

## Wybrane metody ochrony urządzeń elektronicznych przed bronią elektromagnetyczną

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono metody ochrony elementów, systemów i obiektów przed terroryzmem elektromagnetycznym. Opisane metody są oparte na obowiązujących normach i standardach dotyczących kompatybilności elektromagnetycznej i ochrony przed impulsami HPEM (ang. High Power Electromagnetics).

**Abstract.** The paper presents methods used to protect elements, systems and objects against electromagnetic terrorism. Described methods are based on valid standards concerning electromagnetic compatibility and protection against high power electromagnetic impulses (called 'HPEM impulses' in short) (Selected methods of electronic equipment protection against electromagnetic weapon).

**Słowa kluczowe:** impulsy HPEM, metody ochrony, terroryzm elektromagnetyczny.

**Keywords:** HPEM impulses, protection method, electromagnetic terrorism.

### Wstęp

Wykorzystanie broni elektromagnetycznej, polega na wygenerowaniu bardzo krótkiego impulsu promieniowania elektromagnetycznego o wielkiej mocy (tzw. impuls HPEM). Moce wytwarzane w przenośnych generatorach sygnałów HPEM są rzędu 10 – 100 MW przy czasie repetycji ok. 10 s w trybie pracy impulsowej [1]. Stosowanie anten kierunkowych oraz różnych częstotliwości źródła sygnału HPEM umożliwia uzyskanie następującego (przybliżonego) rozkładu natężenia pola elektromagnetycznego w funkcji odległości od nadajnika (tab.1) [2].

Tabela 1. Natężenia pola dla najczęściej stosowanych anten

CZĘSTOTLIWOŚĆ	ODLEGŁOŚĆ	NATEŻENIE POLA	
		Moc 2 kW	Moc 20MW
500MHz	300m	21,5 V/m	2,15 kV/m
	1000m	6,47 V/m	647 kV/m
1 GHz	300m	43,1 V/m	4,31 kV/m
	1000m	12,93 V/m	1,29 kV/m
3 GHz	300m	129,3 V/m	12,93 kV/m
	1000m	38,80 V/m	3,88 kV/m

Sygnał elektromagnetyczny o częstotliwości od 200 MHz do kilkudziesięciu GHz może spowodować zakłócenie, przerwanie pracy lub zniszczenie systemu elektronicznego. Takie celowe oddziaływanie na systemy elektroniczne nazywane jest IEMI (Intentional Electromagnetic Interference) [5]. Michael Schurke z Fraunhofer INT podaje graniczne poziomy odporności urządzeń elektronicznych w wyniku narażenia polem impulsowym HPM oraz falą ciągłą (tab.2) [6].

Można wyróżnić dwie drogi przedostawania się niszczącej energii impulsów HPM do urządzeń i obiektów:

- oddziaływanie bezpośrednie,
- penetracja pośrednia.

Przypadki oddziaływania bezpośredniego występują wówczas gdy obiekt posiada anteny, jak to ma miejsce w przypadku urządzeń radarowych czy centrów łączności. W takim przypadku energia promieniowania bez przeszkód przedostaje się do urządzeń poprzez anteny. Pośrednia penetracja, czyli przedostawanie się energii HPEM do wnętrza obiektów może odbywać się z wykorzystaniem naturalnych otworów, np. wentylacyjnych czy doprowadzeniowych i może się wówczas propagować jak w przewodnicy falowej. W takim przypadku dużą skuteczność w penetracji naturalnymi otworami osiąga się z zastosowaniem częstotliwości wyższych z zakresu mikrofalowego.

Tabela 2. Graniczne poziomy odporności różnych urządzeń i systemów elektronicznych

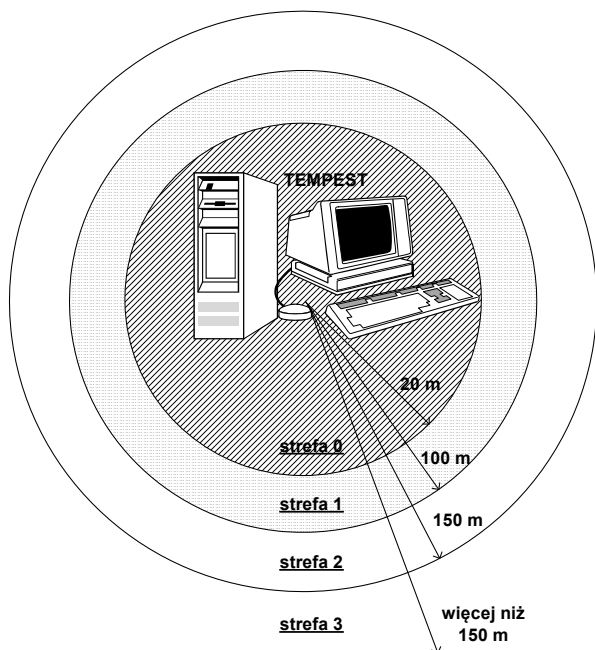
Sygnaly mikrofalowe ciągłe (Continuous Wave)	Natężenie pola [V/m]
Urządzenia komercyjne bez specjalnych wymagań	3 V/m
Urządzenia przemysłowe	10 – 30 V/m
Urządzenia samochodowe, lotnicze	200 V/m
Urządzenia i systemy militarne	10 – 50 V/m
Urządzenia i systemy militarne ze szczególnymi wymaganiami	do 600 V/m
Sygnaly mikrofalowe impulsowe (np. Radary)	Natężenie pola [V/m]
Urządzenia komercyjne	około 100 – 500 V/m
Urządzenia i systemy militarne	około 500 – 6 000 V/m
Urządzenia i systemy militarne ze szczególnymi wymaganiami	do 15 000 V/m

Wobec potencjalnego zagrożenia impulsami HPEM istnieje konieczność stosowania środków ochrony urządzeń elektronicznych przed ich niszczącą mocą. Metody zabezpieczeń przed impulsami HPEM można podzielić na organizacyjne i techniczne.

