

doi:10.15199/48.2025.02.42

## Badania odporności na impulsy elektromagnetyczne wysokiej mocy – opis, zastosowania, przeciwdziałanie

**Streszczenie.** W pracy omówiono badania odporności na impulsy elektromagnetyczne. Przedstawiono przegląd norm wskazujący na konkretny zakres urządzeń przeznaczonych do badań. Omówiono budowę stanowiska oraz opisano przebieg badań. Przetworzono skutki działania NEMP (ang. Nuclear Electromagnetic Pulse) na urządzenia zarówno cywilne jak i wojskowe. Przedstawiono metody przeciwdziałania impulsowemu polu elektromagnetycznemu.

**Abstract.** EMP (Electromagnetic pulse) susceptibility is increasingly measured in a number of industries and applications. This research deals with safety-critical equipment and subsystems, in particular on military equipment. In this work, the examinations using NEMP (Nuclear Electromagnetic Pulse) test system. In particular, the aim of the research was to verify the ability of the equipment enclosure to withstand a transient electromagnetic field. The RS105 limit requires that the equipment shall not degradation of performance malfunction, or deviation from specified indications above the equipment's specific tolerances. The presented results of the experimental show effects of electromagnetic pulse. We will present in detail counteract the negative effects of transient electromagnetic field. (**High-power electromagnetic pulse resistance tests – description, applications, countermeasures**)

**Słowa kluczowe:** podatność na impuls elektromagnetyczny, impuls elektromagnetyczny wysokiej mocy, technologia Marxa, linia radiacyjna

**Keywords:** electromagnetic pulse susceptibility, Nuclear Electromagnetic Pulse, Marx technology, radiation line

### Opis badania i przegląd norm

Podatność na impulsy elektromagnetyczne (EMP – ang. Electromagnetic Pulse) jest coraz częściej rozważana w wielu gałęziach przemysłu. Zainteresowanie badaniami stale rośnie co wpływa na coraz większy zakres zastosowań. Badania dotyczą sprzętu i podsystemów kluczowych dla bezpieczeństwa, w szczególności sprzętu wojskowego.

Badania odporności na impulsy elektromagnetyczne odnoszą się do różnych zakresów impulsów elektromagnetycznych. Głównym obszarem omawianym w opracowaniu są oddziaływania impulsowych pól elektromagnetycznych wysokiej mocy (NEMP – ang. Nuclear Electromagnetic Pulse). NEMP odpowiada polu elektromagnetycznemu powstającemu w wyniku wybuchów jądrowych [5].

Do badań odporności na impulsy elektromagnetyczne wysokiej mocy odnoszą się trzy normy: MIL-STD-461 E/F/G [1], NO-06-A200:2012 [2], NO-06-A500:2012 [3]. W każdej z nich znajduje się opis badań kompatybilności elektromagnetycznej dotyczącej odporności na impulsowe pole elektromagnetyczne. Zakres badań NEMP zawiera się w trzech testach: RS105, KRS-03, PRS-03. Normy opisują przebieg badań oraz charakterystykę impulsu pola elektromagnetycznego któremu musi być poddane badane urządzenie (EUT – ang. Equipment Under Test).

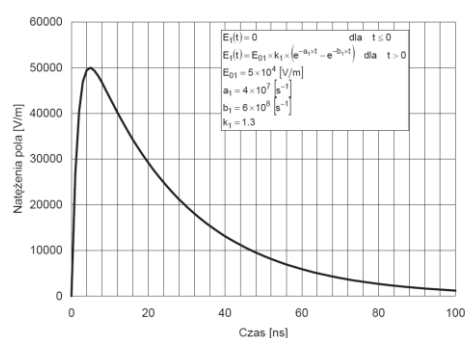
Według normy badania odporności na NEMP wykonuje się w ograniczonym zakresie dla obiektów naziemnych Marynarki Wojennej RP, okrętów nawodnych, podwodnych oraz statków powietrznych Wojsk Lądowych oraz Marynarki Wojennej RP (Rys. 1). Ze względu na współcześnie istniejące zagrożenia, wydaje się że zakres powinien być rozszerzony o kolejne grupy wyrobów o przeznaczeniu dla bezpieczeństwa i obronności. W dalszej części zamieszczono opis i przedstawiono badania EUT w celu udowodnienia zasadności rozszerzenia grupy urządzeń poddanych badaniom.

