

doi:10.15199/48.2024.12.50

Niepewność pomiaru w badaniach impulsowego pola elektromagnetycznego w postaci impulsów HPM

Streszczenie. Pomiar odporności sprzętu IT i specjalistycznego sprzętu wojskowego na impulsy mikrofalowe dużej mocy (High Power Microwave) zyskuje coraz większe znaczenie. Testy te mogą w dość krótkim czasie stać się standardową procedurą dla systemów wojskowych i informatycznych. W artykule przedstawiono i omówiono stanowisko laboratoryjne do pomiaru odporności sprzętu IT i sprzętu wojskowego na impulsy HPM. W artykule przedstawiono ogólne podstawy teoretyczne związane z wysokoenergetycznym środowiskiem elektromagnetycznym dużej mocy szczegółowo omawiając impuls HPM oraz stanowisko laboratoryjne do generowania i pomiarów impulsów HPM. W sposób ogólny omówiono podstawowe definicje związane z wyznaczaniem budżetu niepewności. W artykule przedstawiono sposób wyznaczania budżetu niepewności pomiaru amplitudy impulsu HPM i określono jego składniki dla stanowiska laboratoryjnego do generowania i pomiarów impulsów HPM.

Abstract. The measurement of the immunity of IT equipment and specialized military equipment to high-power microwave pulses (HPM) is becoming increasingly important. These tests may become a standard procedure for military and IT systems in a relatively short time. The article presents and discusses a laboratory stand for measuring the immunity of IT equipment and military equipment to HPM pulses. The article presents the general theoretical foundations related to the high-energy, high-power electromagnetic environment, discussing in detail the HPM pulse and the laboratory stand for generating and measuring HPM pulses. The basic definitions related to determining the uncertainty budget are discussed in general. The article presents a method for determining the uncertainty budget for HPM impulse amplitude measurement and specifies its components for the laboratory stand for generating and measuring HPM pulses. **Measurement uncertainty in pulsed electromagnetic field in the HPM pulses form.**

Słowa kluczowe: niepewność pomiaru, budżet niepewności, pole elektromagnetyczne, impulsy HPM.

Keywords: measurement uncertainty, uncertainty budget, electromagnetic field, HPM pulses.

Wstęp

W środowisku elektromagnetycznym dużej mocy źródła mikrofalowe stanowią stosunkowo nowy rodzaj zagrożenia zarówno dla systemów wojskowych, jak i cywilnych. Działanie z wykorzystaniem tego rodzaju źródła jest zazwyczaj określane, jako celowe zaburzenie elektromagnetyczne. Środowisko promieniowane HPEM (ang. High Power Electromagnetic Environment), które jest z natury szkodliwe, może również występować przy częstotliwościach nawet do kilkuset MHz.

Rozwój technologiczny w zakresie mikrofal dużej mocy sprawił, że możliwa jest produkcja bardziej wydajnych źródeł mikrofalowych celem opromieniowania dużych instalacji wojskowych. Jednocześnie, możliwa jest generacja pól o stosunkowo dużych natężeniach z wykorzystaniem systemów kompaktowych, które mogą mieścić się, np. w walizce.

Dlatego wzrosło potencjalne zagrożenie od HPM (ang. High Power Microwave). Stosowanie systemów HPM, zwłaszcza w warunkach bojowych, przez wojska własne lub sojusznice, skutkować będzie potrzebą uodparniania (ang. ruggedize) własnych systemów obronnych przed wytwarzanymi polami typu HPM. W przypadku zaistnienia dowolnego scenariusza działań, rzeczywista groźba oddziaływania systemów HPM może pojawić się również w przypadku źródeł przyjaznych. Oddziaływanie to nie zostało jeszcze w pełni zdefiniowane przez którekolwiek państwo członkowskie NATO. Z tego powodu przedstawione poniżej informacje mają charakter ogólny i jawny. Władze krajowe powinny konsultować się w celu rozstrzygnięcia, czy środowisko HPM powinno być określone dla danego systemu lub urządzenia [1].

Zaburzenia typu HPM mogą być emitowane w powietrzu lub być przewożone przez przewody/kable. Istnieją dwa główne możliwe sposoby przenikania energii elektromagnetycznej promieniowanej do systemów elektronicznych. Może to odbywać się poprzez "frontowe drzwi" (anteny) lub "tylnymi drzwiami" (kable i otwory w obudowie). Indukowane prądy i napięcia mogą spowodować definitywne uszkodzenia w systemach/układach elektronicznych, do których docierają [1].

