

Andrzej ODON*
Anna SZLACHTA**

MODEL TRANSMITANCYJNY DETEKTORA PIROELEKTRYCZNEGO DLA CELÓW BADAŃ SYMULACYJNYCH

W artykule zaprezentowano szczegółowy tok rozważań analitycznych prowadzących do wyznaczenia modelu transmitancyjnego detektora piroelektrycznego. Opracowany model transmitancyjny może być wykorzystany zarówno do przeprowadzania badań opartych na rozważaniach analitycznych, jak i do badań symulacyjnych właściwości dynamicznych detektorów piroelektrycznych w takich środowiskach programistycznych jak LabVIEW lub MATLAB–Simulink.

SŁOWA KLUCZOWE: modelowanie detektora piroelektrycznego, badania symulacyjne detektora piroelektrycznego

1. WSTĘP

Detektory piroelektryczne stanowią specyficzną grupę termicznych detektorów promieniowania, których obszar zastosowań ulega permanentnemu zwiększaniu, co ma ścisły związek z postępem w doskonaleniu technologii wytwarzania detektorów piroelektrycznych o dobrych jakościowo parametrach i ulepszeniu techniki badań tych detektorów. Prawidłowo realizowane procedury badawcze i projektowe mające na celu rozpoznanie istotnych właściwości detektora piroelektrycznego są możliwe do przeprowadzenia, jeżeli znany jest teoretyczny opis funkcji przetwarzania tego detektora i dostępne jest odpowiednie narzędzie do symulacji jego właściwości. Dobry model detektora i dobre narzędzie symulacyjne mogą zastąpić często skomplikowany, trudny do wyprowadzenia opis analityczny odpowiedzi detektora, zwłaszcza na sygnały wymuszające o bardziej złożonych kształtach. Współczesna technika informatyczna daje wiele możliwości badań symulacyjnych różnego rodzaju elementów elektronicznych lub optoelektronicznych, ale generalnie w żadnej z tych bibliotek programów przeznaczonych do badań symulacyjnych nie jest uwzględniony detektor piroelektryczny. Konieczne jest zatem samodzielne zaimplementowanie modelu i parametrów

* Politechnika Poznańska.

** Politechnika Rzeszowska.

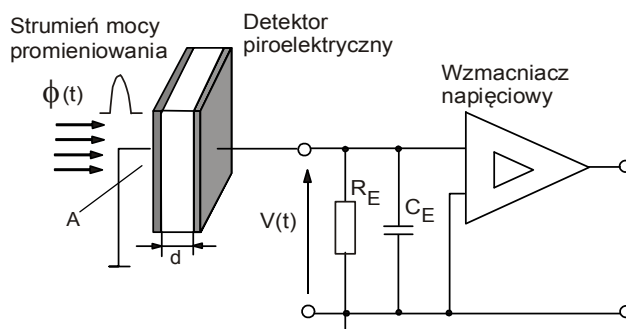
detektora do takich programów jak MATLAB-Simulink, LABVIEW lub SPICE. W nielicznych publikacjach prezentowane są bardzo ubogie informacje o zastosowaniu technik symulacyjnych do badania detektorów piroelektrycznych i w rezultacie wykorzystanie tych informacji dla celów weryfikacji prezentowanych w artykule wyników badań lub dla celów edukacyjnych jest bardzo utrudnione. Przykładem jest publikacja [1], w której autorzy prezentują model piroelektrycznego sensora promieniowania podczerwonego, którego zarówno właściwości termiczne, jak i elektryczne są zamodelowane wyłącznie za pomocą układu elektrycznego, który to układ elektryczny zaimplementowany jest następnie do pakietu oprogramowania Tina. Zawarte w tym artykule komentarze dotyczące zagadnień symulacji są bardzo skromne, praktycznie ograniczają się do kilku zdań tekstu. Podobnie zwięzły jest opis badań symulacyjnych zawarty w publikacji [2], w której autorzy przedstawiają model i rezultaty badań symulacyjnych elektrycznego modelu detektora piroelektrycznego zaimplementowanego w środowisku programistycznym SPICE.

