

Generator mikrofalowy do badań odporności na HPM

Streszczenie. W Narodowym Centrum Badań Jądrowych zaprojektowano, zbudowano i uruchomiono impulsowy generator mikrofalowy, który może być wykorzystany do badań wpływu HPM na układy elektroniczne i organizmy żywe oraz do testowania osłon i aktywnych układów zabezpieczających przed HPM. W artykule przedstawiono budowę układu oraz osiągnięte wyniki.

Abstract. At the National Centre for Nuclear Research, a pulsed microwave generator was designed, built and launched. It can be used to study the impact of HPM on electronic systems and living organisms, as well as to test shields and active protection systems against HPM. The article presents the architecture of the system and the achieved results. (**Microwave generator for apparatus test against HPM**).

Słowa kluczowe: generator mikrofalowy, magnetron, oddziaływanie HPM, broń elektromagnetyczna

Keywords: microwave generator, magnetron, HPM interactions, electromagnetic weapon

Wstęp

Życie człowieka XXI w. w coraz większym stopniu jest uzależnione od różnego rodzaju urządzeń elektronicznych. Praca niektórych z nich jest praktycznie niedostrzegalna, bez innych znowu nie można sobie wyobrazić normalnej egzystencji. Niektóre z nich przejmują funkcje sterujące, kontrolne i decyzyjne, coraz szerzej wypierając czynnik ludzki. Wraz ze wzrostem uzależniania się od dobroczynnego wpływu tych urządzeń zaczęto dostrzegać też zagrożenia z tego płynące. Jako wyniki tych obserwacji powstawały kolejne normy bezpieczeństwa, które dana grupa urządzeń musi spełniać, aby móc być dopuszczona do powszechnego lub specjalistycznego użycia. Jednym z wymagań, jakie stawiają normy, jest tzw. kompatybilność elektromagnetyczna, która m.in. nakłada na producentów wymagania, aby wytwarzane przez urządzenia zaburzenia elektromagnetyczne nie przekraczały poziomu, powyżej którego urządzenia radiowe i telekomunikacyjne lub inne nie mogą działać zgodnie z przeznaczeniem. Z kolei poziom odporności urządzeń na zaburzenia elektromagnetyczne, jakich należy spodziewać się podczas użytkowania zgodnie z przeznaczeniem, powinien pozwalać na działanie urządzenia bez niedopuszczalnego pogorszenia jakości jego użytkowania.

Jeśli jednak odwrócić tok rozumowania, można łatwo oszacować podatność danych urządzeń na wpływ zewnętrznego oddziaływania oraz wyznaczyć minimalne wartości tego oddziaływania potrzebne do wywołania założonej negatywnej reakcji.

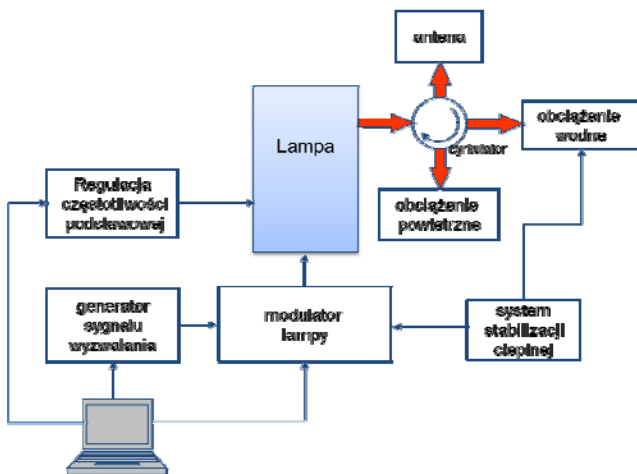
Obecnie bada się urządzenia pod kątem wpływu znanych, niepożądanych oddziaływań takich jak: (LEMP – Lightning Electromagnetic Pulse), od wyładowań elektrostatycznych (ESD – Electrostatic Discharge) oraz impulsy HPM (High Power Microwave). Dwa pierwsze opisane zjawiska mają charakter naturalny, dlatego w toku prac nad urządzeniami doskonalono systemy zabezpieczeń, tak aby ograniczyć ich wpływ lub całkowicie go zneutralizować. Impulsy HPM, w przeciwieństwie do oddziaływań LEMP i ESD, wytwarzane są w sposób całkowicie sztuczny i z tego względu urządzenia elektroniczne są na nie znacznie mniej odporne. Podstawą niekorzystnego działania HPM jest fakt, iż dla fal o długościach milimetrowych praktycznie każdy przewodnik stanowi antenę odbiorczą, przez co następuje indukowanie prądów w obwodach elektronicznych. Prowadzą one do zakłócenia pracy urządzeń, nieprawidłowego działania oprogramowania lub nawet nieodwracalnego uszkodzenia