Podczas badań sprawdza się odporność urządzenia na impuls elektromagnetyczny. Generator impulsów wysokiego napięcia wytwarza przebieg zgodny z impulsem opisywanym w normie NO-06-A200:2012 (Rys. 2).

Sprzęt i układy zainstalowane w następujących środowiskach sprzętowych lub obiektach	Zakres stosowania wymagania																		
	KCE-01	KCE-02	KCE-03	KCS-01	KCS-02	KCS-03	KCS-04	KCS-05	KCS-06	KCS-07	KCS-08	KRE-01	KRE-02	KRS-01	KRS-02	KRS-03			
Okrety nawodne	A	A	L	A	S	S	S	L	A	S	A	A	A	L	A	A	L		
Okrety podwodne	A	A	L	A	S	S	S	L	A	S	L	A	A	L	L	A	L		
Statki powietrzne, Wojska Lądowe, w tym sprzęt zabezpieczenia lotów	A	A	L	A	S	S	S	-	A	A	A	-	A	A	L	A	A	L	
Statki powietrzne, Marynarka Wojenna RP	L	A	L	A	S	S	S	-	A	A	A	-	L	A	L	L	A	L	
Statki powietrzne, Siły Powietrzne	-	A	L	A	S	S	S	-	A	A	A	-	-	A	L	-	-	A	-
Systemy kosmiczne, w tym rakiety nośne	-	A	L	A	S	S	S	-	A	A	A	-	-	A	L	-	-	A	-
Obiekty naziemne, Wojska Lądowe	-	A	L	A	S	S	S	-	A	A	A	-	-	A	L	L	A	-	-
Obiekty naziemne, Marynarka Wojenna RP	-	A	L	A	S	S	S	-	A	A	A	-	-	A	L	A	A	L	-
Obiekty naziemne, Siły Powietrzne	-	A	L	A	S	S	S	-	A	A	A	-	-	A	L	-	-	A	-

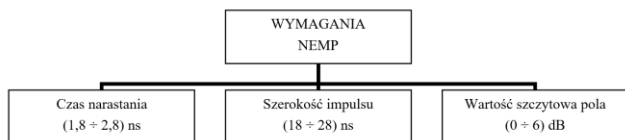
A – stosowane  
L – stosowanie ograniczone zgodnie z odpowiednim rozdziałem niniejszej normy  
S – zamawiający określa w dokumentacji zamówienia

Rys.1. Matryca wymagań [1]



Rys.2. Przebieg zaburzenia według wymagania normy dla wszystkich zastosowań [1]

Zgodnie z normą EUT poddawane jest działaniu impulsowego pola elektromagnetycznego o wartości 50 kV/m. Jednak amplituda impulsu może mieścić się w zakresie od 0 dB do 6 dB powyżej limitu. Dodatkowo ważny jest dobór czasu narastania oraz szerokości impulsu w sposób odpowiadający zapisom normy. Dokładne parametry impulsu zestawiono poniżej (Rys. 3).

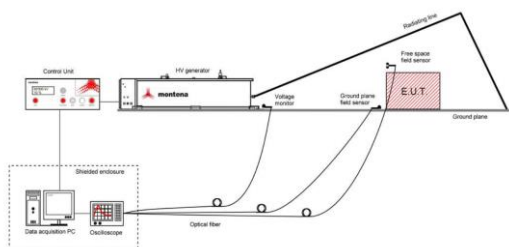


Rys.3. Dokładne parametry impulsu elektromagnetycznego definiowanego przez normę NO-06-A200:2021

W celu odpowiedniego przeprowadzania badań urządzenie musi zostać poddane działaniu pięciu impulsów. Wynik badania uznaje się za pozytywny jeżeli urządzenie nie wykazuje pogorszenia wydajności lub nieprawidłowego działania.

### Opis stanowiska

Stanowisko pomiarowe jest zaprojektowane w sposób umożliwiający instalację zarówno w komorze semi-bezodbiociowej (SAC – ang. Semi Anechoic Chamber) oraz na otwartym poligonie pomiarowym (OATS – ang. Open Area Test Site). Najczęściej stosowana jest pierwsza metoda, ponieważ badania w komorze SAC pozwalają na prowadzenie bezpiecznych i precyzyjnych pomiarów.



