

Metody pomiaru wysokomocowych impulsów elektromagnetycznych HPEM

Streszczenie. W artykule przedstawiono wybrane metody pomiaru wysokomocowych impulsów elektromagnetycznych HPEM: klasyczną, metodę opartą na efekcie magnetoptycznym, metodę opartą na efekcie elektroptycznym oraz metodę kalorymetryczną. Pierwsze trzy zostały sprawdzone na drodze doświadczalnej przy wykorzystaniu generatora HPEM DS110.

Abstract. The article described the selected methods of measurement of high- power electromagnetic pulses HPEM: Traditional Method, Method based on Magneto-Optic Effect, Method based on Electro- Optic Effect and Calorimetric Method. The first three have been researched. The high power pulses were generated by HPEM DS110. (Methods of measurement of high-power electromagnetic pulses HPEM)

Słowa kluczowe: impulsy HPEM, efekt magnetoptyczny, efekt elektroptyczny, metoda kalorymetryczna.

Keywords: pulses HPEM, magneto- optic effect, electro- optic effect, calorimetric method.

Wstęp

Impulsowe promieniowanie elektromagnetyczne wielkiej mocy stwarza duże problemy metrologiczne z racji stosowania układów dipolowo-diodowych, jako sensorów. Układy elektronicznego kształtowania charakterystyki częstotliwościowej powodują, że takie czujniki charakteryzują się dużą stałą czasu, przez co ich „bezwładność” elektryczna uniemożliwia detekowanie krótkich impulsów promieniowania.

W ostatnich latach coraz częściej prowadzone są badania z wykorzystaniem wysokomocowych impulsów promieniowania elektromagnetycznego nazywanych również HPEM (z ang. High Power ElectroMagnetic). Impulsy takie charakteryzują się wysokimi mocami promieniowania (rzędu kilkudziesięciu gigawatów), mogącymi uszkodzić elektronikę sensorów i całego miernika. Kolejnym wyzwaniem metrologicznym związanym z impulsami HPEM są bardzo krótkie czasy trwania poszczególnych impulsów, tj. rzędu pojedynczych nanosekund [2, 4, 6].

Takie ekstremalne parametry impulsów HPEM sprawiają, że w trakcie pomiarów należy korzystać ze specjalistycznych metod, narzędzi i technik pomiarowych, takich jak [1]:

- Metoda klasyczna wykorzystująca odpowiednie sondy pomiarowe;
- Metoda magnetoptyczna (ang. Method Based on Magneto -Optic Effect);
- Metoda elektroptyczna (ang. Method Based on Electro-Optic Effect);
- Metoda kalorymetryczna (ang. Calorimetric Method).

W pracy opisano powyższe metody oraz przedstawiono wyniki badań z wykorzystaniem pierwszych trzech.

Tabela 1. Parametry generatora HPEM typu DS110

Rozmiar	500x410x200 mm
Waga	24 kg
Moc szczytowa	160 MW
Czas trwania impulsu	4 ns
Czas powtórzeń impulsu	> 5Hz (10 Hz typ)
Częstotliwość	350 MHz
Szerokość pasma 3 dB	100 MHz
Czas pracy bez ładowania	>1 godz

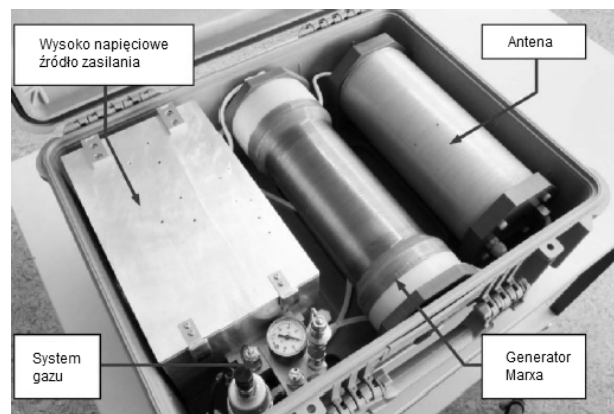
Generator impulsów HPEM

Podczas badań impulsy HPEM generowano z wykorzystaniem generatora DS110, którego podstawowe parametry przedstawiono w tabeli 1 [7].

