

Andrzej ODONPOLITECHNIKA POZNAŃSKA, INSTYTUT ELEKTROTECHNIKI I ELEKTRONIKI PRZEMYSŁOWEJ
Piotrowo 3a, 60-965 Poznań**Wpływ kształtu modulowanego promieniowania optycznego na czułość napięciową detektora piroelektrycznego**

Dr hab. inż. Andrzej ODON



Pracownik naukowo-dydaktyczny Zakładu Metrologii i Optoelektroniki Instytutu Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Poznańskiej. Jest autorem około 80 prac naukowych, prezentowanych w czasopiśmie krajowych i zagranicznych oraz w materiałach konferencyjnych. Główne zainteresowania naukowe dotyczą badań właściwości przetworników i czujników pomiarowych ze szczególnym uwzględnieniem czujników optoelektrycznych a także zastosowań metod symulacji komputerowej do badań toru pomiarowego.

e-mail: andrzej.odon@put.poznan.pl

Streszczenie

Badania zależności czułości detektora piroelektrycznego od częstotliwości powinny być przeprowadzane przy zastosowaniu sinusoidalnie modulowanego promieniowania pobudzającego detektor. W praktyce eksperymentalnej często stosowane są elektromechaniczne modulatory, które zapewniają wytworzenie quasi-prostokątnego lub quasi-trapezowego kształtu przebiegu mocy promieniowania. Wyznaczona w ten sposób wartość czułości napięciowej detektora może być obciążona dużym błędem. W artykule przedstawiono rezultaty badań symulacyjnych, których celem jest wyznaczenie zależności czułości napięciowej od częstotliwości dla modelu detektora piroelektrycznego zaimplementowanego w programie MATLAB-Simulink i dokonanie oceny błędu pomiaru czułości spowodowanego zastosowaniem niesinusoidalnych przebiegów mocy promieniowania pobudzających detektor piroelektryczny.

Słowa kluczowe: czułość detektora piroelektrycznego, optyczny modulator.

Influence of modulated optical radiation shape on pyroelectric detector voltage responsivity**Abstract**

The voltage responsivity of a pyroelectric detector is one of the most important parameters characterizing its measuring properties. Sinusoidally modulated optical radiation should be used for experimental measuring of the pyroelectric detector responsivity. In practice rotating disk choppers are commonly used as a source of modulated optical signals in experimental setups. A disadvantage of using optical choppers is that the produced radiation may have a square or trapezoidal waveform. In the paper the results of simulation studies of the pyroelectric detector frequency response for sinusoidal, square and trapezoidal shape of the modulated radiation are presented. The simulation studies were carried out for the pyroelectric detector model with use of program MATLAB-Simulink. Values of the main parameters of this detector were precisely specified. The frequency dependence of the pyroelectric detector voltage responsivity for different shapes of the absorbed radiation waveform is shown in Fig. 2. The simulation results show that the responsivity of the detector excited by a square wave of radiation has a much higher value (up to several hundred percent) in comparison to that obtained with sinusoidal modulation of radiation, especially at low frequencies. Trapezoidal modulation produces a much smaller error than the square wave modulation.

Keywords: pyroelectric sensor, responsivity, optical modulation.

1. Wstęp

Generalnie właściwości sygnału odpowiedzi detektora piroelektrycznego na pobudzenie promieniowaniem optycznym są jakościowo charakteryzowane za pomocą dwu rodzajów parametrów - czułości prądowej R_I i czułości napięciowej R_V . Warto jednak zauważyć, że w większości zastosowań praktycznych większe

znaczenie, jak się wydaje, ma informacja o czułości napięciowej niż o czułości prądowej tego detektora.

