

**Małgorzata BIADUŃ, Robert BERCZYŃSKI, Marek KUCHTA**

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, WYDZIAŁ ELEKTRONIKI, ZAKŁAD SYSTEMÓW INFORMACYJNO-POMIAROWYCH,  
ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 49

## System pomiarowy sygnałów HPEM w badaniach zabezpieczeń systemów teleinformatycznych

**Mgr inż. Małgorzata BIADUŃ**

Ukończyła Wydział Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej w 2013 roku. Pracuje jako asystent w Zakładzie systemów Informacyjno-Pomiarowych.



e-mail: mbolek@wat.edu.pl

**Mgr inż. Robert BERCZYŃSKI**

Ukończył Wydział Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej w 2011 roku. Pracuje jako asystent w Zakładzie systemów Informacyjno-Pomiarowych.



e-mail: rberczynski@wat.edu.pl

**Dr inż. Marek KUCHTA**

Ukończył Wydział Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej w 1987 roku. Stopień doktora uzyskał w roku 1988. Jest adiunktem w Zakładzie systemów Informacyjno-Pomiarowych.



e-mail: mkuchta@wat.edu.pl

Recording and analyzing signals supports the VisualAnalog software, including a rich set of simulation, data processing, and performing a big number of tests on the collected measurement data. Examples of the amplitude-time and amplitude-frequency characteristics of HPEM signals are presented in Section 3 of the paper.

**Keywords:** HPEM, high-frequency signals, converter A/C.

### 1. Wstęp

Działalność człowieka ulega coraz bardziej uzależnieniu od nowoczesnych technologii. Ich rozwój odnosi się również do systemów walki oraz obrony. Jedną z możliwych metod walki jest broń elektromagnetyczna, która opiera się na wykorzystaniu pola elektromagnetycznego o bardzo dużym natężeniu, powodując uszkodzenia lub zniszczenia urządzeń elektronicznych. Wykorzystanie broni elektromagnetycznej, polega na wygenerowaniu bardzo krótkiego impulsu promieniowania elektromagnetycznego o wielkiej mocy (rys. 1). Impuls ten określa się skrótem HPEM. Takie zjawisko można porównać do wyładowania atmosferycznego podczas burzy, który może zniszczyć każdy sprzęt elektroniczny. W przypadku generatora impulsów HPEM występuje pewność zniszczenia lub zakłócenia pracy środków łączności, systemów komputerowych oraz szeroko rozumianej elektroniki. Oddziaływanie takiego systemu HPEM powoduje m.in. eliminację środków łączności i obserwacji, eliminację urządzeń podsłuchowych, dezaktywację systemów alarmowych oraz ochrony elektronicznej obiektu, blokowanie systemów komputerów. Układy do generowania impulsów wysokomocowych mogą zostać wykorzystane do działań terrorystycznych, będąc ogromnym zagrożeniem bezpieczeństwa publicznego. Wobec potencjalnego zagrożenia impulsami HPEM istnieje konieczność badania skutków oddziaływania tego promieniowania na elektronikę urządzeń oraz systemy łączności, jak również budowanie technicznych środków ochrony i zabezpieczania tych urządzeń przed niszczącą mocą impulsów HPEM. Ważnym elementem w tych działaniach jest zbudowanie miernika przeznaczonego do pomiarów impulsowego promieniowania HPEM. Nie ma możliwości wykorzystania ani dostosowania istniejących na rynku mierników do celów pomiarów impulsów HPEM ze względu na niezwykle krótki czas trwania mierzonych impulsów oraz fakt, że przyrządy te zostałyby natychmiast zniszczone w tak silnych polach elektromagnetycznych.

W ramach współpracy - Komendy Stołecznej Policji i Wojskowej Akademii Technicznej zbadano skutki oddziaływania ekstremalnie wysokomocowych impulsów promieniowania elektromagnetycznego HPEM na urządzenia łączności użytkowanych przez Policję [1].