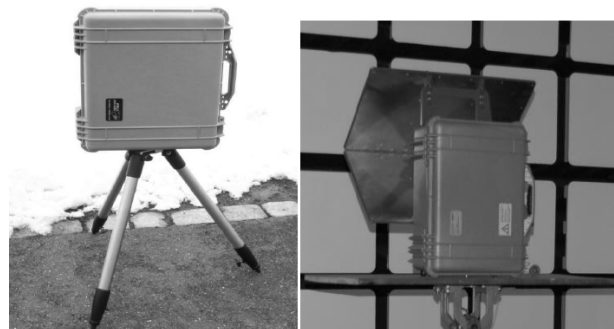
Elementami składowymi generatora są:

- wysoko napięciowe źródło zasilania;
- generator Marxa 300 kV;
- antena rezonansowa.

Budowę nadajnika wraz z głównymi częściami systemu przedstawiono na rysunku 1 oraz rysunku 2.



Rys. 1. Budowa generatora DS110



Rys. 2. Generator DS110: rys. lewy- bez reflektora, rys. prawy- z reflektorem

Metoda klasyczna wykorzystująca odpowiednie sondy pola

Metoda ta umożliwia pomiar parametrów składowej elektrycznej pola elektromagnetycznego. Impulsy HPEM zostają zarejestrowane przy użyciu: systemu komputerowego z odpowiednim oprogramowaniem,

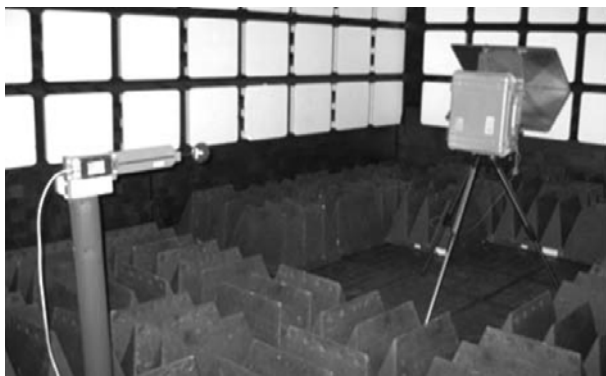
szybkiego oscyloskopu cyfrowego, tłumików RF oraz zasilacza bezprzerwowego UPS. Badania prowadzono w komorze bezodbiowej. Najbardziej newralgiczne punkty systemu pomiarowego takie jak: oscyloskop, zasilacz UPS powinny być umieszczone w obudowie ekranującej lub, jeśli to możliwe, znajdować się poza komorą. W tej metodzie rolę czujników pełnią specjalne sondy pola, które muszą charakteryzować się szerokim pasmem częstotliwości (pasmo powyżej kilku GHz). Ponadto powinny one umożliwiać rejestrację impulsów o odpowiednio krótkich czasach narastania (kilkadziesiąt pikosekund).

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem sond AD-70 oraz AD-80 firmy *Prodyn*. Ich podstawowe parametry przedstawiono w tabeli 2 [8].

Tabela 2. Parametry sond pomiarowych

Parametry	AD- 70	AD- 80
Powierzchnia skuteczna	0,001 m ²	0,0001 m ²
Częstotliwość	> 3,5 GHz	> 5,5 GHz
Czas narastania	< 0,11 ns	< 0,064 ns
Maksymalne napięcie wyjściowe	± 1,5 kV	±1,5 kV

Podczas wykonywania pomiarów sondy pola znajdowały się w odległości 1 m od generatora HPEM. Widok stanowiska pomiarowego przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Metoda klasyczna- stanowisko pomiarowe