Badania teoretyczne i eksperymentalne amplitudowej charakterystyki częstotliwościowej czułości detektora piroelektrycznego powinny być przeprowadzone przy zastosowaniu promieniowania o sinusoidalnym kształcie przebiegu, co wynika jednoznacznie z dobrze znanych wymogów tworzenia charakterystyk częstotliwościowych Bodego. W pewnej, raczej nielicznej, grupie publikacji podejmujących problematykę takich badań eksperymentalnych autorzy jednoznacznie informują, że do badań charakterystyki częstotliwościowej detektora piroelektrycznego stosowali promieniowanie o kształcie sinusoidalnym [1]. Rezultaty takich badań spełniają zatem wymagania formalne niezbędne dla wyznaczenia charakterystyk Bodego. Jednak w wielu innych publikacjach opisywane wyniki badań zależności czułości detektora od częstotliwości uzyskiwano za pomocą sygnału promieniowania o przebiegu trapezowym [2] lub prostokątnym [3], co zwykle ma ścisły związek z zastosowaniem elektromechanicznego modulatora promieniowania do badań eksperymentalnych. Warto zauważyć, że w niektórych pracach informacje o rodzaju zastosowanej modulacji sygnału promieniowania w prezentowanych badaniach eksperymentalnych są pomijane i tylko na podstawie opisu wyposażenia układu pomiarowego, w którego skład wchodził zwykle modulator elektromechaniczny, można domniemywać, że stosowany był sygnał o przebiegu prostokątnym lub trapezoidalnym.

Przeprowadzone i opisywane w niniejszym artykule badania miały na celu określenie konsekwencji metrologicznych wynikających z zastosowania przebiegów sygnału promieniowania o symetrycznym kształcie trapezowym i prostokątnym do badań zależności czułości napięciowej R_V detektora piroelektrycznego od częstotliwości modulowanego sygnału promieniowania. Badania przeprowadzono metodą symulacyjną z wykorzystaniem pakietu MATLAB-Simulink, do którego zaimplementowano model detektora piroelektrycznego o parametrach zgodnych z parametrami realnie wykonanego egzemplarza detektora. Badania przeprowadzono przy zastosowaniu symulowanego sygnału promieniowania o sinusoidalnym, trapezowym i prostokątnym kształcie przebiegu.

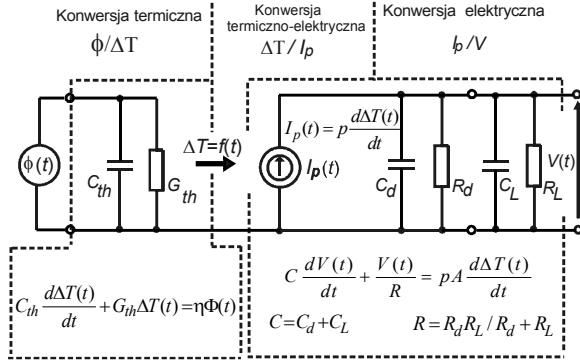
Warto zauważyć, że doniesienia literaturowe na poruszany w artykule temat są ubogie, mimo że zagadnienia te wydają się ważne z punktu widzenia merytorycznej poprawności realizacji optoelektrycznych eksperymentów. Autorowi niniejszej pracy udało się odnaleźć tylko jedną znaczącą publikację podejmującą tę tematykę [4]. Wyniki badań zawarte w tej publikacji, a zwłaszcza ostateczne wnioski, są zbieżne z wynikami uzyskanymi w niniejszej pracy, przy czym należy zwrócić uwagę, że autorzy tej publikacji przyjęli inną niż prezentowaną w niniejszym artykule metodologię badań, a mianowicie opartą na analizie matematycznej wykorzystującej rozkład na szereg Fouriera.

2. Czuość napięciowa detektora piroelektrycznego

Badanie odpowiedzi napięciowej o amplitudzie V_m detektora piroelektrycznego na wymuszenie sinusoidalnie modulowanym sygnałem promieniowania o maksymalnej wartości mocy Φ_m stanowi jeden z najważniejszych sposobów oceny osiągnięć detektora. Celem tych badań jest wyznaczenie czułości napięciowej $R_V = f(\omega)$ opisującej stosunek amplitudy sygnału odpowiedzi V_m detektora do wartości amplitudy Φ_m sinusoidalnego sygnału wymuszenia w funkcji pulsacji ω tego sygnału. Analityczne rozwiązanie i ostateczna postać tej zależności ($R_V = f(\omega)$) są prezentowane w wielu publikacjach jak na przykład w pracy [5]. Zwykle punktem wyjścia takich analiz są schemat zastępczy detektora piroelek-

trycznego [5] i towarzyszący mu opis matematyczny, które powszechnie są wykorzystywane przez badaczy podejmujących tę tematykę.