Impulsy elektromagnetyczne HPEM charakteryzują się parametrami, które sprawiają, że broń elektromagnetyczna jest niezwykle skuteczna w działaniach wojennych czy terrorystycznych. Do tych parametrów należą:

- wysoka moc emitowanych impulsów,

### Streszczenie

W referacie przedstawiono system akwizycji danych pomiarowych z bardzo szybkim przetwornikiem analogowo-cyfrowym AD9484 Analog Devices. Stanowi on końcowy stopień pomiarowego do identyfikacji i pomiarów wybranych parametrów impulsów elektromagnetycznych o bardzo dużej mocy [4]. Układ pomiarowy pozwala na przeprowadzenie badań związanych z bezpieczeństwem systemów teleinformatycznych narażonych na sygnały HPEM (ang. High Power Electromagnetics), czyli ekstremalnie wysokomocowych impulsów promieniowania elektromagnetycznego. Technologia opiera się na wykorzystaniu pola elektromagnetycznego o bardzo dużym natężeniu, powodując uszkodzenia lub zniszczenia urządzeń elektronicznych. Impulsy elektromagnetyczne HPEM charakteryzują się szczególnymi parametrami: wysoką mocą emitowanych impulsów, bardzo krótkim czasem trwania impulsów oraz prędkością propagacji równą prędkości światła, które sprawiają, że broń elektromagnetyczna jest niezwykle skuteczna w działaniach wojennych czy terrorystycznych. Rejestrację i analizę sygnałów wspomaga oprogramowanie VisualAnalog, zawierające bogaty zestaw do symulacji, przetwarzania danych oraz przeprowadzania licznych testów na zgromadzonych danych pomiarowych. Przedstawiono przykładowe charakterystyki amplitudowo-czasowe oraz amplitudowo-częstotliwościowe sygnałów HPEM.

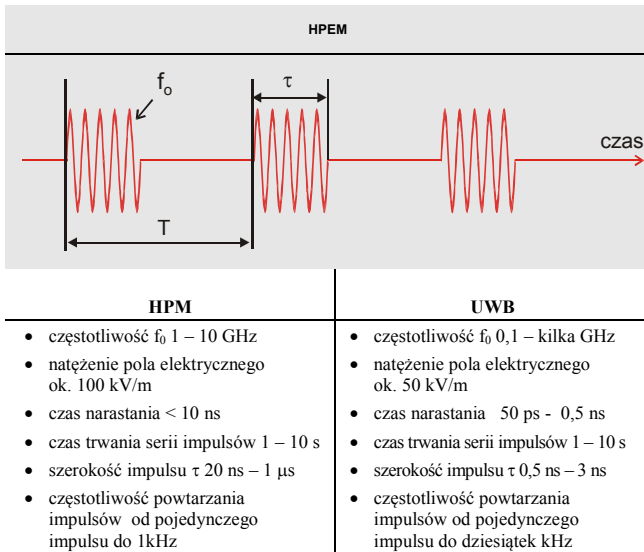
**Słowa kluczowe:** HPEM, sygnały szybkozmienne, przetwornik A/C.

### A measurement system of HPEM signals in investigations of teleinformatic system security

#### Abstract

The paper presents a data acquisition system with a very fast analog-to-digital converter Analog Devices AD9484. It is the final stage of a measurement system for identification and measurement of selected parameters of electromagnetic pulses of very high power [4]. The measurement system allows for tests connected with the security of ICT systems exposed to HPEM (High Power Electromagnetics) signals, which are extremely high power pulses of electromagnetic radiation. The technology is based on the use of the electromagnetic field of very high intensity, causing damage or destroying electronic devices. HPEM electromagnetic pulses are characterized by specific parameters: a high power of the emitted pulses, a very short duration of pulses and the propagation velocity equal to the speed of light which makes electromagnetic weapon extremely effective in warfare or terrorism.

- bardzo krótki czas trwania impulsów,
- prędkość propagacji równa prędkości światła.

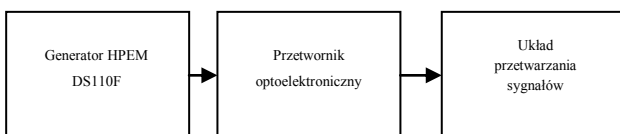


Rys. 1. Postać czasowa sygnału HPEM oraz porównanie parametrów sygnałów HPM oraz UWB

Fig. 1. HPEM signal and comparison of HPM and UWB signals

## 2. Opis układu pomiarowego

Układ generacji oraz pomiaru składa się z generatora impulsów HPEM, przetwornika optoelektronicznego oraz układu przetwarzania sygnałów. Schemat blokowy takiego układu przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat blokowy układu pomiarowego sygnałów HPEM