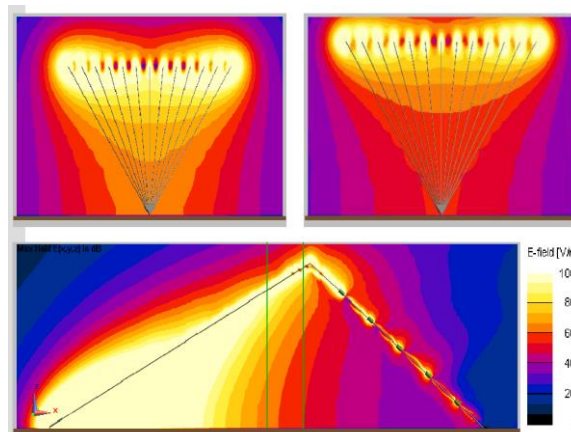
Rys.4. Schemat stanowiska dla testu RS105 [4]

Najważniejsze elementy stanowiska pomiarowego zamieszczono na Rys. 4. System składa się głównie z generatora impulsów wysokiego napięcia podłączonego do linii radiacyjnej. Działanie generatora oparte jest na technologii Marxa. Przez wysokie napięcie w generatorze konieczna jego praca w środowisku gazów o właściwościach izolujących. Linia radiacyjna stanowiąca antenę emituje pole na EUT. Testowane urządzenie musi być umieszczone w obszarze jednorodności generowanego pola elektromagnetycznego, więc istnieje kryterium wielkości badanych urządzeń. Maksymalna wysokość EUT musi być mniejsza niż  $\frac{1}{3}$  wysokości pod linią oraz maksymalna szerokość EUT musi być mniejsza niż  $\frac{1}{2}$  szerokości linii.

Dodatkowo ważnym elementem jest system monitorowania generowanych impulsów. Pomiar generowanego sygnału odbywa się przy pomocy sondy naziemnej pola elektrycznego umieszczonej na przewodzącej podłodze w okolicach badanego obiektu oraz sondy swobodnej pola elektrycznego umieszczonej w przestrzeni w miejscu EUT. Wszystkie dane rejestrowane są przy pomocy oscyloskopu. W celu poprawnego rejestracji wyników oscyloskop oraz komputer powinien być umieszczony w ekranowanym pomieszczeniu. Wyposażenie pomiarowe jest poddane wzorcowaniu lub sprawdzaniu w celu zapewnienia najwyższej jakości wykonywanych badań.

Zasada działania stanowiska pomiarowego do badań odporności na NEMP polega na dostarczeniu impulsu wysokiego napięcia przez generator Marxa do linii radiacyjnej rozstawionej na uziemionej płaszczyźnie komory SAC. Przy przeprowadzeniu każdej próby należy dobrać kształt generowanego napięcia, ponieważ każdorazowo zmienia się wielkość i rozmieszczenie EUT pod linią radiacyjną. Parametry należy dobrać w sposób

umożliwiający generowanie impulsu zgodnego z założeniami normy. Poniżej zamieszczono wizualizację rozchodzenia się fali elektromagnetycznej podczas testów (Rys. 5).

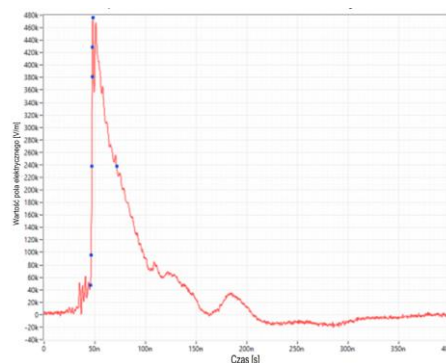


Rys.5. Zobrazowanie rozkładu pola pod linią radiacyjną – między linią radiacyjną a uziomioną płaszczyzną podłogi generowany jest impuls elektromagnetyczny [4]

