

Andrzej ODON

POLITECHNIKA POZNAŃSKA, INSTYTUT ELEKTROTECHNIKI I ELEKTRONIKI PRZEMYSŁOWEJ
Piotrowo 3a, 60-965 Poznań

Pomiar termicznej stałej czasowej detektora piroelektrycznego przy wykorzystaniu jego odpowiedzi na skokowe pobudzenie promieniowaniem optycznym

Dr hab. inż. Andrzej ODON

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



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

Streszczenie

W artykule przedstawiono eksperymentalną metodę pomiaru termicznej stałej czasowej detektora piroelektrycznego opartą na zarejestrowanej napięciowej odpowiedzi tego detektora pobudzonego skokowym sygnałem promieniowania. Metoda ta może stanowić konkurencyjną alternatywę dla stosowanych zwykle metod badawczych opartych na amplitudowych charakterystykach częstotliwościowych detektora. Rezultaty badań eksperymentalnych dla wykonanego prototypu detektora z polimerowym piroelektrykiem typu PVDF wykazały dobrą zgodność z wynikami uzyskanymi teoretycznie.

Słowa kluczowe: detektor piroelektryczny, model detektora piroelektrycznego, właściwości termiczne.

Measurement of the thermal time constant of a pyroelectric detector with use of its response to a step optical signal

Abstract

The thermal time constant of a pyroelectric detector is one of the most important factors determining the responsivity, response time and frequency response of the detector. In most cases, the thermal time constant is determined experimentally from the frequency response of the detector. This measurement method is rather technically difficult, because most of the commercial electromechanical modulators produce a non-sinusoidal waveform of the optical radiation. Additionally, this method is effective only if there is met the requirement that the thermal and electrical time constant values are significantly different. In the paper, the method for measuring the thermal time constant of the pyroelectric detector using the pyroelectric response to a step optical input signal is proposed. In Section 2 of the paper, the equivalent circuit of the pyroelectric detector (Fig. 1) and mathematical relationships (Eqs. 2, 3) describing the voltage response to the step optical input signal are presented. The proposed method for determining the thermal time constant (Eqs. 4, 5) from the pyroelectric voltage response to the step input signal (Fig. 3) is described in Section 3. The value of the thermal time constant τ_{th} is determined from equation (5), where t_{max} is the time moment, in which the pyroelectric voltage response reaches maximum and τ_e is the electrical time constant of the detector. In the second part of Section 3, both theoretical and experimental results of studies are presented in the form of curves. (Fig. 3). A comparison between the theoretical and experimental results shows a good agreement.

Keywords: pyroelectric detector, model of pyroelectric detector, thermal properties.

1. Wstęp

Detektory piroelektryczne stanowią ważną grupę detektorów termicznych stosowanych między innymi w pomiarach parametrów emisyjnych promieniowania podczerwonego. Walory detektorów piroelektrycznych takie, jak równomierna czułość spektralna w szerokim paśmie częstotliwościowym od ultrafioletu do

dalekiej podczerwieni i brak konieczności chłodzenia stanowią przesłanki, dla których od wielu lat prowadzi się intensywne badania nad nowymi materiałami piroelektrycznymi, modyfikacjami technologii ich wytwarzania, doskonaleniem ich opisu matematycznego, metod symulacji oraz sposobów badań eksperymentalnych parametrów tych detektorów.

