

## Model analityczny impulsu HPEM

**Streszczenie.** W artykule przedstawiony został model analityczny impulsu HPEM-UWB (ang. High Power Electromagnetic Environment – Ultra Wideband) propagowanego w komorze bezodbiwojowej. Model analityczny został opracowany na podstawie wyników pomiarów impulsów uzyskanych z generatora HPEM-UWB. Opisane zostało również stanowisko pomiarowe, na którym odbywał się pomiar. Pomiary odbywały się w komorze bezodbiwojowej Wydziału Elektroniki w Wojskowej Akademii Technicznej.

**Abstract.** The article presents the analytical model of HPEM-UWB pulse (High Power Electromagnetic Environment - Ultra Wideband) propagated in the anechoic chamber. The analytical model is based on the measurement results obtained from the pulse generator HPEM-UWB. It presents also the laboratory stand, where the measurements were made. The measurements took place in the anechoic chamber of the Electronics Department at the Military University of Technology. **Analytical model of the HPEM pulse**

**Słowa kluczowe:** impuls elektromagnetyczny, model analityczny, komora bezodbiwojowa.

**Keywords:** electromagnetic pulse, analytical model, anechoic chamber.

doi:10.12915/pe.2014.07.54

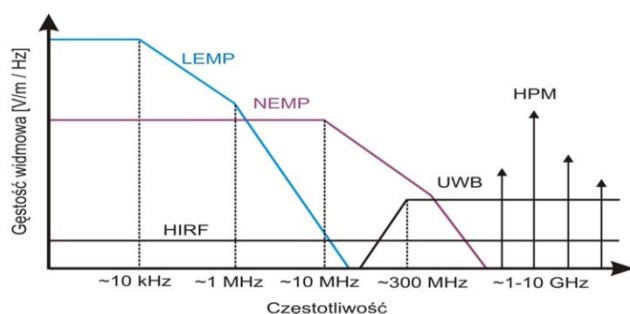
### Wstęp

Celem artykułu było przedstawienie opracowanego modelu analitycznego impulsu HPEM-UWB propagowanego w komorze bezodbiwojowej. Model analityczny został opracowany na podstawie wyników pomiarów impulsów uzyskanych z generatora HPEM-UWB.

Impuls elektromagnetyczny wielkiej mocy określanej jako HPEM jest to impuls o bardzo krótkim czasie trwania (rzędu nanosekund) i o wielkiej mocy (rzędu kilkudziesięciu gigawatów). Impuls HPEM często nazywany jest również bombą E ze względu na możliwość powodowania nieodwracalnych uszkodzeń wszelkiego sprzętu elektronicznego znajdującego się w zasięgu rażenia takiego impulsu.

Impulsy HPEM po raz pierwszy zaobserwowane zostały jako efekt uboczny przy wybuchach bomb atomowych, okazało się również, że zasięg takiego promieniowania znacznie przekracza dotychczas wykorzystywane środki rażenia. Obecnie opracowano kilka sposobów generacji impulsów HPEM dzięki wyspecjalizowanym generatorom promieniowania elektromagnetycznego.

Pojęcie HPEM zostało określone w celu opisanie pola elektromagnetycznego o dużym natężeniu i skutków jego oddziaływania na systemy. Na rysunku 1 przedstawiono widma wybranych impulsów wysokoenergetycznych.



Rys. 1. Klasyfikacja impulsów HPEM

Impuls HPEM może przyjmować różne kształty w zależności od sposobu jego generacji. Jednak najczęściej spotykanymi kształtami jest fala ciągła CW oraz tłumiona fala ciągła DS.

### Model analityczny

Model analityczny impulsu HPEM-UWB przedstawiony został w postaci tłumionej sinusoidy DS (ang. Damped Sinewave), propagowanej w komorze bezodbiwojowej.

