

## Pomiar mocy impulsu elektromagnetycznego zakresu mikrofal

**Streszczenie.** W artykule zwrócono uwagę na problem pomiaru mocy impulsowych. Dostępne mierniki PEM (promieniowania elektromagnetycznego) nie mogą występować w roli mierników mocy krótkotrwałych wysokoenergetycznych impulsów mocy. Cechą współczesnych urządzeń radioelektronicznych jest ich stosunkowo niewielka odporność na oddziaływanie napięć i prądów udarowych dochodzących do tych urządzeń z obwodów sieci zasilających lub linii transmisji sygnałów, a pochodzących od źródeł PEM w formie zakłóceń i zaburzeń promieniowanych bądź przewodzonych. Największe zagrożenie stanowi impuls elektromagnetyczny dużej mocy zakresu mikrofal.

**Abstract.** The article highlighted the problem of measuring the power configuration. Available gauges of the PEM (electromagnetic radiation) may not be in the role of measures under the short-lived high-energy pulses. Feature of the modern electronics equipment is their relatively small resistance to impact tension and shock currents up to these devices from the power supply network circuits or line signal transmission, and from sources of PEM in the form of disturbance and radiated or conducted. The biggest threat is the electromagnetic pulse high power microwave range. **Power measurement of electromagnetic microwave pulse.**

**Słowa kluczowe:** impuls elektromagnetyczny, pomiar mocy impulsowej, kalorymetr mikrofalowy.

**Keywords:** electromagnetic pulse, measurement of power pulse, microwave calorimeter.

doi:10.12915/pe.2014.08.56

### Wstęp

Rozwój współczesnej cywilizacji wiąże się z przetwarzaniem coraz to większej ilości energii do form wykorzystywanych w nauce, medycynie, technologii i itp. Do tej grupy energii należy także energia prądów i pól wysokich częstotliwości, a obserwowane zwiększanie ilości tych źródeł oraz wzrost ich mocy, to kolejne źródło zagrożeń wywołujących niepożądane efekty techniczne.

Prowadzone badania i analizy z zakresu EMC dowodzą, że cechą współczesnych urządzeń radioelektronicznych jest ich stosunkowo niewielka odporność na oddziaływanie napięć i prądów udarowych dochodzących do tych urządzeń z obwodów sieci zasilających lub linii przesyłu sygnałów, a pochodzących od źródeł promieniowania elektromagnetycznego w formie zakłóceń i zaburzeń promieniowanych bądź przewodzonych. Powstające przepięcia i przetężenia są przyczyną utraty sprawności pojedynczych lub grupy podzespołów, a tym samym funkcjonalności danego urządzenia bądź całego systemu. Największe zagrożenie stanowi impuls elektromagnetyczny dużej mocy zakresu mikrofal, który można generować przy wykorzystaniu celowo zbudowanych generatorów mikrofal dużej mocy. Taki stan rzeczy wymaga stosowania i rozwijania skutecznych sposobów ochrony urządzeń technicznych wraz z opracowywaniem wiarygodnych metod i urządzeń pomiarowych, [2, 3, 5].

W artykule zwrócono uwagę na problem pomiaru mocy impulsowych. Dostępne mierniki promieniowania elektromagnetycznego nie mogą występować w roli mierników mocy krótkotrwałych wysokoenergetycznych impulsów mocy.