Możliwość uszkodzenia niezabezpieczonych układów elektronicznych ze zgubnymi konsekwencjami jest uważana, jako realistyczny scenariusz rozwoju sytuacji operacyjnej, włączając w to krytyczne elementy infrastruktury cywilnej, gdzie możliwość sabotażu i terroryzmu jest poważnym problemem. Potencjalny atak i dodatkowe działanie z wykorzystaniem aktualnie i ogólnie dostępnych technologii może być brany pod uwagę w każdej sytuacji, w której awaria systemów elektronicznych może mieć zgubne skutki dla tych systemów. Dotyczyć to może takich elementów jak: zabezpieczenia komputerów, bezobsługowych elektronicznie otwieranych/zamykanych zaworów, uszkodzeń danych komputerowych, utraty łączności i utraty mocy. Zakres skutków oddziaływania HPM zawiera się w szerokim spektrum, od zaburzenia poprawnej pracy systemu, które ustaje, gdy źródło HPM zostanie wyłączone, aż nawet do trwałego uszkodzenia. Z drugiej strony, źródła HPM należą do ogólnej klasy broni nieśmiercionośnych, które mogą być stosowane w celu wyeliminowania wrogich możliwości przy równoczesnym zachowaniu minimum strat i uszkodzeń własnych.

Środowisko HPEM

Pomimo, że efekty działania niektórych źródeł HPEM takich jak impuls elektromagnetyczny spowodowany wyładowaniem atmosferycznym (LEMP) czy też impuls elektromagnetyczny spowodowany wyładowaniem wybuchu jądrowego (NEMP) zbadano dokładnie w przeszłości a efekty tych badań są względnie łatwo dostępne, to HPM jest stosunkowo nowym obszarem badań.

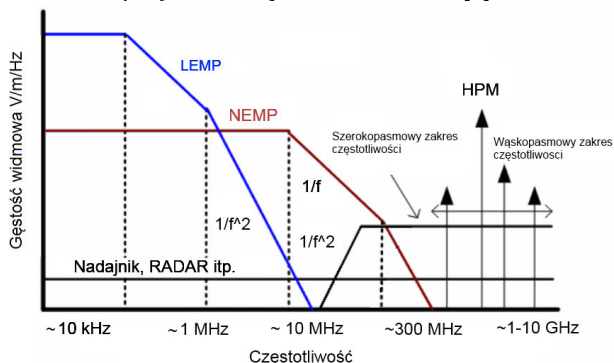
Charakterystyki wrogich źródeł są trudne do przewidzenia, a ewentualne "przyjazne" źródła, z uwagi na fakt, że nie zostały jeszcze wystarczająco zdefiniowane, powinny być tematem kwestii bezpieczeństwa, co sprawia, że określenie środowiska HPM jest bardzo trudne.

Potencjalnymi napastnikami wykorzystującymi HPM mogą być: przestępcy, terroryści, niezadowoleni pracownicy/klienci, żołnierze wrogich sił zbrojnych/sił specjalnych i konkurenci. Potencjalne scenariusze wydarzeń wykorzystujące HPM są podobne. Niezadowolony pracownik może wnieść na teren zakładu pracy małe, improwizowane

urządzenie i uruchamiając to urządzenie może spowodować powstanie licznych problemów związanych z funkcjonowaniem infrastruktury elektrycznej, elektronicznej i innej. Do spowodowania zagrożenia terrorysta może wykorzystać także źródło HPM zainstalowane na pojeździe. W przypadku podejścia militarnego możliwe jest również wykorzystanie źródeł przenoszonych drogą powietrzną.

Charakterystyki zagrożeń HPM są ograniczone przez atakującego umiejętnościami technicznymi, poziomem technologii i dostępem do środków technologicznych. Moc promieniowana źródeł HPM wynosi od kilowatów do gigawatów (w impulsie).

Zakres częstotliwości zawiera się w granicach od kilkudziesięciu MHz do kilku GHz. Na rys. 1 przedstawiono zakresy częstotliwości źródeł typu: LEMP, NEMP i źródeł HPM zaczerpnięte z normy IEC 61000-2-13 [2].