## Środki organizacyjne stosowane w celu ochrony elementów, systemów i obiektów przed terroryzmem elektromagnetycznym

### Strefy bezpieczeństwa

Z bezpieczeństwem i ochroną przed terroryzmem elektromagnetycznym elementów, systemów i obiektów oraz ochroną przechowywania i przetwarzania informacji wiąże się stosowanie stref bezpieczeństwa niedostępnych dla osób niepowołanych. Strefę tę wyznacza się na podstawie badania tłumienia pola elektromagnetycznego w przestrzeni między źródłem niepożądanego emisji, a granicą obszaru kontrolowanego, w odległości 20 m, 100 m oraz powyżej 150 m. Przy określaniu takich stref bezpieczeństwa brane są pod uwagę między innymi poziomy tłumienia pola elektromagnetycznego obiektu budowlanego, lokalizację instalacji energetycznych, telekomunikacyjnych, informatycznych oraz powierzchnię kontrolowanego obszaru. Poglądowy schemat stref bezpieczeństwa i stosowanych w nich urządzeń zwłaszcza wykonanych w technologii *tempestowej* przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Przykładowe strefy bezpieczeństwa

Wyróżnia się następujące strefy bezpieczeństwa oznaczone jako 0, 1, 2, 3:

- 0 – obszar o promieniu < 20 m i/lub odpowiednia skuteczność ekranowania struktury,
- 1 – obszar o promieniu  $\geq 20$  m oraz < 100 m i/lub odpowiednia skuteczność ekranowania struktury,
- 2 – obszar o promieniu  $\geq 100$  m oraz < 150 m i/lub odpowiednia skuteczność ekranowania struktury,
- 3 – obszar o promieniu  $\geq 150$  m i/lub odpowiednia skuteczność ekranowania struktury.

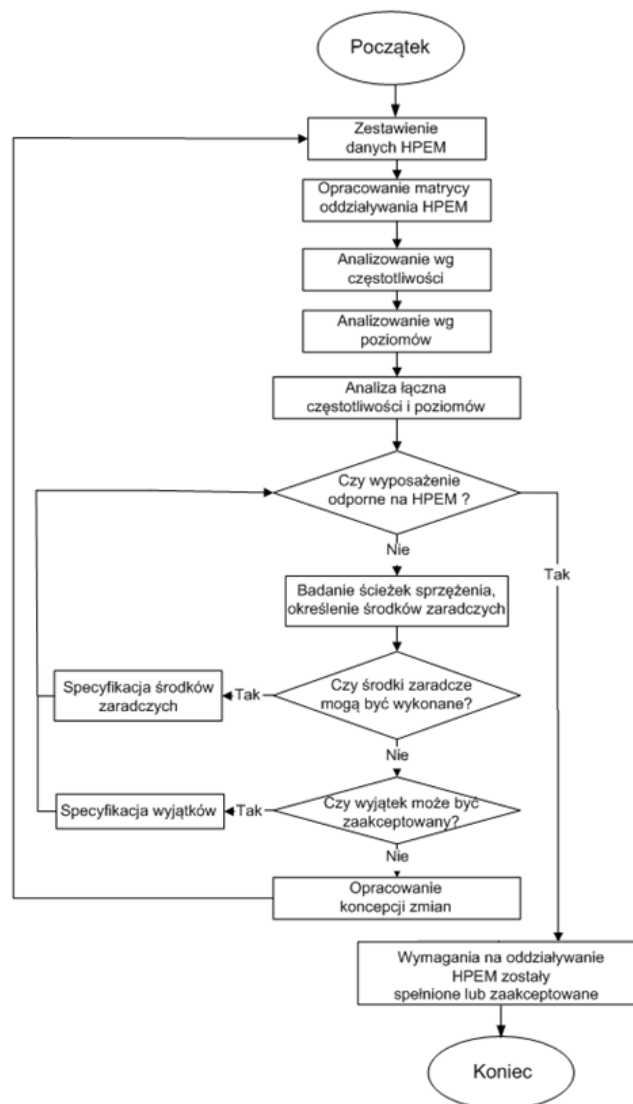
Strefy bezpieczeństwa stosuje się głównie w celu redukcji kosztów wynikających ze stosowania drogich struktur ekranujących o tłumienności rzędu 100 dB. Zastosowanie przykładowo wymogów strefy 1 (obszar powyżej 20 m od urządzenia) oraz struktury ekranującej o tłumienności rzędu 60 dB, daje podobny efekt ekranujący jak zastosowanie dużo droższej w realizacji struktury o tłumienności 100 dB. Wadą podejścia strefowego jest to, że nie wszędzie może mieć ono zastosowanie (np. ochrona w budynkach w centrum miast).

W celu ochrony budynku przed terroryzmem elektromagnetycznym należy wytyczyć strefy bezpieczeństwa dla danego budynku umieszczonego w

danej lokalizacji. Wyznaczenie możliwego obszaru ochronnego będzie podstawą do zastosowania określonych środków technicznych o odpowiedniej skuteczności ekranowania dla pola elektromagnetycznego dużej mocy.

### Analiza dróg oddziaływania impulsów HPEM

Właściwe uwzględnienie zagadnień oddziaływania impulsów HPEM powinno się odbyć na etapie projektowania, budowy i wdrażania każdego urządzenia lub systemu. Zastosowanie środków zaradczych dotyczących HPEM pozwala na uniknięcie błędów już w trakcie realizacji projektu. Narzędziem stosowanym do określenia i definiowania potencjalnych zagrożeń dla urządzeń i systemów w środowisku elektromagnetycznym jest analiza przeprowadzona w tym środowisku. Dotyczy ona wszystkich instalowanych w obiekcie systemów i definiuje zagrożenia ze względu na miejsce zainstalowania urządzeń, tzn. w budynku, w wolnej przestrzeni, itp. Algorytm przeprowadzenia takiej analizy przedstawiono na rysunku 2.

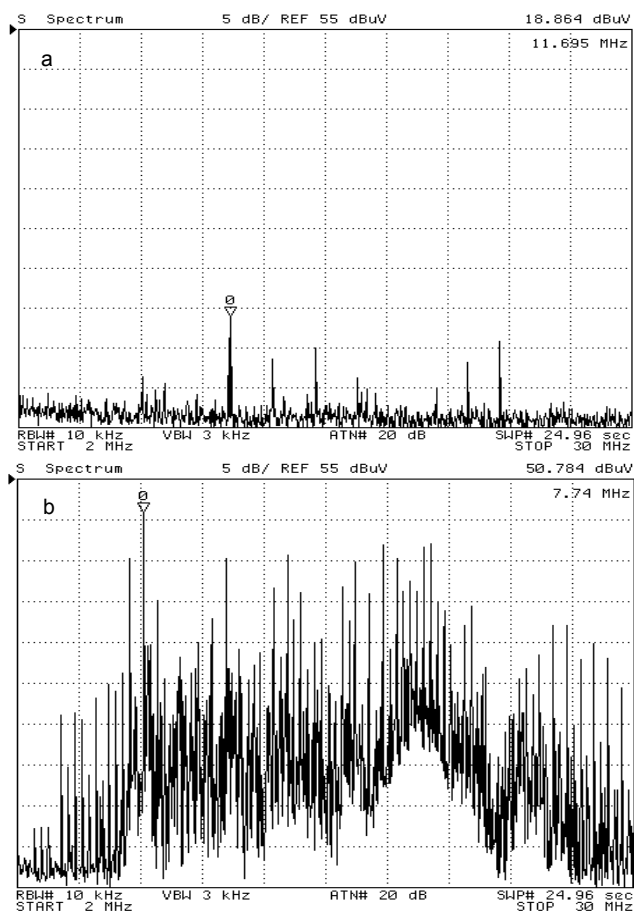


Rys. 2. Algorytm analizy oddziaływania impulsów HPEM na urządzenia i systemy

### Środki techniczne stosowane w celu ochrony elementów, systemów i obiektów przed terroryzmem elektromagnetycznym

Do środków zaradczych stosowanych w fazie projektowania lub budowy urządzenia albo systemu zalicza się następujące czynności:

- ekranowanie kabli, obudów i pomieszczeń,
- filtracja linii zasilania i sygnałowych,
- dobór właściwych kabli i wartości impedancji obwodów,
- separacja tras kablowych, oddzielne ułożenia kabli sygnałowych i zasilających, co jest szczególnie ważne z uwagi na duże prawdopodobieństwo zakłóceń powstających w wyniku przesłuchów silnych pól e-m pochodzących od kabli zasilających na kable sygnałowe transmitujące sygnały o niskich poziomach,
- wykonywanie poprawnych uzemień ekranów kabli,
- sprawdzenie połączeń uzemiających, z punktu widzenia KEM, w celu osiągnięcia wymaganych małych wartości indukcyjności,
- przegląd połączeń uzemiających, z punktu widzenia ochrony przed korozją.



Rys 3. Poziom emisji zaburzeń elektromagnetycznych promieniowanych przez urządzenie, w zakresie częstotliwości od 2 MHz do 30 MHz, dla: a) całkowicie ekranowanej konstrukcji, b) przy otwartych drzwiczkach dostępu do ekranowanej jej części

### Ekranowanie

W celu poprawy skuteczności ekranowania stosuje się doszczelnianie pomieszczeń, jak również instaluje się kabiny ekranowane. Dla urządzeń nentralgicznych z punktu widzenia pracy systemu stosuje się zwiększoną ochronę przed promieniowaniem pola elektromagnetycznego w postaci ekranowanych obudów i stref bezpieczeństwa. Konstrukcja i materiał, z którego wykonane są poszycia użyte do budowy obudowy urządzeń, zastosowanie elektromagnetycznych uszczelnień między-panelowych i drzwiowych, oraz umieszczenie w otworach wentylacyjnych siatek elektromagnetycznych, znacznie obniża możliwość przenikania impulsów HPEM do wnętrza struktury lub obudowy urządzenia. Przykładowo wykonane pomiary poziomu emisji zaburzeń elektromagnetycznych

promieniowanych w paśmie częstotliwości od 2 MHz do 30 MHz, jakie generuje urządzenie ekranowane i nieekranowane, przedstawiono na rysunku 3.

Pomiary wykonano zgodnie z metodyką zawartą w normie NO-06-A500 przy użyciu prętowej anteny odbiorczej i analizatora widma, w odległości 1 metra od urządzenia. Na rysunku 3a przedstawiono poziom emisji pola elektrycznego dla całkowicie ekranowanego urządzenia. Następnie pomiary przeprowadzono przy otwartych drzwiczkach dostępu do ekranowanej części, w której znajdowała się elektronika i zainstalowane oprogramowanie sterujące. Wyniki pomiarów zobrazowano na rysunku 3b.

Każda struktura ekranująca posiada swoją określoną skuteczność ekranowania. Z zaleceń normatywnych wynika, że minimalna wartość współczynnika tłumienności struktur ekranujących, instalowanych na okrętach, powinna wynosić 50 dB (patrz wymagania normy NO-06-A201, kategoria C struktur ekranujących). Jednakże w tym przypadku określa się również wymagania na tłumienie o poziomie 60 dB oraz 100 dB, odpowiednio kategoria B oraz A struktur ekranujących wg NO-06-A201, uwzględniając przy tym elementy dołączone do danej struktury, takie jak:

- wprowadzane i wyprowadzane kable,
- złącza wejścia/wyjścia,
- tłumienie zainstalowanych na przewodach filtrów.

Jak wiadomo ekranowanie na poziomie 60 dB oznacza, że moc zaburzeń promieniowanych ze źródła po przejściu przez strukturę zostaje osłabiona milion razy. Przyjmując, że źródło promieniuje moc o wartości 1 kW, to moc taka wypromieniowana kierunkowo, po przejściu przez strukturę ekranującą o poziomie tłumienia 60 dB, posiada wartość, co najwyżej 1 mW.

Ochronę przed oddziaływaniem impulsów HPEM realizuje się na dwa sposoby: ekranując urządzenia poprzez odpowiednie obudowy oraz zabezpieczając całe systemy poprzez zastosowanie pomieszczeń ekranowanych. Pierwszy sposób dotyczy szczególnie urządzeń, w których jest przechowywana i przetwarzana informacja niejawna, np. serwery, komputery i monitory, a także urządzeń przesyłających taką informację, przykładowo switchy, routery i radiostacje. Drugi sposób polega na ekranowaniu całych pomieszczeń, w których znajduje się sprzęt informatyczny.

Ponadto stosowane są struktury ekranujące specjalnego przeznaczenia, takie jak:

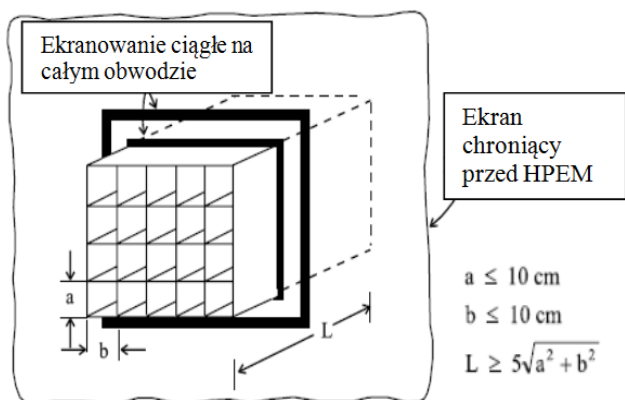
- pomieszczenia do przechowywania oraz przetwarzania informacji niejawnej, stanowiącej tajemnicę państwową lub gospodarczą,
- pomieszczenia kryptograficzne,
- pomieszczenia i obudowy urządzeń łączności radiowej.