Fig. 2. Block diagram of the measurement system for HPEM signals

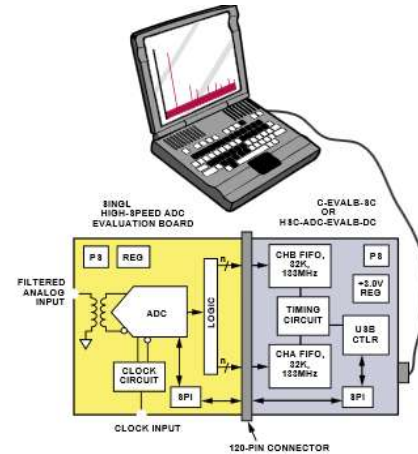
Źródłem promieniowania impulsów HPEM jest generator w postaci kompaktowej walizki, który charakteryzuje się solidną konstrukcją oraz łatwością przenoszenia. Moc szczytowa generatora jest równa 160 MW. Impulsy generowane są na częstotliwości nośnej równej 350 MHz o czasie trwania równym 5 ns.

Następnym elementem toru generacji i pomiaru impulsów HPEM jest przetwornik optoelektroniczny na wyjściu, którego otrzymywany jest sygnał proporcjonalny do natężenia składowych pola elektromagnetycznego.

Ekstremalne parametry generowanych impulsów narzucają wysokie wymagania dla aparatury pomiarowej dotyczące m.in. pasma, częstotliwości próbkowania, pojemności pamięci, poziomu szumów itp. W tym celu zastosowano system akwizycji danych, którego głównym elementem jest przetwornik analogowo-cyfrowy AD9484 firmy Analog Devices. Moduł ten stanowi jeden z najbardziej zaawansowanych produktów, znajdujące się w obecnej ofercie rynkowej tego typu przetworników.

Przetwornik analogowo-cyfrowy AD9484 firmy Analog Devices jest szybkim układem o rozdzielczości 8 bitowej zoptymalizowany pod kątem wyjątkowej dynamiki w systemach szerokopasmowych. Charakteryzuje się małym poborem mocy wynoszącym 670 mW przy szybkości próbkowania 500 MS/s. Zapewnia stosunek sygnału do szumu równy 47 dBFS w zakresie częstotliwości wejściowych do 250 MHz. Przy maksymalnej mocy szerokość pasma częstotliwości układu wynosi 1 GHz. Charakteryzuje się szerokością zakresu dynamicznego (SFDR) 79dBc i nieliniowością 0,2 LSB. Format

danych wyjściowych można wybrać spośród: kodu binarnego, kodu uzupełnień do dwóch oraz kodu Graya [2, 3].

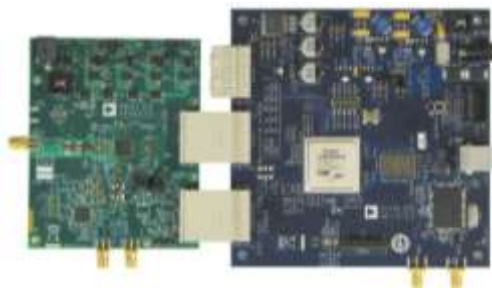


Rys. 3. Układ rejestracji i przetwarzania sygnałów HPEM

Fig. 3. The recording and processing system for HPEM signals

Parametr	Wartość
<b>Rozdzielczość</b>	8bitów
<b>SNR</b>	47 dBFS (w zakresie częstotliwości wejściowych do 250 MHz przy szybkości próbkowania 500 MS/s)
<b>ENOB</b>	7,5 bitów (w zakresie częstotliwości wejściowych do 250 MHz przy szybkości próbkowania 500 MS/s)
<b>SFDR</b>	79 dBc (w zakresie częstotliwości wejściowych do 250 MHz przy szybkości próbkowania 500 MS/s)
<b>DNL/INL</b>	$\pm 0,1$ LSB
<b>Pobór mocy</b>	670 mW (przy szybkości próbkowania 500 MS/s)
<b>Zakresy napięcia wejściowego</b>	1.18 V <sub>pp</sub> do 1,6 V <sub>pp</sub> (1,5 V <sub>pp</sub> – wartość nominalna)