Rys. 1. Porównanie typowych źródeł HPEM pod kątem ich częstotliwości pracy [2]

W zależności od rodzaju celu i wiedzy o celu, do osiągnięcia zamierzonego efektu i spowodowania maksymalnych skutków, atakujący będzie wybierał typy źródeł HPM z najbardziej skutecznym przebiegiem. Możliwe rodzaje źródeł HPM i kształty fali opisano w kolejnym rozdziale artykułu. Poziom energii elektromagnetycznej w miejscu zastosowania źródła HPM zależy od wielu parametrów [2].

Impuls elektromagnetyczny HPM

Źródła HPM można podzielić na cztery kategorie, do których możemy zaliczyć:

- 1) Mobilne źródła HPM.
- 2) Przenośne źródła HPM.
- 3) Źródła HPM generujące zaburzenia przewodzone.
- 4) Źródło HPM na bazie pocisku [3].

Ogólnie rzecz biorąc, gdy określone zostanie źródło, to powinien być określony scenariusz wydarzeń wykorzystując do tego najgorsze warunki mających miejsce okoliczności. Również ważny jest kształt impulsu HPM. Ilość rodzajów kształtów fali HPM jest ograniczona do czterech. Parametry kształtu fali, takie jak częstotliwość, moc, itp. zależą od rodzaju źródła. Ogólnie możemy podzielić kształt fali HPM na:

- 1) Falę ciągłą – w skład systemu HPM, który generuje kształt fali typu CW (ang. continuous wave), wchodzi na ogół, jako magnetron, rezonansowa lampa mikrofalowa. Sygnał o kształcie fali typu CW jest najbardziej efektywny, gdy jego częstotliwość jest dostrojona do najbardziej podatnej częstotliwości z punktu widzenia celu. Falę ciągłą można charakteryzować poprzez wartość częstotliwości i moc [3].
- 2) Wąskopasmową NB (ang. narrow band) impulsową CW - wąskopasmowy impulsowy kształt fali ciągłej CW stanowi sobą typowy kształt fali HPM. W widmie Fouriera tego typu fali występuje wąska obwiednia wokół „częstotliwości środkowej”. Tego typu przebieg może być

charakteryzowany przez częstotliwość nośną, moc szczytową, szerokość impulsu i częstotliwość powtarzania impulsu oraz parametry pochodne, takie jak cykl pracy, moc średnia, itp. Zaletą kształtu fali NB jest fakt, że do wygenerowania skutecznego wysokoenergetycznego impulsu wykorzystywana jest niewielka ilość mocy średniej. W wyniku czego, do zaburzenia pracy lub uszkodzenia wyposażenia elektronicznego wykorzystuje się tego typu wysokoenergetyczne impulsy. Zakłada się, że największą mocą impulsową w szczycie charakteryzują się źródła wąskopasmowe. Generowany sygnał jest najbardziej skuteczny, gdy cel jest podatny na wartość szczytową sygnału przy jego najbardziej wrażliwej częstotliwości. Sygnał ten może być przeznaczony do sprzęgnięcia się z antenami lub strukturami pełniącymi rolę anteny tak, aby spowodować uszkodzenia celu. Źródła wąskopasmowe mogą być także zaprojektowane do sprzęgnięcia się z celem poprzez ścieżki nieumyślne powodując uszkodzenia elektroniki [3].

- 3) Sinusoidę tłumioną - kształt fali DS (ang. damped sine) charakteryzuje się poprzez: częstotliwość nośną, moc szczytową, wartość tłumienia i wartość energii w impulsie. Kształt fali DS charakteryzuje się "częstotliwością środkową" i niektórymi pasmami częstotliwości, które mogą zwiększyć prawdopodobieństwo sprzęgnięcia typu "tylne drzwi". Zaletą kształtu fali DS jest szersze pasmo aniżeli kształty fali CW lub NB; zazwyczaj o jedną oktawę [3].
- 4) Ultra szerokie pasmo - kształt fali UWB (ang. ultra wide band) charakteryzuje się poprzez: moc szczytową, czas narastania, czas zaniku, szerokość pasma i częstotliwość powtarzania impulsów. Impulsy UWB charakteryzują się zdolnością wzbudzenia wielu modów rezonansowych w obiekcie lub celu. Z uwagi na fakt, że moc, która występuje w niewielkiej części zakresu częstotliwości jest stosunkowo mała, a także ze względu na to, że całkowita energia zawarta jest w jednym impulsie, trudno jest wygenerować duże natężenie pola elektromagnetycznego do zniszczenia lub uszkodzenia celu. Aby impulsy typu UWB były skuteczne wymagana jest większa moc aniżeli przy impulsie wąskopasmowym o odpowiedniej częstotliwości typu NB [3].