Ekranowanie systemów realizuje się przy wykorzystaniu struktur o dużych gabarytach jak: komory ekranujące i pomieszczenia ekranowane. Charakteryzują się one bardzo dobrą skutecznością ekranowania rzędu 100 dB, a więc tym samym efektywnie chronią znajdujące się wewnątrz nich systemy. Ekranuje się pomieszczenia łączności radiowej. W konstrukcjach tych występują miejsca nieciągłości skutecznego ekranowania. Do takich miejsc zalicza się wszelkie otwory wentylacyjne i połączenia między-panelowe, połączenie ościeżnicy i drzwi, a także zawiasy i klamki u drzwi.

Istotnym czynnikiem gwarantującym wysoką jakość takiego ekranowania jest odpowiednia konstrukcja i materiał, z którego wykonane są panele ekranowe użyte do budowy komór i zabezpieczania pomieszczeń. Poza tym ważne jest stosowanie specjalnych uszczelnień między-panelowych oraz drzwiowych, np. uszczelki drzwiowe miedziowo-berylowe typu *palcowego*, oraz umieszczanie w

otworach wentylacyjnych specjalnych konstrukcji (rys. 4), co zapewnia wymaganą skuteczność ekranowania w szerokim paśmie częstotliwości.

Efektywnym sposobem na ograniczanie oddziaływania pola elektromagnetycznego w szerokim paśmie częstotliwości jest ekranowanie wielowarstwowe. Skuteczne ekranowanie jest trudniejsze przy niskich częstotliwościach np. rzędu kiloherców, aniżeli ma to miejsce przy częstotliwościach rzędu megaherców. Ekranowanie pola magnetycznego przy niskich częstotliwościach jest utrudnione z uwagi na fakt, że dla pewnych materiałów, z których wykonana jest struktura ekranująca, wartość sygnału odbitego maleje do zera. W celu uzyskania dużej skuteczności ekranowania pól magnetycznych stosuje się ekrany o dużej grubości, najlepiej wykonane z materiałów ferromagnetycznych, przykładowo wysoko przenikalne stopy typu mumetal, dla których przenikalność względna wynosi  $\mu = 20000$ . Dla porównania stal, z której wykonany jest kadłub okrętu posiada przenikalność względną  $\mu = 500$ . Stopy typu mumetal są drogie i dodatkowo podlegają zjawisku magnetostrykcji.



Rys. 4. Konstrukcja panelu wentylacyjnego

Natomiast skuteczność ekranowania pola elektrycznego jest nieskończona przy zerowej częstotliwości i maleje wraz ze wzrostem częstotliwości. Odbicie i absorpcja pola elektrycznego dla materiałów niemagnetycznych maleją wraz ze spadkiem częstotliwości. Przy wysokich częstotliwościach dobrą skuteczność ekranowania uzyskuje się poprzez stosowanie odbijających powierzchni metalowych, które powodują rozproszenie pola. Wyższą skuteczność ekranowania uzyskuje się również poprzez zastosowanie dwóch lub więcej warstw metalu, izolowanych materiałem dielektrycznym. Daje to lepszy efekt tłumienia pola niż zastosowanie metalu w pojedynczej warstwie o tej samej grubości. Miedź, mumetal, żelazo, aluminium, stal oraz inne materiały, charakteryzujące się dobrym współczynnikiem odbicia pola elektrycznego i absorpcji pola magnetycznego, powinny być używane we wzajemnej kombinacji. Wymagania dotyczące skuteczności ekranowania struktur spełniane są poprzez zastosowanie technik i konstrukcji, takich jak: ekrany, filtry, częściowe ekrany, izolacja obwodów poprzez odsprężanie, stosowanie krótkich przewodów i płaszczyzny ziemi odniesienia jako przewodu powrotnego uziemienia.

Aby ekran przez cały okres użytkowania spełniał dostatecznie swoje zadanie, bardzo ważne jest odpowiednie przygotowanie powierzchni tego ekranu. Metale z czasem stopniowo ulegają korozji na skutek chemicznego lub elektrochemicznego oddziaływania czynników środowiskowych. Skutkiem korozji mogą być wżery, pęknięcia, a także powstanie warstwy tlenków na powierzchniach metalowych, powodujące zwiększenie

rezystancji styków pomiędzy elementami (przykładowo połączenie pokrywy z obudową w urządzeniu). Wzrost rezystancji styku pomiędzy warstwami metalowymi, np. w obudowach ekranujących, powoduje rozszczelnienie i tym samym obniżenie skuteczności ekranowania. Stąd też ważną rolę w zapewnieniu długotrwałej skuteczności ekranowania urządzeń i ich elementów, wykonanych szczególnie z aluminium, jest odpowiednie zabezpieczenie antykorozyjne ich powierzchni poprzez proces chromianowania.

W trakcie projektowania okrętowych struktur ekranujących należy dążyć do minimalizacji liczby połączeń poszczególnych elementów. Praktycznie wszystkie struktury zawierają nieciągłości i otwory powodujące przenikanie pola e-m. Zwykle są to najsłabsze punkty tych struktur. W celu zapewnienia ciągłości galwanicznej pomiędzy poszczególnymi łączącymi się ze sobą elementami struktury ekranującej, pod uwagę bierze się następujące zasady:

- stosuje się różnego rodzaju uszczelki elektromagnetyczne, wykonane ze stopów miedzi i berylu, elastomerów przewodzących,
- bezpośrednio w miejscu styku uszczelki i struktury, nie maluje się powierzchni struktury z uwagi na ich ciągłość galwaniczną,
- w doborze uszczelki niezbędne jest określenie właściwej ich szerokości i siły docisku oraz dopasowanie jej do zakresu częstotliwości, przy czym materiał na uszczelki powinien być odporny na korozję, przewodzący, sprężynujący, zaś uszczelki powinny być zabezpieczone przed przemieszczaniem się poprzez stosowanie ścianek bocznych, wypustów lub występów,
- w otworach wentylacyjnych stosuje się falowody tłumiące, np. opisane konstrukcje typu plaster miodu lub siatki metalizowane,
- w otworach wizyjnych stosuje się szyby elektromagnetyczne,
- w miejscach przejść kablowych stosuje się filtry i odpowiednią technikę łączenia ekranu kabla ze strukturą ekranującą,
- wszystkie połączenia klap, włazów i luków ewakuacyjnych wraz z ościeżnicą ekranuje się specjalnym rodzajem uszczelki sprężystych „palcowych”, wykonanych najczęściej z brązu berylowego, z powodu potrzeby dużej ich elastyczności i bardzo dobrych charakterystyk skuteczności ekranowania,
- w przypadku połączeń śrubowych lub nitowanych, które są często używane na okrętach, stosuje się odpowiednią ich liczbę dla zapewnienia dobrego docisku i w efekcie kontaktu galwanicznego.