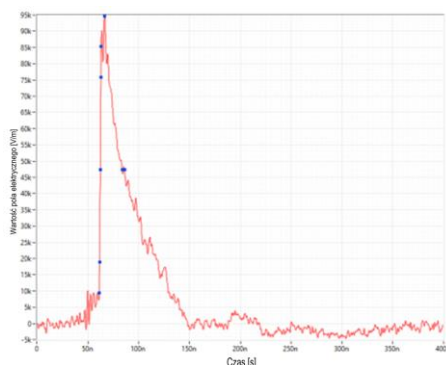
### Przebieg badań oraz wyniki testów

Bezpośrednio przed każdym badaniem wykonuje się kalibrację stanowiska badawczego. Konieczne jest umieszczenie sond w miejscu wyznaczonym dla EUT w późniejszej części badań. Kalibracja polega na doborze parametrów wejściowych na generatorze w sposób umożliwiający generowanie impulsów zgodnych z parametrami zmieszczonymi w normie.

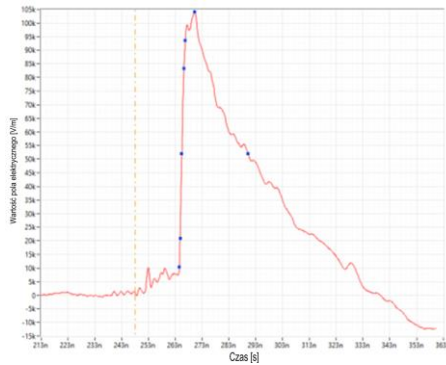
Podczas każdej próby wykonywano pomiar napięcia na generatorze oraz pola elektrycznego mierzonego sondami pomiarowymi (Rys. 6 – Rys. 8). Wyniki tych pomiarów pozwalają na określenie parametrów koniecznych do porównania impulsu z warunkami normy.



Rys.6. Przykładowy wynik badań podczas kalibracji – napięcie na generatorze

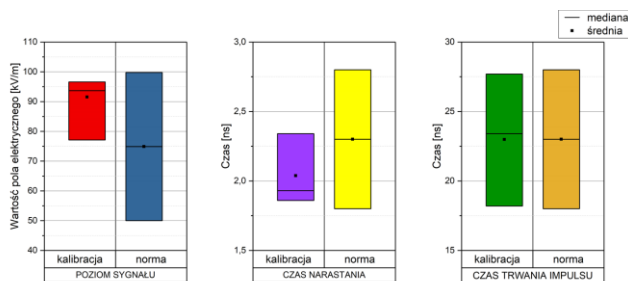


Rys.7. Przykładowy wynik badań podczas kalibracji – pole elektryczne mierzone sondą naziemną



Rys.8. Przykładowy wynik badań podczas kalibracji – pole elektryczne zmierzone sondą swobodną

Zestawiono wyniki dla kilku wygenerowanych impulsów (Rys. 9). Mimo różnic w amplitudzie sygnału oraz parametrach czasowych wszystkie wygenerowane impulsy są zgodne z zakresami zapianymi w normach. Jak już wcześniej wspomniano, amplituda impulsu powinna mieścić się w zakresie od 50 kV/m do ~100 kV/m.



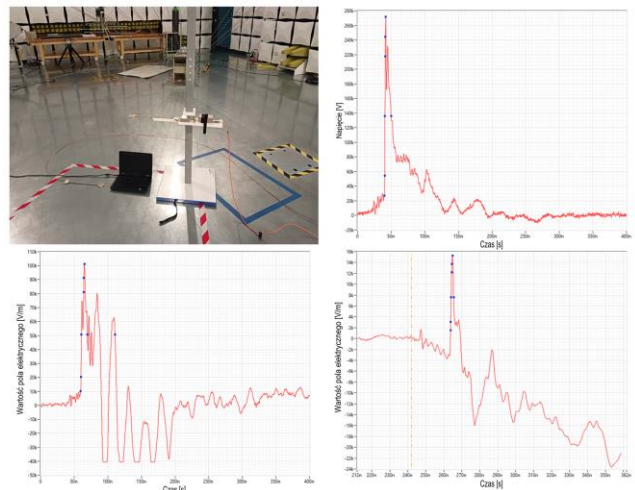
Rys.9. Zestawienie parametrów otrzymanych podczas kalibracji oraz zamieszczonymi w normie NO-06-A200:2012

### Wyniki testów

Badaniom podano Notebook, stanowiący przykład sprzętu o zastosowaniu cywilnym. Przed umieszczeniem EUT pod linią radiacyjną wykonano kalibrację. Podczas i po badaniu sprawdzano prawidłowe działanie EUT zgodnie z zasadą zgodności.