Na rys. 1 pokazano schemat układu zastępczego detektora piroelektrycznego.



Rys. 1. Schemat zastępczy detektora piroelektrycznego współpracującego ze wzmacniaczem napięciowym. [5]

Fig. 1. Equivalent scheme of the pyroelectric detector cooperating with a voltage amplifier [5]

W procesie przetwarzania zaabsorbowanego przez detektor piroelektryczny promieniowania o przebiegu czasowym mocy $\Phi(t)$ na napięciowy sygnał elektryczny $V(t)$ można wyróżnić trzy etapy konwersji. W pierwszym etapie następuje konwersja termiczna promieniowania padającego na powierzchnię A detektora o mocy chwilowej $\Phi(t)$ na przyrost temperatury $\Delta T(t)$ materiału piroelektrycznego tego detektora. W kolejnym etapie przetwarzania (konwersja termiczno-elektryczna) zmiany temperatury $\Delta T(t)$ piroelektryka powodują powstanie ładunku na elektrodach detektora piroelektrycznego i w rezultacie przepływ prądu elektrycznego w obwodzie obciążenia detektora. Efekt ten modeluje się za pomocą źródła prądowego [5], którego prąd $I_p(t)$ wyznaczony jest z zależności $I_p(t) = pA[d\Delta T(t)/dt]$. Ostatni etap przetwarzania (konwersja elektryczna) sprowadza się do przetworzenia sygnału źródła prądowego $I_p(t)$ na sygnał napięciowy $V(t)$ w obwodzie elektrycznym składającym się z równolegle połączonych pojemności C_d detektora i rezystancji upływnościowej R_d materiału piroelektrycznego detektora oraz elementów obwodu obciążenia, które stanowią rezystancja wejściowa R_L wzmacniacza i pojemność wejściowa C_L wzmacniacza z uwzględnieniem pojemności kabla łączącego detektor piroelektryczny ze wzmacniaczem.

Równanie konwersji termicznej [2] opisane jest zależnością:

$$C_{th} \frac{d\Delta T(t)}{dt} + G_{th} \Delta T(t) = \eta \Phi(t) \quad (1)$$

a równanie opisujące łączny proces konwersji termiczno-elektrycznej i konwersji elektrycznej opisane jest zależnością:

$$C_d \frac{dV(t)}{dt} + \frac{V(t)}{R} = pA \frac{d\Delta T(t)}{dt}, \quad (2)$$

gdzie C_{th} jest pojemnością termiczną detektora piroelektrycznego ($C_{th} = c'Ad$), G_{th} jest konduktancją termiczną detektora piroelektrycznego, η jest współczynnikiem absorpcji promieniowania, p jest współczynnikiem piroelektrycznym, C jest pojemnością zastępczą równoległego połączenia pojemności C_d detektora i wejściowej pojemności C_L wzmacniacza, R jest rezystancją zastępczą równoległego połączenia rezystancji R_d detektora piroelektrycznego i rezystancji wejściowej R_L wzmacniacza.

Dla celów realizacji zadań badawczych opisywanych w niniejszym artykule zastosowano symulacyjną metodę badań przy wykorzystaniu środowiska MATLAB-Simulink. Ze względu na specyfikę implementacji danych w tym pakiecie, konieczny jest opis czułości napięciowej detektora piroelektrycznego w postaci

operatorowej. Po dokonaniu transformacji równań (1) i (2) do postaci operatorowej i wykonaniu odpowiednich przekształceń uzyskuje się zależność (3) opisującą czułość $R_V(s)$ detektora piroelektrycznego:

$$R_V(s) = \frac{V(s)}{\Phi(s)} = \frac{p\eta\tau_{th}\tau_e s}{c'dC_d(s\tau_{th} + 1)(s\tau_e + 1)} \quad (3)$$

gdzie c' jest objętościowym ciepłem właściwym detektora, τ_{th} jest termiczną stałą czasową określoną z zależności $\tau_{th} = C_{th}/G_{th}$, τ_e jest elektryczną stałą czasową określoną z zależności $\tau_e = C_d R$, d jest grubością płytki materiału piroelektrycznego detektora.

