszary ładunków elektrycznych tworzą pary wysp komplementarnych ładunków elektrycznych. Wyspy tworzące parę leżą po przeciwnych stronach otworu, przy jego krótszych krawędziach. W miarę wnikania impulsu zaburzającego w głąb obudowy wyspy tworzące parę wysp komplementarnych ładunków elektrycznych „odrywają się” od krótszych krawędzi otworu i przemieszczają się po wewnętrznej powierzchni przedniej ściany obudowy w kierunku ścian bocznych. Na ich



miejscu, po obu stronach otworu, przy jego krótszych krawędziach powstają nowe wyspy, tworzące nowe pary wysp komplementarnych ładunków elektrycznych. Wyspy te mają przeciwną polarność elektryczną niż wyspy, z którymi sąsiadują. Po obu stronach otworu na powierzchniach wewnętrznych najpierw ściany przedniej a następnie ścian bocznych tworzy się ciąg naprzemiennie naładowanych wysp ładunków elektrycznych (rys. 29 i 30). Każda z tych wysp ma swojego komplementarnego partnera po przeciwnej stronie otworu. Z biegiem czasu odległość między wyspami partnerskimi na ścianie przedniej zwiększa się. Pary wysp komplementarnych ładunków elektrycznych są źródłami pola EM we wnętrzu obudowy. Tworzą one razem z polem EM, które wniknęło przez otwór do wnętrza obudowy falowe struktury elektryczne o geometrii u-kształtnego walca. Struktury te przemieszczają się w głąb obudowy. Fale o geometrii u-kształtnego walca zostały już zauważone i omówione w podrozdziale 7.1, który dotyczy wizualizacji 3D i 2D rozwoju pola EM wewnątrz obudowy. Wybrane przykłady charakterystycznych struktur elektrycznych we wczesnej fazie rozwoju pola EM we wnętrzu obudowy przedstawiono na rys. 45. Warto porównać je ze strukturami przedstawionymi na rys. 27Eg i 28Eg w podrozdziale 7.1. Z powyższego wynika, że badania zachowania się ładunku elektrycznego na wewnętrznych ścianach obudowy sugerowane przez Doktorantkę w rozdziale 5, przyczyniły się do głębszego wyjaśnienia pochodzenia i natury pola EM we wnętrzu obudowy.

W podrozdziale 7.3 zaprezentowano wyniki badań rozkładów normalnego pola elektrycznego (subpodrozdział 7.3.1), gęstości ładunku elektrycznego (subpodrozdział 7.3.2), prądu powierzchniowego (subpodrozdział 7.3.3) oraz stycznego pola magnetycznego (subpodrozdział 7.3.4) na zewnętrznych ścianach obudowy.

Z prezentowanych w subpodrozdziale 7.3.1 rozkładów pola elektrycznego na zewnętrznych powierzchniach obudowy wynika, że impuls zaburzający indukuje ładunek elektryczny na zewnętrznych powierzchniach obudowy, czego wyrazem jest pojawienie się składowej normalnej pola elektrycznego na tych powierzchniach. W początkowej fazie oddziaływania impulsu zaburzającego z obudową największe wartości składowej normalnej pola elektrycznego występują na lewym i prawym przednim rogu obudowy oraz na lewej i prawej krótszej krawędzi otworu. Z upływem czasu i oddalania się impulsu zaburzającego od przedniej ściany obudowy pola elektryczne na lewym i prawym przednim rogu obudowy maleją, „ekspandując” na sąsiadujące z nimi powierzchnie ścian obudowy (rys. 31). Maleje także pole elektryczne wokół krawędzi otworu. Największe wartości składowej normalnej pola elektrycznego występują natomiast na ścianach bocznych obudowy, w miejscu aktualnej pozycji impulsu zaburzającego. Poza tym miejscem pole elektryczne jest relatywnie słabe.

Inaczej niż w przypadku polaryzacji pionowej, na powierzchniach górnej i dolnej ściany obudowy nie występuje pole elektryczne w miejscach aktualnej pozycji impulsu zaburzającego. Bowiem ładunki elektryczne wytworzone przez impuls zaburzający na lewej i prawej ścianie bocznej generują pole elektryczne, które kompensuje pole elektryczne impulsu zaburzającego, powodując, że składowa styczna pola elektrycznego na górnej i dolnej powierzchniach obudowy jest równa zero.