W niniejszym artykule zaprezentowano szczegółowe procedury matematyczne prowadzące do opracowania modelu transmitancyjnego detektora piroelektrycznego, który zaimplementowany w programie MATLAB-Simulink lub LABVIEW umożliwia przeprowadzenie badań symulacyjnych odpowiedzi detektora na sygnały promieniowania o kształcie przebiegu czasowego zaprogramowanym za pomocą narzędzi dostępnych w bibliotekach tych programów. Omawiane w niniejszym artykule zagadnienia powiązane są tematycznie z wcześniej publikowanymi artykułami [3, 4], przy czym w niniejszej publikacji w szczególności koncentrowano się na prezentacji szczegółowego toku rozważań analitycznych prowadzących do wyznaczenia modelu transmitancyjnego detektora. Daje to czytelnikowi możliwość weryfikacji poszczególnych etapów obliczeń i ewentualnej adaptacji lub modyfikacji uzyskanych zależności matematycznych dla własnych potrzeb.

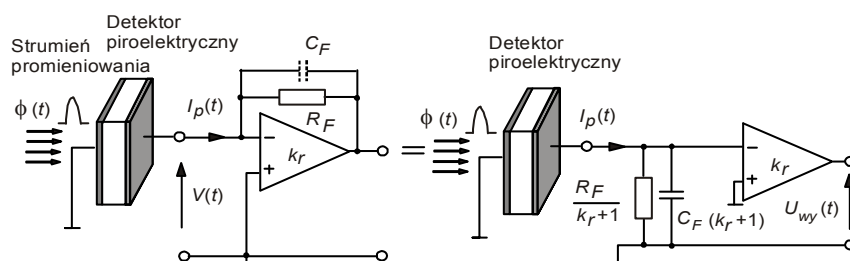
2. PODSTAWOWE UKŁADY PRACY DETEKTORA PIROELEKTRYCZNEGO

Detektor piroelektryczny konstrukcyjnie jest w zasadzie kondensatorem o pojemności C_d i rezystancji upływu dielektryka R_d . Dielektryk tego kondensatora wykonany jest z cienkiej płytki materiału piroelektrycznego o grubości d i powierzchni A pokrytej metalizowanymi okładzinami (rys. 1). Jeżeli na powierzchnię aktywną detektora piroelektrycznego pada promieniowanie o wartości mocy $\Phi(t)$ zmieniającej się w czasie, to w wyniku zmiany temperatury $\Delta T(t)$ piroelektryka i specyficznych fizykalnych 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. W celu pozyskania napięciowego lub prądowego sygnału wyjściowego detektora stosuje się dwa alternatywne sposoby pracy detektora piroelektrycznego i współdziałającego z nim układu wzmacniacza, które określa się jako: tryb napięciowy, w którym detektor współpracuje ze wzmacniaczem o dużej rezystancji wejściowej R_L i pojemności pasożytnej C_L , lub tryb prądowy, w którym detektor współpracuje ze wzmacniaczem transimpedancyjnym wykonanym na wzmacniaczu operacyjnym, którego pętla sprzężenia zwrotnego zamknięta jest poprzez rezystancję R_F [5]. Warto zauważyć, że w schemacie zastępczym takiego wzmacniacza transimpedancyjnego należy uwzględnić również pojemność pasozytną C_F połączoną równolegle z rezystorem R_F . Dotyczy to szczególnie tych przypadków, w których w układzie wzmacniacza stosowana jest stosunkowo duża wartość rezystancji R_F . Obydwa tryby pracy są wykorzystywane w praktyce, jednak wiele doniesień literaturowych wskazuje, że w większości przypadków stosowany jest napięciowy tryb pracy. Na rys. 1 i rys. 2 pokazano schematy ilustrujące odpowiednio napięciowy i prądowy tryb pracy detektora piroelektrycznego.



