

Odpowiedź napięciowa detektora piroelektrycznego na pobudzenie krótkotrwałym impulsem promieniowania optycznego

Streszczenie. W artykule zaprezentowano opis szczegółowych procedur matematycznych prowadzących do wyznaczenia opisu matematycznego napięciowej odpowiedzi detektora piroelektrycznego na pobudzenie krótkotrwałym impulsem promieniowania optycznego. Wyprowadzono równanie opisujące zależność pomiędzy amplitudą napięciowego sygnału odpowiedzi detektora a energią pochłoniętego impulsu promieniowania i fizycznymi parametrami detektora.

Abstract. Detail mathematical procedures, among others those omitted or unavailable in literature, allowing analytical description of the response of the pyroelectric detector to the short input pulse of optical radiation are presented. An equation describing the relationship between the amplitude of the detector response and the radiation pulse energy and the physical parameters of the detector was derived. (**Voltage response of pyroelectric detector to short pulse of optical radiation**).

Słowa kluczowe: detektor piroelektryczny, odpowiedź detektora piroelektrycznego, pomiar energii promieniowania impulsowego
Keywords: pyroelectric detector, response of pyroelectric detector, energy measurement of pulsed radiation.

Wstęp

Detektory piroelektryczne ze względu na swoje szczególne właściwości znalazły zastosowanie między innymi w pomiarach energii impulsowego promieniowania optycznego zwłaszcza laserów impulsowych. Dla ilościowej oceny właściwości detektora piroelektrycznego zastosowanego do pomiarów energii promieniowania impulsowego konieczny jest opis matematyczny napięciowej odpowiedzi $V(t)$ detektora piroelektrycznego na impulsowy sygnał zaabsorbowanego promieniowania o mocy $\Phi(t)$. Jest to szczególnie istotne zarówno w procesie projektowania konstrukcji detektora piroelektrycznego jak i w fazie interpretacji wyników jego badań eksperymentalnych.

Prace badawcze dotyczące teoretycznego modelu działania detektora piroelektrycznego są prowadzone już od ponad 40 lat [1,2]. Tematyka ta jest wciąż aktualna, na co wskazuje duża liczba publikacji z ostatnich lat, w których prezentowane są propozycje udoskonalonych opisów teoretycznych działania detektorów piroelektrycznych i sposoby badań właściwości tych detektorów metodami symulacyjnymi. Należy zauważyć, że w publikacjach dotyczących teoretycznych podstaw działania detektorów piroelektrycznych autorzy koncentrują się najczęściej nad problematyką odpowiedzi detektora piroelektrycznego na pobudzenie promieniowaniem modulowanym sinusoidalnie i w zasadzie można uznać, że tematyka ta rozpracowana jest w sposób zadowalający. Jednak tylko w nielicznych, dostępnych publikacjach prezentowane są zagadnienia badań teoretycznych i eksperymentalnych odpowiedzi tego detektora na impulsowe optyczne sygnały pobudzające detektor piroelektryczny [3] – fakt ten potwierdzają między innymi autorzy publikacji [4,5]. W szczególności informacje dotyczące analitycznego opisu napięciowej odpowiedzi detektora piroelektrycznego na zaabsorbowane promieniowanie impulsowe i wynikające z tego opisu właściwości detektora są skromne lub trudno dostępne w literaturze. Ponadto prezentowany w tych pracach tok przekształceń matematycznych jest niepełny, a nawet całkowicie pomijany i przedstawiana jest tylko postać końcowa zależności odpowiedzi napięciowej tego detektora na pobudzenie impulsowe - na przykład w artykule [6]. W niektórych publikacjach zauważalne są ewidentnie nieprawidłowe zależności matematyczne opisujące odpowiedź impulsową detektora piroelektrycznego [7,8], ale ich weryfikacja jest utrudniona ze względu na pominięcie w

tekście tych publikacji szczegółowego toku rozważań matematycznych.

