

Badania prototypowego detektora pola magnetycznego, w szczególności impulsów HPEM

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań prototypowego detektora pola magnetycznego, w szczególności impulsów HPEM. Układ został wykonany w technologii całkowicie dielektrycznej. Wykonano pomiary charakterystyki przetwarzania, charakterystyki kierunkowości oraz zbadano odpowiedź układu na wybrane wymuszenia.

Abstract. The paper presents the research results regarding a prototype magnetic field detector, HPEM pulses in particular. The system is designed in a fully dielectric technology. Conversion and directionality characteristics were measured and the response of the system to selected inputs was studied. (**Prototype testing of a magnetic field detector, HPEM pulses in particular**)

Słowa kluczowe: detektor HPEM, impulsy HPEM, układ optoelektroniczny

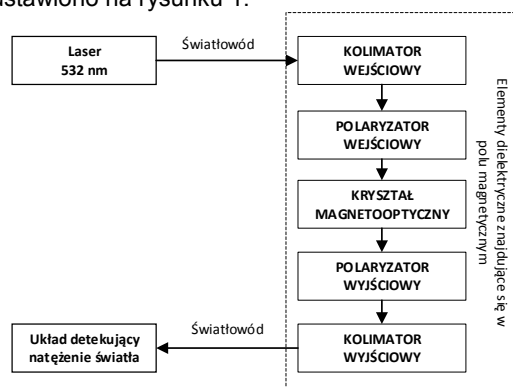
Keywords: HPEM detector, HPEM pulses, optoelectronic system

Wstęp

Obecnie do detekcji i pomiarów wysokomocowych impulsów HPEM wykorzystywane są sondy D-dot oraz B-dot, które umożliwiają pośrednią rejestrację kolejno składowej elektrycznej i magnetycznej pola elektromagnetycznego. Na rynku dostępne są sondy pracujące w paśmie do 10 GHz. Niestety pomiar z wykorzystaniem takich czujników wymaga stosowania dodatkowych elementów takich jak: desymetryzator, kabel koncentryczny, tłumiki. Często wykorzystywany jest także pasywny układ całkujący oraz tor światłowodowy. Wszystkie dodatkowe podzespoły występujące w torze pomiarowym powodują modyfikację charakterystyki częstotliwościowej całego układu. Elementy metalowe z których zbudowane są sondy mogą powodować modyfikację rozkładu pola elektromagnetycznego w przestrzeni co może prowadzić do interferencji fali mierzonej z falami odbitymi [5,8]. Znacznym problemem jest również zastosowanie odpowiedniej wartości tłumienia w przypadku pomiaru źródeł promieniowania o nieznanach parametrach. Wybór zbyt małej wartości tłumienia może skutkować uszkodzeniem układu rejestrującego np. oscyloskopu czy przetwornika analogowo-cyfrowego. Rozwiązaniem powyższych problemów może okazać wykorzystanie przetworników optycznych bazujących na metodzie elektrooptycznej lub magneto-optycznej wykonanych w technologii całkowicie dielektrycznej [3,6,7].

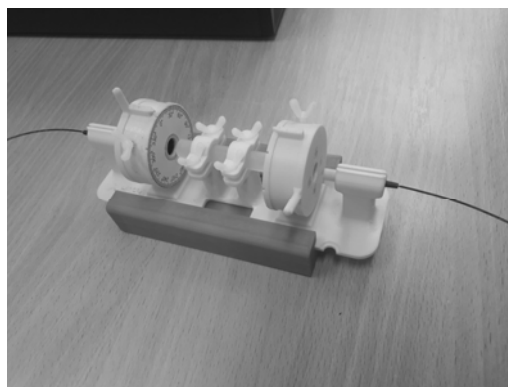
Badany detektor

W pracy przedstawiono wyniki badań prototypowego detektora opartego na zjawisku Faradaya pod kątem możliwości detekcji silnych pól magnetycznych, w szczególności impulsowych. Schemat blokowy sensora przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat blokowy detektora impulsów HPEM