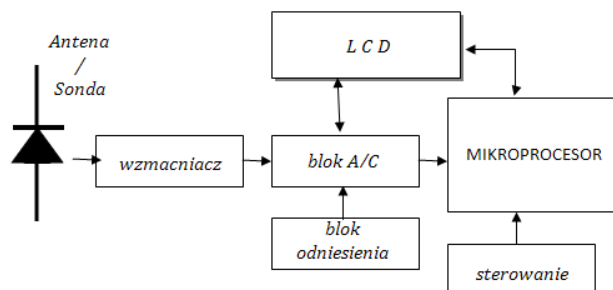
### Pomiar pól elektromagnetycznych

Występująca wysoka koncentracja liczby urządzeń elektronicznych i elektrycznych bardzo dużej mocy generujących, przesyłających i przetwarzających energię i sygnały elektryczne jest przyczyną występowania gwałtownych zmian pola elektromagnetycznego oddziałującego na urządzenia techniczne wywołując często ich nieprawidłową pracę. Wiadomym jest, że pole elektromagnetyczne (PEM), poza wąskim przedziałem częstotliwości i w ograniczonym zakresie amplitud, nie jest wykrywalne organoleptycznie. Stąd też, wykrywanie obecności PEM oraz wszelkie związane z nim prace czy badania, wymagają stosowania odpowiednich narzędzi do jego pomiaru, [1, 2, 5].

Pomiar PEM w polu promieniowania jest jednym z mniej dokładnych w porównaniu z pomiarami innych wielkości fizycznych. Zjawiska towarzyszące występowaniu

PEM wiążą się z potrzebą pomiaru jego cech w otoczeniu pierwotnych i wtórnych źródeł PEM, a także często w zaburzonych jego obecnością ośrodkach materialnych. Prowadzenie pomiarów o charakterze chociażby tylko kontrolnym, wymaga pomimo posługiwania się wielkościami stosunkowo prostymi do zmierzenia, aparatury spełniającej wymagania co do jakości pomiarów.

Z założenia, miernik PEM zawiera zestaw tradycyjnych sond pola elektrycznego, magnetycznego oraz gęstości mocy, a w strukturze wewnętrznej blok odbiornika A/C i zespolony blok wskaźnika cyfrowego, (rys. 1). Sonda pomiarowa zawiera antenę (dipolową bądź ramową) obciążoną detektorem diodowym. Przed przystąpieniem do pomiarów przeprowadzanym jest skalowanie miernika z sondą, [2].



Rys. 1. Schemat blokowy miernika PEM

Z kolei dobór metody pomiaru PEM szczególnie w polu bliskim, warunkują wielkości charakteryzujące to PEM. Jako kryterium oceny może wystąpić efekt oddziaływania PEM na obiekty materialne. Raz może to być pomiar mocy lub energii absorbowanej w jednostce masy, moc wydzielana w jednostce objętości (przyrost temperatury), a innym razem pomiar prądu indukowanego w obiekcie przez działające nań PEM. W podejściu tzw. „nietermicznym” bardziej istotne są amplitudy składowych PEM, ich przestrzenne usytuowanie (ich czasowe zmiany), a także częstotliwości zarówno przebiegu nośnego, jak i modulującego:

$$(1) \quad E = E_0 + \sum_{i=1}^N E_i \cos(\omega_i t + \phi_i)$$

gdzie:  $E_0$  – natężenie pola elektrostatycznego,  $E_i$  – natężenie i-tej składowej

Zmierzenie wszystkich składowych widmowych PEM może być technicznie trudne lub niemożliwe, a nawet niepożądane ze względu na trudności interpretacyjne.

Szerokopasmowy pomiar PEM wydaje się być najdogodniejszym ze względu na szybkość i prostotę pomiaru. Jednak stosowanie miernika obejmującego więcej niż jeden przedział częstotliwościowy wymaga dla jednoznaczności pomiaru wyłączenia wszystkich źródeł poza mierzonym. Jednak i w takiej sytuacji występowanie harmonicznych w widmie źródła może prowadzić do niejednoznaczności wyniku pomiaru. Pomiar selektywny może być (zwłaszcza w obecności większej ilości źródeł PEM) mocno kłopotliwy, pozwala jednak na dokładne wyznaczenie istotności PEM od każdego źródła.