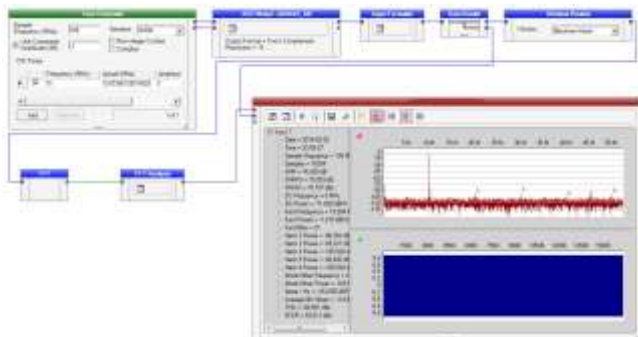
W skład zestawu pomiarowego wchodzi moduł akwizycji próbek sygnału AD9484-5000EBZ, którego zasadniczym elementem jest próbkujący przetwornik AD9484 (8 bitowy). Dodatkowo w skład układu wchodzi moduł pamięci i sterowania typu HSC-ADC-EVALC. Jego zadaniem jest przechowywanie w szybkim buforze pamięci FIFO bloku wyników pomiarów. Pamięć FIFO realizowana jest w postaci odpowiednio zaprogramowanego układu FPGA firmy XILINX.



Rys. 4. Układ pomiarowy składający się z modułu akwizycji próbek sygnału AD9484-5000EBZ oraz modułu pamięci i sterowania typu HSC-ADC-EVALC

Fig. 4. The measurement system consisting of a data acquisition module AD9484-5000EBZ as well as a memory and control module HSC-ADC-EVALC

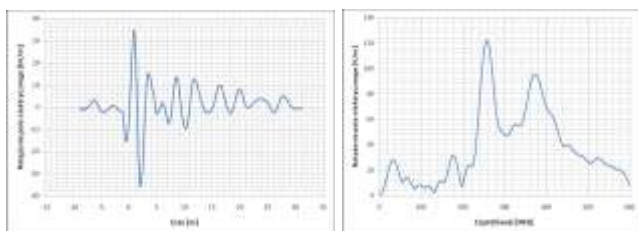
Firma Analog Devices udostępnia również oprogramowanie VisualAnalog pozwalające na jednoczesną akwizycję, wyświetlanie, analizę oraz zapisywanie na dysku rejestrowanych sygnałów. Za pomocą interfejsu graficznego oraz bogatego zestawu do symulacji i analizy danych, środowisko programowe, umożliwia przeprowadzenie licznych testów i badań symulacyjnych. Możliwy jest również eksport danych w celu dalszej, zaawansowanej analizy wyników pomiaru.



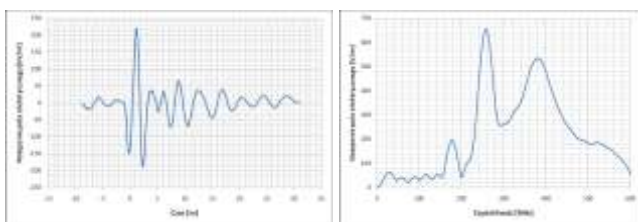
Rys. 5. Okno programu VisualAnalog z przykładową symulacją układu pomiarowego  
Fig. 5. VisualAnalog window with an exemplary simulation of the measurement system

### 3. Charakterystyki sygnałów HPEM

Za pomocą specjalistycznej aparatury przeznaczonej do generowania i analizy sygnałów HPEM przeprowadzono ich rejestrację. Dotyczyło to przypadku bardzo krótkiego impulsu, tj. ok. 4 ns i częstotliwości głównej ok. 260 MHz. Badanie wykonano w komorze bezodbiciowej, w której umieszczono generator impulsów HPEM oraz elektroniczne urządzenie pomiarowe, zintegrowane z generatorem.



Rys. 6. Charakterystyka amplitudowo-czasowa oraz amplitudowo-częstotliwościowa pojedynczego impulsu HPEM pomierzona w odległości 5 m od generatora  
Fig. 6. Amplitude-time and amplitude-frequency characteristic of a single HPEM pulse measured at the distance of 5 m from the generator



Rys. 7. Charakterystyka amplitudowo-czasowa oraz amplitudowo-częstotliwościowa pojedynczego impulsu HPEM pomierzona w odległości 0,5 m od generatora  
Fig. 7. Amplitude-time and amplitude-frequency characteristic of a single HPEM pulse measured at the distance of 0,5 m from the generator

Na rys. 6 i 7 przedstawiono pojedyncze wyniki pomiaru sygnału HPEM w zależności od odległości układu pomiarowego od generatora. Pierwszy z nich charakteryzuje się maksymalną wartością natężenia pola elektrycznego równy 35 kV/m. Na przebiegu amplitudowo-częstotliwościowym można zauważyć występujące charakterystyczne maksimum na częstotliwości równej ok. 260 MHz. Drugi z nich zachowuje podobny charakter, ale osiąga wyższą wartość natężenia pola elektrycznego, tzn. ok. 220 kV/m, co wynika z mniejszej odległości od generatora.