Stanowisko do pomiaru i generowania impulsowego pola elektromagnetycznego

Głównym elementem w omawianym stanowisku pomiarowym odpowiedzialnym za generowanie impulsu HPM jest generator Diehl DS110, który przedstawiono na rys. 2. Jest to kompaktowe urządzenie umieszczone w obudowie, wyglądem przypominającym walizkę. Składnikami generatora są zasilacz wysokiego napięcia, generator Marxa 300 kV i antena rezonansowa. Układ zasilania wysokiego napięcia zasila generator Marxa napięciem 50 kV (napięcie symetryczne ± 25 kV), jest on ładowany do progu ustawionego przez przełącznik, który ustawia ciśnienie gazu N_2 w generatorze. Przy zmianie położenia przełącznika, antena jest zasilana napięciem 300 kV, iskrownik zawarty w powietrzu jest izolowany przez ciśnienie gazu N_2 [2][4][5][6].

Do pomiarów generowanych impulsów HPM wykorzystywany jest system pomiarowy „Diehl Measurement”. Składa się on z oscyloskopu Tektronix Digital DPO70404, sondy D-dot, komputera PC oraz zasilacza UPS. Elementy składowe systemu umieszczone są w ekranowanej i tłumiącej wstrząsy obudowie. Dzięki temu połączeniu system „Diehl Measurement” może być obsługiwany np. w przestrzeni swobodnej bez zasilania sieciowego i może być obsługiwany z zamkniętymi pokrywami ekranującymi, gdy

znajduje się w bliskiej odległości od promieniujących systemów HPM. W obudowie ekranowanej przechowywany jest komputer przenośny, który może być wykorzystany do obliczania mierzonych pól elektromagnetycznych i dalszego przetwarzania mierzonych danych [2][4][5][6].

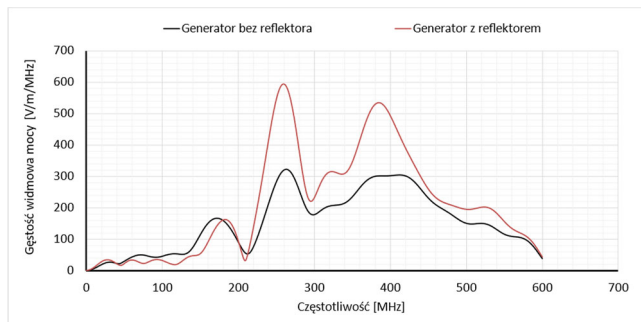


Rys. 2. Widok generatora Diehl DS 110

Na rys. 3 przedstawiono wygląd przykładowego impulsu HPM w dziedzinie czasu, natomiast na rys. 4 przedstawiono widmo częstotliwościowe impulsu HPM



Rys. 3. Przykładowy wygląd impulsu HPM w dziedzinie czasu



Rys. 4. Przykładowy wygląd widma częstotliwościowego dla zarejestrowanego impulsu HPM

A. Sonda pola D-dot

Do pomiaru bardzo krótkich impulsów HPM za pomocą systemu pomiarowego „Diehl Measurement” wybrano kombinację sondy D-dot Prodyn AD-70 i balunu Prodyn BIB-170F stanowiącą czujnik pola elektrycznego. Sonda jest zamontowana na plastikowym stojaku, aby zminimalizować jego wpływ na wynik pomiaru. Sondy pola elektrycznego, takie jak Prodyn AD-70, są czujnikami podwójnymi. Mają dwa elementy antenowe, które są wrażliwe na to samo pole, ale mierzą w przeciwnych fazach. Pomiar realizowany jest w stosunku do ziemi odniesienia znajdującej się pomiędzy dwoma elementami. Sonda pola elektrycznego (D-dot) składa się z pojemnościowych elementów pomiarowych w przeciwieństwie do sond pola magnetycznego (B-dot) mających indukcyjne elementy pomiarowe lub pętle. Sonda pola D-dot jest urządzeniem pasywnym i nie wymaga zewnętrznego zasilania. Ponieważ jest ona symetryczna, wymagany jest dodatkowy układ dopasowujący – balun. Balun to skrót od BALanced and UNbalanced i jest to element, który przekształca symetryczne sygnały z sondy na wspólny, niesymetryczny sygnał, jak zwykle w kablach

koncentrycznych. Powierzchnia efektywna sondy D-dot wynosi 0,001 m², a straty wtrąceniowe baluna wynoszą 8 dB. Wartości te muszą być uwzględniane podczas realizacji pomiarów i są zawarte jako standardowe parametry w oprogramowaniu obliczającym wartości zmierzonych impulsów HPM. Wartości te można zmienić w arkuszu kalkulacyjnym programu Microsoft Excel, gdy używane są inne sondy niż oryginalne sondy dostarczone z systemem pomiarowym Diehl [7].