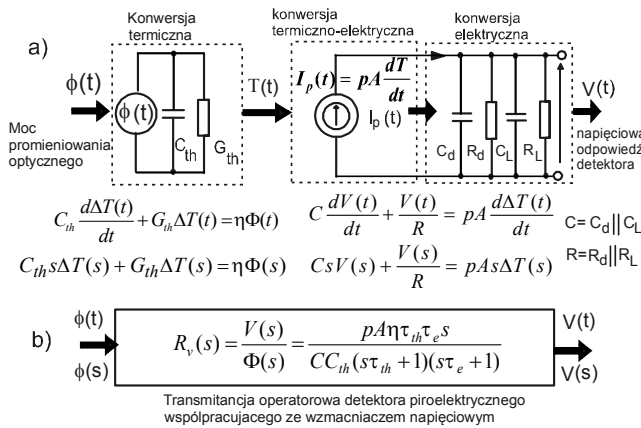
Jednym z kluczowych parametrów, które determinują właściwości dynamiczne detektorów piroelektrycznych są termiczna i elektryczna stała czasowa. Znajomość tych parametrów jest niezbędna dla uzyskania pożądaných osiągnęć detektora. W większości przypadków elektryczną stałą czasową można stosunkowo łatwo określić już na etapie projektowania i zweryfikować eksperymentalnie, ale jednak określenie wartości stałej czasowej termicznej w sposób analityczny jest zadaniem znacznie trudniejszym. Wynika to z faktu, że energia cieplna promieniowania optycznego pochłaniana przez detektor jest przekazywana do otoczenia przy jednoczesnym udziale trzech, stosunkowo trudnych do precyzyjnego zamodelowania procesów transportu ciepła, a mianowicie - przez przewodzenie, konwekcję i promieniowanie. Wiarygodnym sposobem wyznaczenia termicznej stałej czasowej jest przeprowadzenie badań eksperymentalnych odpowiedzi badanego detektora piroelektrycznego na pobudzenie sinusoidalnym lub skokowym sygnałem promieniowania. Warto w tym miejscu zauważyć, że problem badań eksperymentalnych mających na celu wyznaczenie termicznej stałej czasowej detektora piroelektrycznego generalnie jest podejmowany w nielicznych publikacjach i prezentowany jest w sposób lakoniczny w formie kilkuzdaniowego komentarza. Zwykle wyznaczenie wartości termicznej stałej czasowej dokonywane jest na podstawie zależności czułości napięciowej R_V detektora od częstotliwości sinusoidalnego sygnału promieniowania pobudzającego detektor piroelektryczny. Wartość termicznej stałej czasowej detektora określa się w oparciu o wyznaczoną z charakterystyki częstotliwościowej pulsację promieniowania odpowiadającą 3-decybelowej granicy pasma częstotliwościowego [1, 2]. Należy podkreślić, że wykorzystywana w tej metodzie pomiaru zależność na obliczenie termicznej stałej czasowej ma zastosowanie tylko dla tych detektorów, których wartości termicznej i elektrycznej stałej czasowej znacząco różnią się od siebie.

Wyznaczenie termicznej stałej czasowej detektora piroelektrycznego możliwe jest również za pomocą odpowiedzi detektora piroelektrycznego na wymuszenie skokowe, ale w dostępnych publikacjach informacje na ten temat są bardzo skromne. Jednym z niewielu przykładów jest praca [3], w której autorzy informują, że wartość termicznej stałej czasowej określona została w oparciu o parametry zbrocza sygnału odpowiedzi detektora. Jednak podobnie jak w poprzednio omawianym przypadku wynik takiego pomiaru jest poprawny tylko dla znacznie różniących się od siebie wartości termicznej i elektrycznej stałej czasowej detektora.

W niniejszym artykule przedstawiono propozycję metody pomiaru termicznej stałej czasowej detektora piroelektrycznego na podstawie wartości szczytowej napięciowej odpowiedzi tego detektora na sygnał promieniowania typu skok jednostkowy. Wykorzystywana w tej metodzie zależność matematyczna na poszukiwaną wartość termicznej stałej czasowej, umożliwia określenie poprawnego wyniku pomiaru bez konieczności spełnienia wymogu, aby wartości termicznej i elektrycznej stałej czasowej znacząco się różniły. Istotną zaletą tej metody jest również zastosowanie w badaniach eksperymentalnych technicznie łatwo realizowalnego wymuszenia skokowego pobudzającego detektor.