Rys. 1. Tryb napięciowy pracy detektora piroelektrycznego



Rys. 2. Tryb prądowy pracy detektora piroelektrycznego

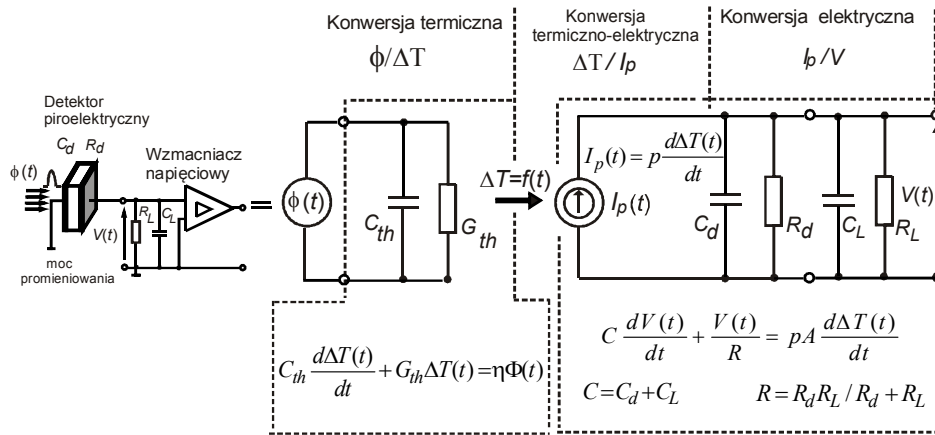
Idealny wzmacniacz transimpedancyjny wykonany na wzmacniaczu operacyjnym o bardzo dużym wzmocnieniu różnicowym k_r (rys. 2) wytwarza na wejściu odwracającym potencjał o wartości bardzo bliskiej potencjałowi masy układu, a więc w rezultacie wejście takiego wzmacniacza transimpedancyjnego można traktować jako zwarcie dla źródła sygnału. Jednak bardziej wnikliwa analiza oparta na znanych podstawach teoretycznych działania wzmacniaczy operacyjnych z ujemnym sprzężeniem zwrotnym wykazuje (efekt Millera), że w schemacie zastępczym wzmacniacza transimpedancyjnego impedancja wejściowa składa się z równoległego połączenia rezystora R_L o wartości rezystancji $R_L = R_F/(k_r + 1)$ i kondensatora C_L o wartości pojemności $C_L = C_F(k_r + 1)$. W rezultacie w trybie prądowym detektor piroelektryczny będzie obciążony impedancją wynikającą z równoległego połączenia rezystora i kondensatora, podobnie jak na schemacie dla trybu napięciowego przedstawionym na rys. 1. Właściwość ta, często w literaturze pomijana, jest konieczna do uwzględnienia w analitycznych rozważaniach szczególnie wtedy, gdy wartość rezystancji sprzężenia zwrotnego jest duża, co w praktyce zwykle ma miejsce.

Obydwa układy zaprezentowane na rysunkach 1 i 2 wykazują się pewnymi specyficznymi, zarówno korzystnymi jak i niekorzystnymi, właściwościami, które nie przesądzają jednoznacznie o tym, który z tych układów jest lepszy. W praktyce stosowane są obydwie konfiguracje układowe, ale jednak ostateczna decyzja o wyborze rodzaju układu w konkretnym rozwiązaniu konstrukcyjnym powinna być powzięta każdorazowo po przeprowadzeniu wnikliwej analizy właściwości detektora piroelektrycznego, specyfiki sygnałów wejściowych oraz toru układu kondycjonowania sygnału odpowiedzi napięciowej detektora. Niektóre doniesienia literaturowe wskazują, że jednak większość aplikacji detektora piroelektrycznego wykorzystuje tryb napięciowy. Z tego względu dalsze rozważania prezentowane w kolejnych rozdziałach niniejszego artykułu dotyczące opracowanego i opisywanego w modelu detektora piroelektrycznego odnoszą się wyłącznie do napięciowego trybu pracy tego detektora.

3. MODEL DETEKTORA PIROELEKTRYCZNEGO

Podstawowy model detektora piroelektrycznego, na który składa się opis matematyczny za pomocą liniowych równań różniczkowych i powiązany z nim schemat zastępczy zostały opracowane już w latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych [6] ubiegłego wieku. Aktualnie model ten z uwzględnieniem nieznacznych jego adaptacji wykorzystywany jest z zadowalającymi rezultatami dla celów przeprowadzania teoretycznych rozważań dotyczących detektorów piroelektrycznych, co potwierdzają liczne doniesienia literaturowe z ostatnich lat.

Na rys. 3 pokazano schemat układu zastępczego detektora piroelektrycznego.