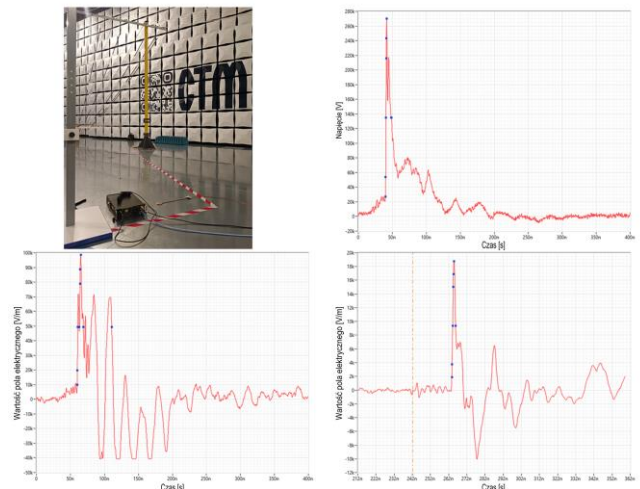
Urządzenie zgodnie z normą poddano działaniu pięciu impulsom. Wyniki badań dla jednego z tych impulsów przedstawiono na wykresach (Rys. 10). Zauważalne są istotne różnice w mierzonym sygnale na sondach pola elektrycznego w porównaniu z danymi otrzymanymi podczas kalibracji. Zmiany w generowanym polu elektrycznym względem impulsu wzorcowego z normy są spowodowane umieszczeniem badanego obiektu w pobliżu sond pomiarowych. Dokładniej różniące się przebiegi wynikają z zakłóceń pochodzące od działającego urządzenia lub spowodowane są odbiciami. Podczas kalibracji generowany sygnał był zgodny z normą.

Przeprowadzono badania odporności radiostacji na impulsowe pole elektromagnetyczne. Wybrane EUT stanowi sprzęt wojskowy. Według matrycy wymagań zamieszczonej w normie urządzenie typu radiostacja nie powinno polegać badaniom odporności na impulsowe pole elektromagnetyczne wysokiej mocy [1]. Mimo to skłaniamy się na podstawie wyników badań i możliwych zagrożeń do sprawdzania odporności tego typu urządzeń. W naszej firmie wykonuje się badania urządzeń tej grupy mimo braku takiej konieczności. Badania pozwalają na sprawdzenie szczelności obudowy chroniącej sprzęt przed polem elektromagnetycznym. Dodatkową ochronę powinny także stanowić zabezpieczone złącza antenowe.



Rys.10. Zdjęcie stanowiska pomiarowego oraz wyniki pomiarów podczas badań laptopa – odpowiednio: napięcie na generatorze, pole elektryczne mierzone sondą naziemną, pole elektryczne mierzone sondą swobodną

EUT zostało zbadane podczas normalnej pracy, podłączone zgodnie z wszystkimi wymaganiami. Poddane zostało działaniu pięciu impulsów pola elektromagnetycznego. Zgodne z oczekiwaniami, biorąc pod uwagę przeprowadzoną kalibrację i uzyskany sygnał na generatorze, badania zakończyły się wynikiem pozytywnym (Rys. 11). Nie zarejestrowano jakiegokolwiek pogorszenia działania badań. Stwierdzano, że radiostacja wykazuje odporność na impulsy pola elektromagnetycznego wysokich mocy.



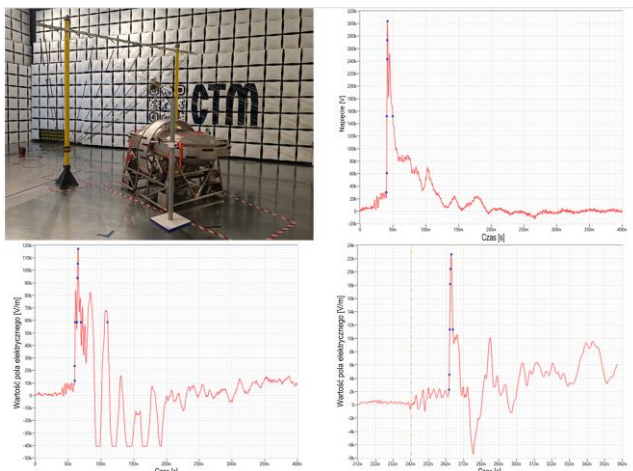
Rys.11. Zdjęcie stanowiska pomiarowego oraz wyniki pomiarów podczas badań laptopa – odpowiednio: napięcie na generatorze, pole elektryczne mierzone sondą naziemną, pole elektryczne mierzone sondą swobodną