Układ został wykonany wyłącznie z elementów dielektrycznych. Podstawowym elementem detektora jest kryształ powodujący skręcenie płaszczyzny polaryzacji światła pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego a tym samym zmianę natężenia światła docierającego na wyjście układu. Kryształ ten charakteryzuje się bardzo dużą wartością stałej Verdet. Skonstruowany detektor pracuje na długości fali 532 nm. Widok skonstruowanego detektora przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Prototypowy detektor impulsów HPEM

Badania

W ramach pracy przeprowadzono następujące badania:

- zarejestrowano sygnał dla wymuszenia polem magnetycznym sinusoidalnym niskiej częstotliwości,
- wyznaczono charakterystykę przetwarzania czyli zależność między napięciem na wyjściu detektora a natężeniem pola magnetycznego,
- wyznaczono czułość detektora,
- zmierzono charakterystykę kierunkową,
- zarejestrowano sygnał wyjściowy przy wymuszeniu wysokomocowym impulsem elektromagnetycznym.

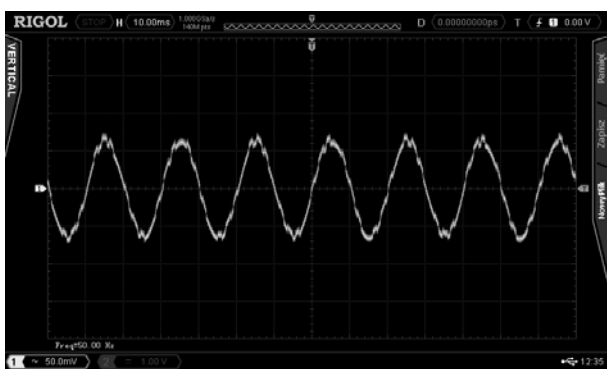
Wyniki Badań

Badania wstępne przeprowadzono z wykorzystaniem cewek Helmholtza będących źródłem pola magnetycznego. Wymuszeniem było sinusoidalne pole magnetyczne o częstotliwości 50 Hz. Sygnał wyjściowy rejestrowano z wykorzystaniem oscyloskopu DS4012 firmy Rigol. Podczas pomiaru składowa stała w sygnale wyjściowym została wyeliminowana poprzez wybranie sprzężenia zmiennoprądowego. Widok stanowiska laboratoryjnego przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Stanowisko do rejestracji odpowiedzi detektora na wymuszenie sinusoidalne

Na rysunku 4 przedstawiono odpowiedź układu na wymuszenie.



Rys. 4. Zarejestrowany sygnał na wyjściu detektora dla wymuszenia sinusoidalnego

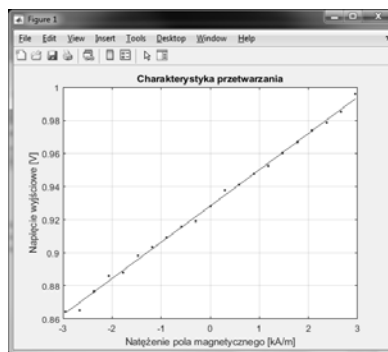
Układ reaguje na wymuszenie w postaci sinusoidalnego pola magnetycznego. Zarejestrowany sygnał charakteryzuje się częstotliwością 50 Hz.

W kolejnym etapie wyznaczono charakterystykę przejściową jako zależność napięcia wyjściowego od natężenia pola magnetycznego. Pomiaru wykonano w zakresie od -3 kA/m do 3 kA/m. W trakcie pomiarów wykorzystane zostały następujące przyrządy: cewki Helmholtza, miernik natężenia pola magnetycznego model 5080 firmy Sypris Test & Measurement, multimetr 34410A firmy Agilent oraz zasilacz laboratoryjny IT6720 firmy Itech. Stanowisko pomiarowe przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Stanowisko laboratoryjne do pomiaru charakterystyki przetwarzania

Wyniki badań zostały przedstawione na rysunku 6. Aproksymację przeprowadzono w Matlabie z wykorzystaniem metody najmniejszych kwadratów.