Rys. 3. Schemat zastępczy detektora piroelektrycznego współpracującego ze wzmacniaczem napięciowym [7]

W procesie przetwarzania zaabsorbowanego przez detektor piroelektryczny promieniowania o przebiegu czasowym mocy $\Phi(t)$ na napięciowy sygnał elektryczny $V(t)$ można wyróżnić trzy etapy przetwarzania sygnału: konwersji termicznej, konwersji termiczno-elektrycznej i konwersji elektrycznej. Wszystkie, kolejne etapy tej konwersji opisane są liniowymi równaniami różniczkowymi, których postaci matematyczne są prezentowane między innymi w takich fundamentalnych publikacjach jak [6, 7],

W pierwszym etapie procesu przetwarzania detektora piroelektrycznego następuje konwersja termiczna mocy promieniowania $\Phi(t)$ padającego na powierzchnię A detektora na przyrost temperatury $\Delta T(t)$ materiału piroelektrycznego tego detektora. Równanie konwersji termicznej [6,7] opisane jest zależnością:

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

gdzie: C_{th} jest pojemnością termiczną detektora piroelektrycznego, G_{th} jest konduktancją termiczną detektora piroelektrycznego, η jest współczynnikiem absorpcji promieniowania

Zmiany temperatury $\Delta T(t)$ piroelektryka powodują powstanie ładunku $q(t)$ na elektrodach detektora piroelektrycznego i w rezultacie przepływ prądu elektrycznego w obwodzie obciążenia detektora, który stanowią nie tylko rezystancja wejściowa R_L wzmacniacza i pojemność wejściowa C_L wzmacniacza, ale również pojemność własna C_d detektora i rezystancja upływnościowa R_d materiału piroelektrycznego detektora. Efekt omawianego procesu przetwarzania modeluje się za pomocą źródła prądowego [7], którego prąd $I_p(t)$ wyznaczony jest z zależności :

$$I_p = p \frac{d\Delta T(t)}{dt} \quad (2)$$

gdzie p jest współczynnikiem zastosowanego materiału piroelektrycznego w konstrukcji detektora piroelektrycznego.

Trzeci i jednocześnie 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. Analiza elektrycznej części schematu zastępczego wykazuje, że napięciowy sygnał odpowiedzi detektora piroelektrycznego $V(t)$ opisany jest zależnością:

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

gdzie pojemność C określona z zależności $C = C_d + C_L$ jest pojemnością zastępczą równoległego połączenia pojemności detektora C_d i pojemności wejściowej wzmacniacza C_L , a rezystancja R jest rezystancją zastępczą połączenia równoległego rezystancji detektora R_d oraz rezystancji wejściowej wzmacniacza R_L i wyznaczona jest z zależności $R = R_d R_L / (R_d + R_L)$.

Podstawiając zależność (2) opisującą prąd $I_p(t)$ do prawej strony równania (3), uzyskuje się równanie opisujące związek pomiędzy odpowiedzią napięciową detektora $V(t)$ a sygnałem wejściowym, jaki stanowi zmiana temperatury $\Delta T(t)$ piroelektryka:

$$C \frac{dV(t)}{dt} + \frac{V(t)}{R} = pA \frac{d\Delta T(t)}{dt} \quad (4)$$

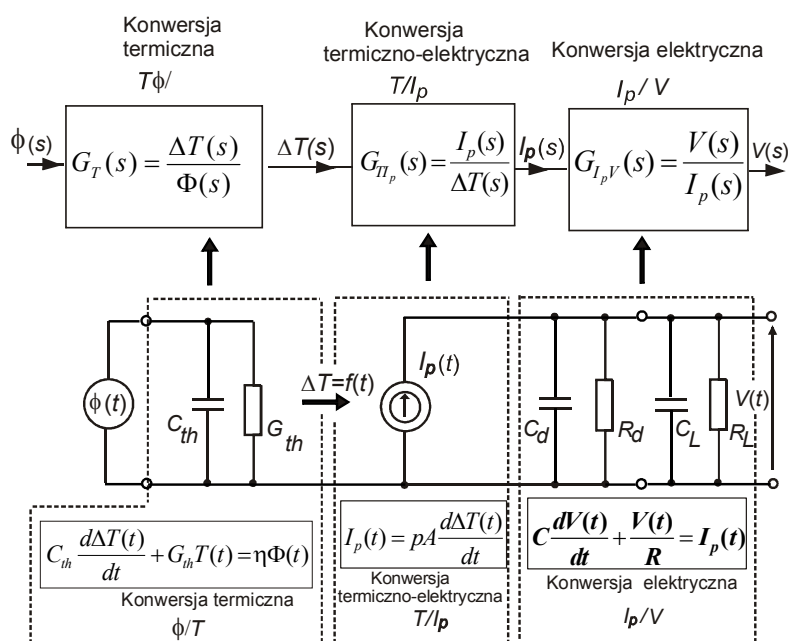
Równania (1), (2), (3) i (4) stanowią kluczowe zależności opisu matematycznego detektora piroelektrycznego, które umożliwiają określenie w teoretyczny sposób właściwości dynamicznych detektora piroelektrycznego zaprezentowanych jako odpowiedzi detektora na pobudzenie sygnałem mocy promieniowania $\Phi(t)$, w szczególności o kształtach przebiegów standardowych, takich jak: sinusoidalny, skok jednostkowy i impuls prostokątny.