Głównym celem niniejszej publikacji jest prezentacja rozważań analitycznych przeprowadzonych w celu wyznaczenia opisu matematycznego napięciowej odpowiedzi $V(t)$ detektora piroelektrycznego na pobudzenie impulsem promieniowania o mocy opisanej funkcją $\Phi(t)$ i o czasie trwania znacznie krótszym od termicznej i elektrycznej stałej czasowej detektora piroelektrycznego. Następnie w oparciu o znajomość tej zależności przeprowadzono dalsze rozważania mające na celu określenie zależności opisującej związek mierzalnych parametrów sygnału napięciowego $V(t)$ z energią pochłoniętego impulsu promieniowania. Uwzględniono szczegółowy tok rozważań analitycznych prowadzących do wyznaczenia opisu matematycznego napięciowej odpowiedzi $V(t)$ detektora piroelektrycznego na pobudzenie krótkotrwałym impulsem promieniowania. Umożliwi to czytelnikowi przeprowadzenie weryfikacji poszczególnych etapów obliczeń i ewentualnej adaptacji lub modyfikacji uzyskanych zależności matematycznych dla własnych potrzeb.

Omawiane w niniejszym artykule zagadnienia stanowią jeden z wątków tematyki prowadzonych przez autora badań dotyczących detektorów piroelektrycznych, których wyniki zaprezentowano między innymi w publikacjach [9-11].

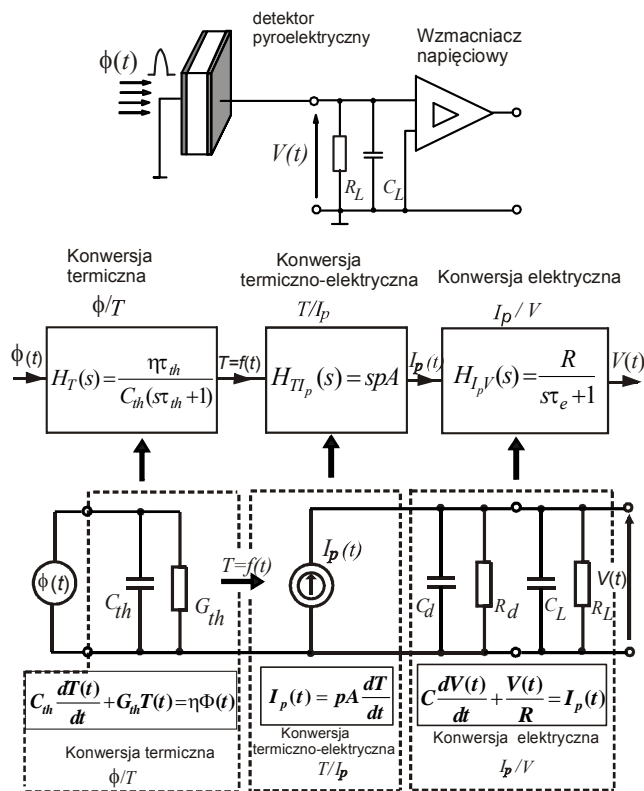
Model transmitancyjny detektora piroelektrycznego

Dobrze opracowany model detektora piroelektrycznego i opis matematyczny jego odpowiedzi napięciowej $V(t)$ na wymuszenie sygnałem promieniowania o mocy $\Phi(t)$ umożliwia rozpoznanie właściwości dynamicznych detektora zarówno na drodze analitycznej jak i przy wykorzystaniu komputerowych technik symulacyjnych. Podstawowy opis matematyczny i schemat zastępczy detektora piroelektrycznego zostały w zasadzie opracowane i opublikowane [1,2] już w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku. W aktualnie prowadzonych pracach badawczych wspomniany opis matematyczny detektora piroelektrycznego jest z powodzeniem adaptowany, ale także udoskonalony dla konkretnych celów aplikacyjnych [5,9,12-14].

Detektor piroelektryczny konstrukcyjnie jest w zasadzie kondensatorem o pojemności C_d . Dielektryk tego kondensatora wykonany jest z cienkiej płytki materiału