Obudowy ekranujące są powszechnie klasyfikowane według następujących trzech kryteriów:

- rodzaju konstrukcji,
- materiału ekranującego,
- zastosowania.

Występują następujące rodzaje konstrukcji obudów ekranujących:

- ekran pojedynczy,
- ekran podwójny (komórkowy),
- ekran podwójny elektrycznie odizolowany (DEI),
- ekran modułowy skręcany,
- stała lokalizacja ekranu albo konfiguracja demontowalna,
- konstrukcja spawana,
- odlew.

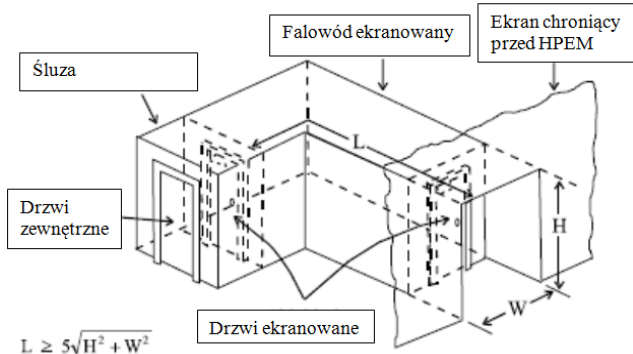
Materiałem ekranującym mogą być:

- miedź (konstrukcja wsporcza albo ekran),
- stal (arkusze albo płyty),
- aluminium,
- mumetal,

- różnorodne materiały metalizowane.

Zastosowania obudów ekranujących obejmują między innymi:

- komory bezodbiciowe stosowane w badaniach współczynników antenowych,
- komory bezodbiciowe stosowane w komercyjnych badaniach EMC,
- komory odbiciowe – klatki Faradaya,
- komory rewerberacyjne,
- zastosowania w pracach badawczo-rozwojowych,
- zastosowania w konstrukcji urządzeń elektrycznych i elektronicznych oraz pomieszczeń wymagających podwyższonych parametrów ekranowania np. do ochrony przed impulsem HPEM – rys. 5,
- komercyjne obiekty wyposażenia RF, medycznego itp.



Rys. 5. Przykładowa konstrukcja ekranująca przed polem impulsowym HPEM

Przykłady zastosowań obudów ekranujących i wymagań są następujące:

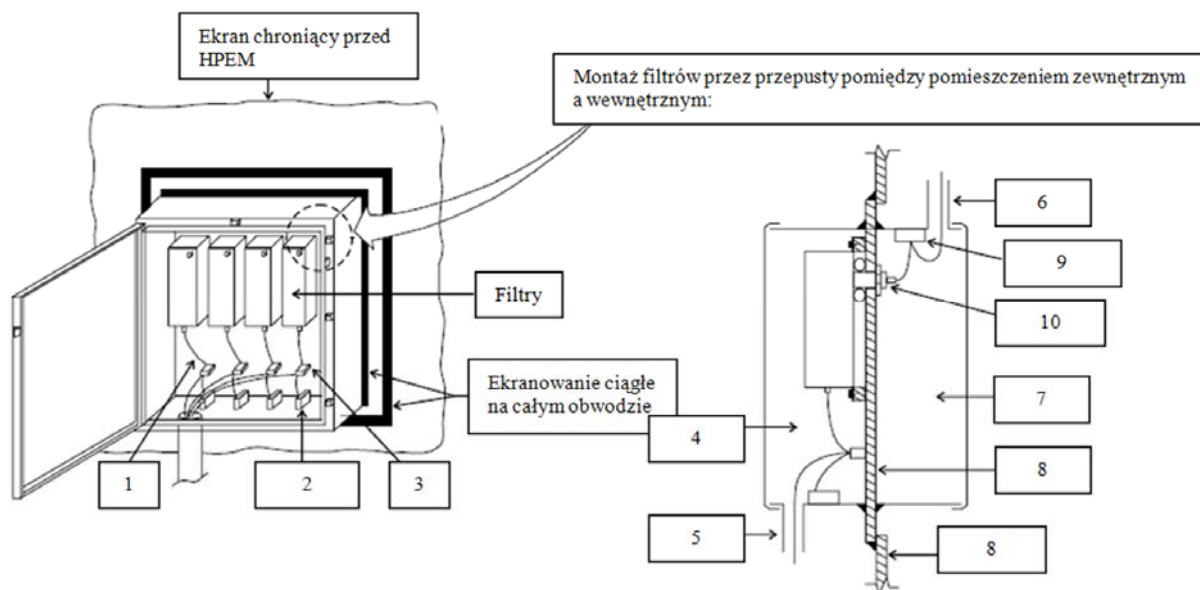
- spawana stalowa obudowa ekranująca do zastosowań na potrzeby obronności i bezpieczeństwa Państwa: powinna być badana w każdym określonym do badań zakresie częstotliwości i powinna charakteryzować się wysokim poziomem SE (> 100 dB),
- pojedynczy miedziany ekran, z połączonymi śrubowo sekcjami paneli, do zastosowań medycznych (MRI): powinien być sprawdzony tylko w paśmie rezonansowym i powinien mieć SE w zakresie od 80 dB do 100 dB,

- stalowa struktura komory, do badań i naprawy wyposażenia radiowego VHF i UHF: powinna być badana w paśmie wysokich częstotliwości,

- przenośna, składana komora badawcza do zastosowań polowych, wykonana z materiałów metalizowanych albo ekranujących: powinna być badana z uwzględnieniem wymagań dotyczących niskich poziomów w zakresie rezonansowym i/lub paśmie wysokich częstotliwości.