Ostatnimi przedstawionymi wynikami są badania Modułowego Lekkiego Trału Niekontaktowego, który służy do zwalczania min morskich z zapalnikami niekontaktowymi i jest przeznaczony do pracy w środowisku morskim.

Po kalibracji EUT umieszczono pod linią radiacyjną. Przystąpiono do badań mimo że nie został spełniony jeden z podstawowych warunków badań. Urządzenie nie spełniało kryterium wymiarów. Maksymalnie EUT powinno mieć 1,2 m wysokości oraz 2,4 m szerokości. Natomiast EUT wychodziło poza zakres jednorodności pola ze względu na zbyt duże rozmiary.

EUT podłączono do komputera umożliwiając transmisję i odbiór danych. W celu określenia wyniku badania na

bieżąco testowano komunikację z urządzeniem. Wynik badania EUT uznaje się za negatywny (Rys. 12). Jednak należy przypomnieć że część trału była za blisko linii radiacyjnej, czyli amplituda generowanego pola była za wysoka w niektórych obszarach. Wartości wykazywały ponad górną granicę zakresu pola definiowanego przez normę.

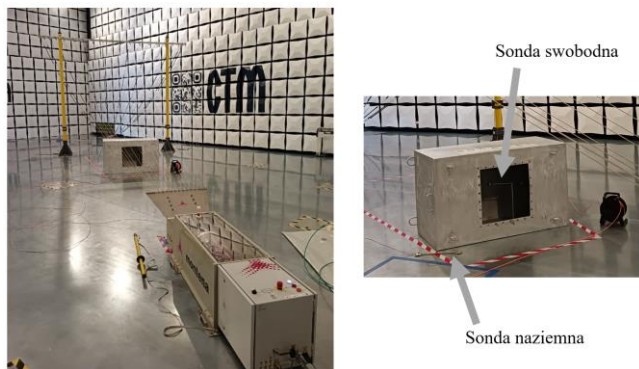


Rys.12. Zdjęcie stanowiska pomiarowego oraz wyniki pomiarów podczas badań MLM – odpowiednio: napięcie na generatorze, pole elektryczne mierzone sondą naziemną, pole elektryczne zmierzone sondą swobodną

### Przeciwdziałanie skutkom NEMP

Badaniom poddano izolowane elektromagnetycznie szyby. Szyby zostały specjalnie zaprojektowane w celu blokowania lub tłumienia promieniowania elektromagnetycznego. Dla zapewnienia skuteczności odporności na NEMP szyby powinny zapobiegać wnikaniu fal elektromagnetycznych z zewnętrznych źródeł lub zawierać przepuszczanie pola elektromagnetycznego tylko w określonym zakresie.

Przed rozpoczęciem testów wykonano kalibrację umieszczając sondy pod linią radiacyjną, odsuwając wszystkie niepożądane elementy na bezpieczną odległość zapewniającą brak wpływu na działanie czujników. W ten sposób dobrano parametry generatora. Po uzyskaniu wyników zgodnych z normą obudowę umieszczono pod linią radiacyjną, a w niej sondę swobodną pola elektrycznego (Rys. 13). Powtórzono testy z parametrami ustalonymi podczas kalibracji. W ten sposób wykonano pomiar tła, czyli impulsu mierzonego wewnątrz metalowej obudowy. Każdą szybę montowano kolejno w metalową obudowę rejestrując wynik promieniowania wynikającego do obudowy. Pozwoliło to określić skuteczność tłumienia dla każdego z wariantów.