B. Oscyloskop

Głównym elementem systemu „Diehl Measurement” jest nowoczesny cyfrowy oscyloskop Tektronix DPO70404. Zawiera on cztery kanały analogowe, każdy o szerokości pasma 4 GHz i częstotliwości próbkowania w czasie rzeczywistym 25 GS/s. Do pomiaru pola impulsowego systemu „Diehl Measurement” nie można używać interpolowanej wyższej częstotliwości próbkowania, zawsze należy używać metody próbkowania w czasie rzeczywistym. Oscyloskop jest montowany w ekranowanej 19-calowej obudowie za pomocą zestawu montażowego Tektronix. Tektronix DPO70404 zawiera własną płytę komputerową do obsługi sprzętu. Można zainstalować program Microsoft Excel z makrami przetwarzania, ale doświadczenie firmy Diehl pokazuje, że korzystanie z oddzielnego komputera sprawia, że oscyloskop jest bardziej stabilny, a analiza danych bardziej niezależna. Oscyloskop umożliwia rejestrowanie tak zwanych formatów FastFrame. FastFrame jest w stanie uchwycić wiele zdarzeń wyzwalających, odpowiednio wiele impulsów HPM, jako sekwencyjne rekordy umieszczone kolejno w zbiorczym rekordzie. Można przeglądać i mierzyć każdy rekord indywidualnie. Znaczniki czasu wyświetlają bezwzględny czas wyzwalania dla określonej klatki i względny czas między wyzwalaczami dwóch określonych klatek. Oznacza to, że kilka impulsów HPM można zapisać w jednym pliku i przetworzyć w komputerze w jednym kroku.

Dane zmierzone za pomocą oscyloskopu można zapisać na wewnętrznym dysku twardym, na pamięciach USB podłączonych do portów USB lub bezpośrednio na dyskach sieciowych po podłączeniu do innych komputerów. Diehl zaleca, aby najpierw zapisać zmierzone dane na wewnętrznym dysku twardym. Aby skopiować je na komputer przenośny, należy użyć pamięci USB lub połączenia sieciowego. Dzięki temu podczas przetwarzania zmierzonych danych na komputerze przenośnym znajduje się tylko duplikat [9].

Wyjście sondy pola D-dot jest proporcjonalne do pierwszej pochodnej czasowej indukcji elektrycznej $D(t)$, czyli:

$$(1) \quad D\text{-dot} = dD/dt,$$

uwzględniając równanie:

$$(2) \quad V_o = Z A_{eq} dD/dt \text{ lub } dD/dt = V_o/(Z A_{eq}),$$

uwzględniając równanie $D = \epsilon_0 E$ otrzymujemy:

$$(3) \quad dE/dt = \frac{V_o}{Z A_{eq} \epsilon_0}$$

Sygnały na wyjściu sondy pola D-dot są mierzone w voltach, które są proporcjonalne do jednostek pierwszej pochodnej czasowej indukcji elektrycznej dD/dt (równanie 1). Stała proporcjonalności między wyjściem sondy pola a pierwszą pochodną czasową natężenia pola elektrycznego to stała przenikalności elektrycznej ϵ_0 . Jak pokazano w równaniu (2) stała proporcjonalności między wyjściem czujnika V_o a pierwszą pochodną czasową natężenia pola elektrycznego dE/dt jest iloczynem impedancji wyjściowej Z i powierzchni efektywnej sondy A_{eq} oraz stałej przenikalności

ϵ_0 . Jest to współczynnik kalibracji i jest on stosowany do pierwszej pochodnej czasowej natężenia pola elektrycznego, dE/dt , a nie do samego natężenia pola elektrycznego [7].

