

Błąd pomiaru termicznej stałej czasowej detektora piroelektrycznego wyznaczonej z odpowiedzi częstotliwościowej tego detektora

Streszczenie. Przybliżoną wartość termicznej stałej czasowej detektora piroelektrycznego można wyznaczyć z parametrów jego charakterystyki Bodego, jeżeli stosunek n termicznej i elektrycznej stałej czasowej osiąga odpowiednio dużą, niestety bliżej niesprecyzowaną w literaturze, wartość liczbową. W artykule zaprezentowano ścisły opis matematyczny zależności błędu pomiaru termicznej stałej czasowej detektora piroelektrycznego od wartości współczynnika n .

Abstract. Thermal time constant of the pyroelectric detector is usually determined from the cutoff frequency of his Bode plot. The method can provide good measurement results by assumption that the thermal and electric time constants are significantly different. In the literature there is no more specific suggestions of desired values of the factor n which describes the ratio between the thermal and electrical time constant. As a result of conducted studies the mathematical formula for determining measurement error of the thermal time constant as function of this factor n was obtained. (**Measurement error of thermal time constant of pyroelectric detector determined from his frequency response**).

Słowa kluczowe: detektor piroelektryczny, czułość napięciowa, termiczna stała czasowa.

Keywords: pyroelectric detector, voltage responsivity, thermal time constant.

Wstęp

Detektory piroelektryczne ze względu na swoje szczególne właściwości znalazły wiele zastosowań w takich dziedzinach jak: miernictwo parametrów promieniowania optycznego zwłaszcza laserów, systemy alarmowe dostępu, spektroskopia podczerwona, analiza składu gazów i termowizja [1-5]. Te aktualne i wciąż poszerzane obszary zastosowań tych detektorów stanowią zasadniczy czynnik stymulujący rozwój prac badawczych w tej tematyce.

Należy zauważyć, że chociaż fundamentalne prace podejmujące tematykę podstaw teoretycznych zasady działania i sposobów badań istotnych parametrów detektorów piroelektrycznych zostały opracowane już na przełomie lat siedemdziesiątych i osiemdziesiątych ubiegłego wieku, to tematyka ta jest ciągle bardzo aktualna, o czym świadczy duża ilość publikacji z ostatnich kilku lat. Doniesienia literaturowe wskazują na intensywny rozwój technologii wytwarzania tych detektorów [6,7] i ich zastosowań. Równolegle podejmowane są prace nad doskonaleniem sposobu modelowania detektorów i opracowania nowych symulacyjnych i eksperymentalnych technik badawczych [8-17].

Szczególnie ważna dla realizacji prac projektowych i konstrukcyjnych jest znajomość istotnych parametrów decydujących o osiągnięciach detektorów. Do takich parametrów należą między innymi termiczna i elektryczna stała czasowa. Wyznaczenie ich wartości może być przeprowadzone zarówno na drodze analitycznej, jak i eksperymentalnej. W większości przypadków określenie w sposób analityczny wartości termicznej stałej czasowej jest zadaniem trudniejszym niż oszacowanie wartości elektrycznej stałej czasowej. Wynika to z faktu, że energia ciepła promieniowania optycznego pochłaniana przez detektor jest przekazywana do otoczenia przy jednoczesnym udziale trzech stosunkowo trudnych do precyzyjnego zamodelowania procesów transportu ciepła (przewodzenie, konwekcja i promieniowanie). Wiarygodne rezultaty wyznaczenia termicznej stałej czasowej detektora uzyskuje się w wyniku przeprowadzenia odpowiednich badań eksperymentalnych. Najczęściej stałą termiczną badanego detektora piroelektrycznego wyznacza się z parametrów jego częstotliwościowej odpowiedzi na pobudzenie sinusoidalnym sygnałem promieniowania (charakterystyka Bodego) [18-20]. Należy podkreślić, że wykorzystywana w tej metodzie pomiaru zależność na