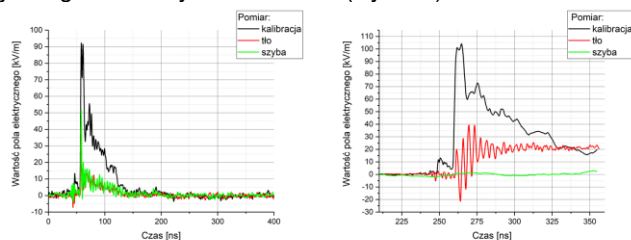


Rys.13. Stanowisko pomiarowe

Przeprowadzono kalibrację i określono parametry generatora pozwalające na generowanie impulsów zgodnych z normą. W celu pomiaru tła umieszczono swobodną sondę pola elektrycznego wewnątrz obudowy. Badania tła wykonano pięciokrotnie w celu otrzymania wiarygodnych wyników. Wyniki dla wszystkich pięciu powtórzeń były spójne.

Zaobserwowano, że istnieje znacząca różnica w sygnale uzyskanym dla kalibracji oraz pomiaru tła. Stwierdzono, że obudowa ma istotny wpływ na prowadzone badania. Nie ma to jednak wpływu na efekt końcowy, ponieważ sama obudowa nie zmienia parametrów wygenerowanego impulsu. Powoduje jedynie zakłócenie pomiaru sondą swobodną pola elektrycznego. Pomiar tła jest niezbędny do wyciągnięcia wniosków o skuteczności ekranowania próbek.

Po kalibracji i pomiarze tła wykonano badania dla pięciu próbek. Badane materiały zostały oznakowane zgodnie z wytycznymi producenta. Każdą próbkę umieszczano kolejno w obudowie wykonując serię koniecznych pomiarów. Każdorazowo wygenerowano pięć impulsów o tych samych parametrach w celu sprawdzenia powtarzalności wyników. Przedstawiono wyniki dla wszystkich badanych próbek oraz dokładne wyniki dla jednego z badanych materiałów (Rys. 14).



Rys.14. Porównanie wyników pomiarów podczas badań kalibracji, tła oraz próbki – odpowiednio: pole elektryczne mierzone sondą naziemną, pole elektryczne zmierzone sondą swobodną

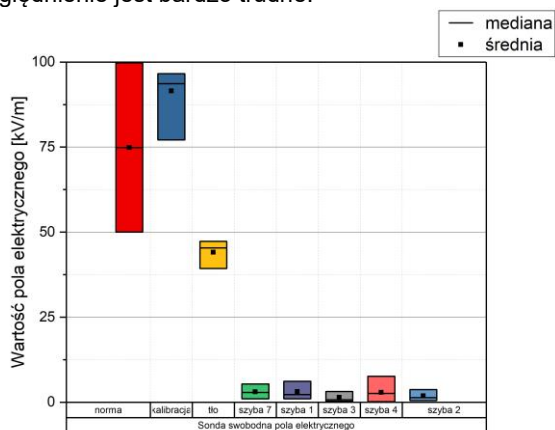
Badania wykazały, że szyby mają znaczący wpływ na tłumienie sygnału. Zaobserwowano niemal całkowity spadek wartości generowanego impulsu do zera. Zestawiono i porównano wyniki pomiarów dla kalibracji, pomiaru tła oraz pomiaru z ekranującą próbką. Wyniki podsumowano i porównano na wykresie. Zgodnie z założeniami eksperymentu informacja o skuteczności ekranowania jest wyciągana z sondy swobodnej pola elektrycznego. Dla sondy naziemnej pomiar tła oraz szyby będzie taki sam ze względu na umieszczenie sondy poza obudową.

Porównując wszystkie próbki stwierdzono, że materiały ekranujące znacznie obniżają fale elektromagnetyczne rejestrowane przez sondy pomiarowe (Rys. 15). Jednoznacznie udowodniono pozytywne działanie próbek na ekranowanie impulsów elektromagnetycznych wysokich mocy.

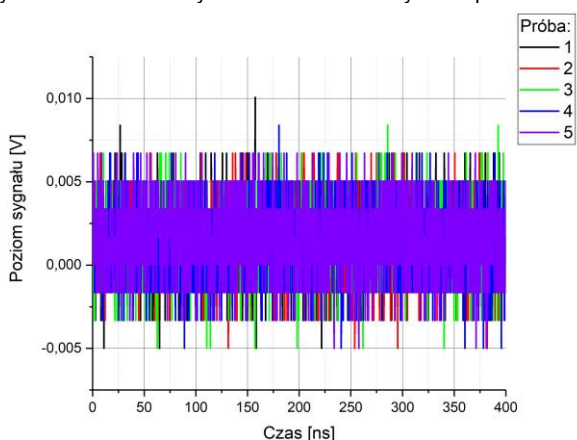
Stwierdzono, że nie istnieje możliwość jednoznacznego wskazania próbki o najwyższej skuteczności ekranowania. Wszystkie materiały wykazują spójne właściwości i charakteryzują się wysokim współczynnikiem tłumienia.