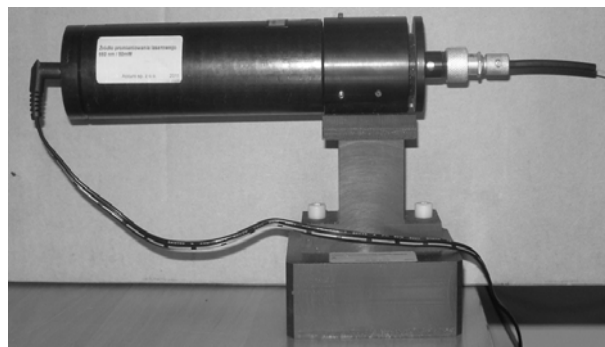
Metoda magnetoptyczna

Metoda magnetoptyczna umożliwia pomiar składowej magnetycznej pola elektromagnetycznego. Zasadniczym elementem przetwornika pomiarowego jest materiał wykazujący efekt Faradaya. Zjawisko to polega na skręceniu płaszczyzny polaryzacji liniowo spolaryzowanego światła, propagującego się przez ośrodek umieszczony w zewnętrznym polu magnetycznym. Skręcenie to jest wprost proporcjonalne do stałej Verdet, indukcji magnetycznej oraz długości próbki (1) [3, 5].

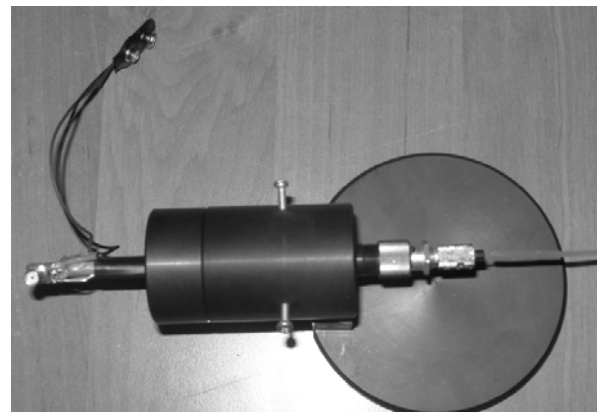
$$(1) \quad \beta = V \cdot B \cdot d$$

gdzie: β – kąt skręcenia, V – stała Verdet, B – indukcja magnetyczna w kierunku propagacji światła, d – długość próbki.

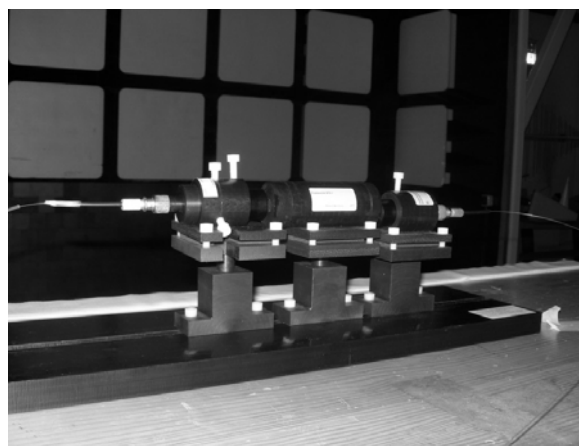
W celu zbadania tej koncepcji zaprojektowano i zbudowano przetwornik pomiarowy, przedstawiony na rysunku 6. Dodatkowo wykonano: nadajnik laserowy emitujący światło o długości 660 nm i mocy 100mW (rys. 4) oraz układ detekcyjny zawierający szybką fotodiodę z konwerterem prąd-napięcie (rys. 5). W czasie wykonywania pomiarów zarówno nadajnik jak i układ detekcyjny umieszczono poza komorą bezodbiową (komunikacja światłowodowa z przetwornikiem).