Rys. 6. Zależność napięcia wyjściowego detektora od natężenia pola magnetycznego

Wykorzystując metodę najmniejszych kwadratów uzyskano następujące równanie prostej:

$$(1) \quad U = 0,0219 [Vm / kA] \cdot H [kA / m] + 0,9282 [V]$$

gdzie: H - natężenie pola magnetycznego

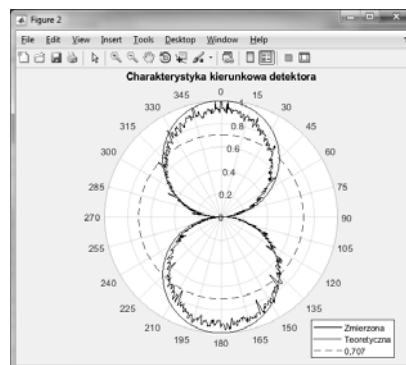
Współczynnik korelacji liniowej równy 0,9989. Czułość detektora wynosi 21,9 mV/(kA/m).

Następnie wykonano pomiary charakterystyki kierunkowości. Wykorzystano następujące przyrządy pomiarowe: cewki Helmholtza, zasilacz laboratoryjny IT6720 firmy Itech, zasilacz laboratoryjny DF1731SB3A, moduł NI-6210 firmy National Instruments oraz autorską platformę obrotową. Pomiar został zautomatyzowany z wykorzystaniem autorskiego oprogramowania napisanego w środowisku Matlab. Widok stanowiska pomiarowego przedstawiono na rysunku 7.



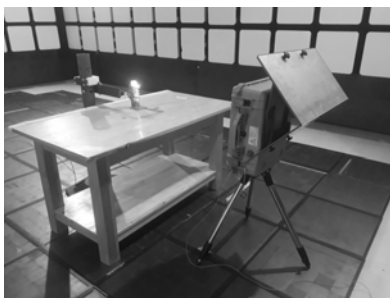
Rys. 7. Stanowisko laboratoryjne do pomiaru charakterystyki kierunkowości

Charakterystyka kierunkowości została przedstawiona na rysunku 8.



Rys. 8. Charakterystyka kierunkowości detektora

W ramach pracy zarejestrowano również odpowiedź układu na wymuszenie impulsowym polem elektromagnetycznym. Badania zostały przeprowadzone w komorze bezodbiwojowej Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej. Podczas badań wykorzystano następujące przyrządy pomiarowe: generator DS110 firmy Diehl, oscyloskop Tektronix DPO70404, oscyloskop Rohde&Schwarz RTO 1022, sondę D-dot AD-70 oraz Balun BIB-170F firmy Prodyn. Sygnał rejestrowano z wykorzystaniem dwóch różnych i niezależnych układów pomiarowych. Układ odniesienia (detekujący pochodną składowej elektrycznej) zawierał sondę D-dot, desymetryzator, przewód koncentryczny, tłumiki oraz oscyloskop Tektronix DPO70404. Natomiast układ badany zawierał laser, 2 światłowody, prototypowy detektor pola magnetycznego, detektor natężenia światła i oscyloskop Rohde&Schwarz RTO1022. Elementy układów pomiarowych, które umieszczone były w komorze bezodbiwojowej przedstawione zostały na rysunku 9.



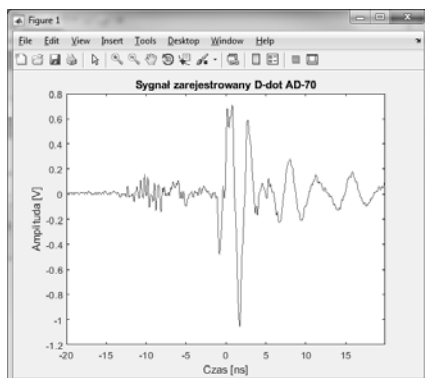
Rys. 9. Elementy układów pomiarowych w komorze bezodbiwojowej

Elementy układów pomiarowych, które umieszczone były w pomieszczeniu pomiarowym przedstawiono na rysunku 10.

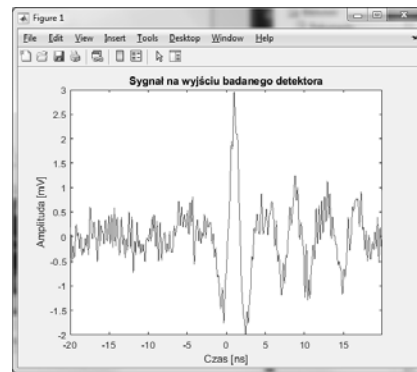


Rys. 10. Elementy układów pomiarowych poza komorą bezodbiwojową

Przykładowe sygnały zarejestrowane w tej samej próbie przedstawiono na rysunkach 11 i 12.