obliczenie termicznej stałej czasowej ma zastosowanie tylko dla tych detektorów piroelektrycznych, których wartości termicznej i elektrycznej stałej czasowej znacząco różnią się od siebie. W przeciwnym przypadku uzyskane wyniki obliczeń mogą być obciążone błędem. Warunek ten jest przytaczany między innymi przez Whatmore'a w publikacji [21]. Przeprowadzone rozeznanie literaturowe wykazało, że niestety w żadnej znaczącej pozycji literaturowej z zakresu tej tematyki nie uwzględniono zarówno szczegółowych rozważań analitycznych, jak i konkretnych ilościowych zaleceń, które sugerowałyby, jaki stosunek wartości termicznej i elektrycznej stałej czasowej detektora piroelektrycznego należy zachować, aby wynik pomiaru termicznej stałej czasowej był obciążony akceptowalnie małym błędem. W rezultacie wartości wymaganej relacji tych stałych czasowych, gwarantującej dostatecznie mały błąd ich pomiarów, przyjmowana jest w oparciu o intuicję. Ta, jak się wydaje, istotna luka informacyjna stanowiła inspirację do podjęcia przez autora niniejszej publikacji bardziej szczegółowej analizy tego problemu.

W artykule przedstawiono wyniki przeprowadzonej analizy, której celem jest określenie zależności błędu pomiaru termicznej stałej czasowej detektora piroelektrycznego od stosunku wartości termicznej i elektrycznej stałej czasowej dla metody opartej na parametrach częstotliwościowej charakterystyki Bodego tego detektora.

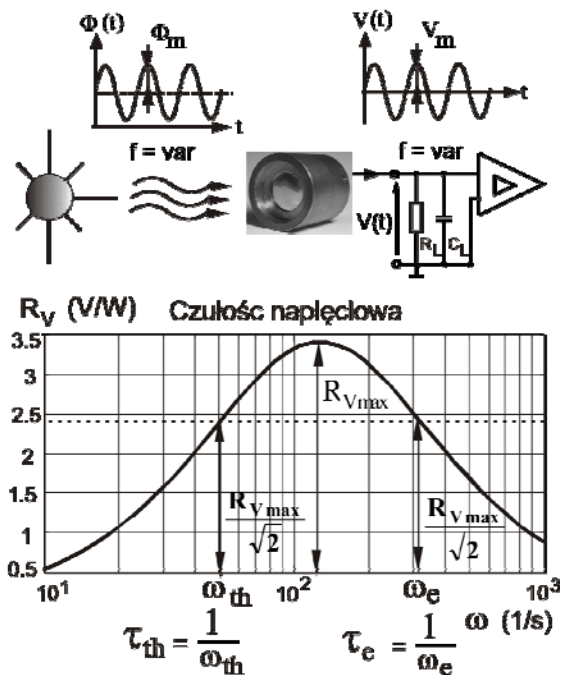
Zasada pomiaru termicznej stałej czasowej oparta na parametrach charakterystyki Bodego detektora

Dla obliczenia wartości termicznej stałej czasowej konieczne jest przeprowadzenie badań eksperymentalnych mających na celu wyznaczenie zależności czułości napięciowej R_V detektora od częstotliwości sinusoidalnego sygnału promieniowania pobudzającego detektor piroelektryczny.

Czułość napięciowa R_V detektora piroelektrycznego zdefiniowana jest jako stosunek amplitudy napięcia wyjściowego V_m detektora i amplitudy mocy pochłoniętego promieniowania Φ_m :

$$(1) \quad R_V = \frac{V_m}{\Phi_m}$$

Na rysunku 1 pokazano przykładową charakterystykę częstotliwościową tego detektora piroelektrycznego.



Rys. 1 Charakterystyka częstotliwościowa detektora piroelektrycznego i eksperymentalny sposób jej wyznaczenia

Uwzględniając opis matematyczny poszczególnych etapów konwersji detektora i wynikający stąd jego schemat zastępczy, [21-23] można wykazać, że dla trybu napięciowego pracy detektora (detektor obciążony dużą wartością rezystancji wejściowej R_L wzmacniacza napięciowego) czułość napięciowa R_V opisana jest zależnością [17, 21-23]:

$$(2) \quad R_V = \frac{\eta p A R \cdot \omega}{G_{th} (1 + \omega^2 \tau_{th}^2)^{1/2} \cdot (1 + \omega^2 \tau_e^2)^{1/2}}$$

gdzie: τ_{th} jest termiczną stałą czasową, G_{th} jest konduktancją termiczną detektora, η jest współczynnikiem absorpcji promieniowania, p jest współczynnikiem piroelektrycznym, A jest powierzchnią aktywną materiału piroelektrycznego detektora, R jest zastępczą rezystancją obejmującą układ równolegle połączonych rezystancji upływu dielektryka R_d detektora i rezystancji wejściowej R_L wzmacniacza