Nie ma możliwości jednoznacznego wskazania próbki o najlepszych właściwościach ekranujących. Przedstawiane wyniki badań zostały wcześniej poddane obróbce danych. Dane rejestrowane na sondzie swobodnej pola elektrycznego są przetwarzane i przeliczane w oprogramowaniu. Z surowych danych wskazanie najskuteczniejszego ekranowania wydaje się całkowicie niemożliwe. Stwierdzono, że mierzony sygnał przy zastosowaniu ekranujących szyb jest na poziomie możliwości pomiarowych stanowiska badawczego (Rys.

16). Żaden pomiar nie jest idealnie dokładny – przyrządy mają swoje ograniczenia, a każdy pomiar jest zniekształcony przez czynniki losowe, których uwzględnienie jest bardzo trudne.



Rys.15. Porównanie wyników badań dla wszystkich próbek



Rys.16. Surowe dane z sondy swobodnej pola elektrycznego podczas badania ekranujących próbek

### Podsumowanie

Badania odporności na impulsowe pole elektromagnetyczne wysokiej mocy są stosowane dla wąskiego zakresu urządzeń. Grupę obiektów przeznaczonych do badań uwzględnia wymagania normy.

Badania odporności mają zastosowanie dla urządzeń montowanych na statkach, łodziach podwodnych, pojazdach naziemnych oraz samolotach.

Przeprowadzono badania dla urządzeń o zastosowaniu cywilnym oraz wojskowym. Stwierdzono, że pozytywne wyniki otrzymano dla sprzętu wojskowego. Wynika to z stosowania dodatkowych zabezpieczeń. Zastosowanie odpowiedniego ekranowania gwarantuje skuteczną ochronę przed działaniem NEMP. Na podstawie wyników badań wydaje się, że coraz szersza grupa wyrobów powinna być poddawana tym badaniom.

Możliwe jest przeciwdziałania skutkom NEMP. Istnieją materiały, których zastosowanie przy projektowaniu oraz tworzeniu urządzeń może obniżyć wnikanie impulsowego pola elektromagnetycznego wysokiej mocy do minimum.

Rozszerzenie badań dla urządzeń cywilnych i wojskowych oraz materiałów ekranujących może spowodować, że skuteczność przeciwdziałania skutkom NEMP umożliwi otrzymanie efektów pozwalających na nieprzerwane działanie EUT nawet w przypadku zagrożeń.

**Autorzy:** Marta Czarnowska, Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Centrum Techniki Morskiej, ul. Dickmana 62, 81-109 Gdynia, E-mail: marta.czarnowska@ctm.gdynia.pl; Przemysław Stencel, Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Centrum Techniki Morskiej, ul. Dickmana 62, 81-109 Gdynia, E-mail: przemyslaw.stencel@ctm.gdynia.pl.

### LITERATURA

- [1] MIL-STD-461 E/F/G – Requirements For The Control Of Electromagnetic Interference Characteristics Of Subsystems And Equipment; Test RS105 – radiated susceptibility, transient electromagnetic field
- [2] NO-06-A200:2012 – Kompatybilność Elektromagnetyczna. Poziomy dopuszczalne emisji ubocznych i odporności na narażenia elektromagnetyczne; KRS-03 – odporność na narażenia promieniowane, impulsowe pole elektromagnetyczne
- [3] NO-06-A500:2012 – Kompatybilność Elektromagnetyczna. Procedury badań zaburzeń elektromagnetycznych i odporności na narażenia elektromagnetyczne; PRS-03 – odporność na narażenia promieniowane, impulsowe pole elektromagnetyczne
- [4] <https://www.montena.com>
- [5] Gech Deb, Devendra Chandra Pande, Nuclear Electromagnetic Pulse (NEMP) — A Threat to Electronics, *IETE Technical Review*, 2015, No. 4, 9-19