2. Napięciowa odpowiedź detektora piroelektrycznego na pobudzenie sygnałem promieniowania typu skok jednostkowy

Analityczne rozważania i ostateczna postać wyrażenia opisującego odpowiedź napięciową $V(t)$ na pobudzenie sygnałem promieniowania typu skok jednostkowy o amplitudzie mocy promieniowania Φ_m są w zasadzie znane [3, 4], a zasadnicze różnice polegają głównie na sposobach wyprowadzenia tej zależności. W niniejszej publikacji w zwięzłej formie zostaną przedstawione jedynie kluczowe zależności matematyczne dla przeprowadzenia toku rozważań analitycznych. Zwykle punktem wyjścia takiej analizy są schemat zastępczy detektora piroelektrycznego [3, 5-7] i towarzyszący mu opis matematyczny pokazane na rys. 1.



Rys. 1. a) Schemat zastępczy detektora piroelektrycznego współpracującego ze wzmacniaczem napięciowym b) model transmitancyjny detektora [3,5-7]
Fig. 1. a) Equivalent circuit of a pyroelectric detector cooperating with a voltage amplifier b) transfer function model of the detector [3,5-7]

Oznaczenia symboli uwzględnionych na rys 1: C_{th} – pojemność termiczna detektora G_{th} – konduktancja termiczna detektora, $\Delta T(t)$ – zmiany temperatury piroelektryka, η – współczynnik absorpcji promieniowania, p – współczynnik piroelektryczny, $I_p(t)$ – prąd wytwarzany przez detektor wskutek indukowanego ładunku w wyniku zmian temperatury $\Delta T(t)$ piroelektryka, A – powierzchnia aktywna detektora, C – pojemność zastępcza równolegle połączonych pojemności detektora C_d i pojemności wejściowej wzmacniacza, C_L , R – rezystancja zastępcza równolegle połączonych rezystancji upływu R_d piroelektryka i rezystancji wejściowej wzmacniacza R_L .

Proces przetwarzania sygnału mocy promieniowania $\Phi(t)$ pobudzającego detektor na sygnał napięciowy $V(t)$ podawany na wejście wzmacniacza, zamodelowany jest za pomocą schematu zastępczego detektora piroelektrycznego pokazanego na rys. 1. Proces ten składa się z trzech etapów konwersji – termicznej, termiczno-elektrycznej i elektrycznej. Każdy z tych etapów opisany jest odpowiednimi równaniami różniczkowymi i ich odpowiednikami w postaci operatorowej – zagadnienie to opisano bardziej szczegółowo w pracach [6, 7].

Po wykonaniu odpowiednich przekształceń matematycznych równań operatorowych uwzględnionych na rys. 1, można otrzymać wyrażenie na transmittancję operatorową $R_I(s)$ [5-7] opisującą zależność pomiędzy sygnałem wyjściowym $V(s)$ i sygnałem wejściowym $\Phi(s)$ dla układu pokazanego na rys. 1:

$$R_v(s) = \frac{V(s)}{\Phi(s)} = \frac{pA\eta\tau_{th}\tau_e s}{CC_{th}(s\tau_{th} + 1)(s\tau_e + 1)}, \quad (1)$$

gdzie, τ_{th} jest termiczną stałą czasową określoną z zależności $\tau_{th} = C_{th} / G_{th}$, a τ_e jest elektryczną stałą czasową określoną z zależności $\tau_e = CR$.

Jeżeli sygnał wejściowy określony jest zależnością typu skok jednostkowy $\Phi(t) = \Phi_m \mathbf{1}(t)$, to w wyniku przekształcenia odwrotnego Laplace'a otrzymujemy równanie opisujące napięciowy sygnał odpowiedzi $V(t)$ detektora piroelektrycznego:

$$V(t) = \mathcal{L}^{-1}[\Phi(s)R_v(s)] = \frac{pA\eta\Phi_m\tau_e\tau_{th}}{CC_{th}(\tau_e - \tau_{th})} (e^{-t/\tau_e} - e^{-t/\tau_{th}}), \quad (2)$$

przy założeniu, że $\tau_{th} \neq \tau_e$.