pirelektrycznego o grubości d i powierzchni A pokrytej metalizowanymi okładzinami. Jeżeli na powierzchnię aktywną detektora piroelektrycznego pada promieniowanie o wartości mocy $\Phi(t)$ zmieniającej się w czasie, to w wyniku termiczno-elektrycznych procesów zachodzących w materiale piroelektrycznym na elektrodach tego detektora pojawi się ładunek elektryczny $q(t)$. Sygnałami zawierającymi informację o parametrach sygnału promieniowania mogą być zarówno napięcie $V(t)$ na elektrodach detektora piroelektrycznego, jak również prąd $I_p(t)$ płynący w obwodzie obciążenia detektora piroelektrycznego o bardzo małej wartości impedancji. Pozyskanie napięciowego lub prądowego sygnału wyjściowego detektora piroelektrycznego można realizować za pomocą dwóch alternatywnych sposobów współpracy układu detektora piroelektrycznego ze wzmacniaczem. Pierwszy z nich, określany jest jako tryb prądowy, w którym detektor współpracuje ze wzmacniaczem transimpedancyjnym, a drugi określany jest jako tryb napięciowy, w którym detektor współpracuje ze wzmacniaczem o dużej rezystancji wejściowej R_L . Przeprowadzone w artykule rozważania odnoszą się do napięciowego trybu pracy tego detektora, który, jak się wydaje, stosowany jest częściej niż tryb prądowy.

W procesie przetwarzania mocy zaabsorbowanego przez detektor piroelektryczny promieniowania na sygnał elektryczny można wyróżnić trzy etapy konwersji: pierwszy etap - konwersja termiczna promieniowania o mocy chwilowej $\Phi(t)$ padającego na powierzchnię detektora na zmianę temperatury materiału piroelektrycznego detektora $T(t)$, drugi etap - konwersja termiczno/elektryczna polegająca na przetworzeniu zmian temperatury $T(t)$ piroelektryka na prąd elektryczny źródła prądowego $I_p(t)$ i trzeci etap - konwersja elektryczna.



Rys.1. Schemat zastępczy [2] detektora piroelektrycznego współpracującego ze wzmacniaczem napięciowym i odpowiadający mu model transmitancyjny [9].

Na rysunku 1 pokazano schemat układu zastępczego detektora piroelektrycznego [2] i odpowiadający mu model transmitancyjny opracowany przez autora niniejszej publikacji [9]. Poszczególne etapy konwersji sygnału detektora piroelektrycznego – konwersja termiczna, termiczno-elektryczna i elektryczna opisane są odpowiednio równaniami [2] (1), (2), i (3):

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

$$(2) \quad I_p = pA \frac{dT(t)}{dt}$$

$$(3) \quad C \frac{dV(t)}{dt} + \frac{V(t)}{R} = I_p(t)$$

gdzie: C_{th} – pojemność cieplna detektora piroelektrycznego, G_{th} – konduktancja termiczna detektora piroelektrycznego, η – współczynnik absorpcji promieniowania, p – współczynnik piroelektryczny, C – pojemność zastępcza detektora C_d i wzmacniacza C_L , R – rezystancja zastępcza równoległego połączenia rezystancji upływnościowej R_d materiału piroelektrycznego i rezystancji wejściowej wzmacniacza R_L .

Należy podkreślić, że równania (1), (2) i (3) są słuszne przy założeniu, że płytka materiału piroelektrycznego jest dostatecznie cienka i w rezultacie zmiana temperatury materiału piroelektrycznego wywołana zaabsorbowanym promieniowaniem jest jednakowa w całej jego objętości.

Kolejne etapy konwersji sygnału w torze schematu zastępczego detektora piroelektrycznego można zamodelować za pomocą transmitancji operatorowych opisanych zależnościami:

- Transmitancja $H_T(s)$ dla konwersji termicznej:

$$(4) \quad H_T(s) = \frac{T(s)}{\Phi(s)} = \frac{\eta}{sC_{th} + G_{th}} = \frac{\eta\tau_{th}}{C_{th}(s\tau_{th} + 1)}$$

gdzie: τ_{th} – termiczna stała czasowa określona z zależności: $\tau_{th} = C_{th}/G_{th}$, C_{th} – pojemność cieplna określona z zależności: $C_{th} = c'Ad$, c' – objętościowe ciepło właściwe detektora,

- Transmitancja $H_{Tp}(s)$ dla konwersji termiczno-elektrycznej:

$$(5) \quad H_{Tp}(s) = \frac{I_p(s)}{T(s)} = spA$$

- Transmitancja $H_{IpV}(s)$ dla konwersji elektrycznej:

$$(6) \quad H_{IpV}(s) = \frac{V(s)}{I_p(s)} = \frac{R}{sRC + 1} = \frac{R}{s\tau_e + 1} = \frac{\tau_e}{C(s\tau_e + 1)}$$

gdzie: τ_e – elektryczna stała czasowa detektora piroelektrycznego i wzmacniacza ($\tau_e = RC$).