W subpodrozdziale 7.3.2 przedstawiono rozkłady gęstości ładunku elektrycznego na zewnętrznych ścianach obudowy. Rozkłady te pokazano na rys. 33 i 34. Rozkłady te są skorelowane z rozkładami składowej normalnej pola elektrycznego na zewnętrznych ścianach obudowy. Wynika to z proporcjonalności między gęstością ładunku powierzchniowego a składową normalną pola elektrycznego. A zatem zgodnie z opisami zachowania się składowej normalnej pola elektrycznego w subpodrozdziale 7.3.1, w pierwszej fazie oddziaływania impulsu zaburzającego na obudowę największy ładunek elektryczny zostaje zgromadzony na lewym (ujemny ładunek elektryczny) i prawym (dodatni ładunek elektryczny) obudowy oraz na lewej i prawej krótszej krawędzi otworu. Wraz z oddalaniem się impulsu zaburzającego od przedniej ściany obudowy gęstość ładunku powierzchniowego na lewym i prawym przednim rogu obudowy maleje. Jednocześnie na powierzchniach górnej, dolnej i bocznych ścianach obudowy, sąsiadujących z lewym i prawym przednim jej rogiem powstaje i rozwija się ładunek elektryczny o niedużej gęstości powierzchniowej. Maleją także gęstości ładunku elektrycznego wokół otworu. Impuls zaburzający, poruszający się w kierunku tylnej ściany obudowy indukuje na bocznych ścianach obudowy sprzężone ze sobą wąskie obszary znacznego ładunku elektrycznego o przeciwnych polarnościach. Na lewej bocznej ścianie powstaje obszar o ujemnym ładunku elektrycznym, na prawej bocznej ścianie - o dodatnim ładunku elektrycznym. Obszary te poruszają się razem z impulsem zaburzającym w kierunku tylnej ściany obudowy. Towarzyszy temu przepływ prądu elektrycznego i co za tym idzie pole magnetyczne na powierzchniach obudowy. Opisane są one w następnych podrozdziałach.

W subpodrozdziale 7.3.3 omówiono przepływ prądu elektrycznego na zewnętrznych powierzchniach obudowy (rys. 35-37). We wczesnej fazie oddziaływania impulsu zaburzającego na przednią ścianę obudowy pole elektryczne impulsu zaburzającego wymusza bardzo intensywną migrację elektronów swobodnych po ścianie przedniej z prawego rogu obudowy do lewego rogu, tak aby wytworzony na tych rogach układ ładunków elektrycznych o przeciwnej polarności (ładunek ujemny na lewym rogu, ładunek dodatni na prawym rogu) utworzył na powierzchniach ściany przedniej obudowy pole elektryczne kompensujące pole elektryczne impulsu zaburzającego. Migrację tę utrudnia otwór w ścianie przedniej, przy

którego krótszych krawędziach powstają również obszary ładunków elektrycznych o przeciwnej polarności (ładunek ujemny przy prawej krawędzi, ładunek dodatni przy lewej krawędzi). W okolicach otworu migracja elektronów swobodnych odbywa się także po dłuższych krawędziach otworu. (Należy pamiętać, że kierunek przepływu prądu elektrycznego na rys. 35-37 jest kierunkiem umownym, obowiązującym w elektromagnetyzmie. Elektrony swobodne tworzące rzeczywisty prąd elektryczny poruszają się przeciwnie do kierunku prądu umownego. Inaczej mówiąc, kierunek prądu elektronowego jest przeciwny do kierunku prądu umownego). Jak wynika z poprzedniego subpodrozdziału (7.3.2), w miarę oddalania się impulsu zaburzającego od przedniej ściany obudowy maleje gęstość ładunków elektrycznych na przednich rogach obudowy. Skutkuje to zmniejszaniem się intensywności migracji elektronów na przedniej ścianie obudowy. Jednocześnie impuls zaburzający przemieszczający się w kierunku tylnej ściany obudowy indukuje na ścianach bocznych obudowy sprzężoną ze sobą parę wąskich obszarów ładunków elektrycznych o przeciwnej polarności. Odbywa się to w taki sposób, że w obszarze wytworzonym na lewym boku obudowy gromadzą się elektrony swobodne, które pod wpływem pola elektrycznego impulsu zaburzającego wyemigrowały po powierzchniach ściany górnej i dolnej z partnerskiego obszaru sprzężonego na prawym boku obudowy. Migrację tę ilustrują rys. 35d-35h i 36. Po oddaleniu się impulsu zaburzającego od przedniej ściany obudowy prąd powierzchniowy na górnej i dolnej ścianie obudowy przyjmuje formę wąskiego pasa w płaszczyźnie wyznaczonej przez impuls zaburzający. Pas ten przesuwają się w stronę tylnej ściany obudowy zgodnie z impulsem zaburzającym.