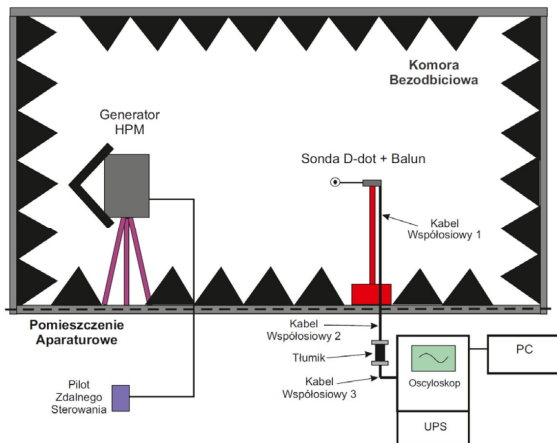
Wyjście czujnika jest funkcją cosinusoidalną o amplitudzie V_{op} i częstotliwości f , gdzie:

$$(4) \quad E_p = \frac{1}{2} f \left(\frac{dE}{dt} \right)_p = \frac{1}{2} f \frac{V_{op}}{Z_{Aeq} \epsilon_0}$$

C. Kompletny tor pomiarowy

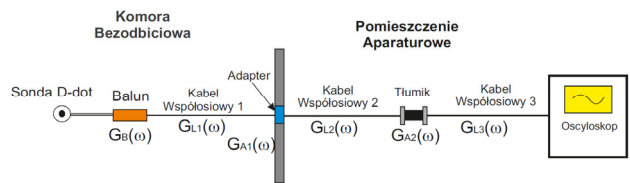
Ponieważ sygnał wyjściowy sondy pola D-dot jest symetryczny, a wejście oscyloskopu jest niesymetryczne, transformator symetryczny-niesymetryczny (balun) jest bezpośrednio podłączony do sondy. To urządzenie dodaje określoną wartość strat wtrąceniowych do sygnału z sondy i wykonuje transformację impedancji ze zbalansowanego wyjścia sondy (zwykle $100 \Omega \rightarrow 2,50 \Omega$) na wyjście koncentryczne (zwykle 50Ω) [8].

Zanim sygnał wyjściowy z sondy D-dot może zostać zarejestrowany przez oscyloskop, musi zostać przesłany. Istnieją dwa typy przesyłania danych z sondy D-dot do oscyloskopu. Pierwszy z nich bazuje na torach w.cz. (liniach koncentrycznych), którymi bezpośrednio połączone są sonda D-dot, balun i oscyloskop. Ze względu na wysokie amplitudy impulsów HPM ekranowanie torów w.cz. dla linii sygnałowych może być jednak dużym problemem. Możliwe jest stosowanie drugiego typu przesyłania danych z wykorzystaniem krótkiego połączenia koncentrycznego, które jest używane od baluna do nadajnika optycznego. Nadajnik optyczny kończy sygnał elektryczny i przekształca ten sygnał w sygnał optyczny. Sygnał optyczny jest przesyłany za pośrednictwem światłowodu do odbiornika, który dokonuje konwersji z powrotem na sygnał elektryczny. W praktyce czujnik D-dot jest bezpośrednio podłączony do baluna. W niniejszym stanowisku pomiarowym występują jednak tylko tor w.cz.



Rys. 5. Schemat blokowy stanowiska laboratoryjnego do generowania i pomiaru impulsu HPM

Na rys. 5 przedstawiono schemat blokowy stanowiska laboratoryjnego do generowania i pomiaru impulsu HPM. Głównymi elementami tego stanowiska laboratoryjnego są generator Diehl i sonda pola, które umieszczono w komorze bezodbiwojowej, dzięki czemu prawdopodobieństwo uszkodzenia innych urządzeń elektronicznych znajdujących się w pobliżu generatora jest bardzo małe. Ponadto zostały umieszczone na metalowej podłodze z absorberami ferrytowymi, zapewniając w ten sposób wspólną masę odniesienia. Urządzenia w pomieszczeniu pomiarowym umożliwiają ich bezpieczną obsługę przez osoby upoważnione.



Rys. 6. Schemat toru pomiarowego w stanowisku laboratoryjnym do pomiaru impulsu HPM

Na rys. 6 przedstawiono schemat z wykorzystaniem wszystkich komponentów używanych do pomiaru impulsów HPM. Kompletna ścieżka sygnału oczywiście musi być uważana za nieidealną, ponieważ każdy komponent modyfikuje oryginalny sygnał z wyjścia sensora D-dot. Wpływ każdego komponentu na wartość odbieranego sygnału można opisać za pomocą złożonych funkcji przenoszenia, w których $G_B(\omega)$ jest dla baluna, $G_{L1}(\omega)$, $G_{L2}(\omega)$, $G_{L3}(\omega)$ dla kabli koncentrycznych, $G_{A1}(\omega)$, $G_{A2}(\omega)$ dla adapteru w ścianie komory i tłumika. Te złożone funkcje przenoszenia opisują odpowiedź amplitudową i liniowe odchylenie fazowe każdego elementu w zależności od częstotliwości kątovej ω jako układu liniowego. Dane dla każdego elementu toru pomiarowego można łatwo uzyskać przez pomiar S_{21} (współczynnika transmitancji) za pomocą wektorowego analizatora sieci [8].