Uzyskany model transmitancyjny detektora piroelektrycznego umożliwia nie tylko przeprowadzenie rozważań analitycznych w domenie rachunku operatorowego, ale także umożliwia wykonanie jego badań symulacyjnych w środowisku Matlab-Simulink lub Labview. Model ten przeznaczony jest dla elementarnej wersji konstrukcyjnej detektora bez warstwy absorbentu pokrywającego jego elektrodę aktywną.

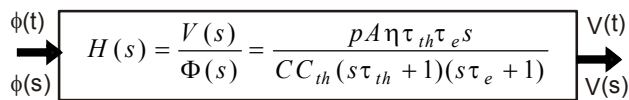
Transmitancja zastępcza detektora piroelektrycznego obejmująca wszystkie trzy etapy konwersji stanowi iloczyn transmitancji określonych wzorami (4), (5), (6):

$$(7) \quad H(s) = H_T(s) \cdot H_{Tlp}(s) \cdot H_{lpV}(s)$$

Po wstawieniu do wzoru (7) zależności (4), (5) i (6) opisujących odpowiednio transmitancje operatorowe $H_T(s)$, $H_{Tlp}(s)$ i $H_{lpV}(s)$ uzyskuje się poszukiwaną zależność opisującą zastępczą transmitancję operatorową $H(s)$ detektora piroelektrycznego:

$$(8) \quad H(s) = \frac{pA\eta}{CC_{th}} \frac{s\tau_{th}\tau_e}{(s\tau_{th}+1)(s\tau_e+1)}$$

W rezultacie dla celów obliczeń teoretycznych a także komputerowej symulacji właściwości dynamicznych detektora piroelektrycznego można wykorzystać schemat blokowy pokazany na rysunku 2 zawierający tylko pojedynczy element opisany transmitancją zastępczą $H(s)$, dla którego sygnałem wejściowym jest moc promieniowania $\Phi(s)$, a sygnałem wyjściowym - napięcie wyjściowe detektora $V(s)$.



Rys. 2. Model transmitancyjny detektora piroelektrycznego

Odpowiedź detektora piroelektrycznego na impuls promieniowania

Uwzględniając zależność (8) opisującą transmitancję operatorową detektora piroelektrycznego można uzyskać operatorowe równanie (9) opisujące odpowiedź napięciową $V(s)$ na sygnał mocy promieniowania $\Phi(t)$:

$$(9) \quad V(s) = \frac{pA\eta\tau_e\tau_{th}}{CC_{th}} \frac{s\mathcal{L}[\Phi(t)]}{(s\tau_e+1)(s\tau_{th}+1)}$$

Wykorzystując twierdzenie o splocie transformatał składowych, można wyznaczyć ogólną postać zależności na poszukiwany oryginał funkcji opisującej postać czasową napięcia wyjściowego $V(t)$ detektora:

$$(10) \quad V(t) = \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{pA\eta\tau_e\tau_{th}}{CC_{th}} \frac{s}{(s\tau_e+1)(s\tau_{th}+1)} \right] * \Phi(t) = \\ = \left[K \frac{1}{(\tau_{th}-\tau_e)} \left(\frac{1}{\tau_e} e^{-t/\tau_e} - \frac{1}{\tau_{th}} e^{-t/\tau_{th}} \right) \right] * \Phi(t)$$

gdzie $K = pA\eta\tau_e\tau_{th}/CC_{th}$ jest współczynnikiem charakteryzującym parametry materiałowe i fizyczne detektora piroelektrycznego.

Zależność (10) stanowi wyjściowy etap do dalszych przekształceń opartych na definicji splotu

funkcji $f_1(t) * f_2(t) = \int_0^t f_1(t-x)f_2(x)dx$, w którym funkcje

$f_2(t)$ oraz $f_1(t)$ opisane są odpowiednio zależnościami: $f_2(t) = \Phi(t)$ oraz