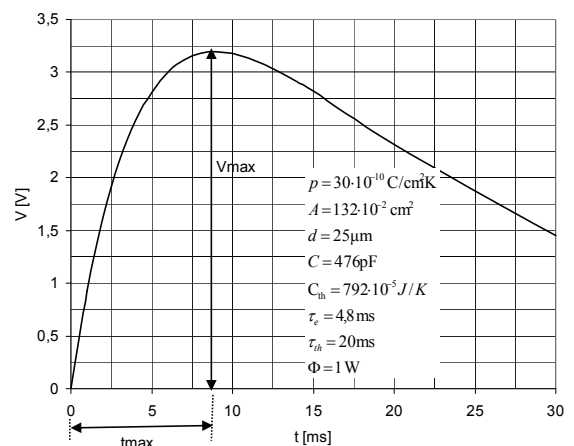
Dla szczególnego przypadku $\tau_{th} = \tau_e = \tau$ odpowiedź napięciową $V(t)$ można wyznaczyć obliczając granicę funkcji opisanej wzorem (2):

$$\begin{aligned} V(t) &= \lim_{\tau_e \rightarrow \tau_{th}} V(t) = \lim_{\tau_e \rightarrow \tau_{th}} \frac{pA\eta\Phi_m\tau_e\tau_{th}(e^{-t/\tau_e} - e^{-t/\tau_{th}})}{CC_{th}(\tau_e - \tau_{th})} = \\ &= \lim_{\tau_e \rightarrow \tau_{th}} \frac{\frac{d}{d\tau_e} pA\eta\Phi_m\tau_e\tau_{th}(e^{-t/\tau_e} - e^{-t/\tau_{th}})}{\frac{d}{d\tau_e} CC_{th}(\tau_e - \tau_{th})} = \\ &= \frac{pA\eta\Phi_m\tau_e^{-t/\tau_{th}}}{CC_{th}} \Big|_{\tau_{th}=\tau} = \frac{pA\eta\Phi_m\tau_e^{-t/\tau}}{CC_{th}} \end{aligned} \quad (3)$$

Podobne wyniki obliczeń przeprowadzone dla stanowiącego przedmiot analizy zagadnienia odpowiedzi skokowej detektora piroelektrycznego zaprezentowano w pracy [4].

3. Opis metody pomiaru termicznej stałej czasowej detektora piroelektrycznego i wyniki badań

Na rysunku 2 pokazano przykładowy wykres opisanej zależności (2) odpowiedzi napięciowej $V(t)$ detektora piroelektrycznego na pobudzenie sygnałem promieniowania typu skok jednostkowy. Wykres wykonano dla konkretnego egzemplarza detektora piroelektrycznego o jednoznacznie określonych parametrach, których specyfikację uwzględniono na rys. 2.



Rys. 2. Odpowiedź napięciowa $V(t)$ detektora piroelektrycznego na pobudzenie sygnałem promieniowania typu skok jednostkowy

Fig. 2. Voltage response $V(t)$ of the pyroelectric detector to the step signal of optical radiation

Można wykazać, że maksymalna wartość przebiegu $V(t)$ jest osiągana po czasie [4]:

$$t_{max} = \frac{\tau_e\tau_{th}}{\tau_{th} - \tau_e} \ln \frac{\tau_{th}}{\tau_e}. \quad (4)$$

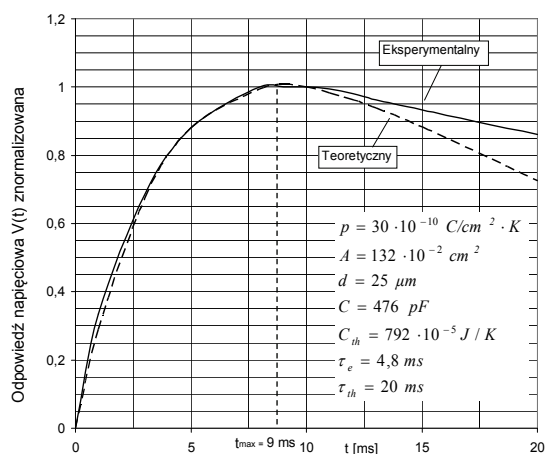
W wyniku przekształcenia zależności (4) otrzymujemy równanie:

$$\ln \frac{\tau_{th} + t_{max}}{\tau_e} + \frac{t_{max}}{\tau_{th}} - \frac{t_{max}}{\tau_e} = 0. \quad (5)$$