Promieniowanie elektromagnetyczne (fala elektromagnetyczna) jest to rozchodzące się w przestrzeni zaburzenie pola elektromagnetycznego. Składowa elektryczna i magnetyczna fali indukują się wzajemnie (zmienne pole elektryczne wytwarza zmienne pole magnetyczne, oraz zmienne pole magnetyczne wytwarza zmienne pole elektryczne). W celu określenia zależności pomiędzy polem magnetycznym a elektrycznym można posłużyć się wektorem Poyntinga:

$$(1) \quad S = E \times H = \frac{1}{\mu_0} E \times B = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} D \times B = c^2 D \times B$$

gdzie:  $S$  – gęstość mocy propagowanej w kierunku wektora,  $E$  – natężenie pola elektrycznego,  $\epsilon_0$  – przenikalność elektryczna wolnej przestrzeni,  $D$  – indukcja elektryczna,  $H$  – natężenie pola magnetycznego,  $\mu_0$  – przenikalność magnetyczna wolnej przestrzeni,  $B$  – indukcja magnetyczna,  $c$  – prędkość światła w wolnej przestrzeni.

Wektor Poyntinga określa strumień energii przenoszonej przez pole elektromagnetyczne. Wektor ten jest określony jako iloczyn wektorów natężeń pola elektrycznego i magnetycznego. Kierunek wektora Poyntinga mówi o kierunku przepływu energii związanej z polem elektromagnetycznym (falą elektromagnetyczną).

Promieniowane elektromagnetyczne może przyjmować, między innymi postać fali ciągłej CW lub pojedynczego impulsu elektromagnetycznego EMP (ang. Electromagnetic Pulse). Indukcja magnetyczna dla sinusoidalnej fali ciągłej określona jest zależnością (2):

$$(2) \quad B(t) = B_0 \sin(\varphi + 2\pi ft)$$

gdzie:  $B_0$  – amplituda lub wartość maksymalna,  $\varphi$  – faza początkowa,  $f$  – częstotliwość,  $t$  – czas.

Przebieg czasowy indukcji magnetycznej lub elektrycznej odpowiadającej impulsowi w postaci tłumionej sinusoidy może być zamodelowany przy pomocy zależności 3.

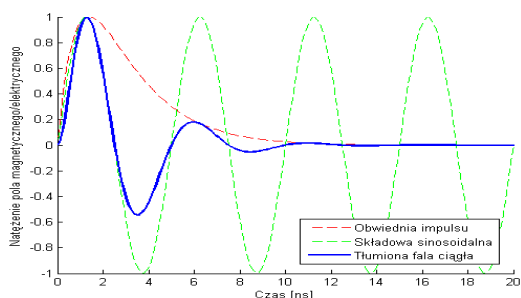
$$(3) \quad B_{DS}(t) = B_0 \sin(\varphi + 2\pi ft) \left( e^{-\frac{at}{\tau}} - e^{-\frac{bt}{\tau}} \right)$$

Powyższa zależność składa się ze składowej sinusoidalnej oraz składowej opisującej kształt obwiedni impulsu. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowy przebieg czasowy impulsu w postaci tłumionej sinusoidy wraz z poszczególnymi składowymi.

Zależność opisująca obwiednię impulsu w postaci tłumionej sinusoidy (4) opisana została podwójną funkcją wykładniczą. Przeprowadzona analiza ma na celu określenie parametrów modelu analitycznego.

$$(4) \quad B(t) = B_0 \left( e^{-\frac{at}{\tau}} - e^{-\frac{bt}{\tau}} \right)$$

gdzie:  $B_0$  – początkowa wartość indukcji magnetycznej,  $a$  – współczynnik opadania,  $b$  – współczynnik narastania ( $b=a+1$ ),  $\tau$  – stała czasowa.



Rys. 2. Impuls w postaci tłumionej funkcji sinusoidalnej DS

Wprowadzając dodatkowe oznaczenie  $k_p$  w postaci:

$$k_p = \frac{B_p}{B_0} = \left( \frac{b}{a} \right)^{-a} - \left( \frac{b}{a} \right)^{-b} \text{ można zapisać:}$$

$$(5) \quad B_p = k_p B_0$$

Kolejnym parametrem opisującym model wykładniczy jest „szerokość” impulsu  $t_w$ . Jest to wartość całki funkcji  $B(t)$  podzielona przez wartość maksymalną osiąganą przez  $B(t)$ , opis tego parametru przedstawia zależność (6).

$$(6) \quad t_w = \frac{A}{B_p} = B_0 \frac{\tau}{B_p a b} = \frac{\tau}{k_p a b},$$

Wprowadzając  $t_1$  jako punkt początkowy i  $t_2$  jako punkt końcowy czasu trwania impulsu  $t_w$  można zauważyć, że  $t_2 = t_1 + t_w$ .