$f_1(t) = [K/(\tau_{th}-\tau_e)] \cdot \{[\exp(-t/\tau_e)]\tau_e^{-1} - [\exp(-t/\tau_{th})]\tau_{th}^{-1}\}$. Zgodnie z przytoczoną wyżej definicją splotu, na prawej stronie równania wprowadzona jest zmienna pomocnicza x , która po podstawieniu za argument funkcji $f_2(t)$ przekształca ją do postaci $f_2(x)$, a w funkcji $f_1(t)$ zmienna pomocnicza x jest uwzględniona w przekształconej postaci tej funkcji, to znaczy $f_1(t-x)$. W rezultacie obydwie funkcje $f_2(t)$ i $f_1(t)$ przekształcone zostaną odpowiednio do postaci $f_2(x) = \Phi(x)$ oraz $f_1(x) = [K/(\tau_{th}-\tau_e)] \cdot \{[\exp(-x/\tau_e)]\tau_e^{-1} - [\exp(-x/\tau_{th})]\tau_{th}^{-1}\}$. W wyniku wykonania kolejnych przekształceń

matematycznych określonych definicją splotu funkcji uzyskuje się zależność (11), która stanowi ważny etap pośredni umożliwiający realizację dalszej części rozważań analitycznych:

$$(11) \quad V(t) = K \frac{1}{(\tau_{th}-\tau_e)} \left(\frac{1}{\tau_e} e^{-t/\tau_e} - \frac{1}{\tau_{th}} e^{-t/\tau_{th}} \right) * \Phi(t) = \\ = \int_{x=0}^{x=t} \frac{K}{(\tau_{th}-\tau_e)} \left(\frac{e^{-(t-x)/\tau_e}}{\tau_e} - \frac{e^{-(t-x)/\tau_{th}}}{\tau_{th}} \right) \Phi(x) dx = \\ = \frac{K}{(\tau_{th}-\tau_e)} \left[\frac{e^{-t/\tau_e}}{\tau_e} \int_{x=0}^{x=t} e^{x/\tau_e} \Phi(x) dx - \frac{e^{-t/\tau_{th}}}{\tau_{th}} \int_{x=0}^{x=t} e^{x/\tau_{th}} \Phi(x) dx \right]$$

Wyznaczenie na podstawie zależności (11) poszukiwanej funkcji opisującej postać matematyczną oryginału $V(t)$ jest możliwe, jeżeli znana jest zależność funkcyjna opisująca moc promieniowania $\Phi(x)$. W przypadku rozważanego pobudzenia typu impulsowego funkcja $\Phi(x)$ ma niezerową wartość tylko w krótkim przedziale czasu od $x=0$ do $x=t_i$. W rezultacie równanie (11) ulegnie przekształceniu do postaci:

$$(12) \quad V(t) = \frac{K}{(\tau_{th}-\tau_e)} \left[\frac{e^{-t/\tau_e}}{\tau_e} \int_{x=0}^{x=t_i} e^{x/\tau_e} \Phi(x) dx - \frac{e^{-t/\tau_{th}}}{\tau_{th}} \int_{x=0}^{x=t_i} e^{x/\tau_{th}} \Phi(x) dx \right]$$

Jeżeli przyjęte zostanie założenie, że czas trwania t_i impulsu mocy promieniowania spełnia warunek:

$$(13) \quad t_i \ll \tau_e,$$

to iloczyn funkcji eksponentialnej e^{x/τ_e} i funkcji $\Phi(x)$ objęty operacją całkowania w zależności (12) można zastąpić przybliżoną zależnością:

$$(14) \quad \int_{x=0}^{x=t_i} e^{x/\tau_e} \Phi(x) dx \approx \int_0^{t_i} \Phi(x) dx$$

Podobnie przyjmując założenie, że jeżeli czas trwania t_i impulsu mocy promieniowania spełnia warunek:

$$(15) \quad t_i \ll \tau_{th}$$

to wyrażenie objęte drugą całką oznaczoną we wzorze (12) można zastąpić przybliżoną zależnością:

$$(16) \quad \int_{x=0}^{x=t_i} e^{x/\tau_{th}} \Phi(x) dx \approx \int_0^{t_i} \Phi(x) dx$$