4. TRANSMITANCYJNY MODEL DETEKTORA PIROELEKTRYCZNEGO

Transmitancyjny model detektora piroelektrycznego jest utworzony w oparciu o schemat zastępczy pokazany na rys. 3 i zależności matematyczne opisujące poszczególne etapy konwersji piroelektrycznego. Wszystkie etapy konwersji są

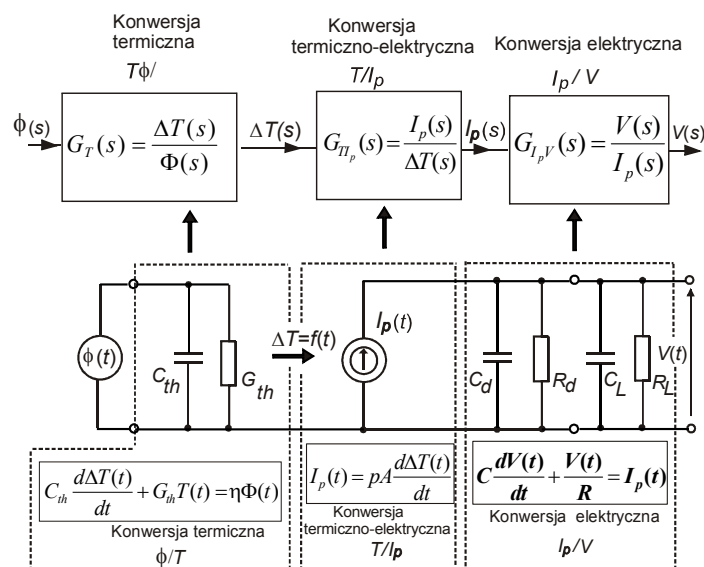
zamodelowane za pomocą odpowiedniego liniowego równania różniczkowego (1), (2), (3) i mają jednoznacznie określony sygnał wejściowy i wyjściowy. Zatem poszczególne etapy konwersji można przedstawić jako połączone ze sobą szeregowo transmitancje operatorowe.

W schemacie zastępczym pokazanym na rys. 4 wyróżniono bloki reprezentujące trzy etapy konwersji sygnałów dla detektora piroelektrycznego: konwersja termiczna opisana równaniem (1), konwersja termiczno-elektryczna opisana równaniem (2) i konwersja prąd-napięcie opisana równaniem (3).



Rys. 4. Przekształcenie schematu zastępczego detektora piroelektrycznego z obwodem termicznym i elektrycznym w transmitancyjny schemat blokowy

Sygnałem wejściowym jest moc promieniowania $\Phi(t)$, a sygnałem wyjściowym – napięcie $V(t)$ wytworzone pomiędzy elektrodami detektora piroelektrycznego. Uwzględniając znane z teorii sterowania procedury tworzenia schematów blokowych, transmitancyjny schemat zastępczy detektora piroelektrycznego można przedstawić jako połączenie szeregowo trzech bloków o transmitancjach $G_T(s)$, $G_{TIp}(s)$ i $G_{IpV}(s)$ opisujących właściwości odpowiedniego podzespołu schematu zastępczego pokazanego na rys. 4. Zależności matematyczne opisujące poszczególne transmitancje można wyznaczyć, dokonując przekształcenia równań różniczkowych opisujących poszczególne bloki schematu zastępczego na postać operatorową.