Elektryczna stała czasowa τ_e obliczana jest z zależności:

$$(3) \quad \tau_e = RC$$

gdzie: pojemność C jest pojemnością zastępczą równolegle połączonych pojemności detektora C_d i pojemności wejściowej C_L wzmacniacza.

Detektor piroelektryczny konstrukcyjnie jest w zasadzie kondensatorem, w którym cienka płytka materiału piroelektrycznego (kilkadziesiąt μm) jest dielektrykiem pokrytym obustronnie metalizacją. Zatem dysponując informacją o wartości przenikalności elektrycznej i rezystywności materiału piroelektrycznego, oraz jego grubości i powierzchni aktywnej łatwo można teoretycznie wyznaczyć wartość pojemności C_d detektora piroelektrycznego i upływności R_d . Dane dotyczące rezystancji R_L i pojemności wejściowej C_L wzmacniacza są zwykle dostępne i w rezultacie po wykonaniu obliczeń pojemności zastępczej C oraz rezystancji R , możliwe jest analityczne określenie wartości elektrycznej stałej czasowej τ_e z akceptowalną niedokładnością.

Teoretyczne wyznaczenie termicznej stałej czasowej jest znacznie trudniejsze, ze względu na konieczność uwzględnienia jednocześnie trzech niełatwych do precyzyjnego zamodelowania mechanizmów transportu ciepła. W większości przypadków pożądane jest zatem wyznaczenie termicznej stałej czasowej w sposób eksperymentalny w oparciu o parametry eksperymentalnie wykonanej charakterystyki częstotliwościowej detektora współpracującego ze wzmacniaczem napięciowym. Wartość zarówno termicznej stałej czasowej τ_{th} , jak i elektrycznej stałej czasowej τ_e detektora można określić w oparciu o wyznaczone z charakterystyki częstotliwościowej pulsacje sygnału promieniowania odpowiednio ω_{th} i ω_e odpowiadające 3-decybelowej granicy pasma charakterystyki częstotliwościowej detektora [21-23] pokazanej na rys. 1. Termiczną τ_{th} i elektryczną τ_e stałą czasową można obliczyć odpowiednio z zależności (4) i (5):

$$(4) \quad \tau_{th} \approx \frac{1}{\omega_{th}}$$

$$(5) \quad \tau_e \approx \frac{1}{\omega_e}$$

Wzory (4) i (5) na obliczanie stałych czasowych detektora piroelektrycznego są słuszne pod warunkiem spełnienia dwóch istotnych wymogów. Pierwszym wymogiem stosowalności tych formuł do obliczeń termicznej i elektrycznej stałej czasowej jest konieczność pozyskania informacji o relacji między tymi stałymi czasowymi, bo w przypadku braku informacji o tej relacji nie jest możliwe rozróżnienie czy wynik obliczeń dotyczy termicznej czy też elektrycznej stałej czasowej [21-23]. W większości praktycznie realizowanych układów z detektorem piroelektrycznym elektryczna i termiczna stała czasowa spełniają nierówność $\tau_{th} > \tau_e$, a zatem spełniona jest nierówność $\omega_{th} < \omega_e$, czyli usytuowanie tych pulsacji na osi ω jest zgodne z symbolami ω_{th} i ω_e pokazanymi na rys.1. W ogólnym przypadku konieczne jest jednak przeprowadzenie wstępnych badań wykonanych innymi metodami umożliwiającymi oszacowanie wartości przynajmniej jednej ze stałych czasowych i obliczenie odpowiadającej jej pulsacji. Jak już wcześniej zauważono wyznaczenie elektrycznej stałej czasowej w sposób teoretyczny jest raczej prostą operacją matematyczną i daje zwykle zadowalające rezultaty. Wyznaczenie tego parametru może być przeprowadzone również w prosty eksperymentalny sposób - przez zastosowanie odpowiednich przyrządów pomiarowych do pomiaru pojemności, co zwykle potwierdza obliczenia teoretyczne z akceptowalną niedokładnością.