Rys. 11. Sygnał zarejestrowany z wykorzystaniem sondy D-dot



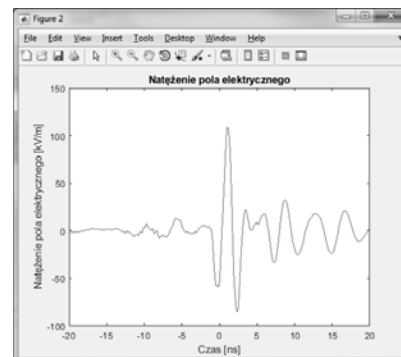
Rys. 12. Sygnał zarejestrowany z wykorzystaniem badanego detektora

W celu porównania postaci czasowej składowej elektrycznej wraz ze składową magnetyczną dane zostały przetworzone z wykorzystaniem środowiska Matlab. Aby możliwe było wyznaczenie widma składowej elektrycznej zarejestrowany sygnał w pierwszej kolejności scałkowano numerycznie z wykorzystaniem metody trapezów. Następnie został on wyskalowany z zastosowaniem współczynnika A_k równego:

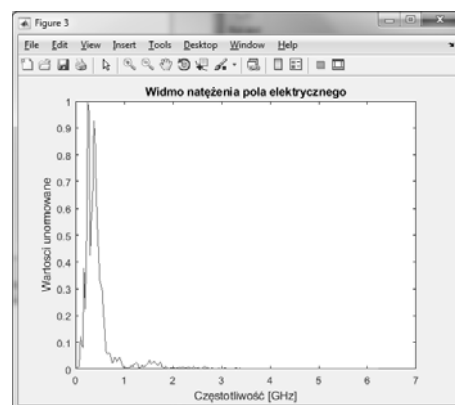
$$(2) \quad A_k = \frac{10^{\frac{BdB+TdB}{20}}}{R \cdot A_{eq} \cdot \epsilon_0}$$

gdzie: BdB- tłumienie desymetryzatora, TdB- tłumienie tłumika(tłumików), R- impedancja sensora, A_{eq} - powierzchnia skuteczna anteny, ϵ_0 - przenikalność elektryczna.

Postać czasową składowej elektrycznej oraz widmo przedstawiono na rysunku 13 i 14.

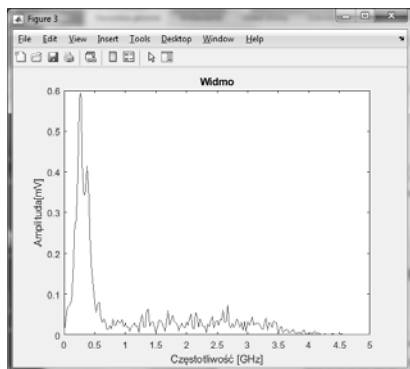


Rys. 13. Postać czasowa natężenia pola elektrycznego



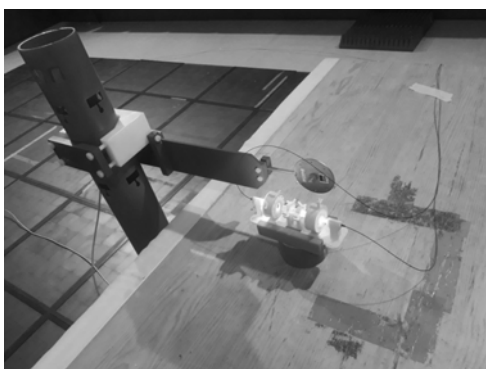
Rys. 14. Widmo natężenia pola elektrycznego

Widmo sygnału zarejestrowanego z wykorzystaniem badanego detektora przedstawiono na rysunku 15.