Zależność (3) opisująca czułość napięciową $R_V(s)$ jest w zasadzie opisem modelu transmitancyjnego detektora piroelektrycznego [6, 7], który to model można wykorzystać również dla innego typu badań symulacyjnych – na przykład badań odpowiedzi czasowej detektora na pobudzenia sygnałem promieniowania o zadany kształcie [6,7].

W wielu przypadkach wymagane jest wykonanie obliczeń numerycznych wartości czułości napięciowej $R_V(\omega)$ detektora piroelektrycznego w funkcji pulsacji sygnału promieniowania o sinusoidalnym kształcie przebiegu czasowego. Dokonując przekształceń postaci operatorowej czułości napięciowej $R_V(s)$ opisanej zależnością (3) na postać widmową $R_V(j\omega)$, można łatwo wyznaczyć moduł wyrażenia $|R_V(j\omega)|$, który opisuje poszukiwaną zależność czułości napięciowej $R_V(\omega)$ detektora piroelektrycznego:

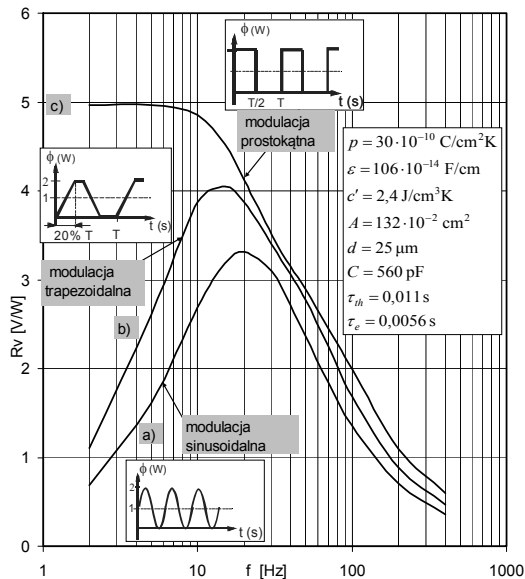
$$R_V(\omega) = \frac{V(\omega)}{\Phi_m(\omega)} = \frac{p\eta\tau_e\tau_{th}\omega}{c'dC\sqrt{1+\omega^2\tau_e^2}\sqrt{1+\omega^2\tau_{th}^2}} \quad (4)$$

3. Symulacyjne badania czułości napięciowej detektora piroelektrycznego - wyniki badań

Badania czułości napięciowej przeprowadzono dla modelu konkretnego egzemplarza detektora piroelektrycznego o jednoznacznie określonych parametrach stosując pobudzenie sygnałami promieniowania o kształtach sinusoidalnym, prostokątnym i trapezowym o identycznych amplitudach mocy promieniowania. Uzyskane wyniki badań symulacyjnych wykonanych za pomocą pakietu MATLAB-Simulink umożliwiają wykonanie charakterystyk pokazanych na rys. 2 ilustrujących zależność czułości napięciowej detektora piroelektrycznego od częstotliwości $R_V = f(f)$ dla sinusoidalnej, trapezoidalnej (o czasie nachylenia zbocza równym 20% okresu T) i prostokątnej modulacji sygnału promieniowania.