Drugim wymogiem ograniczającym stosowalność zależności (4) i (5) jest konieczność spełnienia warunku, aby wartości termicznej i elektrycznej stałej czasowej różniły się znacznie od siebie [21-23]. W przeciwnym przypadku wyznaczona z zależności (4) wartość termicznej stałej czasowej obciążona może być znacznym błędem. Jak już wspomniano we wstępie niniejszego artykułu, w dostępnej literaturze niestety brak jest informacji, jaką konkretną wartość liczbową stosunku stałych czasowych należy interpretować jako dostatecznie dużą. Warto w tym miejscu zauważyć, że analiza treści niektórych artykułów naukowych, w których zawarte są informacje o wyznaczeniu termicznej stałej czasowej z danych charakterystyki Bodego badanego detektora, wykazuje, że ich autorzy przeprowadzając badania nie brali pod uwagę warunku dotyczącego relacji między stałymi czasowymi lub kierowali się intuicją w ocenie wspomnianego wymogu.

Błąd pomiaru termicznej stałej czasowej

Jeżeli przyjmiemy założenie, że elektryczna stała τ_e czasowa detektora piroelektrycznego jest n -krotnie mniejsza od stałej czasowej elektrycznej τ_{th} , to wartość elektrycznej stałej czasowej τ_e można opisać zależnością:

$$(6) \quad \tau_e = \frac{\tau_{th}}{n}, \text{ gdzie } n > 1$$

Po wstawieniu zależności (6) opisującej elektryczną stałą czasową τ_e do równania (2), otrzymujemy po odpowiednich przekształceniach zmodyfikowaną w porównaniu do formuły (2) zależność na czułość napięciową R_V detektora piroelektrycznego:

$$(7) \quad R_V = \frac{\eta p A R \cdot \omega}{G_{th} \sqrt{1 + \omega^2 \tau_{th}^2 + \frac{\omega^2 \tau_{th}^2}{n^2} + \frac{\omega^4 \tau_{th}^4}{n^2}}}$$

Można wykazać, że maksymalna wartość czułości napięciowej R_{Vmax} opisana jest zależnością [21-23]:

$$(8) \quad R_{Vmax} = \frac{\eta p A R}{G_{th} (\tau_{th} + \tau_e)}$$

Dla pewnej wartości pulsacji $\omega = \omega_{th}$ czułość napięciowa R_V osiąga wartość opisaną zależnością [21-23]:

$$(9) \quad R_V = \frac{R_{Vmax}}{\sqrt{2}} = \frac{\eta p A R}{G_{th} (\tau_{th} + \tau_e) \sqrt{2}}$$

Po podstawieniu zależności (9) do lewej strony równania (7) otrzymujemy równanie:

$$(10) \quad \frac{\eta p A R}{G_{th} (\tau_{th} + \tau_e) \sqrt{2}} = \frac{\eta p A R \cdot \omega}{G_{th} \sqrt{1 + \omega^2 \tau_{th}^2 + \frac{\omega^2 \tau_{th}^2}{n^2} + \frac{\omega^4 \tau_{th}^4}{n^2}}}$$

W wyniku rozwiązania równania (10) otrzymujemy wzory (11) i (12) opisujące pierwiastki tego równania, czyli wartości pulsacji ω_1 i ω_2 , które stanowią 3-decybelową granicę pasma częstotliwościowego detektora piroelektrycznego.

$$(11) \quad \omega_1 = \frac{n}{\tau_{th} \sqrt{2}} \sqrt{\left(1 + \frac{1}{n^2} + \frac{4}{n}\right) - \sqrt{\left(1 + \frac{1}{n^2} + \frac{4}{n}\right)^2 - \frac{4}{n^2}}}$$

$$(12) \quad \omega_2 = \frac{n}{\tau_{th} \sqrt{2}} \sqrt{\left(1 + \frac{1}{n^2} + \frac{4}{n}\right) + \sqrt{\left(1 + \frac{1}{n^2} + \frac{4}{n}\right)^2 - \frac{4}{n^2}}}$$