Pole magnetyczne styczne do zewnętrznych powierzchni obudowy zostało opisane w subpodrozdziale 7.3.4. W początkowej fazie oddziaływania impulsu zaburzającego z przednią ścianą obudowy mamy do czynienia ze znanym zjawiskiem odbicia się fali EM od powierzchni metalowej. W przypadku impulsu zaburzającego o polaryzacji równoległej natężenie stycznego pola magnetycznego na „ciągłej” powierzchni przedniej ściany obudowy jest jednorodne i dwukrotnie większe niż natężenie pola magnetycznego impulsu zaburzającego. Zaburzenie tej jednorodności stycznego pola magnetycznego występuje w okolicach otworu. Po oddaleniu się impulsu zaburzającego od przedniej ściany obudowy styczne pole magnetyczne na powierzchni obudowy wynika z istnienia wąskiego pasa prądu powierzchniowego w płaszczyźnie impulsu zaburzającego (subpodrozdział 7.3.3). Styczne pole magnetyczne także przyjmuje postać wąskiego pasa na górnej i dolnej ścianie obudowy. Pas ten przemieszcza się w stronę tylnej ściany obudowy, zgodnie z impulsem zaburzającym (rys. 38 i 39).

Na podstawie wyników zaprezentowanych w podrozdziałach 7.1-7.3, w podrozdziale 7.4 przedstawiono autorski model wnikania impulsu elektromagnetycznego o polaryzacji równoległej do wnętrza obudowy. Zgodnie z tym modelem część impulsu zaburzającego wnika przez otwór do wnętrza obudowy, powodując powstanie i rozwój par wysp komplementarnych ładunków elektrycznych na wewnętrznych powierzchniach obudowy. Pary wysp komplementarnych ładunków elektrycznych generują pole elektryczne we wnętrzu obudowy. We wczesnym etapie wnikania impulsu zaburzającego pole elektryczne, które wnika do wnętrza obudowy przez otwór oraz pole elektryczne wytworzone przez pary wysp komplementarnych ładunków elektrycznych tworzą we wnętrzu obudowy charakterystyczne falowe struktury elektryczne o geometrii u-kształtnego walca o owalnym przekroju poprzecznym z podstawami walca zaczynającymi się i kończącymi na wewnętrznej powierzchni przedniej ściany obudowy (rys. 45). Podstawami u-kształtnego walca jest para wysp komplementarnych ładunków elektrycznych. Czoła fal u-kształtnych fal elektrycznych przemieszczają się w głąb obudowy. Jednocześnie podstawy tych fal, czyli wysp komplementarnych ładunków elektrycznych poruszają się po ścianach bocznych w taki sposób, że u-kształtne ramiona fal stają się coraz bardziej rozwarte. U-kształtnym falom elektrycznym towarzyszą sprzężone z nimi fale magnetyczne. W sformułowaniu powyższego modelu owocną rolę odegrała analiza migracji elektronów swobodnych na powierzchniach obudowy, zresztą podobnie jak w przypadku polaryzacji pionowej impulsu zaburzającego.

W rozdziale 8 przedstawiono wyniki własnych, testowych badań symulacyjnych dla przypadku impulsu zaburzającego z tzw. polaryzacją skręconą. Przeprowadzone testy wykazały, że środowisko symulacyjne CST Studio „poradziło” sobie pod względem obliczeniowym z przypadkiem polaryzacji skręconej. Jednak jak można było przewidzieć, wyniki uzyskane dla polaryzacji skręconej okazały się trudne do zinterpretowania i mało przydatne merytorycznie. Z tego względu odstąpiono od bardziej szczegółowych badań tego przypadku. Tym bardziej, że w razie potrzeby skomplikowany przypadek polaryzacji skręconej może być analizowany jako liniowa kombinacja polaryzacji pionowej i równoległej. Przypadki tych polaryzacji zostały opisane odpowiednio w rozdziałach 6 i 7.

W rozdziale 9 przedstawiono analizę skuteczności ekranowania wnętrza obudowy z otworem. Rozdział ten składa się z 4 podrozdziałów.