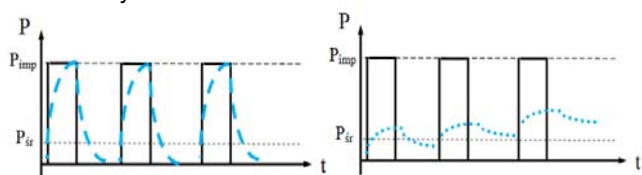
Pomiary natężenia pola elektromagnetycznego za pomocą tradycyjnego miernika PEM wyposażonego w izotropowy czujnik pola elektromagnetycznego umożliwia wykonanie pomiarów zarówno składowej pola elektrycznego jak i magnetycznego w określonym paśmie w trzech kierunkach przestrzeni  $E_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z$  oraz łącznie  $E$  i  $H$ :

$$(2) \quad E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$$

$$H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}$$

Ogólnodostępne mierniki pomiarowe, wykorzystywane do pomiarów natężenia pola elektromagnetycznego oraz gęstości mocy są wzorcowane w polach ciągłych. Tymczasem wiele urządzeń wytwarza pola modulowane impulsowo. Dzięki temu uzyskuje się impulsy promieniowania o bardzo wysokiej mocy szczytowej, przy niskiej wartości średniej, [1, 6].

Diodowy system detekcji mierzonych sygnałów charakteryzuje się największą dynamiką pomiarów natężenia pola elektrycznego, ale wymaga dodatkowego kształtowania charakterystyki częstotliwościowej miernika poprzez zastosowanie układów RLC. Zastosowanie układów RLC powoduje zwiększenie stałej czasu miernika, a tym samym wnosi duże błędy przy pomiarach pól elektromagnetycznych modulowanych impulsowo. Wzorcowanie tych mierników odbywa się w sytuacji promieniowania ciągłego, jednakże aby móc je stosować do pomiarów impulsowych pól elektromagnetycznych wymagany jest dodatkowe, indywidualne kalibrowanie w polach impulsowych o parametrach (czas trwania impulsu oraz częstotliwość repetycji impulsów) identycznych z impulsami mierzonego pola elektromagnetycznego. Stosowane układy RLC powodują zwiększenie stałej czasu, a tym samym zwiększenie bezwładności sondy – im większa stała czasu, tym wolniej „narasta” i „opada” sygnał mierzony przez miernik – rys. 2.



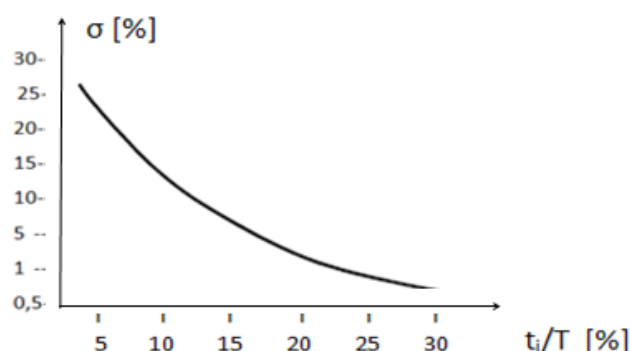
Rys. 2. Diodowa detekcja sygnałów impulsowych z uwzględnieniem stałej czasu układu RC sondy (krzywe przerywane – sygnał mierzony: mała stała czasu i duża stała czasu)

Oznacza to, że stosowanie mierników dipolowo-diodowych do pomiarów pól impulsowych kalibrowanych jedynie

w polach ciągłych, powoduje z założenia, że pomiary te obarczone są dużym błędem  $\sigma$  ściśle związanym z wartością  $t_i/T$ , (rys. 3).

Co prawda, dodatkowy błąd pomiaru wynikający z „impulsowości” pola może być ustalony eksperymentalnie poprzez dodatkowe skalowanie w impulsowych polach wzorcowych, ale pamiętać należy, że skalowanie należy

wykonywać przy zachowaniu dokładnie takich samych wartości współczynników wypełnienia, przy których będą wykonywane właściwe pomiary.