Łatwo można zauważyć, że wyrażenia na prawych stronach zależności (14) i (16) opisują energię E wytworzoną przez promieniowanie o mocy $\Phi(t)$ ($\Phi(t)$ w formule splotu oznaczona jest jako $\Phi(x)$) w przedziale czasu od 0 do t_i , zgodnie ze wzorem:

$$(17) \quad E = \int_{x=0}^{x=t_i} \Phi(x) dx$$

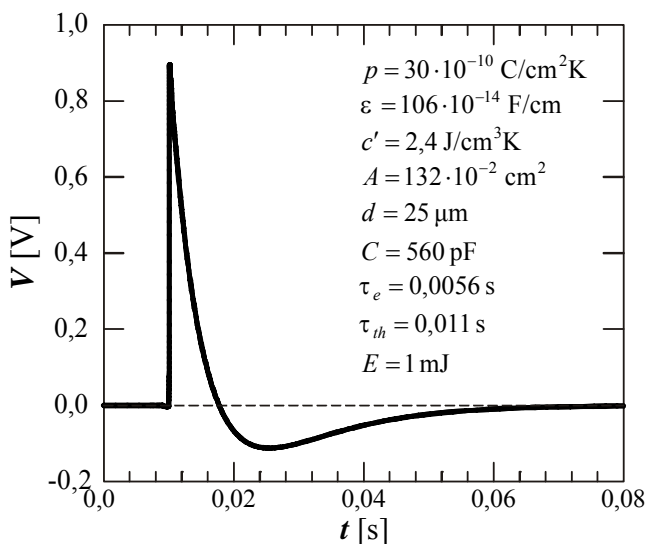
Zatem wyrażenia opisujące prawą stronę równań (14) oraz (16) możemy zastąpić symbolem energii E impulsu promieniowania i następnie wstawić do zależności (12).

Uzyskamy wtedy ostateczną postać zależności opisującej odpowiedź napięciową $V(t)$ detektora piroelektrycznego na impuls promieniowania o energii E :

$$(18) \quad V(t) = \frac{pA\eta\tau_e\tau_{th}}{CC_{th}(\tau_{th} - \tau_e)} \left(\frac{1}{\tau_e} e^{-t/\tau_e} - \frac{1}{\tau_{th}} e^{-t/\tau_{th}} \right) E$$

Identyczną zależność odpowiedzi napięciowej $V(t)$ detektora piroelektrycznego na impuls promieniowania o energii E zaprezentowano w publikacji [6], przy czym zależność ta została zamieszczona bez wyprowadzenia i komentarzy pozwalających na weryfikację lub odtworzenie sposobu wyznaczenia tej zależności.

Na rysunku 3 pokazano wykres przebiegu czasowego napięciowej odpowiedzi $V(t)$ detektora piroelektrycznego opisanej zależnością (18) na pobudzenie krótkotrwałym impulsem promieniowania o energii $E=1$ mJ i o czasie trwania t_i spełniającym nierówności (13) oraz (15). Wykres sporządzono dla zaprojektowanego i wykonanego egzemplarza detektora piroelektrycznego z piroelektrykiem typu PVDF. Wykaz wartości ważniejszych parametrów fizycznych tego detektora zamieszczono w oknie rysunku 3.



Rys. 3. Wykres przebiegu czasowego odpowiedzi napięciowej detektora piroelektrycznego $V(t)$ na pobudzenie krótkotrwałym impulsem promieniowania o energii $E = 1$ mJ. Wykres ilustruje właściwości dynamiczne wykonanego polimerowego (PVDF) detektora piroelektrycznego

Można wykazać, że wartość maksymalna sygnału $V(t)$ określonego zależnością (18) opisana jest wzorem:

$$(19) \quad V_m = \frac{pA\eta\tau_e\tau_{th}}{CC_{th}(\tau_{th} - \tau_e)} \left(\frac{1}{\tau_e} - \frac{1}{\tau_{th}} \right) E$$

Po dokonaniu operacji skrócenia we wzorze (19) otrzymujemy ostatecznie bardzo ważną dla realizacji pomiaru energii promieniowania zależność opisującą funkcję przetwarzania wartości mierzonej energii E impulsu promieniowania na mierzalny parametr przebiegu odpowiedzi napięciowej detektora piroelektrycznego, który stanowi amplituda V_m tego przebiegu wyznaczona z zależności:

$$(20) \quad V_m = \frac{pA\eta}{CC_{th}} E$$

Po podstawieniu formuły opisującej pojemność cieplną $C_{th} = c'Ad$ do wzoru (20) otrzymamy inną, przydatną dla