Rys. 4. Przekształcenie schematu zastępczego detektora piroelektrycznego z obwodem termicznym i elektrycznym w transmitancyjny schemat blokowy

W wyniku przekształcenia równania różniczkowego (1) opisującego konwersję termiczną do postaci operatorowej, można wykazać, że transmitancja dla bloku odpowiedzialnego za realizację konwersji termicznej opisana jest zależnością:

$$G_T(s) = \frac{\Delta T(s)}{\Phi(s)} = \frac{\eta}{sC_{th} + G_{th}} \quad (5)$$

W wyniku przekształcenia równania różniczkowego (1) opisującego konwersję termiczną do postaci operatorowej, można wykazać, że transmitancja dla bloku odpowiedzialnego za realizację konwersji termicznej opisana jest zależnością:

$$G_T(s) = \frac{\Delta T(s)}{\Phi(s)} = \frac{\eta}{sC_{th} + G_{th}} \quad (6)$$

Uwzględniając znany z literatury wzór opisujący termiczną stałą czasową $\tau_{th} = C_{th}/G_{th}$, pożądane jest przekształcić zależność (6) do wygodnej dla celów praktycznych postaci:

$$G_T(s) = \frac{\eta}{G_{th}(s\tau_{th} + 1)} = \frac{\eta\tau_{th}}{C_{th}(s\tau_{th} + 1)} \quad (7)$$

Analogicznie po dokonaniu przekształcenia równania różniczkowego (2) na postać operatorową, można wykazać, że transmitancja operatorowa $G_{TIp}(s)$ dla procesu konwersji termicznej na elektryczną opisana jest zależnością:

$$G_{TIp}(s) = \frac{I_p(s)}{T(s)} = spA \quad (8)$$

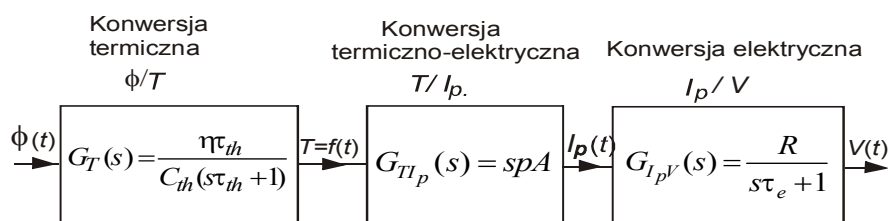
W wyniku wykonania przekształcenia równania (3) na postać operatorową, można wykazać, że transmitancja operatorowa $G_{IpV}(s)$ dla konwersji elektrycznej prąd-napięcie opisana jest zależnością:

$$G_{IpV}(s) = \frac{V(s)}{I_p(s)} = \frac{1}{sC + 1/R} \quad (9)$$

Dla celów praktycznych pożądane jest przekształcenie zależności (9) do postaci, w której uwzględniony zostanie wzór na stałą czasową elektryczną $\tau_e = RC$. Po wykonaniu tej operacji wyrażenie opisujące transmitancję operatorową $G_{IpV}(s)$ dla konwersji elektrycznej prąd-napięcie przyjmie bardziej użyteczną w badaniach symulacyjnych postać opisaną zależnością (10):

$$G_{IpV}(s) = \frac{R}{s\tau_e + 1} \quad (10)$$

Ostatecznym rezultatem przeprowadzonych w niniejszym rozdziale rozważań jest opracowanie schematu blokowego transmitancyjnego modelu detektora piroelektrycznego pokazanego na rys. 5.

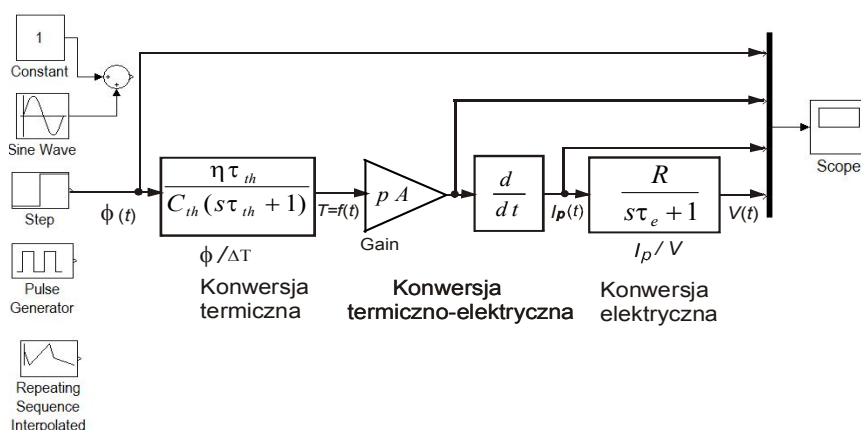


Rys. 5. Model transmitancyjny detektora piroelektrycznego

Opracowany transmitancyjny model tego detektora składa się z trzech szeregowo połączonych bloków z matematycznym opisem transmitancji operatorowych, które odpowiadają kolejnym etapom procesu konwersji. Model ten jest wygodny zarówno dla przeprowadzania analitycznych rozważań, jak i przeprowadzania badań symulacyjnych w takich środowiskach programistycznych jak Matlab-Simulink lub LABVIEW.