### Filtrowanie

Oddziaływanie HPEM w postaci impulsowych zaburzeń przewodzonych odbywa się w głównej mierze poprzez sieciowe instalacje kablowe. W celu eliminacji tych zaburzeń stosuje się ekranowanie torów kablowych poprzez właściwe uziemianie, unikanie pętli prądowych, zapewnienie małej impedancji połączeń ekranów, kompensację zakłóceń w torach symetrycznych. W celu ograniczenia impulsowych zaburzeń przez przewody sieci zasilającej, oprócz ekranowanych kabli stosuje się przeciwzakłóceńowe filtry elektromagnetyczne w miejscach przejść tych kabli przez strukturę ekranującą. Podobnie zabezpiecza się linie sygnałowe. W celu ochrony urządzeń przed impulsami elektromagnetycznymi, stosuje się zabezpieczenia przeciwprzepięciowe, iskierniki gazowe oraz zabezpieczenia nadprądowe. Układy te pozwalają spełnić stawiane wymagania odpornościowe na udary napięciowe oraz oddziaływanie pola impulsowego. Tłumienność filtrów przeznaczonych do instalacji w obwodach zasilania prądem przemiennym i prądem stałym nie może być mniejsza niż wymagana tłumienność całej konstrukcji. Filtry przeciwzakłóceńowe obwodów zasilania powinny być zabezpieczone przed przepięciami. W przypadku braku takich zabezpieczeń, należy je zainstalować w obudowie ekranowanej, między wyjściem filtru a gniazdem przyłączeniowym. Zaleca się [9], aby nominalna tłumienność wtrąceniowa filtrów przeciwzakłóceńowych w obwodach sygnałowych była dobrana indywidualnie, w zależności od wymagań na charakterystyki amplitudowe i fazowe kanału transmisyjnego. Zastosowanie filtru przeciwzakłóceńowego nie może powodować utraty lub zniekształcenia sygnału użytecznego. Na rysunku 6 przedstawiono przykładowy schemat rozmieszczenia filtrów zabezpieczających instalację przed oddziaływaniem impulsów HPEM.



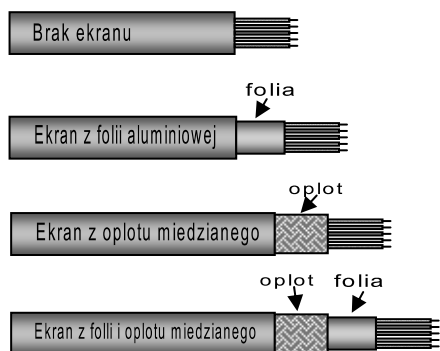
Rys. 6. Filtry zabezpieczające instalację przed oddziaływaniem impulsów HPEM (Oznaczenia: 1 – powierzchnia ochronna, 2 – odgromnik, 3 – punkt dołączenia terminala, 4 – pomieszczenie zewnętrzne, 5 – zewnętrzne doprowadzenie, 6 – wewnętrzne doprowadzenie, 7 – pomieszczenie wewnętrzne, 8 – ekran chroniący przed HPEM, 9- zabezpieczenie napięciowe, 10 – przepust)



## Charakterystyka ekranów kablowych i stopnia ich ekranowania

Skuteczność ekranowania kabli jest wynikiem trzech parametrów: grubości ekranu, gęstości krycia oraz przewodności materiału, z którego wykonano ekran. Miarą skuteczności ekranowania jest impedancja transferowa. Im mniejsza impedancja transferowa  $Z_T$  tym mniejsza część sygnału znajdującego się na zewnętrznej stronie ekranu sprzęga się z przewodami umieszczonymi w ekranie.

Sposoby ekranowania przewodów sygnałowych i zasilających przedstawiono na rysunku 7. Ekranu służące zapewnieniu kompatybilności elektromagnetycznej, jeśli są elementem kabli i przewodów giętkich mają zazwyczaj konstrukcję plecioną. Oplot wykonuje się z drutów miedzianych lub miedzianych ocynowanych. Druty miedziane ocynowane są bardziej odporne na korozję w przypadku uszkodzenia powłoki zewnętrznej i pozwalają na łatwiejsze wykonanie pewnego połączenia elektrycznego. Ekran pleciony ma znaczną grubość, ale niższą niż inne konstrukcje gęstość krycia. Gęstość krycia, wyrażona w procentach określa powierzchnię kabla „przykrytą” ekranem. Ekran z plecionki mają malejącą impedancję transferową tylko do pewnej krytycznej częstotliwości, wynoszącej od kilkuset kHz do kilku MHz. Powyżej tej częstotliwości ich impedancja transferowa rośnie. Wynika to z przenikania pola elektromagnetycznego przez otwory w plecionce. Wzrost impedancji transferowej powyżej częstotliwości krytycznej jest tym większy im mniejszy jest stopień wypełnienia plecionki.



Rys. 7. Sposoby ekranowania kabli sygnałowych i zasilających

W przypadku kabli instalacyjnych, do ułożenia na stałe, z żyłami jednodrutowymi ekran może mieć formę taśmy lub rury miedzianej. Ekran ten ma 100% gęstość krycia i bardzo dobrą skuteczność ekranowania. Niestety ekran tego typu nie nadaje się do kabli elastycznych. Najlepsze właściwości ekranujące zapewnia ekran wykonany z rury stalowej lub miedzianej. Impedancja transferowa takiego ekranu maleje z częstotliwością. Malenie to wynika z efektu naskórkowości, który powoduje elektromagnetyczne oddzielenie wnętrza ekranu od otoczenia.

Kolejną formą ekranu jest folia metalizowana zaopatrzona w żyłę uziemiającą umożliwiającą podłączenie i zwierającą kolejne „zwoje” ekranu. Ekran taki jest często nazywany ekranem elektrostatycznym, gdyż jego zadaniem jest przede wszystkim odprowadzenie ładunków elektrycznych mogących zakłócić sygnały niskoprądowe. Skuteczność ekranowania ekranów foliowych jest niewielka, bo mimo 100% pokrycia mają one bardzo małą grubość. Ponieważ ekrany tego typu są elastyczne i zajmują w konstrukcji kabla niewiele miejsca świetnie nadają się do ekranowania par wieloparowych kabli sterowniczych oraz do ekranowania ośrodków kabli telefonicznych i sygnałowych. Ekranu mają nie tylko chronić sygnał przesyłany kablem przed zakłóceniami, ale w niektórych

sytuacjach działają w „drugą stronę”, czyli nie dopuszczają do zakłócania urządzeń znajdujących się w pobliżu kabla przez sygnał przesyłany kablem.