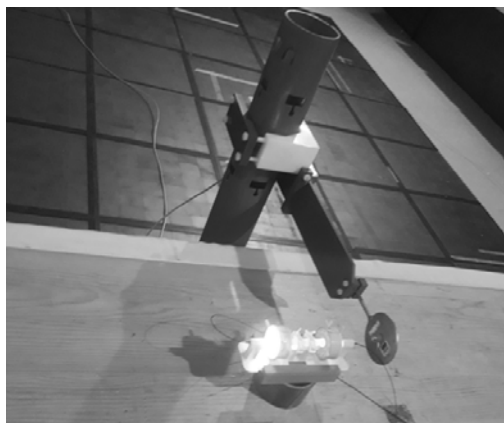


Rys. 15. Widmo sygnału zarejestrowanego z wykorzystaniem detektora Faradaya

Ponadto detektor został przebadany w dwóch pozostałych ortogonalnych kierunkach (rys. 16 i 17).



Rys. 16. Badanie detektora dla ustawienia w kierunku zgodnym z kierunkiem propagacji impulsu HPEM



Rys. 17. Badanie detektora dla ustawienia w kierunku zgodnym z kierunkiem składowej elektrycznej

W przypadku ustawienia detektora w kierunkach ortogonalnych sygnał nie został zarejestrowany (warunki

wyzwolienia nie zostały spełnione). Wynika to z faktu, iż skonstruowany detektor reaguje tylko na składową magnetyczną, która jest prostopadła do składowej elektrycznej i kierunku propagacji fali elektromagnetycznej.

Podsumowanie

W ramach pracy zostały przedstawione wyniki badań prototypowego detektora pola magnetycznego dedykowanego do wykrywania impulsów HPEM. Wyniki badań potwierdzają fakt, iż detektor reaguje wyłącznie na składową magnetyczną, która musi być skierowana wzdłuż osi kryształu. Na podstawie charakterystyki przetwarzania możemy wnioskować, że z punktu widzenia technicznego zastosowania detektora istnieje liniowa zależność pomiędzy napięciem na wyjściu a natężeniem pola magnetycznego. Współczynnik korelacji liniowej jest bliski jedności. Detektor charakteryzuje się dwukierunkową charakterystyką kierunkowości. Szerokość wiązek wynosi ok. 90° . Ostatnim etapem badań było zbadanie odpowiedzi detektora na wymuszenie impulsowym polem elektromagnetycznym. W trakcie badań sygnał był jednocześnie rejestrowany dwoma układami pomiarowymi. Widmo sygnału składowej elektrycznej zawiera dwie dominujące harmoniczne na częstotliwości 250 MHz i 375 MHz. Natomiast w widmie sygnału zarejestrowanego z wykorzystaniem prototypowego detektora dominuje tylko składowa o częstotliwości 250 MHz.

Autorzy:

mgr inż. Rafał Białek, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: rafal.bialek@wat.edu.pl;

dr inż. Michał Wiśnios, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: michal.wisnios@wat.edu.pl;

dr hab. inż. Marek Kuchta, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: marek.kuchta@wat.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Weber M.J., *Handbook of laser science and technology: Supplement 2: Optical Materials*, CRC Press, 1995,
- [2] Romaniuk R., *Szko nieliniowe dla fotoniki. Część 5. Szkoła Verdeta – Faradaya*, Elektronika nr 10/2008,
- [3] Riordan J.A., Sun F. G. Lu Z.G., Zhang X.C., *Free-space transient magneto-optic sampling*, Applied Physics Letters, Volume 71, Issue 11, 1998,
- [4] Siuzdak J., *Wstęp do współczesnej telekomunikacji światłowodowej*, Warszawa 1999,
- [5] Białek R., Kuchta M., Kubacki R., *Metody pomiaru wysokomocowych impulsów elektromagnetycznych HPEM*, Przegląd Elektrotechniczny nr 1/2017,
- [6] Białek R., Wiśnios M., Kuchta M., Jadczak K., *Studying fibre-optic link used to transmission an analogue signals*, Przegląd Elektrotechniczny nr 12/2018,
- [7] Fiala P., Drexler P., Steinbauer M., *Optical Methods Identifying of the Special Purpose Generator Pulses*, PIERS Online, nr 6/2006,
- [8] Białek R., Kuchta M., *Dielektryczny detektor wysokomocowych impulsów elektromagnetycznych*, XII Konferencja Naukowo-Techniczna Systemy Rozpoznania i Walki Radioelektronicznej KNTWRE 2018.