Podstawiając

$$B(t_1) = B(t_2) = B(t_1 + t_w)$$

otrzymujemy:

$$(7) \quad t_1 = \tau \ln \left[ \frac{e^{-\frac{1}{k_p a}} - 1}{e^{-\frac{1}{k_p b}} - 1} \right],$$

Co po wprowadzeniu dodatkowego oznaczenia

$$k_w = \frac{e^{-\frac{1}{k_p a}} - 1}{e^{-\frac{1}{k_p b}} - 1}$$

możemy zapisać jako

$$t_1 = \tau \ln k_w.$$

Korzystając ze znajomości czasu  $t_1$  i  $t_2$  oraz przekształcenia  $B_p = k_p B_0$  możliwe jest wyznaczenie wartości funkcji  $B(t)$  dla której określony zostanie współczynnik  $\beta$  mówiący o stosunku  $B_p$  do wartości funkcji w punktach  $t_1$  i  $t_2$ .

$$(8) \quad \frac{B(t_1)}{B_p} = k_p (k_w^{-a} - k_w^{-b}) = \beta,$$

Dla przykładowych wartości  $a$ ,  $\beta(a)$  przyjmuje wartości zawarte w tabeli 1

1. Wartość Tabela  $\beta(a)$  dla przykładowych wartości  $a$

a	0,1	1	10	100
$\beta(a)$	0,3795	0,4200	0,4306	0,4308

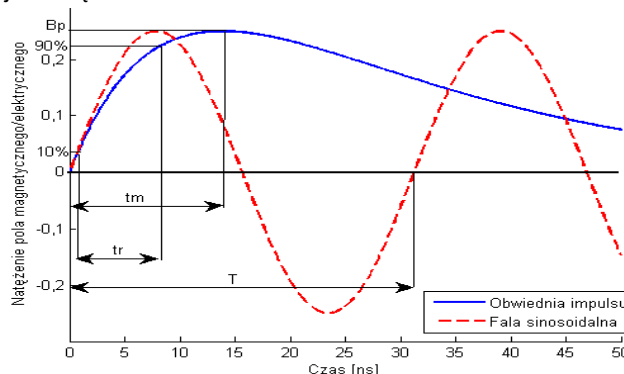
W sytuacjach rzeczywistych  $a$  zawiera się zazwyczaj w przedziale od 0,1 do 10, a najczęściej  $a=1$  co oznacza, że  $B(t_1) = 0,42 B_p$ .

Ostatnim parametrem pozwalającym opisać obwiednię impulsu HPEM jest czas narastania impulsu, może on być rozpatrywany dwojako:

- a)  $t_m$  - czas, w którym  $B(t)$  osiąga wartość maksymalną (licząc od zera),

- b)  $t_r$  - czas, w którym  $B(t)$  osiąga 90% wartości maksymalnej licząc od 10%.

Oba czasy przedstawione są na rysunku 3. W najbardziej ogólnym przypadku promieniowanie elektromagnetyczne dla fali ciągłej rozpatrywane jest w dziedzinie częstotliwości, podczas gdy dla impulsu elektromagnetycznego poruszamy się w dziedzinie czasu. Należy jednak pamiętać, że są to tożsame zjawiska i mogą być rozpatrywane wymiennie zarówno w dziedzinie czasu jak i częstotliwości.



Rys. 3. Porównanie impulsu i fali ciągłej (sin)

Dla przykładowych wartości  $a$ ,  $k_m(a)$  przyjmuje wartości zawarte w tabeli 3.2

Tabela 2 – Wartość  $k_m(a)$  dla przykładowych wartości  $a$

a	0,1	1	10	100
$k_m(a)$	0,5336	0,4413	0,4328	0,4326

Z tabeli 2 wynika, że zakładając  $a=1$  czas narastania impulsu wynosi  $t_m = 0,44T$ , co odpowiada czasowi jaki upływa od wartości 0 do momentu uzyskania wartości maksymalnej  $B_p$ .