Podrozdział 9.1 zawiera charakterystyki czasowe natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w wybranych punktach A i B wewnątrz obudowy dla obu przypadków polaryzacji impulsu zaburzającego: pionowej i równoległej. Punkt A (0, 0, 0) znajduje się w geometrycznym środku obudowy t.j. najpowszechniej wybieranym punktem do liczbowej

analizy jakości skuteczności ekranowania. Punkt B (0; 0; -211,5) znajduje się na osi z, przy tylnej ścianie obudowy, gdzie występuje najwięcej lokalnych konstruktywnych interferencji pola EM (podrozdziały 6.1 i 7.1). Punkt B został dobrany w taki sposób, aby uwypuklić różnice w wartościach skuteczności ekranowania (przedstawionej w podrozdziale 9.3) wynikające z doboru różnych punktów wewnątrz obudowy. Dla obu przypadków polaryzacji (pionowej i równoległej) w fazie falowej (opisanej w podrozdziałach 6.1 i 7.1) charakterystyki czasowe pola elektrycznego i magnetycznego przechodzących przez punkty A i B mają formę powtarzających się impulsów. Impulsy na charakterystyce odpowiadają przechodzącym przez punkty A i B charakterystycznym falowym strukturom elektrycznym opisanym w podrozdziałach 6.2 i 7.2. Amplitudy tych impulsów wewnętrznych są mniejsze od maksymalnej amplitudy impulsu zaburzającego i maleją z upływem czasu.

W podrozdziale 9.2 opisano zmianę charakteru oddziaływania zakłócenia elektromagnetycznego w obudowie z otworem dla dwóch przypadków: bez zastosowania ochrony w postaci obudowy z otworem oraz dla przypadku umieszczenia punktu A w obudowie z otworem. Oddziaływanie zewnętrznego impulsu zaburzającego na wybrany punkt A w przestrzeni dla przypadku bez zastosowania ochrony w postaci obudowy z otworem ma charakter jednorazowy. Natomiast w przypadku umieszczenia punktu A w obudowie z otworem, na skutek wniknięcia przez otwór impulsu zaburzającego w jej wnętrzu powstaje ciąg subnanosekundowych EM impulsów wewnętrznych, które oscylując między ścianami: frontową i tylną obudowy wielokrotnie przemieszczają się przez punkt A. Wynika z tych dwóch przykładów, że charakter zakłóceń elektromagnetycznych, jakich doznaje punkt A po umieszczeniu go w obudowie z otworem zmienia się w porównaniu z przypadkiem bez zastosowania obudowy.

W podrozdziałach 9.3 i 9.4 przedstawiono dwa spojrzenia na skuteczność ekranowania (SE) wnętrza obudowy z otworem: lokalne i globalne.

Opisane w podrozdziale 9.3 lokalne spojrzenie na skuteczność ekranowania opiera się na wyznaczeniu ilościowych zależności czasowych SE w wybranych punktach A i B wewnątrz obudowy. Takie lokalne podejście (określenie czasowych zależności SE w geometrycznym środku obudowy) jest najpowszechniej stosowanym sposobem określania skuteczności ekranowania wewnątrz obudów ekranujących. Z otrzymanych charakterystyk SE wynika, że w obu rozważanych punktach (A i B) w obudowie skuteczność ekranowania impulsu zaburzającego wynosi co najmniej 8 dB w przypadku polaryzacji pionowej i 12 dB w przypadku polaryzacji równoległej. W obu przypadkach polaryzacji (pionowej i równoległej) skuteczność ekranowania wewnątrz obudowy rośnie z upływem czasu (analiza w czasie 30 ns).

Dotyczy to nie tylko punktów A i B, ale także innych punktów w obudowie. Tendencja ta wynika z faktu bardziej równomiernego rozłożenia się pola EM w całej objętości obudowy oraz wpływu części energii z obudowy przez otwór przy kolejnych odbiciach pola EM od ściany przedniej.

W podrozdziale 9.4 przedstawiono inne niż dotychczas stosowane, globalne podejście do określania skuteczności ekranowania wnętrza obudowy. Nowe podejście zaproponowane w niniejszej rozprawie doktorskiej polega na wyznaczeniu globalnych, dwuwymiarowych (2D) map chwilowych wartości skuteczności ekranowania dla całej płaszczyzny  $xy$  ( $z = \text{const.}$ ) wewnątrz badanej obudowy ekranującej w czasie  $t = \text{const.}$  Otrzymane globalne mapy SE w płaszczyźnie 2D umożliwiają szczegółową ocenę skuteczności ekranowania w wybranej płaszczyźnie wnętrza badanej obudowy. Z wyznaczonych map globalnej skuteczności ekranowania możliwe jest szybkie zidentyfikowanie najbardziej wrażliwych punktów w obudowie.