Równanie (5) pełni kluczową rolę w procesie wyznaczenia poszukiwanej wartości termicznej stałej czasowej τ_{th} detektora piroelektrycznego. Jeżeli na podstawie eksperymentalnie wyznaczonej odpowiedzi skokowej $V(t)$ detektora piroelektrycznego określona zostanie wartość czasu t_{max} i jednocześnie znana jest wartość stałej czasowej elektrycznej τ_e określonej na podstawie parametrów detektora i współpracującego z nim wzmacniacza, to rozwiązanie równania (5) umożliwi wyznaczenie wartości termicznej stałej czasowej τ_{th} . Rozwiązanie równania (5) można łatwo uzyskać numerycznie wykorzystując odpowiednie aplikacje komputerowe.

W celu weryfikacji zaproponowanej metody pomiaru termicznej stałej czasowej przeprowadzono badania eksperymentalne dla wykonanych kilku typów egzemplarzy detektorów piroelektrycznych z piroelektrykiem polimerowym PVDF o znanych parametrach materiałowych i elektrycznych, stosując pobudzenie sygnałem promieniowania typu skok jednostkowy. Wykorzystując eksperymentalnie zarejestrowany za pomocą oscyloskopu cyfrowego wykres lub dane liczbowe próbek przebiegu odpowiedzi detektora $V(t)$ na wymuszenie skokowe, można określić wartość czasu t_{max} i następnie rozwiązując numerycznie równanie (5), można obliczyć wartość poszukiwanej termicznej stałej czasowej τ_{th} .

Na rys. 3 pokazano znormalizowane wykresy dwóch przebiegów czasowych napięciowej odpowiedzi detektora na pobudzenie skokowe. Jeden z tych wykresów stanowi rezultat badań eksperymentalnych konkretnego egzemplarza detektora i umożliwia wyznaczenie czasu t_{max} . W rezultacie po wstawieniu wartości czasu t_{max} do równania (5) możliwe jest wyznaczenie wartości termicznej stałej czasowej τ_{th} . Drugi z wykresów, narysowany linią przerywaną, wyznaczony jest na podstawie teoretycznej zależności (2), do której wstawione zostały wartości eksperymentalnie wyznaczonej termicznej stałej czasowej τ_{th} oraz wartości wszystkich pozostałych parametrów określonych na podstawie cech konstrukcyjnych tego detektora i danych katalogowych zastosowanego materiału piroelektrycznego.



Rys. 3. Odpowiedzi napięciowe $V(t)$ detektora piroelektrycznego na pobudzenie sygnałem promieniowania typu skok jednostkowy uzyskane eksperymentalnie i teoretycznie

Fig. 3. Voltage responses $V(t)$ of the pyroelectric detector to the step radiation signal obtained experimentally and theoretically

Porównanie uzyskanych eksperymentalnie i teoretycznie wykresów odpowiedzi napięciowych $V(t)$ detektora na pobudzenie skokowym sygnałem promieniowania wykazuje, że wykresy te charakteryzują się dobrą zgodnością kształtów, zwłaszcza w przedziale czasu, w którym występuje efekt narastania zbocza tych wykresów aż do osiągnięcia wartości maksymalnej. Stanowi to