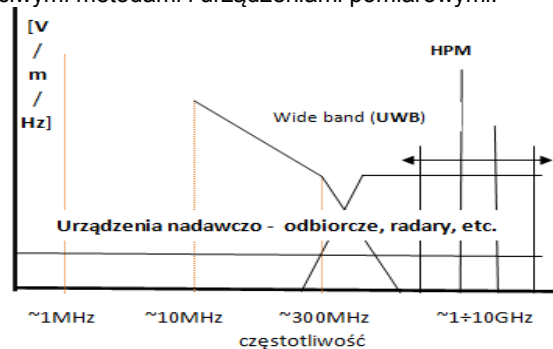


Rys.3. Wpływ wartości współczynnika wypełnienia ( $t_i/T$ ) na dokładność pomiaru (błąd względny –  $\sigma$ )

### Wysokoenergetyczny impuls elektromagnetyczny HPM

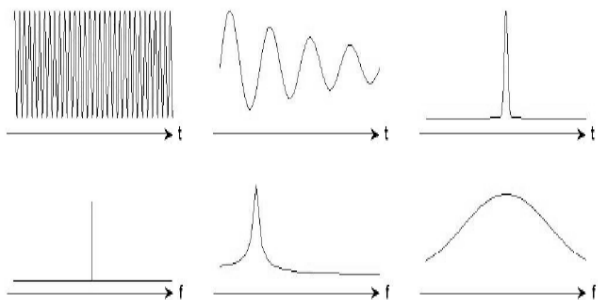
Analiza cech pracy źródeł impulsowego promieniowania elektromagnetycznego dużej mocy, pozwala stwierdzić że szczególne zainteresowanie budzi problem oceny progów odporności elektromagnetycznej urządzeń w sytuacji oddziaływania impulsu dużej mocy zakresu mikrofal (High Power Microwave - HPM). Dokładne określenie oddziaływania wymaga specjalizowanych badań i wielu testów, a stosowane ekranowanie i filtracja to ograniczone zabezpieczenie. Szczególnie, że wiązkę promieniowania impulsowego można dowolnie ukierunkować, tj. zbudować źródło jako urządzenie z energią skierowaną, [1, 6].

Celowo budowane źródła kierowanej energii wyróżniają różnice konstrukcyjne, zakres częstotliwości i moc generowanych impulsów, (rys. 4). Oznacza to, że stworzenie warunków do pewnego i niezawodnego działania systemów elektronicznych pracujących w pobliżu „źródeł impulsowych”, wymaga pełnej znajomości cech źródeł mocy impulsowych oraz ochrony przed tym promieniowaniem uwarunkowanej właściwymi metodami i urządzeniami pomiarowymi.



Rys. 4. Źródła zaburzeń elektromagnetycznych wysokiej mocy

Impulsy promieniowania elektromagnetycznego indukują wysokie wartości prądów w obwodach elektronicznych powodując ich częściowe uszkodzenie lub zniszczenie. Energia impulsów może „wciekać” do wnętrza tych urządzeń zarówno przez interfejsy, nieszczelne obudowy, doprowadzenia sieciowe i sygnałowe, a głównie przez anteny nadawczo – odbiorcze. Wysokomocowe impulsy elektromagnetyczne charakteryzują się niezwykle krótkim czasem trwania (rzędu nanosekund) oraz ekstremalnie wysoką mocą w impulsie - rzędu kilkudziesięciu gigawatów. Wszystkie rodzaje impulsów można klasyfikować w zależności od kształtu, czasu trwania  $\tau$ , częstotliwości powtarzania  $f_p$ , mocy impulsu  $P_i$ , energii oraz mocy średniej ciągu impulsów, (rys. 5).



Rys. 5. Postać czasowa i częstotliwościowa impulsu elektromagnetycznego

Ogólnie energię impulsu prostokątnego  $W_i$  określa zależność:

$$(3) \quad W_i = P_i t_i$$

a jego moc średnią  $P_{sr}$  wytwarzaną w czasie jednego okresu powtarzania impulsów:

$$(4) \quad P_{sr} = P_i \frac{t_i}{T_p} = P_i t_i f_p = P_i k, \quad k = \frac{t_i}{T_p} = t_i f_p$$