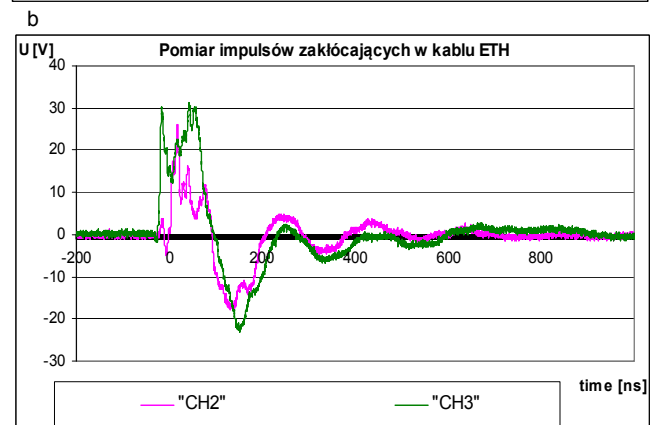
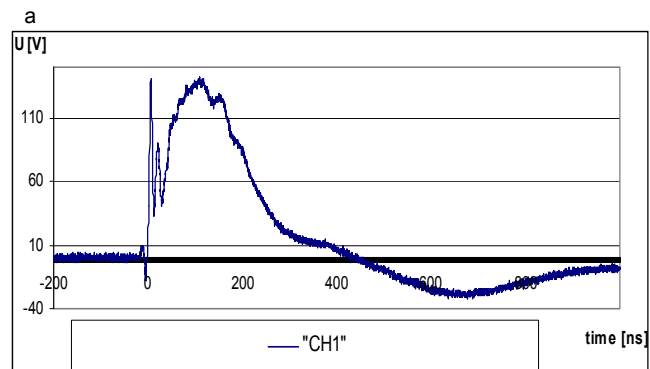
Ekranu z taśmy (aluminiowej) mają złe właściwości ekranujące. Ich impedancja transferowa w dolnym zakresie jest większa niż plecionek ze względu na gorszą rezystancję przejścia na styku taśmy. Ich impedancja transferowa rośnie monotonicznie gdyż dla większych częstotliwości styk taśmy stanowi szczelinę elektromagnetyczną. Na dodatek właściwości ekranu z taśmy aluminiowej pogarszają się z upływem czasu, na skutek utleniania się powierzchni taśmy, co dodatkowo zwiększa rezystancję przejścia.

## Porównanie właściwości przewodów transmisyjnych

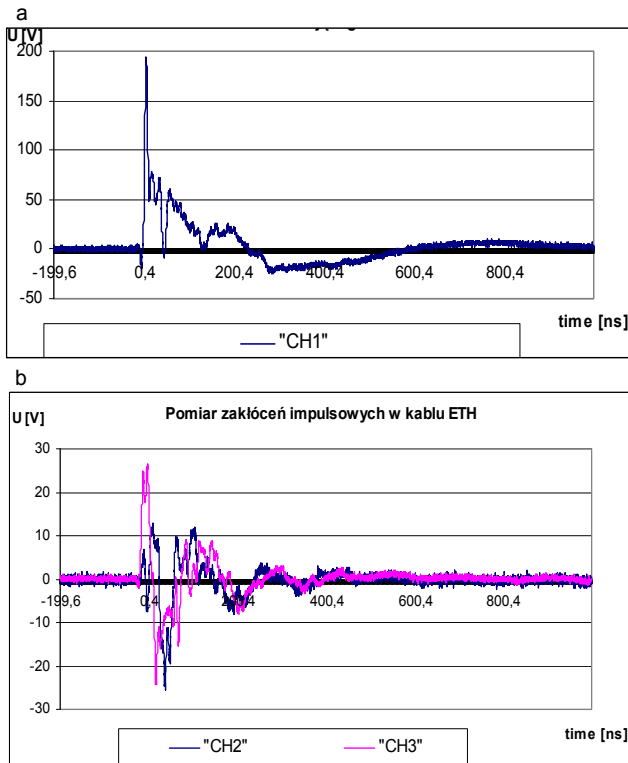
Dobór odpowiednich kabli jest istotnym elementem ochrony przed zakłóceniami elektromagnetycznymi. Do badań porównawczych właściwości linii transmisyjnych wytypowano dwa przewody ethernetowe o długości 2 m:

- kabel skrętkowy ethernet firmy DRAKA COMTEQ, UC 900 Super screen kat 7 S/FTP, żyły ekraowane folią aluminiową i całość żył otulona siatką drucianą
- kabel skrętkowy nieekranowany, firmy Copartner LL84201 UTP, Kat. 5E [7].

Badane przewody były obciążone na początku i na końcu rezystancją 100  $\Omega$ . Napięcie wstrzykiwano do jednej pary transmisyjnej poprzez sieć sprzęgająco-odsprzęgającą wbudowaną w generator do badań odporności urządzeń na narażenia impulsowe firmy EM Test, typ UCS 500N5. Mierzono również przesłuchy jakie powstały w innej (sąsiedniej) parze przewodów transmisyjnych pod wpływem impulsu zakłócającego. Poziomy napięć mierzono oscyloskopem Tektronix TDS3054C na końcu kabla na rezystancji 100  $\Omega$ , a także na obu końcach sąsiedniej pary transmisyjnej. Wyniki przeprowadzonych pomiarów zostały zamieszczone na rysunkach 8 i 9.



Rys. 8. Sygnał zakłócający (a) oraz przesłuchy na początku i końcu pary przewodów obciążonych rezystancją 100  $\Omega$  (b) w kablu Copartner eth kat 5e UTP



Rys. 9. Sygnał zakłócający (a) oraz przesłuchy na początku i końcu pary przewodów obciążonych rezystancją 100 Ω (b) w kablu S/FTP eth kat 7 DRAKA

Porównując otrzymane wartości napięć impulsów wygenerowanych w kablach nieekranowanych i kablach EMC, widać duże zalety kabli EMC w stosunku do ich tanich odpowiedników. Pomimo takich samych narażeń impulsowych sprzęganych do kabli, zaobserwowano kilkukrotnie mniejsze amplitudy niepożądanych sygnałów w kablach EMC.

Polepszone właściwości kabli i przewodów uzyskuje się dzięki powleczeniu pojedynczych przewodów materiałem absorpcyjnym. Stosując takie kable można uzyskać następujące korzyści:

- Zakłócenia powodowane przez sieci energetyczne lub impulsowe pole elektromagnetyczne są redukowane,
- Czas narastania szybkich impulsów zakłócających znacznie się wydłuża, powodując spadek „agresywności” impulsów

Zatem można stwierdzić, że użycie tego typu kabli zawierających dodatkową warstwę z materiałem absorpcyjnym może znacząco poprawić odporność systemu teleinformatycznego na działanie silnych pól elektromagnetycznych oraz przewodzonych narażeń impulsowych.