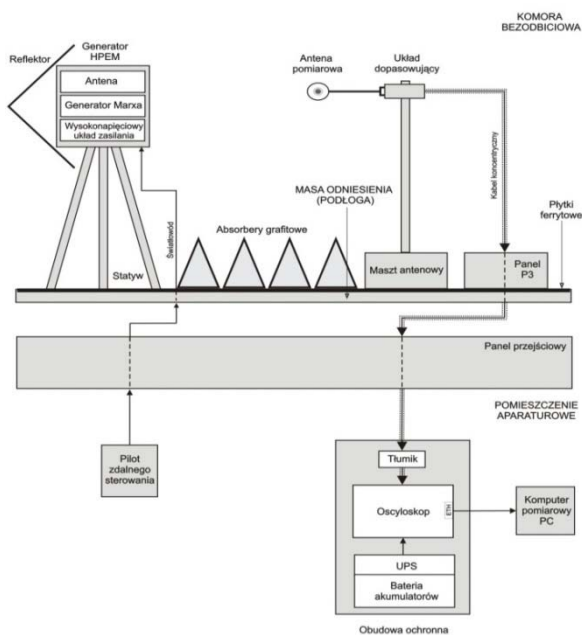
Poza przedstawionymi powyżej zależnościami matematycznym konkretnych parametrów modelu wykładniczego do poprawnego zamodelowania impulsu elektromagnetycznego niezbędne jest odpowiednie dobranie wartości początkowej impulsu  $B_0$  oraz stałej czasowej  $\tau$ , które w głównej mierze wpływają na kształt impulsu. Przy propagacji impulsu elektromagnetycznego w wolnej przestrzeni stała czasowa  $\tau$  dla składowej ładującej i rozładowującej jest taka sama, zatem dla rozpatrywanego modelu z zależności (3) przy założeniu, że  $a=1$ ,  $B_0=1$ ,  $\tau=20ns$  otrzymujemy:  $b=2$ ,  $t_m=0,693\tau$ ,  $B_p=B_0/4$ ,  $A=B_0\tau/2$ ,  $t_w=2\tau$ ,  $t_1=0,127\tau$ .

### Stanowisko do generacji i pomiaru impulsów HPEM-UWB

Na rysunku 4 przedstawiony został schemat blokowy stanowiska do generacji i pomiaru impulsów HPEM-UWB. Główne elementy czyli generator i antena odbiorcza umieszczone zostały w komorze bezodbiwojowej dzięki czemu prawdopodobieństwo uszkodzenia innych urządzeń elektronicznych znajdujących się w pobliżu jest bardzo małe.

Elementy stanowiska pomiarowego znajdujące się w komorze bezodbiwojowej rozmieszczone zgodnie ze schematem blokowym z rysunku 4 przedstawia rysunek 5.

Dla tego przypadku do generatora dołączony został reflektor zapewniający większe skupienie promieniowania w zadanym kierunku (jest to element opcjonalny).



Rys. 4. Schemat blokowy stanowiska do pomiaru impulsu



Rys. 5. Widok części stanowiska pomiarowego znajdującego się w komorze bezodbiocowej

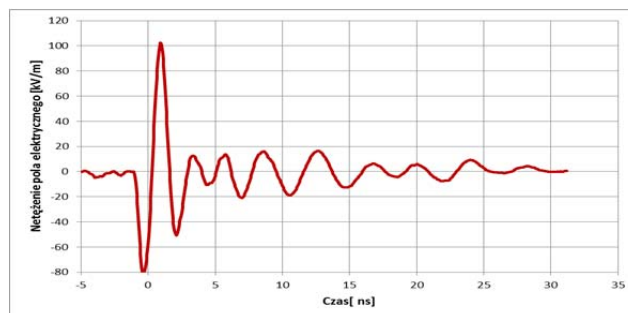
Głównym elementem odpowiedzialnym za generację impulsu HPEM-UWB jest *Generator Diehl DS 110 KS2.F.MP1.B*. Jest to kompaktowe urządzenie zamknięte w obudowie wyglądem przypominające walizkę. Elementami składowymi tego generatora są wysokonapięciowe układy zasilania, generator Marxa 300kV oraz rezonansowa antena. Wysokonapięciowy układ zasilania dostarcza do generatora Marxa napięcie 50kV (napięcie symetryczne  $\pm 25kV$ ), jest on ładowany do momentu ustalonego przez próg przełącznika, który ustala ciśnienie gazu  $N_2$  w generatorze. W momencie zmiany położenia przełącznika do anteny zostaje doprowadzone napięcie o wartości 300kV, iskrownik znajdujący się w antenie jest izolowany przez ciśnienie gazu  $N_2$ .