Niepewność pomiaru dla stanowiska laboratoryjnego do pomiaru i generacji impulsów HPM

Identyfikowalność wielkości pomiarowych jest bardzo ważna dla akredytowanej procedury testowej. Dokładność i pewność wyników pomiarów są oparte na budżecie niepewności. Zaczynając od równania modelu, można obliczyć budżet niepewności dla przedstawionego stanowiska pomiarowego. W tego typu rodzajach pomiarów bardzo często używa się wartości logarymicznych dla poszczególnych wielkości, co upraszcza końcowe wzory dotyczące kalkulacji budżetu niepewności. Równanie dla opisanego i przedstawionego na rys. 6 toru pomiarowego wygląda następująco:

$$(5) \quad E(t) = E_{calc}(t) + dV_{scope}(t) + dV_{sensor}(t) + P_s + \sum dER_x$$

gdzie w tabeli 1 opisano składniki wchodzące w skład budżetu niepewności.

Tabela 1. Składniki niepewności pomiarowej

Symbol	Niewiadoma	Jednostka	Opis
$E(t)$	Różnica sygnału odebranego z sondy D-dot	dBµV/m	Wynik pomiaru
$E_{calc}(t)$	Obliczone natężenie pola elektrycznego	dBµV/m	Wartość obliczona z próbki danych z oscyloskopu
$dV_{scope}(t)$	Błąd pomiaru amplitudy na oscyloskopie	dB	Błąd amplitudy pochodzący z oscyloskopu
$dV_{sensor}(t)$	Błąd wyjściowy sondy D-dot	dB	Wartość sumująca wszystkie niedoskonałości sondy D-dot
P_s	Powtarzalność pomiaru	dB	Wartość ta jest oszacowaniem powtarzalności pomiaru np. umiejscowieniem sondy pomiarowej
$\sum dER_x$	Suma błędów z toru pomiarowego	dB	Wartość ta jest ogólnym błędem pochodzącym z pomiaru S_{21} elementów toru pomiarowego

Z powodu analizy całkowitego toru pomiarowego funkcje przenoszenia każdego elementu w zależności od częstotliwości kątovej zmniejszają swój udział w budżecie niepewności tylko do składowych pochodzących z pomiarów S_{21} dla każdego z nich [8][9]:

$$(6) \quad \sum dER_x = dER_B + dER_{L1} + dER_{L2} + dER_{L3} + dER_{A1} + dER_{A2}$$

Tabela 2. Budżet niepewności pomiaru

Symbol	Źródło niepewności	Wartość S(x)	Rozkład prawdopodobieństwa	Dzielnik	c _i	c _i *u(x _i)
E _{calc(t)} [dB]	Oszacowanie wynikające z różniczek i obliczenia natężenia pola elektrycznego	0,5	Prostokątny	1,732	2	0,289
dV _{scope(t)} [dB]	Świadczenie wzorcowania oscyloskopu	0,65	Prostokątny	1,732	1	0,375
dV _{sensor(t)} [dB]	Oszacowanie z pomiaru odniesienia w komorze bezodbiciowej	2,68	Normalny k=2	2	1	1,34
P _s [dB]	Pomiar weryfikacyjny przed każdym testem	0,00115	Normalny k=2	2	1	0,001
dER _B [dB]	Świadczenie wzorcowania analizatora sieci	0,35	Prostokątny	1,732	1	0,202
dER _{L1} [dB]		0,35	Prostokątny	1,732	1	0,202
dER _{L2} [dB]		0,35	Prostokątny	1,732	1	0,202
dER _{L3} [dB]		0,35	Prostokątny	1,732	1	0,202
dER _{A1} [dB]		0,35	Prostokątny	1,732	1	0,202
dER _{A2} [dB]		0,35	Prostokątny	1,732	1	0,202
$\sum (c_i * u(x_i))^2$						2,265
$\sqrt{\sum (c_i * u(x_i))^2}$						1,505
k =						2
Niepewność rozszerzona u_c(x) =						3,01

W Tabeli 2 pokazano pełne wyliczenie rozszerzonej niepewności pomiarowej w postaci budżetu niepewności pomiaru dla omówionego stanowiska laboratoryjnego w tym niepewność źródeł i zakładane dystrybucje. Obliczenia dokonano na podstawie literatury [9].