Rys. 4. Źródło światła laserowego



Rys. 5. Układ detekcyjny

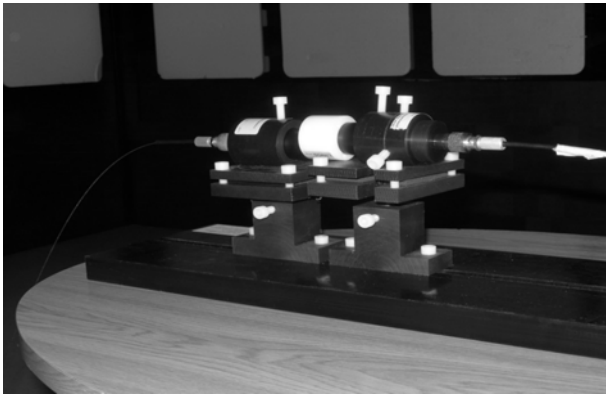


Rys. 6. Metoda magnetoptyczna- widok przetwornika

Metoda elektroptyczna

Metoda elektroptyczna umożliwia pomiar składowej elektrycznej pola elektromagnetycznego. Zasadniczym elementem czujnika jest materiał wykazujący efekt Pockelsa. Polega on na liniowej zmianie współczynnika załamania światła pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego. Zjawisko to występuje w kryształach, które wykazują efekt piezoelektryczny. Metoda wykorzystująca to zjawisko charakteryzuje się małą bezwładnością. Pozwala to na modulację światła w zakresie częstotliwości rzędu kilkudziesięciu gigaherców [3, 5].

W celu zbadania tej koncepcji pomiarowej został zaprojektowany i zbudowany czujnik pomiarowy, przedstawiony na rysunku 7.



Rys. 7. Metoda elektrooptyczna- widok przetwornika

Metoda kalorymetryczna

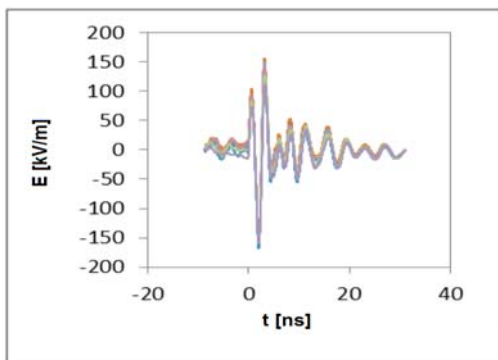
Metoda kalorymetryczna, w przeciwieństwie do poprzednich metod, umożliwia pomiar mocy impulsu (wektora Poyntinga). Oparta jest na zasadzie bezpośredniej zamiany energii impulsu wielkiej częstotliwości na ciepło i pomiarze powstałego przyrostu temperatury. Budowa kalorymetru jest uzależniona od zakresu temperatur, ilości mierzonego ciepła i wymaganej dokładności pomiarów. Wyróżnia się kalorymetry statyczne (bezpłynowe) oraz przepływowe.

W kalorymetrze statycznym falowód przegrodzony jest przesłoną, która oddziela czynnik (absorber węglowy) pochłaniający energię mierzonego impulsu HPEM. Efektem oddziaływania mocy jest przyrost temperatury tego czynnika. Najczęściej przyrost ten mierzy się poprzez wykorzystanie układów mostkowych. Największą zaletą tej metody jest możliwość pomiaru impulsów charakteryzujących się szerokim pasmem. Metoda kalorymetryczna wykorzystująca termistor i mostek Wheastone, umożliwia pomiar impulsów o czasie 0,03 ns z dokładnością 10 % [2, 3].

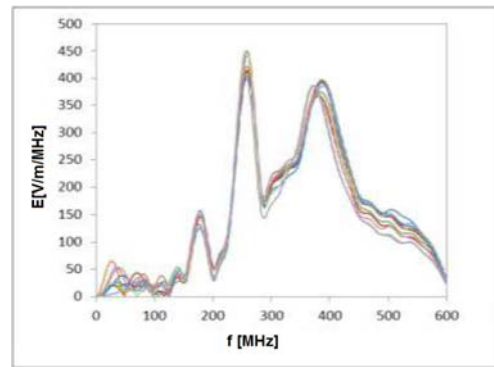
Wyniki pomiarów

Wyniki badań, przedstawione w pracy, miały na celu potwierdzenie możliwości zastosowania metody klasycznej, metody magnetoptycznej i metody elektrooptycznej do pomiaru wybranych parametrów wysokomocowych impulsów HPEM. W każdym przypadku rejestrowano sygnały nadawane z generatora DS110 z dołączonym reflektorem.