Przedstawione poniżej wyniki pomiarów są jedynie wycinkiem zbioru uzyskanego w cyklu pomiarowym. Każdy cykl pomiarowy wykonywany był pięciokrotnie w celu sprawdzenia powtarzalności pomiarów, a zmiana cyklu skutkowałą zmianą odległości generatora od anteny odbiorczej, w niektórych przypadkach zmianą progu wyzwalania oraz wartości tłumika na wejściu oscyloskopu.

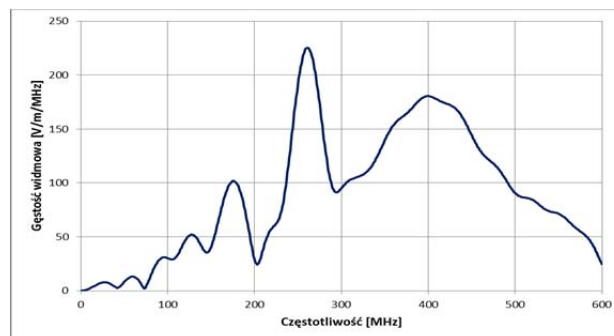
Rysunek 6 przedstawia ilustrację graficzną pomiarów, a rysunek 7 widmo tego impulsu.

Należy wspomnieć, że wcześniejsze zależności opisują indukcyjność magnetyczną, natomiast sonda wykorzystywana w pomiarach mierzy indukcyjność elektryczną. Wyniki w postaci próbek czasowych po przesłaniu do komputera pomiarowego, zostają dodatkowo przetworzone w taki

sposób, że impuls przyjmuje postać funkcji natężenia pola elektrycznego  $E$  w dziedzinie czasu. Przytoczone wcześniej zależności mają zatem sens po skorygowaniu parametrów indukcji magnetycznej na natężenie pola elektrycznego. W dalszej części wszystkie wyniki odnoszą się do natężenia pola elektrycznego  $E$ .



Rys. 6. Graficzna reprezentacja impulsu HPEM-UWB wykreślona na podstawie pomiarów



Rys. 7. Widmo impulsu HPEM-UWB

### Dobór parametrów modelu

W celu poprawnego wyznaczenia modelu analitycznego opisującego impuls HPEM-UWB, należy posłużyć się miarą podobieństwa dwóch sygnałów. Ocenie podlega podobieństwo między impulsem uzyskanym z pomiarów, a impulsem opisanym analitycznie zależnością (3).

Miarę podobieństwa obu sygnałów określa współczynnik korelacji Pearsona. Uzyskanie maksymalnego podobieństwa obu sygnałów polegało na dobraniu odpowiednich wartości współczynników tłumionej fali sinusoidalnej  $E_{DS}(t)$ . W algorytmie (rys. 8) przyjęto, że zmianie będą ulegały następujące parametry (wartość kroku zmienności parametrów przyjęto na poziomie  $\Delta=0,0001$ ):

- $\tau$  – stała czasowa,
- $a$  – współczynnik opadania,
- $f$  – częstotliwość,
- $\varphi$  – faza początkowa.

Eliminacja zbędnych danych pomiarowych polega na usunięciu odcinków sygnału w dziedzinie czasu odpowiadających stanom nieustalonym pracy generatora HPEM-UWB.