Wysokomocowe impulsy promieniowania, będące przedmiotem badań, charakteryzują się bardzo krótkimi czasami co powoduje, że widma takich impulsów są bardzo szerokie. Przykładowo impulsy HPEM o czasie trwania 4 ns charakteryzują się widmem o szerokości ok. 500 MHz.

Pomiary tak szerokiego widma wymagają zbudowania ultraszerokopasmowej anteny (sondy) umożliwiającej identyfikację wszystkich harmonicznych widma na takim samym poziomie. Dodać należy, że zarówno antena jak i układ elektroniczny miernika muszą posiadać bardzo wysoką dynamikę umożliwiającą pomiary niskich wartości natężenia pola elektrycznego, jak również ekstremalnie wysokich natężeń pola w impulsie. Zastosowanie najnowszych przetworników A-C umożliwi całkowanie mierzonych impulsów w czasie rzeczywistym oraz ich przetwarzanie w procesorze.

Znajomość właściwości generowanych sygnałów wpłynęła na wybór odpowiedniego przetwornika oraz przeprowadzenie wstępnych badań i jego odpowiednią konfigurację. Wysoka częstotliwość próbkowania, niski poziom szumów oraz wysoka liniowość przetwornika AD9484 pozwalają na przeprowadzenie pomiaru sygnałów impulsowych o szczególnie wysokich właściwościach, do których należą wysoka moc oraz częstotliwość..

### 4. Podsumowanie

Obecnie na wyposażeniu armii większości krajów europejskich znajdują się uzbrojenia wykorzystujące broń z energią skierowaną (bomby E). Charakteryzują się one wytwarzaniem promieniowania o ekstremalnie wysokich mocach w impulsie, mającego zdolności niszczenia urządzeń elektronicznych. W takim przypadku niezabezpieczone wojskowe urządzenia elektroniczne mogą być łatwo zniszczone. Nieprzyjaciel, w ramach działań strategicznych lub lokalnych (np. w ataku na bazy wojskowe za granicą kraju) może szczególnie łatwo zniszczyć urządzenia i środki łączności. Dostępne są również przenośne lub przewoźne generatory impulsów HPEM, które mogą być wykorzystane do niszczenia infrastruktury krytycznej na szczeblu państwa lub służb reagowania kryzysowego w ramach ataku terrorystycznego.

Wobec potencjalnego zagrożenia impulsami HPEM istnieje konieczność badania skutków oddziaływania tego promieniowania na elektronikę urządzeń oraz systemu łączności, jak również budowanie technicznych środków ochrony i zabezpieczenia tych urządzeń przed niszczącą mocą impulsów HPEM.

Zaproponowany w artykule moduł akwizycji danych z przetwornikiem AD9484 o częstotliwości próbkowania rzędu MHz umożliwia zbieranie i przetwarzanie danych pomiarowych sygnałów HPEM. Cechując się niskim poborem mocy, małym rozmiarem, dużym zakresem dynamiki spełnia wysokie wymagania potrzebne do analizy sygnałów wysokomocowych HPEM. Tak szczególne właściwości układu pomiarowego mogą znaleźć zastosowanie w różnych dziedzinach elektroniki na przykład w analizie sygnałów telewizyjnych czy radarowych, w układach rejestracji i analizy bardzo szybkich przebiegów elektrycznych. Dodatkowo, nieskomplikowane w obsłudze środowisko Visual Analog wspomagające realizację pomiarów pozwala na szybką interpretację danych.

### 5. Literatura

- [1] 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.
- [2] Instrukcja AD9484, Analog Devices, 2011.
- [3] Opracowanie: Evaluating the AD9434 and AD9484 Analog-to-Digital Converters, Analog Devices, 2011.
- [4] Kuchta M., Sokołowski Z., Szulim M., Kubacki R.: „Elaboration of the method and system measurement of the HPEM electrical parameters”, Symposium on Applied Electromagnetics, Sopron, Hungary, 3-6.06.2012r., materiały konferencyjne s.91-92