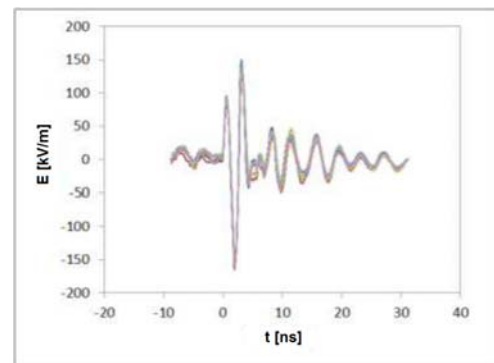
Przy wykorzystaniu metody klasycznej zarejestrowano przebiegi i po wstępnym przetworzeniu komputerowym przedstawiono natężenie pola elektrycznego w funkcji czasu i jego widmo dla sondy AD- 70 oraz AD- 80. Wyniki zostały przedstawione na rysunku 8, 9, 10 i 11.



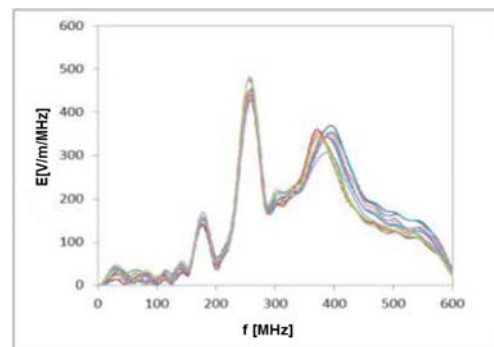
Rys. 8. Impuls HPEM zarejestrowany przy użyciu sondy AD- 70



Rys. 9. Widmo impulsu HPEM zarejestrowanego przy użyciu sondy AD- 70

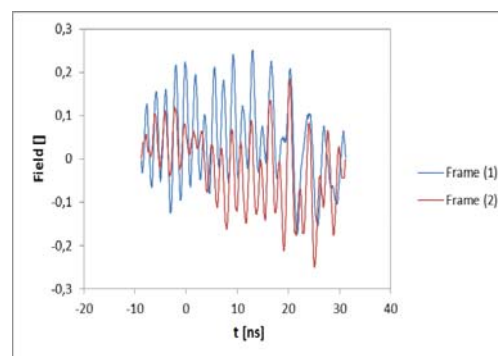


Rys. 10. Impuls HPEM zarejestrowany przy użyciu sondy AD- 80

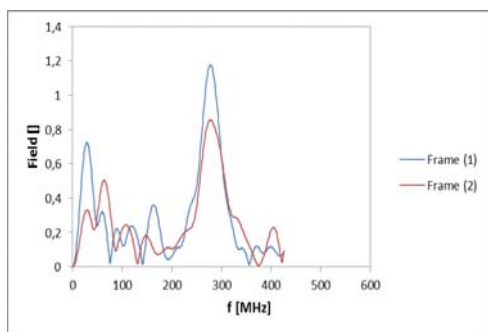


Rys. 11. Widmo impulsu HPEM zarejestrowanego przy użyciu sondy AD- 80

Zarejestrowane przebiegi czasowe sygnału oraz ich widma z wykorzystaniem metody magnetoptycznej zostały przedstawione na rysunku 12 i rysunku 13. Badany przetwornik nie był cechowany.

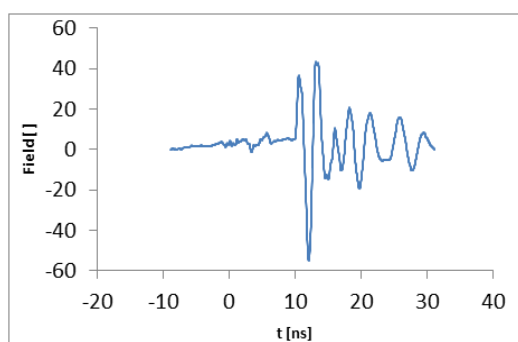


Rys. 12. Impuls HPEM zarejestrowany z wykorzystaniem metody magnetoptycznej.