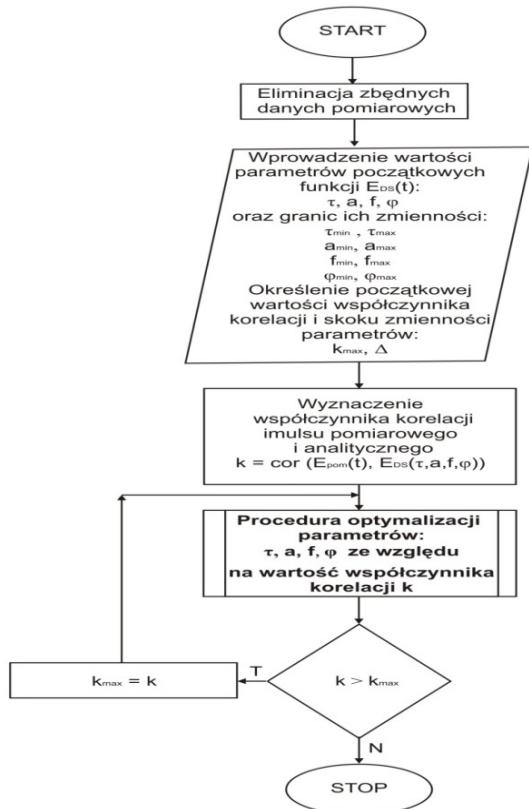
Prawidłowy dobór wartości początkowych modelu pozwala na znaczne przyspieszenie wyznaczania dokładnych wartości opisujących model analityczny oraz pozwala uniknąć błędnych wyników.

Szacowanie zmienności parametrów modelu analitycznego impulsu w postaci tłumionej sinusoidy ma na celu określenie przedziału, w jakim można spodziewać się maksymalnej wartości współczynnika korelacji Pearsona.

Dla wyznaczonych w toku działania algorytmu wartości parametrów modelu analitycznego z zależności (3) otrzymano następujący wynik (9):

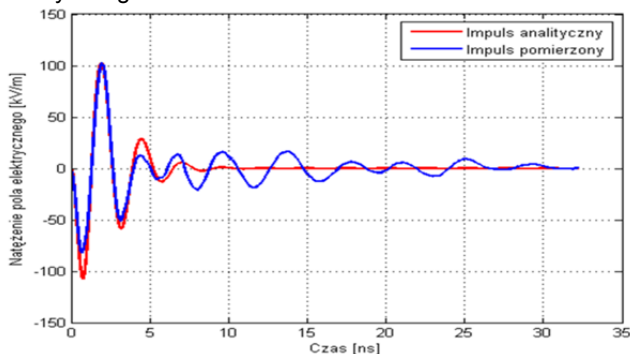
$$(9) E_{DS}(t) = 736 * \sin(178,9775 + 2\pi * 0,3881 * t) * \left( e^{\frac{-1,7974-t}{2,6634}} - e^{\frac{-2,7974-t}{2,6634}} \right)$$

Koniec pracy algorytmu następuje w momencie uzyskania powtarzalnej maksymalnej wartości współczynnika korelacji.



Rys. 8. Algorytm wyznaczania parametrów modelu analitycznego impulsu

Rysunek 9 przedstawia wynikowe porównanie impulsu uzyskanego z pomiarów i impulsu uzyskanego z modelu analitycznego.



Rys. 9. Porównanie impulsu analitycznego z impulsem pomierzonym

## Wnioski

W analizie porównawczej badającej podobieństwo impulsu analitycznego i pomierzonego posłużono się współczynnikiem korelacji Pearsona. Impuls pomierzony został wygenerowany z odległości 1 metra w stosunku do anteny odbiorczej, zarówno generator jak i antena znajdowały się w komorze bezchowej.

Otrzymane wyniki współczynnika korelacji obu impulsów na poziomie 0,9261 pozwalają na dobre zamodelowanie impulsów rzeczywistych. Należy również stwierdzić, że największe znaczenie mają pierwsze amplitudy impulsu i to właśnie ich dobre odwzorowanie było głównym celem opracowanego modelu.

Impulsy elektromagnetyczne o parametrach opisanych w powyższym artykule można praktycznie wygenerować np. przy pomocy generatora HPEM-RF DS110. W celu ochrony urządzeń elektronicznych przed takimi impulsami koniecznym jest zabudowanie ich w obudowy ekranujące o dostatecznie dużej efektywności ekranowania. Do oceny uzyskiwanych efektywności ekranowania obudów ekranujących oraz tłumienności wnoszonych przez materiały użyte do ich konstrukcji można wykorzystać metodologie pomiarowe opisane w pozycjach literaturowych [4-11].