gdzie:  $k$  - współczynnik wypełnienia,  $t_i$  - czas trwania

Impuls elektromagnetyczny dużej mocy zakresu mikrofal (HPM) jest impulsem o częstotliwości środkowej mieszczącej się w przedziale 4-30GHz oraz mocy szczytowej przekraczającej 100 MW. Sposób generacji impulsu determinuje czas trwania, częstotliwość powtarzania, czas narastania zbrocza, czas opóźnienia. Częstotliwość środkowa tego sygnału zależy od przyjętych rozwiązań technologicznych i jest zwykle „dopasowywana”. Występujące przetężenia i przepięcia wraz ze zmianami rozkładów temperatury wewnątrz struktur elementów elektronicznych mogą być przyczyną ich trwałych uszkodzeń, (tab. 1), [1, 5].

Tabela 1. Odporność elektromagnetyczna podzespołów

Rodzaj elementu	Wartość energii [J] (poziom trwałego uszkodzenia)
Diody mieszaczy mikrofalowych	$10^{-9}$
Tranzystory małej mocy	$10^{-8}$
Kondensatory	$10^{-7}$
Tranzystory średniej mocy	$10^{-6}$
Rezystory warstwowe	$10^{-6}$
Tranzystory dużej mocy	$10^{-4}$

### Pomiar mocy impulsowych

Generalnie w analizie sygnałów poświęconej pomiarom mocy mikrofalowej zwraca się uwagę na ich moc średnią. Dla sygnału „ciągłego” jest to naturalne, natomiast w przypadku sygnału impulsowego, pojęcie to nie jest wystarczającym. Moc średnią  $P_{sr}$  określa zależność:

$$(5) \quad P_{sr} = \frac{1}{kT} \int_0^{kT} u(t)i(t)dt \quad k = 1, 2, \dots$$

W przypadku fali ciągłej, dla której  $T$  odpowiada okresowi drgań w. cz., całkowanie powinno być dokonywane przez co najmniej jeden okres, a dla modulacji amplitudy sygnału fali w. cz., całkowanie obejmować powinno co najmniej jeden okres przebiegu o najmniejszej z częstotliwości modulującej. Z kolei w przypadku sygnału w. cz. w postaci ciągu impulsów (np. sygnał radarowy), moc średnia powinna być określana z uwzględnieniem czasu całkowania będącego wielokrotnością okresu powtarzania impulsów  $T$ . Moc impulsu  $P_{imp}$  określa:

$$(6) \quad P_{imp} = \frac{1}{t_i} \int_t^{t+t_i} u(t)i(t)dt$$

Czas całkowania odpowiada czasowi trwania impulsu, a wzajemny związek pomiędzy mocami określa zależność:

$$(7) \quad P_{sr} = P_{imp} \frac{t_i}{T} = P_{imp} t_i f$$

$f$  – częstotliwość powtarzania impulsów.

W przypadku impulsów o nieregularnym kształcie, pomimo okresowego występowania zalecanym jest posługiwanie się wartością mocy chwilowej  $P_c$  lub mocy obwiedni impulsu:

$$(8) \quad P_c = \frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} u(t)i(t)dt$$

Czas całkowania powinien być wielokrotnie krótszy od czasu  $t_i$  trwania impulsu i jednocześnie wielokrotnie dłuższy od okresu drgań w.cz. Jednakże ze skracaniem czasu trwania  $t_i$  impulsu, spełnienie obu warunków staje się coraz trudniejszym. Wówczas określenie mocy chwilowej impulsu jest nieprecyzyjne i mało użyteczne. Z kolei pomiar mocy impulsu wymaga zmierzenia wartości średniej przebiegu  $P_{sr}$  i wyznaczenia wartości  $P_{imp}$ . Do tego wymagany jest znajomość czasu  $t_i$  oraz częstotliwości powtarzania impulsów  $f$ . Stosowane mierniki „diodowe”, pomimo zalet związanych z prostotą konstrukcji, wymagają zachowania warunku pracy w części kwadratowej charakterystyki, by napięcie wyjściowe było proporcjonalne do mocy chwilowej  $P_c$ . Jednakże moce chwilowe impulsu mogą być na tyle duże, że po pierwsze wychodząc będą poza zakres kwadratowej części charakterystyki lub zniszczą diodę (przebiecie).