celów projektowania, zależność pomiędzy amplitudą V_m napięciowego sygnału odpowiedzi detektora piroelektrycznego a mierzoną energią promieniowania pochłoniętego przez ten detektor:

$$(21) \quad V_m = \frac{p\eta}{c'dC} E$$

W praktyce producenci mierników przeznaczonych do pomiaru energii impulsu lasera często operują pojęciem czułości napięciowej R_{VJ} [V/J] detektora piroelektrycznego, która jest definiowana jako:

$$(22) \quad R_{VJ} = \frac{V_m}{E}$$

W rezultacie po wstawieniu wyrażenia (21) opisującego amplitudę V_m do wzoru (22) otrzymujemy przydatną dla celów projektowania zależność opisującą czułość napięciową R_{VJ} detektora piroelektrycznego:

$$(23) \quad R_{VJ} = \frac{V_m}{E} = \frac{p\eta}{c'dC} = \frac{p\eta}{c'd(C_d + C_L)}$$

gdzie C_d jest pojemnością detektora, a C_L jest pojemnością wejściową wzmacniacza wraz z kablem łączącym detektor piroelektryczny ze wzmacniaczem.

Analiza zależności (23) wykazuje, że czułość napięciowa R_{VJ} detektora piroelektrycznego zastosowanego do pomiarów energii promieniowania impulsowego jest proporcjonalna do współczynnika piroelektrycznego piroelektryka zastosowanego w konstrukcji detektora piroelektrycznego i jest odwrotnie proporcjonalna do objętościowego ciepła właściwego c' detektora, grubości d płytki piroelektryka oraz pojemności elektrycznej C wynikającej z równoległego połączenia pojemności detektora C_d oraz wzmacniacza C_L . Wzór ten daje istotne informacje umożliwiające ocenę i optymalizację osiągnięć detektora piroelektrycznego. Przykładowo w celu uzyskania odpowiednio dużej czułości detektora należy konstruować detektory piroelektryczne o małej pojemności elektrycznej, a zatem małej powierzchni A i zamontować detektor bezpośrednio w głowicy zawierającej układ wzmacniacza, tak aby wyeliminować pojemność kabla, która zwykle ma znaczące wartości. Odpowiednio dużą czułość uzyskać można również przez wykonanie konstrukcyjne detektora o małej pojemności cieplnej C_{th} na przykład dzięki zastosowaniu materiału piroelektryka o małej wartości objętościowego ciepła właściwego c' . Wzór (23) sugeruje, że zmniejszenie grubości d dielektryka powinno także korzystnie wpłynąć na zwiększenie czułości napięciowej R_{VJ} detektora piroelektrycznego, jednak wnikliwa analiza wzoru (23) wykazuje, że n -krotnemu zmniejszeniu grubości d dielektryka odpowiada n -krotny wzrost pojemności C_d , a więc przy założeniu, że $C_d \gg C_L$, mianownik wzoru (23) pozostanie bez zmian. Należy w tym miejscu przypomnieć, że wszystkie poprzednio i obecnie zaprezentowane rozważania dotyczą dostatecznie cienkich płytek piroelektrycznych, w których zmiana temperatury materiału piroelektrycznego wywołana zaabsorbowanym promieniowaniem jest jednakowa w całej jego objętości.

Interesujące są konsekwencje wpływu zwiększenia wartości rezystancji wejściowej R_L wzmacniacza na czułość napięciową R_{VJ} w pomiarach energii krótkotrwałych impulsów promieniowania. Wzór (23) nie zawiera parametru - rezystancja wejściowa R_L , a więc oznacza to, że, jeżeli czas trwania impulsów promieniowania jest dostatecznie krótki w porównaniu do elektrycznej i termicznej stałej czasowej, to wartość czułości napięciowej R_{VJ} nie zależy od rezystancji wejściowej wzmacniacza.

Podobnie wzór (23) nie zawiera również parametru - czas trwania impulsu, a więc oznacza to, że czułość napięciowa R_{Vj} nie zależy od czasu trwania impulsu promieniowania, oczywiście przy spełnieniu wspomnianego wyżej warunku dotyczącego relacji pomiędzy wartością czasu impulsu promieniowania a wartościami termicznej i elektrycznej stałej czasowej detektora.