układów elektronicznych [1]. Biorąc pod uwagę znaczenie elektroniki w zastosowaniach takich jak: przemysłowe, medyczne, wojskowe, w administracji i łączności, problem ochrony urządzeń przed szkodliwym działaniem fal elektromagnetycznych staje się coraz bardziej istotny. W 2003 r. Pentagon szacował, że w ponad 20 krajach trwają prace nad wykorzystaniem impulsów HPM jako kolejnego rodzaju uzbrojenia [2]. Z tego też powodu szczególnie ważne staje się badanie odporności urządzeń elektrycznych i elektronicznych na impulsy HPM oraz stosowanie materiałów osłaniających/tłumiących [1,3]. Z kolei, aby badać odporność urządzeń i materiałów, a w następstwie również projektować osłony i systemy ochronne, potrzebna jest aparatura do wytwarzania testowych sygnałów zakłócających. Urządzenia produkujące impulsy HPM dzielą się na jednorazowe (E-bomby) oraz generatory wielokrotnego użytku. Najbardziej rozwiniętą techniką wykorzystywaną w E-bombach jest kompresja strumieniowa (FCG), w której inicjujący impuls prądowy zostaje wzmocniony w procesie zagęszczania pola magnetycznego za pomocą energii eksplozji materiału wybuchowego [4]. Powstały prąd zostaje przekształcony w impuls mikrofalowy, który jest zdolny wyrządzić znaczne zniszczenia elektroniki na obszarze o średnicy około 500 metrów [2]. Użycie E-bomby do testów działania impulsów HPM na elektronikę wiąże się z uciążliwymi problemami takimi jak eksplozja czy trudność dokładnego i powtarzalnego ukierunkowania mikrofal. Z tego względu, przy badaniu impulsów HPM stosuje się generatory wielokrotnego użytku. Zasadniczą częścią ich budowy jest źródło fal elektromagnetycznych. Przykładami takich źródeł są: klistron, magnetron i wiraktor. Klistrony i magnetrony charakteryzują się dobrą stabilnością pracy. Ponadto współczesne układy zasilania źródeł pozwalają na modyfikację czasu trwania i repetycji impulsów oraz mocy wyjściowej, co przekłada się na łatwość prowadzenia badań. W roku 2015 w Polsce dostępne były m.in. dwa generatory HPM: stanowisko laboratoryjne przygotowane przez Radiotechnika Marketing oraz system walizkowy Diehl DS110F, wytworzony i zaprezentowany w ramach grantu MSWiA [5]. Ze względu na to, że oferowały one możliwość prowadzenia testów w bardzo organicznym zakresie, poszukiwano alternatywnego sposobu produkcji impulsów HPM.

Generator HPM

W Narodowym Centrum Badań Jądrowych opracowano i wyprodukowano prototypowy generator HPM oparty na magnetronie. Jego podstawowym zastosowaniem jest możliwość badania wpływu zakłóceń na urządzenia elektroniczne oraz testowanie jakości osłon przeciw impulsom HPM.