Zgodnie z przyjętym założeniem dotyczącym relacji matematycznej pomiędzy termiczną i elektryczną stałą czasową ($\tau_{th} > \tau_e$) i informacjami zawartymi w rozdziale 2, pulsacje odpowiadające tym stałym czasowym spełniają nierówność $\omega_{th} < \omega_e$. Oznacza to, że obliczona ze wzoru (11) pulsacja ω_1 jest powiązana z termiczną stałą czasową, czyli $\omega_{th} = \omega_1$, a pulsacja ω_2 wyznaczona ze wzoru (12) ma związek z elektryczną stałą czasową, czyli $\omega_e = \omega_2$. Zatem po wstawieniu wzoru (11) do równania (10) i dokonaniu odpowiednich przekształceń, otrzymujemy zależność (13) opisującą rzeczywistą wartość stałej termicznej τ_{th} , która odpowiada wartości pulsacji ω_{th} wyznaczonej z eksperymentalnie uzyskanej charakterystyki $R_V = f(\omega)$ czułości napięciowej detektora piroelektrycznego:

$$(13) \quad \tau_{th} = \frac{n}{\omega_{th} \sqrt{2}} \sqrt{\left(1 + \frac{1}{n^2} + \frac{4}{n}\right) - \sqrt{\left(1 + \frac{1}{n^2} + \frac{4}{n}\right)^2 - \frac{4}{n^2}}}$$

Zależność (13) opisuje rzeczywistą wartość stałej czasowej termicznej τ_{th} dla współczynnika n o znanej wartości i pulsacji ω_{th} wyznaczonej z wykresu charakterystyki częstotliwościowej.

Tymczasem zgodnie z procedurami zalecanymi w literaturze, których opis przedstawiono w rozdziale 2, po wyznaczeniu pulsacji ω_{th} odpowiadającej dolnej granicy pasma częstotliwościowego można wartość termicznej stałej czasowej τ_{th} obliczyć z przybliżonej zależności:

$$(14) \quad \tau_{thobl} \approx \frac{1}{\omega_{th}}$$

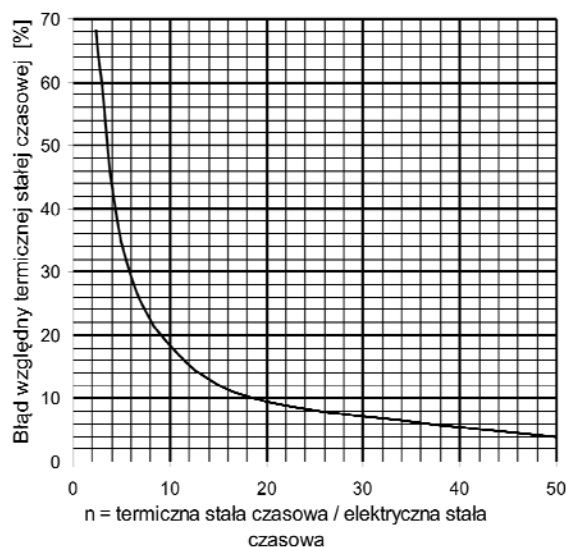
Wzór ten jest słuszny tylko dla odpowiednio dużych wartości n . Jeżeli warunek ten nie jest spełniony, to wynik obliczeń będzie obarczony błędem δ opisanym zależnością:

$$(15) \quad \delta = \frac{\tau_{thobl} - \tau_{th}}{\tau_{th}}$$

Po wstawieniu zależności (13) i (14) do wzoru (15) otrzymujemy zależność $\delta = f(n)$ opisującą błąd względny wyznaczenia termicznej stałej czasowej od współczynnika n charakteryzującego iloraz termicznej i elektrycznej stałej czasowej:

$$(16) \quad \delta = \frac{1 - \frac{n}{\sqrt{2}} \sqrt{\left(1 + \frac{1}{n^2} + \frac{4}{n}\right) - \sqrt{\left(1 + \frac{1}{n^2} + \frac{4}{n}\right)^2 - \frac{4}{n^2}}}}{\frac{n}{\sqrt{2}} \sqrt{\left(1 + \frac{1}{n^2} + \frac{4}{n}\right) - \sqrt{\left(1 + \frac{1}{n^2} + \frac{4}{n}\right)^2 - \frac{4}{n^2}}}}$$

Wykres zależności $\delta = f(n)$ opisaney wzorem (16) pokazano na rysunku 2.