Dla zaprezentowanej metody testowej służącej do pomiaru amplitudy impulsów HPM rozszerzoną niepewność pomiaru można określić na $\pm 3,01$ dB. Współczynnik rozszerzenia k = 2,0 jest podyktowany dodatkowymi stopniami swobody spowodowanymi błędami typu A podczas analizy wszystkich składników pochodzących z pomiarów S₂₁.

Podsumowanie

Badania odporności specjalistycznego sprzętu wojskowego na impulsowe pole elektromagnetyczne nabiera znaczenia coraz bardziej. W dość krótkim czasie badania te mogą stać się standardową procedurą dla systemów wojskowych i informatycznych. Procedury badawcze występujące w dokumentach normalizacyjnych definiujące poziomy zagrożenia i procedury testowania dla narażeń impulsami HPM istnieją od kilku lat.

W niniejszym artykule przedstawiono procedurę pomiaru i stanowisko pomiarowe do badania odporności sprzętu wojskowego na impulsowe pole elektromagnetyczne

Głównym celem niniejszego artykułu było jednak przedstawienie sposobu wyznaczenia i wyliczenie budżetu niepewności dla badania odporności specjalistycznego sprzętu wojskowego na impulsowe pole elektromagnetyczne.

Ze względu na zależności matematyczne, które uwzględniają wszystkie informacje toru pomiarowego z punktu widzenia parametrów elektrycznych, rozszerzona niepewność pomiaru wynosi 3,01 dB dla omówionego stanowiska laboratoryjnego. Stosując tę metodę badania, można zaferować wiarygodne i powtarzalne testy kwalifikacyjne HPM do narażania sprzętu wojskowego, które opierają się na dokładności i wiarygodności takich testów.

Praca została sfinansowana przez Wojskową Akademię Techniczną w ramach projektu nr UGB/749/2024 pt. "Anteny mikropaskowe o wysokim zysku energetycznym pracujące w paśmie milimetrym"

Autorzy:

dr inż. Rafał Przesmycki, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: rafal.przesmycki@wat.edu.pl;

dr inż. Marek Bugaj, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: marek.bugaj@wat.edu.pl;

LITERATURA

- [1] AECTP 250 Ed.2 2011: Electrical and electromagnetic environmental conditions, NATO INTERNATIONAL STAFF - DEFENCE INVESTMENT DIVISION, 2011.
- [2] Przesmycki R., Wnuk M. – Susceptibility of IT devices to HPM pulse, *International Journal of Safety and Security Engineering*, Volume 8, No. 2, 2018, pages 223-233.
- [3] NO-06-A218-4 2014 – Technika wojskowa, Warunki Środowiskowe Część 4: Elektryczne i elektromagnetyczne oddziaływania środowiskowe, 2014
- [4] Przesmycki R., Wnuk M., Bugaj M. – HPEM susceptibility assessment of data storage devices, 2016, *21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON)*, 9-11 May 2016, Kraków, Poland, Electronic ISBN: 978-1-5090-2214-4, DOI: 10.1109/MIKON.2016.7492113.
- [5] Przesmycki R., Wnuk M. – HPEM susceptibility assessment of informatic devices, *Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS)*, 8-11 Aug. 2016, Shanghai, China, 978-1-5090-6093-1, DOI: 10.1109/PIERS.2016.7734568.
- [6] DIEHL BGT Defence – Operating and Maintenance Manual for DIEHL DS110.KS2.F.MP1.B (HPM Case System DS110), document No BDB8118952.
- [7] Reed Edgel W. – The next Best Thing to Calibration, Functional Testing, *Prodyn Application note*.
- [8] M. Kreitlow, G. Schmidt and F. Sabath, – Accreditation of a NEMP test procedure: Approach, measurement technique, uncertainty, *2016 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, Ottawa, ON, 2016, pp. 841-846. doi: 10.1109/ISEMC.2016.7571759
- [9] M. Kreitlow, G. Schmidt and F. Sabath, – The Uncertainty of Measurement in NEMP Testing, July 2016. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, *International Organization for Standardization (ISO) Std. ISO 17 025:2005*, August 2005
- [10] Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM), *Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM/WG 1)*, September 2008