dobrą rekomendację słuszności stosowania zaproponowanej techniki pomiaru termicznej stałej czasowej detektora piroelektrycznego. W dalszym przedziale czasu po osiągnięciu wartości maksymalnej przebiegi obydwu wykresów w części opadającej wykazują stopniowo zwiększającą się rozbieżność, co może być wywołane technicznymi niedoskonałościami stanowiska do badań eksperymentalnych na przykład takimi, jak zastosowanie nieidealnego wzmacniacza, którego prąd polaryzujący wywołuje ładowanie pojemności detektora. Opadająca część wykresu uzyskanego eksperymentalnie nie ma jednak istotnego znaczenia dla jakości pomiaru, gdyż wynik pomiaru termicznej stałej czasowej określa się dla czasu t_{max} , dla którego występuje maksimum.

4. Podsumowanie

Zaproponowana metoda pomiaru termicznej stałej czasowej detektora piroelektrycznego w oparciu o jego odpowiedź napięciową na pobudzenie sygnałem promieniowania typu skok jednostkowy, zdaniem autora, jest konkurencyjną alternatywą dla stosowanych zwykle metod badawczych opartych na charakterystykach częstotliwościowych otrzymywanych przy wykorzystywaniu sygnału sinusoidalnego. Pomiarowe źródła promieniowania optycznego modulowanego sinusoidalnie są w zasadzie komercyjnie niedostępne, a powszechnie eksploatowane elektromechaniczne modulatory zapewniają wytworzenie tylko przebiegu sygnału promieniowania o trapezowym kształcie, który nie powinien być wykorzystywany do wyznaczenia charakterystyki częstotliwościowej detektora. Istotnym problemem przy wyznaczaniu wartości termicznej stałej czasowej w oparciu o trzy-decybelową granicę pasma charakterystyki częstotliwościowej detektora, jest również konieczność spełnienia wymogu dotyczącego znacznie różniących się wartości jego stałej czasowej elektrycznej i termicznej. Zaprezentowana metoda pomiaru wartości termicznej stałej czasowej detektora piroelektrycznego w oparciu o napięciową odpowiedź skokową jest łatwa dla realizacji technicznej i sprowadza się do rejestracji przebiegu odpowiedzi napięciowej a następnie wyznaczenia chwili czasowej, w której przebieg osiągnie wartość szczytową. Wykonane badania eksperymentalne i ich porównanie z wynikami uzyskanymi teoretycznie potwierdziły walory pomiarowe opisywanej w artykule metody pomiaru.

5. Literatura

- [1] Kao M. C., Chen H. Z., Yang S. L., Chen Y. C., Hsieh P. T., Yu C. C.: Pyroelectric Ta-modified LiNbO₃ thin films and devices for thermal infrared detection, *Thin Solid Films*, 516, 16, p. 5518–5522, 2008.
- [2] Peng Q. X., Wu C. G., Luo W. B., Chen C., Cai G. Q., Sun X. Y., Qian D. P.: An infrared pyroelectric detector improved by cool isostatic pressing with cup-shaped PZT thick film on silicon substrate, *Infrared Physics & Technology*, 61, p. 313–318, 2013.
- [3] Ichinose N., Hirao Y., Nakamoto M., Yamashita Y.: Pyroelectric Infrared Sensor Using Modified PbTiO₃ Ceramics, *T. IEE Japan*, vol. 122-E, p.523-530, 2002.
- [4] Simhony M., Shaulov A.: Pyroelectric Voltage Response to Step Signals of Infrared Radiation in Triglycine Sulphate and Strontium-Barium Niobate, *J. Appl. Phys.*, 42, 3741, pp. 3741-3744, 1971.
- [5] Wheless 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*, pp. 7-11, 1994.
- [6] Odon A., Otomański P.: Badania symulacyjne detektora piroelektrycznego z wykorzystaniem środowiska MATLAB-Simulink, *Pomiary Automatyka Kontrola* nr 12, str 1540-1542, 2011.
- [7] Odon A.: Modelling and Simulation of the Pyroelectric Detector Using MATLAB/Simulink, *Measurement Science Review*, vol. 10, No 6, pp. 195-199, 2010.