Rys.2. Zależność błędny względnego δ pomiaru termicznej stałej czasowej od współczynnika n charakteryzującego iloraz termicznej i elektrycznej stałej czasowej

Analiza wykresu pokazanego na rysunku 2 wykazuje, że błąd względny $\delta = f(n)$ pomiaru termicznej stałej czasowej detektora piroelektrycznego w funkcji współczynnika n zależy quasi-hiperbolicznie od wartości n . Błąd ten osiągać może duże wartości (nawet kilkadziesiąt procent) zwłaszcza dla stosunkowo małych wartości współczynnika n . Przykładowo dla $n = 10$ wartość błędny δ obarczającego wynik obliczeń termicznej stałej czasowej wynosi około

19%. Tak duża wartość tego błędu może znacząco różnić się od jej oceny opartej na intuicji badacza, gdyż taka relacja ($n = 10$) pomiędzy wartościami stałych czasowych jest na tyle duża, że, jak mogłoby się wydawać, gwarantuje ona poprawny wynik pomiaru obliczony przy zastosowaniu wzoru (14). Z zależności (16) i wykonanego w oparciu o tę zależność wykresu (rys. 2) wynika, że jeżeli wymaga się, aby błąd δ osiągnął akceptowalną dla zastosowań pomiarowych wartość, na przykład mniejszą niż 5%, to współczynnik n powinien spełniać nierówność $n > 45$.

Wyniki przeprowadzonych badań wykazują jednoznacznie, że zalecenia literaturowe dotyczące wymogów odnośnie stosowalności wzoru (14) na obliczanie termicznej stałej czasowej detektora piroelektrycznego są zbyt ogólnikowe. Tekst opisujący te wymogi sformułowany jest zwykle w sposób bardzo zwięzły i stanowi tylko zalecenie, aby wartości termicznej i elektrycznej stałej czasowej detektora piroelektrycznego znacznie różniły się od siebie [21-23]. Tekst ten nie zawiera jednak żadnej sugestii, jaką minimalną wartość stosunku tych stałych czasowych należy interpretować jako dostatecznie dużą. Intuicyjna ocena tej wartości, pomijająca weryfikację opartą na odpowiednich zależnościach matematycznych może stanowić przyczynę powstania znaczących błędów pomiaru.

Najważniejszym rezultatem przeprowadzonych i opisywanych w niniejszej publikacji badań analitycznych było uzyskanie, dotychczas niepublikowanego w dostępnej literaturze, ścisłego opisu matematycznego wartości błędu wyznaczenia termicznej stałej czasowej (wzór 16) w funkcji współczynnika n charakteryzującego stosunek termicznej i elektrycznej stałej czasowej detektora piroelektrycznego. Rezultaty tych badań mogą być przydatne dla obiektywnej oceny wiarygodności pomiaru termicznej stałej czasowej detektora piroelektrycznego za pomocą metody opartej na pomiarze częstotliwości granicznych pasma częstotliwościowego charakterystyki Bodego tego detektora.