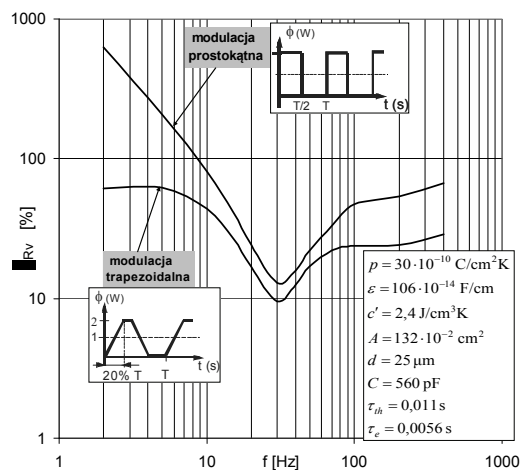
Na rysunku 3 pokazano zależność procentowego błędu względnego δ_{R_V} , jakim obarczona jest wartość wyznaczonej czułości napięciowej dla niesinusoidalnych (prostokątnego i trapezowego z czasem nachylenia zbocza równym 20% okresu T) przebiegów mocy promieniowania w odniesieniu do czułości napięciowej wyznaczonej dla promieniowania modulowanego sinusoidalnie i traktowanej jako wartość poprawna.

Uzyskane wyniki badań symulacyjnych zależności czułości napięciowej detektora piroelektrycznego od częstotliwości $R_V = f(f)$ dla sinusoidalnej, trapezowej i prostokątnej modulacji sygnału promieniowania zaprezentowane w formie wykresów na rys. 2 i rys. 3 jednoznacznie wykazują, że charakterystyki wyznaczone eksperymentalnie za pomocą sygnału promieniowania o kształcie trapezowym lub prostokątnym mogą bardzo znacznie różnić się kształtem od charakterystyki traktowanej jako charakterystyka odniesienia, to znaczy uzyskanej za pomocą sygnału promieniowania, którego przebieg czasowy ma kształt sinusoidalny. Łatwo można zauważyć, że szczególnie dla niższych wartości częstotliwości modulacji promieniowania wartości czułości wyznaczone dla sygnałów niesinusoidalnych, zwłaszcza prostokątnych, obarczone są bardzo dużymi błędami, których wartości mogą osiągnąć nawet kilkaset procent (rys. 2).



Rys. 2. Zależność czułości napięciowej detektora piroelektrycznego od częstotliwości $R_V = f(f)$ dla promieniowania modulowanego: a) sinusoidalnie, b) trapezoidalnie, c) przebiegiem prostokątnym

Fig. 2. Frequency dependence of the pyroelectric detector responsivity $R_V = f(f)$ with a) sinusoidally modulated radiation, b) trapezoidally modulated radiation with rise and fall times of 20% of period, c) square-wave modulated radiation



Rys. 3. Względny błąd δ_{R_V} czułości detektora piroelektrycznego wyznaczony dla niesinusoidalnych (prostokątnego i trapezoidalnego) sposobów modulacji

Fig. 3. Relative error δ_{R_V} of the pyroelectric detector voltage responsivity for non-sinusoidal (square and triangular) modulation

4. Podsumowanie

Rezultaty analizy charakterystyk ilustrujących zależność czułości napięciowej detektora piroelektrycznego od częstotliwości $R_V = f(f)$ uzyskanych metodą symulacji jednoznacznie wykazują, że ewentualne próby weryfikacji jakości eksperymentalnie wykonanych badań dla prostokątnego lub trapezoidalnego sygnału promieniowania (zwłaszcza o stromych zboczach) polegające na porównaniu jej z wyznaczoną teoretycznie charakterystyką częstotliwościową, a więc dla sinusoidalnej modulacji promieniowania, nie mają, jak się wydaje, poważnego uzasadnienia naukowego. Charakterystyki te z natury mogą wykazywać się znacznymi różnicami kształtów, a ich wartości maksymalne występują dla zupełnie innych wartości częstotliwości. Przegląd niektórych źródeł literaturowych wskazuje, że takie próby porównania omawianych charakterystyk mają jednak miejsce, co sugeruje, że autorzy tych publikacji nie doceniają konsekwencji wynikających z zastosowania niesinusoidalnych kształtów przebiegu promieniowania do