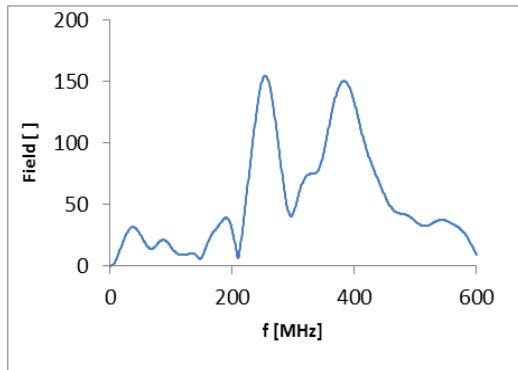


Rys. 13. Widmo impulsu HPEM zarejestrowanego przy użyciu metody magnetoptycznej.

Zarejestrowane przebiegi czasowe sygnału oraz ich widma z wykorzystaniem metody elektroptycznej zostały przedstawione na rysunku 14 i rysunku 15. Badany przetwornik nie był cechowany.



Rys. 14. Impuls HPEM zarejestrowany z wykorzystaniem metody elektroptycznej.



Rys. 15. Widmo impulsu HPEM zarejestrowanego przy użyciu metody elektroptycznej.

W metodzie magnetoptycznej i elektroptycznej niemożliwe jest wiarygodne odzwierciedlenie kształtu

sygnału bez znajomości charakterystyk statycznych zbudowanych czujników.

Wnioski

W pracy omówiono wybrane metody pomiaru impulsów wysokomocowych HPEM. Zostały przedstawione wyniki pomiarów z zastosowaniem metody klasycznej, metody magnetoptycznej i metody elektroptycznej. Wstępnie przeprowadzone badania pokazują, że opisane metody mogą być z powodzeniem wykorzystywane do pomiarów impulsów elektromagnetycznych dużej mocy HPEM.

Podstawową wadą metody klasycznej jest konieczność stosowania specjalizowanych układów tłumiących i dopasowujących sygnał pozyskiwany z anteny pomiarowej do obwodów wejściowych elektronicznych urządzeń rejestrujących.

Metody optyczne charakteryzują się bardzo szerokim pasmem. Dzięki temu możliwa jest rejestracja impulsów o bardzo krótkich czasach trwania (rzędu pojedynczych nanosekund). Zastosowanie transmisji światłowodowej w metodzie magnetoptycznej i elektroptycznej pozwala zabezpieczyć najbardziej neralgiczne punkty systemu.

Autorzy: mgr inż. Rafał Białek, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych, Zakład Systemów Informacyjno- Pomiarowych, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: rafal.bialek@wat.edu.pl;
dr hab. inż. Marek Kuchta, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych, Zakład Systemów Informacyjno- Pomiarowych, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: marek.kuchta@wat.edu.pl;
prof. dr hab. inż. Roman Kubacki, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Telekomunikacji, Zakład Radiokomunikacji, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: roman.kubacki@wat.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Projekt rozwojowy NCBiR nr 0063/R/T00/2010/11 (523/2010/WAT), *Opracowanie technologii i demonstratora zabezpieczenia systemów teleinformatycznych służb porządku publicznego w aspekcie narażenia na terrorystyczne działanie silnych impulsów elektromagnetycznych* (2010 – 2012)
- [2] Wnuk M., Chudy Z., *Pomiar mocy impulsu elektromagnetycznego mikrofal*, Przegląd Elektrotechniczny, nr 8, 2014
- [3] Drexler P., Fiala P., *Methods for High Power EM Pulse Measurement*, Radioengineering, 2006
- [4] Kubacki R., Kieliszek J., Sobiech J., Puta R., *Metrologia pól elektromagnetycznych modulowanych impulsowo miernikami diodowymi*, Medycyna Pracy, 2007
- [5] Fiala P., Drexler P., Steinbauer M., *Optical Methods Identifying of the Special Purpose Generator Pulses*, PIERS Online, 2008
- [6] Piwowarczyk K., Wnuk M., Nowosielski L., *Model analityczny impulsu HPEM*, Przegląd Elektrotechniczny, nr 7, 2014
- [7] Kuchta M., Paś J., *Terroryzm elektromagnetyczny- zagrożenia w obiektach budowlanych*, Biuletyn WAT, nr 2, 2015
- [8] Nowosielski L., *Measurement of the Pulses Generated by the High Power Electromagnetic Pulse Generator*, Progress In Electromagnetics Research Symposium, Praga 2015