LITERATURA

- [1] Pullano, S.A, Islam S.K., Fiorillo A.S., Pyroelectric sensor for temperature monitoring of biological fluids in microchannel devices, *IEEE Sensors Journal*, 14 (2014), n. 8, 2725-2730
- [2] Lew W., Lytken O., Farmer J. A., Crowe M., C., Campbell, C., T., Improved pyroelectric detectors for single crystal adsorption calorimetry from 100 to 350 K, *Review of Scientific Instruments*, 81 (2010), 024102-1-024102-9
- [3] Giovannetti G., Artwig V., Francesconi R., Landini L., Benassi A., Study for a portable IR sensor to detect the blood temperature during coronary bypass implantation by pass implantation for a portable IR sensor to detect the blood temperature during coronary, *Review of Scientific Instruments*, 76 (2005), 084302-1-084302-5
- [4] Karty katalogowe, Ophir Optronics Ltd, Laser measurement instruments, <http://www.ophiropt.com/laser-measurement-instruments/laser-power-energy-meters>. (2015)
- [5] Capineri L., Lenzi F., Masotti L., Mazzoni M., CO₂ Laser pulse monitoring instrument based on PVDF pyroelectric array, *IEEE Sensors Journal*, 5 (2005), 3, 520-529
- [6] Guggilla P., Batra A. K., Currie J. R., Aggarwal M. D., Alim M., Lala R. B., Pyroelectric ceramics for infrared detection applications, *Materials Letters*, 60 (2006), 1937-1942
- [7] Ferrari V., Marioli D., Masotti L., Mazzoni M., Taroni A., Comparisons between PZT and PVDF thick films technologies in the design of low-cost pyroelectric sensors, *Review of Scientific Instruments*, 75 (2004) n.1, 4906-4910
- [8] Satapathy S., Wadhawan V. K., Fabrication of pyroelectric laser-energy meters and their characterization using Nd:YAG laser of variable pulse-width, *Sensors and Actuators, A* 121 (2005), n. 2, 576-583
- [9] Lubomirsky I., Stafsudd O., Invited Review Article: Practical guide for pyroelectric measurements, *Review of Scientific Instruments*, 83 (2012), 051101-1-051101-18
- [10] Bennaji N, Mellouki I., Yacoubi N., Determination of thermal properties of graphite black-coating by photothermal and electro-pyroelectric techniques, *Sensors&Transducers* 27 (2014), 75-81
- [11] Capineri L., Masotti L., Mazzoni M., Pyroelectric PVDF sensor modeling of the temporal voltage response to arbitrarily modulated radiation, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 47 (2000) n. 6, 1406-1412.
- [12] Ramos P., Meca F. J., Mendiola J., Martin E., A simple thermal and electrical model of an infrared pyroelectric detector using spice, *Ferroelectrics*, 271 (2002) n. 1, 379-384
- [13] Efthymiou S., Ozanyan K. B., Advanced Simulator of Pyroelectric Detector circuits and associated signal processing, *Proc IEEE Africon11*, (2011), 1-6
- [14] Smith, B., Amon, C.H., Simultaneous electrothermal test method for pyroelectric microsensors, *Journal for Electronic Packaging*, 129 (2007), 504-511
- [15] Odon A., Modelling and simulation of the pyroelectric detector using MATLAB/Simulink, *Measurement Science Review*, 10 (2010) n. 6, 195-199
- [16] Odon A., Pomiar termicznej stałej czasowej detektora piroelektrycznego przy wykorzystaniu jego odpowiedzi na skokowe pobudzenie promieniowaniem optycznym, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 60 (2014) n.8, 577-579
- [17] Odon A., Wpływ kształtu modulowanego promieniowania optycznego na czułość napięciową detektora piroelektrycznego, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 58 (2012) n.11., 997-999
- [18] 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 (2008) n.16, 5518-5522
- [19] Wu C.G., Li P., Cai G.Q., Luo W.B., Sun X.Y., Peng Q.X, Hang W.L, Quick response PZT/P(VDF-TrFE) composite film pyroelectric infrared sensor with patterned polyimide thermal isolation layer, *Infrared Physics & Technology*, 66 (2014), 34-38
- [20] 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 (2013), 313-318,
- [21] Whatmore R.W., Watton R., Pyroelectric materials and devices, in: Capper P., Elliott C.T. (Eds.), *Infrared Detectors and Emitters: Materials and Devices*, Kluwer Academic Publishers, Boston (2000), 99-147
- [22] Aggarwal M.D., Currie J.R., Penn B.G., Batra A.K. Lal R.B., Polymer-ceramic composite materials for pyroelectric infrared detectors: an overview, NASA/TM 215190, (2007)
- [23] Rogalski A., Infrared detectors, CRC Press Taylor&Francis Group, second edition (2000)

Autor: dr hab. inż. Andrzej Odon, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: andrzej.odon@put.poznan.pl