badan eksperymentalnych i przyjmują nieprawdziwe założenie, że wyniki badań amplitudowej charakterystyki częstotliwościowej uzyskane przez zastosowanie niesinusoidalnego kształtu sygnału promieniowania można w praktyce traktować jako zbliżone do wyników uzyskanych za pomocą sygnału promieniowania o kształcie sinusoidalnym. Z przeprowadzonej analizy wykresów omawianych charakterystyk pokazanych na rys. 2. wynika praktyczne zalecenie, że jeżeli pożądane jest wykonanie charakterystyk częstotliwościowych Bodego, a jednocześnie ze względów technicznych nie ma możliwości wykonywania tych badań za pomocą sygnału promieniowania o sinusoidalnym kształcie przebiegu, to zastosowanie sygnału promieniowania o kształcie trapezoidalnym o odpowiednim nachyleniu zboczy daje zdecydowanie lepsze wyniki niż sygnału promieniowania o kształcie prostokątnym. Badania symulacyjne wykazują, że właśnie dla sygnału prostokątnego profil wykresu ilustrującego zależność czułości napięciowej od częstotliwości wykazuje największe różnice w porównaniu do charakterystyki częstotliwościowej dla sygnału sinusoidalnego i wynikające stąd błędy wartości rzędnych dla tego wykresu przyjmują duże wartości. Powyższe wywody nie powinny jednak skłaniać do pochopnych wniosków, że charakterystyki ilustrujące zależność czułości napięciowej detektora piroelektrycznego od częstotliwości $R_V = f(f)$ uzyskane za pomocą niesinusoidalnych sygnałów promieniowania przedstawiają małą wartość użytkową. Należy podkreślić, że znajomość takiej charakterystyki detektora piroelektrycznego uzyskanej za pomocą sygnału trapezoidalnego lub prostokątnego jest bardzo ważna dla praktycznych zastosowań i ma kluczowe znaczenie dla kalibracji tych urządzeń optoelektronicznych, w których stosowane są modulatory wytwarzające właśnie takie przebiegi sygnału promieniowania. Przykładem są zastosowania detektorów piroelektrycznych w urządzeniach do zdalnego pomiaru temperatury lub zastosowania ich jako piroelektrycznych matryc do przetwarzania zobrażeń termicznych w kamerach termowizyjnych. Modulatory stanowiące integralny podzespół konstrukcyjny tej aparatury (na przykład w pirometrach) wytwarzają zwykle modulowane promieniowanie padające na powierzchnię aktywną detektora piroelektrycznego o trapezoidalnym lub prostokątnym kształcie przebiegu. Badanie zależności czułości napięciowej detektora piroelektrycznego od częstotliwości $R_V = f(f)$ w celu dokonania kalibracji detektora w takich urządzeniach musi być zatem przeprowadzone dokładnie za pomocą takiego kształtu promieniowania, jakie wytwarza konkretny egzemplarz modulatora.

5. Literatura

- [1] Simonne J. J., Bauer F., Audaire L.: Pyroelectric Properties of a VDF/TrFE-on-Silicon Sensor, *Ferroelectrics* 171, 1995, pp. 239-252.
- [2] Cicco G. D., Morten B., Dalmonego D., Prudenziati M.: Pyroelectricity of PZT-based thick-films, *Sensors and Actuators* 76, 1999, pp. 409-415.
- [3] Mendes R. G., Eiras J. A.: Influence of neodymium and lanthanum doping in the pyroelectric properties of strontium barium niobate (SBN) thin films, *Journal of the European Ceramic Society* 24, 2004, pp. 1637-1640.
- [4] Benjamin K. D., Armitage A. F., South R. B.: Harmonic errors associated with the use of choppers in optical experiments, *Measurement* 39, 2006, pp. 764-770.
- [5] Wheelless W. P., Wurtz L. T., Wells J. A.: An equivalent-circuit radiation sensor model, *Southeastcon 94 - Creative Technology Transfer: A Global Affair*, Proc. of IEEE, 1994, pp. 7-11.
- [6] Odon A., Otomański P.: Badania symulacyjne detektora piroelektrycznego z wykorzystaniem środowiska Labview, *Pomiary Automatyka Kontrola* nr 12, 2011, str. 1540-1542.
- [7] Odon A.: Modelling and Simulation of the Pyroelectric Detector Using MATLAB/Simulink, *Measurement Science Review*, 2010, vol. 10, No 6, pp. 195-199.