## LITERATURA

- [1] R. Przesmycki, L. Nowosielski, M. Bugaj, K. Piwowarczyk – Analiza emisji promieniowanej współczesnych urządzeń informatycznych, *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, ISSN 0033-2097, NR 2/2012, str: 4-6.
- [2] R. Przesmycki, M. Wnuk, L. Nowosielski, K. Piwowarczyk, and M. Bugaj – The Shielding Effectiveness Measurement Using High Voltage Pulse Generator, Moscow, Russia, August 19-23.2012, *PIERS Proceedings 2012*, str. 1449-1452, ISSN 1559-9450, ISBN: 978-1-934142-22-6.
- [3] L. Nowosielski, R. Przesmycki, M. Wnuk, K. Piwowarczyk – Small Chambers Shielding Efficiency Measurements, *PIERS Marrakesh Morocco 20 - 23.03.2011r.*, PIERS Online, Vol. 7, No. 3, str. 256-260, 2011, ISSN 1931-7360,
- [4] R. Przesmycki, L. Nowosielski, M. Wnuk, P. Skokowski – Metodyka pomiarów skuteczności ekranowania małych komór, *KKRRiT Poznań Polska 08 - 10.06.2011r.*, *Przegląd Telekomunikacyjny 6/2011*, str: 321-324, ISSN 1230-3496,
- [5] R. Przesmycki, L. Nowosielski, M. Wnuk, M. Bugaj – Pomiar efektywności ekranowania komór ekranujących, *KKRRiT Poznań Polska 08 - 10.06.2011r.*, *Przegląd Telekomunikacyjny 6/2011*, str: 325-328, ISSN 1230-3496,
- [6] R. Przesmycki, L. Nowosielski, M. Bugaj, M. Wnuk, K. Piwowarczyk - The Shielding Effectiveness Measurement Using High Voltage Pulse Generator, *PIERS Proceedings, Proceedings of PIERS 2012 in Moscow*, ISSN 1559-9450, ISBN 978-1-934142-22-6, 19.08.2012-23.08.2012r, str: 1449-1452,
- [7] R. Przesmycki, L. Nowosielski, M. Wnuk, M. Bugaj – Small chambers shielding effectiveness measurement, *Mediterranean Microwave Symposium (MMS)*, 2011 11th, Hammamet, Tunezja 08.09 - 10.09.2011r, IEEE Xplore, ISSN: 2157-9822, Print ISBN: 978-1-4577-1814-4,
- [8] R. Przesmycki, L. Nowosielski, M. Wnuk, M. Bugaj – The laptop casing shielding effectiveness measurement, *Mediterranean Microwave Symposium (MMS)*, 2011 11th, Hammamet, Tunezja 08.09 - 10.09.2011r, IEEE Xplore, ISSN: 2157-9822, Print ISBN: 978-1-4577-1814-4.
- [9] K. Piwowarczyk, R. Przesmycki, L. Nowosielski, M. Bugaj - Procedure for absorption measurements of absorbing materials, *Przegląd Elektrotechniczny*, Volume 88, Issue 2, 2012, Pages 33-35, ISSN: 0033-2097.
- [10] R. Kubacki, L. Nowosielski, R. Przesmycki - The improved technique of electric and magnetic parameters measurements of powdered materials, *Advances In Engineering Software*, Volume 42, Issue 11, November 2011, Pages 911-916, ISSN: 0965-9978.
- [11] R. Kubacki, L. Nowosielski, R. Przesmycki - Technique for the electric and magnetic parameter measurement of powdered materials, *WIT Transactions on Modelling and Simulation*, Volume 48, 2009, Pages 241-250, ISSN: 1743355X, ISBN: 978-184564187-0.

Autorzy: mgr inż. Kazimierz Piwowarczyk, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: [kpiwowarczyk@wat.edu.pl](mailto:kpiwowarczyk@wat.edu.pl); dr inż. Leszek Nowosielski, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: [lnowosielski@wat.edu.pl](mailto:lnowosielski@wat.edu.pl); prof. dr hab. inż. Maran Wnuk, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: [mwnuk@wat.edu.pl](mailto:mwnuk@wat.edu.pl).