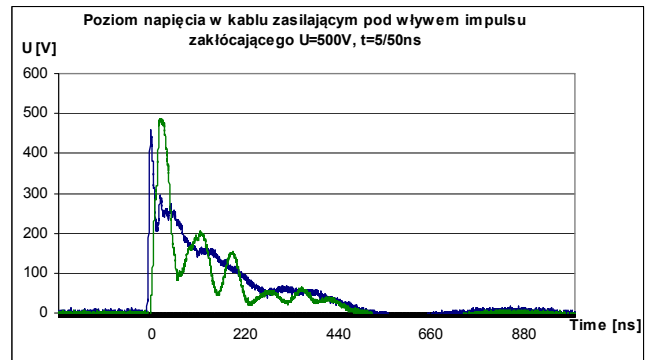
#### Porównanie właściwości kabli zasilających

Zbadano również właściwości kabli zasilających komputery PC [8]. Do badań wytypowano dwa kable zasilające o długości 1,8 m:

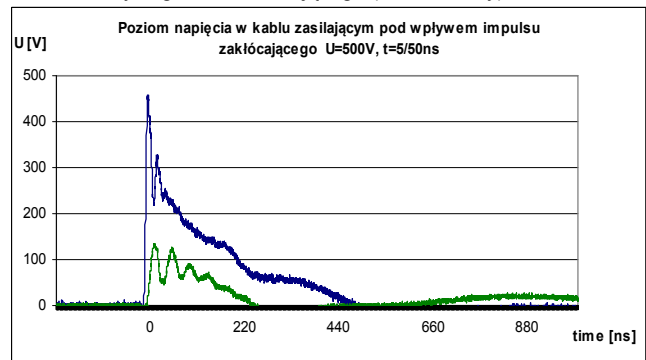
- zwykły kabel zasilający firmy Leoni typ H05VV-F, 3G, 0,75 mm<sup>2</sup> z końcówkami Schuko – IEC.
- kabel firmy EMC Cord ES 102 firmy EMC Eupen z identycznym końcówkami Schuko – IEC z wbudowanym kondensatorem ochronnym typu X, C = 0,1 μF.

Napięcie wstrzykiwano do początku kabli (do wtyku Schuko) poprzez sieć sprzęgająco-odsprzęgającą wbudowaną w urządzenie UCS 500N5. Poziomy napięć mierzono oscyloskopem Tektronix TDS3504 na końcu kabla. Kabel na końcu był obciążony zasilaczem

komputerowym ATX. Wyniki pomiarów zostały przedstawione na rysunkach 10 i 11.



Rys. 10. Impuls zakłócający (kolor niebieski) oraz poziom napięcia na końcu zwykłego kabla zasilającego (kolor zielony)



Rys. 11. Impuls zakłócający (kolor niebieski) oraz poziom napięcia na końcu kabla zasilającego EMC Cord ES 102 firmy EMC Eupen (kolor zielony)

Porównując wykresy zamieszczone na rysunkach 10 i 11 widać, że poziom napięcia w kablu EMC jest od 3 do 5 razy niższy niż dla zwykłego kabla zasilającego, czyli stopień tłumienia napięciowego sygnału zakłócającego w kablu EMC jest bardzo znaczący.

#### Podsumowanie

Impulsy promieniowania elektromagnetycznego o wysokiej mocy mogą zakłócić prace urządzeń elektronicznych a nawet spowodować ich uszkodzenie lub całkowite zniszczenie. Dlatego konieczne jest stosowanie środków chroniących obiekty, urządzenia i systemy łączności przed niszczącą mocą impulsów HPEM. Dobór odpowiednich metod ochronnych zarówno organizacyjnych jak i technicznych powinien być realizowany już w fazie projektowania.

Organizacyjne środki ochrony przed terroryzmem elektromagnetycznym stosuje się głównie w celu zmniejszenia kosztów związanych z zastosowaniem wysoce skutecznych, jednak drogiej, środków technicznych, np. struktur ekranujących o dużej tłumienności. należy również podkreślić, iż konieczne są okresowe przeglądy struktur ochronnych, gdyż wszelkie zmiany degeneracyjne pogarszają ich właściwości. Ponadto, z zamieszczonych w pracy wyników badań dotyczących właściwości kabli transmisyjnych i zasilających wynika, że ich odpowiedni dobór może znacząco wpłynąć na zwiększenie bezpieczeństwa elektromagnetycznego całego systemu.

**Autorzy:** mgr inż. Jolanta Chmieleńska, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: jolanta.pacan@wat.edu.pl;

dr hab. inż. Marek Kuchta, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: [mkuchta@wat.edu.pl](mailto:mkuchta@wat.edu.pl);  
prof. dr hab. inż. Roman Kubacki, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Telekomunikacji, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: [rkubacki@wat.edu.pl](mailto:rkubacki@wat.edu.pl);  
mgr inż. Krzysztof Wierny, Radiotechnika Marketing sp. z o. o., Pietrzykowice, ul. Fabryczna 20, 55-080 Kąty Wrocławskie, E-mail: [kwierny@radiotechnika.com.pl](mailto:kwierny@radiotechnika.com.pl);  
mgr inż. Marek Dras, Prezes Zarządu Radiotechnika Marketing sp. z o. o., Pietrzykowice, ul. Fabryczna 20, 55-080 Kąty Wrocławskie, E-mail: [mdras@radiotechnika.com.pl](mailto:mdras@radiotechnika.com.pl)

#### LITERATURA

- [1] Wilson C., *High Altitude Electromagnetic Pulse and High Power Microwave (HPM) Devices*, CRS Report for US Congress, Order Code PL32544, 2004.
- [2] Norma IEC 61000-2-13, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-13: Environment – High-power electromagnetic (HPEM) environments – Radiated and conducted*, First edition 2005-03.
- [3] J. Benford, J.A. Swegle „High Power Microwaves” Taylor & Francis Group.
- [4] Frank Sabath, “System oriented view on High-Power Electromagnetic (HPEM) Effects and Intentional Electromagnetic Interference (IEMI)”
- [5] W.A. Radasky, *Application of S.C. 77C Standards for Protecting Commercial Buildings from the Effects of Intentional Electromagnetic Interference (IEMI)*, EMC’09/Kyoto.
- [6] Michael Schurke, *HPM Susceptibility of Electronic Systems, Directed Energy Weapons*, London 2011.
- [7] M. Kuchta, R. Kubacki, L. Nowosielski, M. Dras, K. Wierny, R. Namiotko: *Standardy bezpieczeństwa dla urządzeń teleinformatycznych zabezpieczające przed terroryzmem elektromagnetycznym*, XXII Sympozjum Środowiskowe PTZE, Sandomierz, 9-12.09.2012r.
- [8] Sprawozdanie z projektu pt. *Opracowanie technologii i demonstratora zabezpieczenia systemów teleinformatycznych służb porządku publicznego w aspekcie narażenia na terrorystyczne działania silnych impulsów elektromagnetycznych* nr PBR/15-523/2010/WAT, WAT Wydział Elektroniki, 2012.
- [9] Norma IEC 61000-2-13, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-13: Environment – High-power electromagnetic (HPEM) environments – Radiated and conducted*, First edition 2005-03