W urządzeniu tym wykorzystano dopasowane źródło mocy mikrofalowej, umożliwiające sekwencyjne wytworzenie impulsów o wartościach dochodzących do 2,5MW mocy szczytowej oraz o czasie trwania powyżej 3 μ s. Źródło to wytwarza falę sinusoidalną o częstotliwości z zakresu 2995-3003MHz. Lampa generacyjna jest zasilana w energię elektryczną z modulatora HV opartego na technologii PFN (z ang. Pulse Forming Network) tj. linii formującej impuls, połączonej ze specjalnie skonstruowanym transformatorem impulsowym. Lampa mikrofalowa wytwarzająca promieniowanie mikrofalowe jest połączona poprzez dopasowany trakt mikrofalowy z emiterym promieniowania, którym może być antena paraboliczna lub antena różkowa (tubowa). Źródło mocy mikrofalowej musi być zabezpieczone przed odbiciem się mocy mikrofalowej od emitera na skutek niedopasowania i taką rolę spełnia zainstalowany cyrkulator mikrofalowy. Schemat blokowy urządzenia przedstawiono na Rys. 1, a wykonany generator na Rys. 2 (wraz z układem chłodzenia oraz zamontowanym zamiast anteny obciążeniem wodnym i miernikiem mocy).



Rys.1. Schemat blokowy generatora mikrofalowego opartego na magnetronie

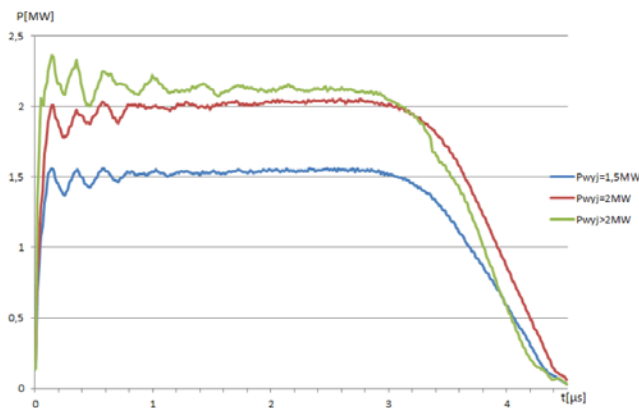


Rys.2. Zdjęcie generatora HPM zaprojektowanego i zbudowanego w NCBJ (bez anteny)

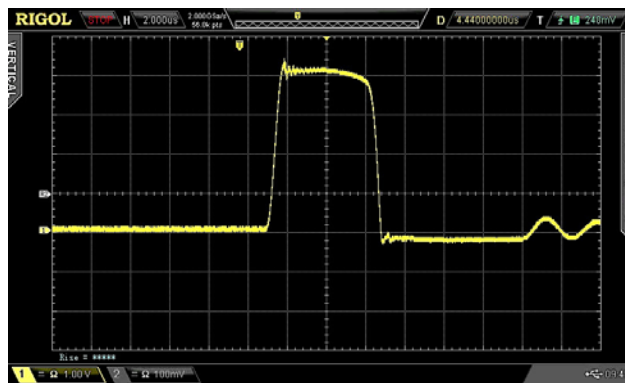
Wyniki

Działanie urządzenia zostało zweryfikowane przy pomocy obciążenia wodnego typu Ferrite R284B-3, które bezodbiornie pochłaniało promieniowanie mikrofalowe. Do pomiaru mocy mikrofalowej wykorzystano miernik NRX firmy Rohde&Schwarz wyposażony w głowicę typu NRP8S, zaś wyniki pomiarów mocy zostały zaprezentowane na Rys. 3. Wartość generowanej mocy mikrofalowej jest modyfikowana poprzez zmianę wysokiego napięcia na magnetronie oraz poprzez zmianę wartości pola magnetycznego – zgodnie z charakterystyką magnetronu.

Przebieg fali padającej wychodzącej z cyrkulatora zarejestrowanej na detektorze Radiall R451075000 połączonym z oscyloskopem Rigol w kierunku obciążenia wodnego przedstawiono na Rys. 4.