Podsumowanie

W artykule zaprezentowano opis szczegółowych procedur matematycznych prowadzących do wyznaczenia opisu matematycznego napięciowej odpowiedzi $V(t)$ detektora piroelektrycznego na krótkotrwałe pobudzenie impulsem promieniowania o mocy $\Phi(t)$. Uzyskany opis matematyczny sygnału odpowiedzi napięciowej umożliwił przeprowadzenie dalszych rozważań mających na celu określenie zależności opisującej związek amplitudy tego sygnału z energią pochłoniętego impulsu promieniowania. Ostatecznym celem przeprowadzonych rozważań analitycznych było wyznaczenie opisu matematycznego czułości napięciowej detektora piroelektrycznego przeznaczonego do pomiarów energii promieniowania impulsowego i wynikające z tego opisu wnioski umożliwiające ocenę i optymalizację osiągnięć detektora piroelektrycznego.

Zaprezentowany w artykule szczegółowy tok przekształceń matematycznych prowadzących do wyznaczenia opisu matematycznego napięciowej odpowiedzi detektora piroelektrycznego na pobudzenie krótkotrwałym impulsem promieniowania i czułości napięciowej detektora w pomiarach energii promieniowania impulsowego, może umożliwić odtworzenie poszczególnych etapów obliczeń i ewentualną adaptację lub modyfikację zależności matematycznych dla własnych potrzeb.

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

LITERATURA

- [1] Liu S. T., Long D., Pyroelectric detectors and materials, *Proc. of the IEEE*, Vol. 66, (1978) n. 1, 14-26
- [2] Wheless W. P., Wurtz L. T., Wells J. A., An equivalent-circuit Technology Transfer: A Global Affair, *Proc. of IEEE*, (1994), 7-11

- [3] Shaulov A., Rosenthal A., Simhony M., Pyroelectric voltage response to short infrared laser pulses in triglycine sulphate and strontiumbarium niobate, *Journal of Applied Physics*, (1972), n.43, 4518-4522
- [4] Efthymiou S., Ozanyan K. B., Pulsed performance of pyroelectric detectors Sensors & their Applications XV, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 178, (2009), 012044, 1-6.
- [5] Efthymiou S., Ozanyan K. B., Advanced Simulator of Pyroelectric Detector circuits and associated signal processing, *Proc IEEE Africon11*, (2011), 1-6
- [6] Touayar O., Sifi N., Ktari T., Bastie J., Experimental evaluation of a pyroelectric detector linearity used for pulsed laser energy absolute measurement, *Sensors and Actuators*, (2005) A 120, 482-489
- [7] Almasri M., Butler D. P., Çelik-Butler Z., Adam R., Sobolewski R., Cryogenic performance of semiconducting Y-Ba-Cu-O for infrared detection, *Superconductor Science and Technology*, Vol. 12, (1999), n. 12, 751-754
- [8] Butler D. P., Çelik-Butler Z., Adam R., Sobolewski R., Pyroelectric effect in Y-Ba-Cu-O thin films under laser illumination, *Journal of Applied Physics*, Vol. 85, (1999), n. 2, 1075-1079
- [9] Odon A., Modelling and Simulation of the Pyroelectric Detector Using MATLAB/Simulink, *Measurement Science Review*, Vol. 10, (2010) n. 6, 195-199
- [10] Odon A., Błąd pomiaru termicznej stałej czasowej detektora piroelektrycznego wyznaczonej z odpowiedzi częstotliwościowej tego detektora, *Przegląd Elektrotechniczny* (2015), n.8, 36-39
- [11] Odon A., Measurement error of voltage responsivity of pyroelectric detector induced by use of non-sinusoidal modulation of radiation, *Proceedings of the 8th International Conference on Measurements*, Smolenice Castle, Slovakia, May 27-30, 2013. - *Institute of Measurement Science: Bratislava*, (2013), 219-222
- [12] Ramos P., Meca F. J., Mendiola J., & Martin E., A simple thermal and electrical model of an infrared pyroelectric detector using spice, *Ferroelectrics*, Vol. 271, (2002), n. 1, 379-384
- [13] Touayar O., Sifi N., Brahim J. B., Theoretical and experimental study of power radiometric measurements using a pyroelectric current integrator converter, *Sensors and Actuators, A: Physical*, Vol 135, (2007), n. 2, 484-491
- [14] 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