### Kalorymetryczny pomiar mocy impulsowej

Wielu procesom fizycznym, chemicznym czy biologicznym towarzyszą efekty cieplne, które często wymagają nie tylko jakościowej ale i ilościowej analizy. Pomiar ilości ciepła jest konieczny przy wyznaczaniu parametrów efektów cieplnych reakcji chemicznych, energii promieniowania elm. różnych częstotliwości czy też energii wydzielającej się podczas przemian promieniotwórczych. Pamiętając o proporcji ilości przekazanego ciepła  $Q$  do zmiany temperatury i masy ciała:  $Q \sim m\Delta T$ , ciepło właściwe danego ciała określa zależność:

$$(9) \quad Q = c_w m \Delta T, \quad c_w = \frac{Q}{m\Delta T}$$

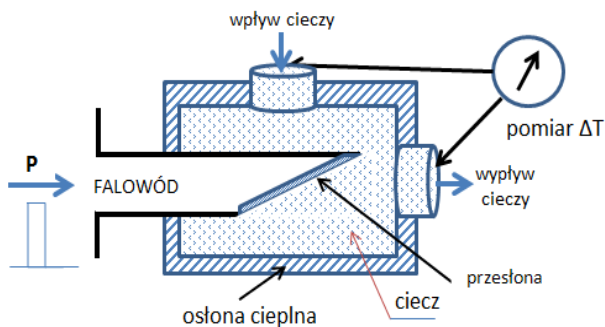
Tak więc budowę kalorymetru uzależnia zakres temperatur, ilość mierzonych ciepła i wymagana dokładność pomiarów, (rys. 8). Współczesne kalorymetry pozwalają na dokonanie pomiaru ciepła w granicach od  $10^{-5}$  J do kilku tysięcy dżuli, w zakresie temperatur od 0.05K-100K. Ilość ciepła wymienionego pomiędzy wprowadzającym, a układem złożonym z cieczy, naczynia i termometru można wyrazić następująco:

$$(10) \quad \Delta Q = \Delta T \sum_{i=1}^3 m_i c_{wi}$$

gdzie:  $m_i, c_i$  oznaczają masy i ciepła właściwe: kalorymetru, cieczy i termometru, a  $\Delta T$  jest zmianą temperatury układu po wprowadzeniu ciepła.

Szczegółowe pozyskanie danych wymaga badań eksperymentalnych, ponieważ dane tablicowe są danymi ogólnymi. Podstawową zasadą metody kalorymetrycznej pomiaru mocy impulsowej jest bezpośrednia zamiana energii impulsu wielkiej częstotliwości na ciepło i pomiar powstałego

przyrostu temperatury. Według klasycznego podziału, wyróżnia się kalometry statyczne (bezsprężliwe) oraz przepływowe (rys. 6), [4].



Rys. 6. Struktura kalometru przepływowego

Kalometr statyczny często jako tzw. układ adiabatyczny zawiera falowód przegrodzony przesłoną (absorber węglowy) osłaniającą czynnik cieplny pochłaniający energię mierzonego impulsu. Rezultatem jest przyrost temperatury czynnika pochłaniającego. Mierzona temperatura  $T(t)$  jako efekt oddziaływania mocy  $P$  jest funkcją czasu:

$$(11) \quad P = A \frac{dT}{dt} + \frac{T}{R_t}$$

gdzie:  $P$  - moc oddziaływania,  $A$ [J/K] – pojemność cieplna,  $R_t$ [K/W] – rezystancja termiczna kalometru. Wartość temperatury  $T$  warunkuje:

$$(12) \quad T = R_t P (1 - e^{-t/RC})$$

gdzie:  $RC$  - termiczna stała czasu urządzenia.