Rys.3. Wyniki pomiarów mocy mikrofalowej deponowanej na obciążeniu wodnym typu Ferrite R284B-3



Rys.4. Fala padająca wychodząca z cyrkulatora – obwiednia impulsu deponowanego na obciążeniu wodnym

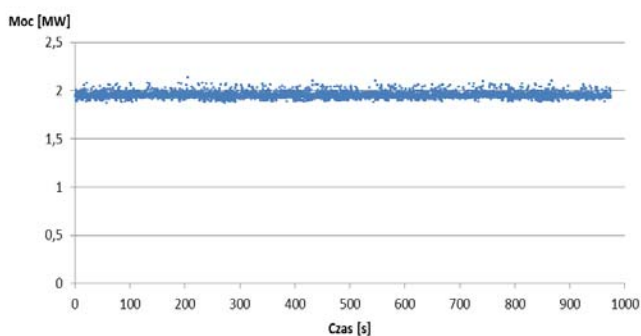
Parametry urządzenia przedstawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Parametry generatora HPM

Parametr	Wartość
Moc mikrofalowa	Przełączana 1,5; 2; >2 MW
Częstotliwość pracy	Przełączalna z zakresu 2995 do 3003 MHz
Czas trwania impulsu	Minimum 3,6 μ s FWHM
Czas narastania	Do 40ns
Czas opadania	1,6 μ s, maksymalnie
Częstotliwość powtarzania impulsów	Przełączana, 1;50;150;300Hz
Możliwość zdalnego sterowania	Komunikacja światłowodowa do 600m
Zasilanie	Trójfazowe, pięcioprzewodowe 400V, 50Hz

W wybranych aplikacjach kluczowe może być precyzyjne dostarczanie impulsów o dokładnie określonej wartości mocy w.cz. Dlatego wykonano badania

powtarzalności pracy generatora przy dłuższej serii impulsów. Zebrane dane dla mocy 2MW przedstawiono na Rys. 5.



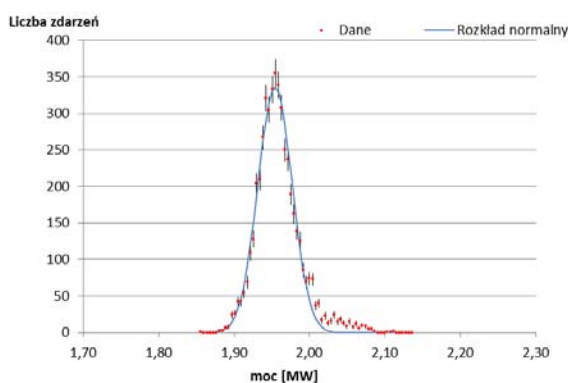
Rys.5 Wykres mocy emitowanej z generatora dla większej liczby impulsów przy mocy zadanej 2MW

W oparciu o Rys. 5 wygenerowano histogram oraz dopasowano rozkład normalny w celu oszacowania rozrzutu mocy (Rys. 6). Najlepsze dopasowanie uzyskano dla:

$$\bar{x} = 1,96 \text{ MW}$$

$$\sigma = 23 \text{ kW}$$

Zatem błąd rozrzutu mocy między kolejnymi impulsami określony jako σ/\bar{x} wynosi $\sim 1.2\%$.