W rozdziale 10 zawarto uwagi dotyczące walidacji wyników symulacji numerycznej. Ze względu na to, że źródłami subnanosekundowych impulsów do celów ataków EM dysponuje wąska, w zasadzie anonimowa grupa, a wykonanie badań doświadczalnych w zakresie przedstawionym w niniejszej rozprawie jest wyzwaniem ekstremalnym praktycznie niemożliwe było wykonanie walidacji eksperymentalnej. Z tych względów w przedstawionej rozprawie doktorskiej zwraca się szczególną uwagę na zgodność otrzymanych wyników z zasadami fizyki a szczególnie prawami Maxwella. Zarzutów do przedstawionych wyników nie przedstawili recenzenci artykułów, w których opublikowano wyniki otrzymane w niniejszej rozprawie (przedstawione na końcu pracy w postaci spisu publikacji Doktorantki) oraz dyskutanci plakatów naukowych o tematyce niniejszej rozprawy doktorskiej zaprezentowanych na konferencjach naukowych.

Rozdział 11 zawiera podsumowanie i wnioski końcowe prowadzące do udowodnienia tezy rozprawy doktorskiej.

Najważniejsze z nich to:

- 1) obrazy 3D i 2D wizualizujące morfologię pola elektrycznego i pola magnetycznego w czasie procesu wnikania i rozwoju pola EM wewnątrz obudowy ekranującej,
- 2) wykrycie istnienia dwóch faz rozwoju pola EM w małej niewysokiej metalowej obudowie ekranującej z otworem: fazy falowej i fazy interferencyjnej,
- 3) rozkłady ładunku elektrycznego na wewnętrznych powierzchniach obudowy,
- 4) rozkłady pola elektrycznego i pola magnetycznego, ładunku elektrycznego oraz prądu powierzchniowego na zewnętrznych powierzchniach obudowy,

- 5) wyjaśnienie pochodzenia i natury pola EM we wnętrzu obudowy dla dwóch polaryzacji impulsu zaburzającego,
- 6) autorskie modele wnikania impulsu elektromagnetycznego do wnętrza obudowy dla dwóch polaryzacji impulsu zaburzającego,
- 7) charakterystyki czasowe natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w wybranych punktach wnętrza obudowy,
- 8) wykrycie i opis zmiany charakteru zaburzenia elektromagnetycznego we wnętrzu obudowy ekranującej z otworem, polegającego na powstaniu we wnętrzu obudowy ciągu tzw. subnanosekundowych EM impulsów wewnętrznych,
- 9) lokalne charakterystyki czasowe skuteczności ekranowania pola elektrycznego i magnetycznego,
- 10) dwuwymiarowe globalne mapy skuteczności ekranowania pola elektrycznego i pola magnetycznego dla wybranych czasów,
- 11) powiązanie skuteczności ekranowania wnętrza obudowy z fizycznymi procesami (m.in. z migracją elektronów swobodnych) zachodzącymi na metalowych powierzchniach obudowy z otworem w czasie procesów wnikania i rozwoju pola EM wewnątrz obudowy z otworem.

A zatem przeprowadzona w rozprawie doktorskiej analiza procesów wnikania impulsu zaburzającego dla dwóch przypadków polaryzacji: pionowej i równoległej wykazała, że możliwe jest określenie skuteczności antyelektromagnetycznego ekranowania wnętrza niewysokiej metalowej obudowy z perforacją technologiczną na podstawie analizy symulacji procesu wnikania subnanosekundowego impulsu płaskiej fali EM dużej mocy do jej wnętrza. A zatem została potwierdzona teza postawiona w niniejszej rozprawie doktorskiej.

Rozprawę kończą spis literatury i spis publikacji autorki rozprawy doktorskiej. Lista publikacji Doktorantki zawiera 10 pozycji związanych z tematyką rozprawy doktorskiej (w tym 3 artykuły naukowe opublikowane w czasopismach z listy JCR) oraz 11 innych publikacji naukowych dotyczących innych zagadnień badawczych (w tym 5 artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach z listy JCR). Spis literatury liczy 63 pozycje.