W przypadku czasu pomiaru  $t_p \ll RC$ , wartość mocy mierzonej  $P$  na podstawie zmierzonego przyrostu temperatury  $\Delta T$  określa wynik:

$$(13) \quad P = A \frac{\Delta T}{t_p}$$

Zaletą pomiaru kalometrycznego jest szerokie pasmo pomiarowe i duży przedział doboru czasu pomiaru. W rezultacie temperatura czynnika wpływającego jest inna niż dopływającego, a moc mikrofalowa odpowiada:

$$(14) \quad P = m c_w \Delta T$$

Propozycją rozwiązania struktury kalometrycznego pomiaru mocy wysokoenergetycznego impulsu elektromagnetycznego może być kapilarna struktura z czynnikiem wrażliwym temperaturowo np. w postaci alkoholu. W prostszych strukturach typu laboratoryjnego w pomiarach mocy impulsowych możemy wykorzystać układy mostkowe.

## Podsumowanie

Wiele urządzeń wytwarza pola modulowane impulsowo, dzięki temu uzyskuje się impulsy promieniowania o bardzo wysokiej mocy szczytowej, przy niskiej wartości średniej. Z kolei dostępne mierniki promieniowania elektromagnetycznego nie mogą występować w roli mierników mocy krótkotrwałych wysokoenergetycznych impulsów mocy, ponieważ są wzorcowane w polach ciągłych. Mając na uwadze aktualne zainteresowanie nową grupą źródeł wysokoenergetycznych krótkotrwałych impulsów mocy i realność ich użycia, należy opracować skuteczną metodę pomiaru mocy impulsowych wysokiej mocy szczytowej.

Próba wykorzystania dotychczasowych diodowych systemów detekcji mierzonych sygnałów przy pomiarach pól elektromagnetycznych modulowanych impulsowo wymaga przynajmniej indywidualnej kalibracji w polach impulsowych o parametrach identycznych z impulsami mierzonego pola elektromagnetycznego. Jednakże moce chwilowe impulsu mogą być na tyle duże, że zniszczą diodę. Dlatego też, wskazanym jest zwrócenie uwagi na inne metody pomiaru mocy impulsowych. Należy do nich między innymi kalometryczny pomiar ciepła absorbowanego od energii impulsu.

## LITERATURA

- [1]. Wnuk M., Kubacki R.: *Broń wiązkowa a walka elektroniczna*, IX Konferencja Naukowo – Techniczna nt.: Systemy rozpoznania i walki elektronicznej – KNTWE 2012, Kazimierz Dolny, 6-8 listopada 2012r.
- [2]. Kubacki R., Kieliszek J., Sobiech J., Puta R.: *Metrologia pól elektromagnetycznych modulowanych impulsowo miernikami diodowymi*, Medycyna Pracy, 2007r.
- [3]. Galwas B.: *Miernictwo mikrofalowe*, WKiŁ. Warszawa 1985r.
- [4]. Chudy Z.: *Wybrane problemy rozpoznania i walki elektronicznej*, Redakcja Wydawnictw Wojskowej Akademii Technicznej, Warszawa, 2011.
- [5]. Chudy Z.: *Monitoring pracy źródeł promieniowania mikrofal w systemie bezpieczeństwa elektromagnetycznego*, Przegląd Elektrotechniczny, Nr 11, 2009r., s. 122-127.
- [6]. Chudy Z.: *Elektroniczna degradacja technicznej funkcjonalności urządzeń i systemów radioelektronicznych*, UISR'2012 – V Konferencja Naukowa nt. Urządzenia i systemy radioelektroniczne, Sobienie Szlacheckie, 6-7.12.2012r.

## Autorzy:

1. Prof. dr hab. inż. Marian Wnuk, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, e-mail: [marian.wnuk@wat.edu.pl](mailto:marian.wnuk@wat.edu.pl);
2. Dr inż. Zdzisław Chudy, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, e-mail: [zdzislaw.chudy@wat.edu.pl](mailto:zdzislaw.chudy@wat.edu.pl);