Rys.6 Histogram powtarzalności pracy generatora wraz z najlepszym dopasowaniem rozkładu normalnego



Rys.7. Generator na stanowisku pomiarowym PSTS w warunkach rzeczywistych

Podsumowanie

Wyprodukowany w Narodowym Centrum Badań Jądrowych generator HPM został przetestowany przez Pol-Spec-Tech-Service (PSTS) w warunkach zbliżonych do rzeczywistych (w tym w konfiguracji z anteną paraboliczną – Rys.7), gdzie potwierdzono jego przydatność do zakładanych aplikacji. Urządzenie to daje dostęp specjalistom do prowadzenia badań w zróżnicowanych warunkach, dzięki czemu możliwa jest weryfikacja wyników doświadczeń prowadzonych do tej pory na urządzeniach o niższych parametrach mocowych. Generator umożliwia również prowadzenie całkowicie nowych eksperymentów związanych z odpornością urządzeń elektronicznych, badaniem wpływu promieniowania mikrofalowego na organizmy żywe, a także na specjalistyczne systemy np. mikroprocesorowe. Otrzymane wyniki pozwolą na lepsze poznanie mechanizmów oddziaływania impulsów HPM oraz umożliwią opracowanie skuteczniejszej ochrony przed nimi.

Tematyka i prace przy przygotowaniu tego artykułu powstały w wyniku realizacji komponentu Pol-Spec-Tech-Service Sp. z o. o. w ramach Programu Strategicznego Nr 1/PS/2014. pt. „Nowe systemy uzbrojenia i obrony w zakresie energii skierowanej”, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, Projekt Nr 3 pt. „Metody i Sposoby Ochrony i Obrony przed Impulsami HPM”, umowa Nr DOB-1-3/1/PS/2014.

Autorzy: Michał Andrasiak, Narodowe Centrum Badań Jądrowych, ul.A. Sołtana 7, 05-400 Otwock, E-mail: m.andrasiak@ncbj.gov.pl; Artur Baczewski, NCBJ, E-mail: a.baczewski@ncbj.gov.pl; Józef Bogowicz, NCBJ, E-mail: j.bogowicz@ncbj.gov.pl; Mariusz Chabera, NCBJ, E-mail: m.chabera@ncbj.gov.pl; Kacper Kaźmierczak, NCBJ, E-mail: k.kazmierczak@ncbj.gov.pl; Jan Klimaszewski, NCBJ, E-mail: j.klimaszewski@ncbj.gov.pl; Tymoteusz Kosiński, NCBJ, E-mail: t.kosinski@ncbj.gov.pl; Andrzej Łubian, NCBJ, E-mail: a.lubian@ncbj.gov.pl; Michał Matusiak, NCBJ, E-mail: m.matusiak@ncbj.gov.pl; Agnieszka Misiarz, NCBJ, E-mail: a.misiarz@ncbj.gov.pl; Janusz Prac, NCBJ, E-mail: janusz.prac@ncbj.gov.pl; Jacek Rządkiwicz, NCBJ, E-mail: j.rzadkiwicz@ncbj.gov.pl; Marcin Wojciechowski, NCBJ, E-mail: m.wojciechowski@ncbj.gov.pl; Sławomir Wronka, NCBJ, E-mail: s.wronka@ncbj.gov.pl; Tomasz Zakrzewski, NCBJ, E-mail: t.zakrzewski@ncbj.gov.pl

LITERATURA

- [1] Wnuk M., Matuszewski J., Chudy Z., Nowe technologie i urządzenia rażenia elektromagnetycznego w dziedzinie walki elektronicznej, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 91 nr 3/2015
- [2] Abrams M., The Dawn of the E-Bomb, *IEEE Spectrum*, ISSN 0018-9235, Nov. 2003
- [3] Kołodziejcki J., Kubiak I., Łysko J., Narażenia sprzętu elektronicznego promieniowaniem elektromagnetycznym – sposoby generacji i metody ochrony, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 91 nr 11/2015
- [4] Bechta K., Broń elektromagnetyczna - istota działania i znaczenie broni przyszłości, <https://www.elektroonline.pl/a/4240/2.Bron-elektromagnetyczna-istota-dzialania-i-znaczenie-broni-przyszlosci>, *Elektronika* [data dostępu: 07.10.2019]
- [5] Dras M., Kałuski M., Szafrąńska M., Impulsy HPM – zaburzenia i ich oddziaływanie na systemy – zagadnienia podstawowe, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 91 nr 11/20