Na rys. 6 pokazano przykładową implementację tego modelu do programu Matlab-Simulink. Po wstawieniu danych liczbowych parametrów detektora piroelektrycznego do odpowiednich transmitancji operatorowych i zainicjowaniu procesu symulacji uzyskane zostaną graficznie prezentowane przebiegi czasowe poszczególnych sygnałów wyjściowych dla poszczególnych bloków. Konfiguracja schematu blokowego umożliwi jednocześnie przeprowadzenie badania symulacyjnego dla kilku różnych wartości zadanych parametrów detektora piroelektrycznego

i łatwą modyfikację parametrów sygnału promieniowania. Program MATLAB-Simulink umożliwia nie tylko prezentację graficzną przebiegów czasowych sygnałów, ale również eksport wartości współrzędnych punktów narysowanych przebiegów w tekstowej postaci tabelarycznej, co stwarza korzystne przesłanki do ewentualnego dalszego procesu obróbki uzyskanych danych.



Rys. 6. Model transmitancyjny detektora piroelektrycznego zaimplementowany do programu MATLAB-Simulink

5. PODSUMOWANIE

W niniejszej publikacji zaprezentowano opracowany model transmitancyjny detektora piroelektrycznego, który zaimplementowany w takich programach jak MATLAB-Simulink lub LABVIEW umożliwia przeprowadzenie badań symulacyjnych odpowiedzi detektora na sygnały promieniowania o kształcie przebiegu czasowego zaprogramowanym za pomocą narzędzi dostępnych w bibliotekach tych programów. Uwzględniono opis szczegółowych procedur matematycznych prowadzących do wyznaczenia opisu matematycznego transmitancji modelujących trzy kolejne etapy zachodzące w procesie konwersji sygnału w układzie detektora piroelektrycznego współpracującego z wzmacniaczem napięciowym.

LITERATURA

- [1] Armitage A. F., Benjamin K., Setiadi D., Weller H., Binnie T. D., Infrared sensing using pyroelectric polymers, Proc. of the Eighth Conference on Sensors and Their Applications, Glasgow, p. 297-302, 1997.

- [2] 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, No. 1, p. 379-384, 2002.
- [3] Odon A., Badanie i przetwarzanie odpowiedzi detektora piroelektrycznego na potrzeby pomiarów energii promienistej, *Rozprawa nr 445*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2010.
- [4] Odon A., Modelling and Simulation of the Pyroelectric Detector Using MATLAB/Simulink, *Measurement Science Review*, vol. 10, No 6, pp. 195-199, 2010.
- [5] Chirtoc M., Bentefour E. H., Antoniow J. S., Glorieux C., Thoen J., Delenclos S., Sahraoui A. H., Longuemart S., Kolinsky C., Buisine J. M., Current mode versus voltage mode measurement of signals from pyroelectric sensors, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 74 (2), No. 1, pp. 648-650, 2003.
- [6] Liu S. T., Long D., Pyroelectric detectors and materials, *Proc. of the IEEE*, Vol. 66, No. 1, , pp. 14-26, 1978.
- [7] 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.

LAPLACE TRANSFER FUNCTION MODEL OF PYROELECTRIC DETECTOR

In the article an original Laplace transform function model of the pyroelectric detector is proposed for analytical and simulation studies of the detector responses to the input radiation signals of different shapes. The knowledge of Laplace transfer function model of the pyroelectric detector is necessary for its simulation studies with the help of such programs as MATLAB/Simulink or LABVIEW. Simulation in Matlab/Simulink or LABVIEW of designed model of pyroelectric detector gives excellent possibilities of investigation that are difficult to realize by analytical methods. It is very important that the tests can be easily modified and the results are obtained quickly.

(Received: 7. 03. 2016, revised: 9. 03. 2016)