



Metoda stabilizacji termicznej czułości układu detekcyjnego z niechłodzonym fotorezystorem PbSe

ANDRZEJ MŁODZIANKO, MAREK ZYGMUNT, PIOTR KNYSK

Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki,
01-494 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. W artykule przedstawiono metodę stabilizacji termicznej czułości układu detekcyjnego dla zakresu spektralnego podczerwieni MIDIR 2-5 μm z wykorzystaniem fotorezystora wykonanego w technologii PbSe bez układów chłodzących. Zaprezentowano również wyniki badań termicznych czułości detektorów różnych producentów oraz realizację praktyczną układu detekcyjnego wraz z wynikami badań temperaturowych.

Słowa kluczowe: fotorezystor PbSe, detekcja, podczerwień, stabilizacja termiczna, detektory podczerwieni

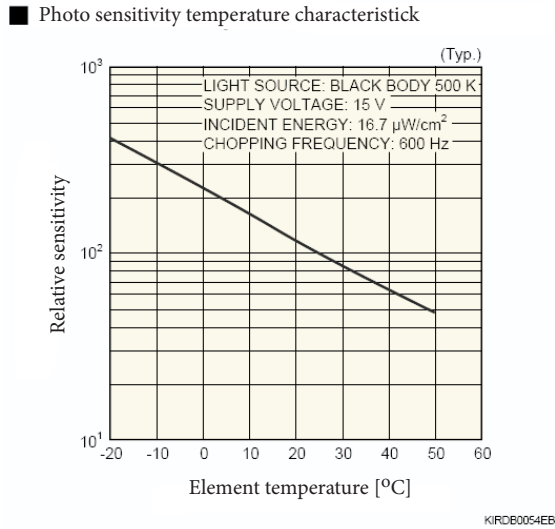
Symbole UKD: 535-15

1. Wprowadzenie

Istotną wadą fotorezystorów PbSe stosowanych w układach detekcyjnych na zakres 1-5 μm jest silna zależność ich czułości od temperatury. Prostem i oczywistym sposobem rozwiązania tego problemu jest zastosowanie chłodziarki Peltiera zintegrowanej w jednej obudowie ze strukturą detekcyjną. Pozwala to na stabilizowanie temperatury struktury, a zatem również na stabilizację czułości. Stosowanie detektorów z chłodzeniem jest jednak czynnikiem znacznie podnoszącym koszt urządzenia, a ponadto nie zawsze jest możliwe w urządzeniach o zasilaniu bateryjnym z uwagi na znaczne zwiększenie poboru mocy ze źródła zasilania. W artykule przedstawiono metodę kompensacji zmian czułości napięciowej układu detekcyjnego zawierającego niechłodzony detektor PbSe, wykorzystującą nieliniowy w funkcji temperatury element w układzie wzmacniającym.

2. Charakterystyki czułości napięciowej fotorezystora PbSe w funkcji temperatury

Na rysunku 1 przedstawiono typową charakterystykę napięciowej czułości względnej fotorezystora PbSe w funkcji temperatury [1].



Rys. 1. Typowa charakterystyka napięciowej czułości względnej fotorezystora PbSe (wg firmy Hamamatsu)

Z danych producenta wynika, że funkcja zmian termicznych czułości względnej fotorezystora opisywana jest za pomocą zależności:

$$S_{\lambda n}(T) = e^{-\beta_d(T-T_0)}, \quad (1.1)$$

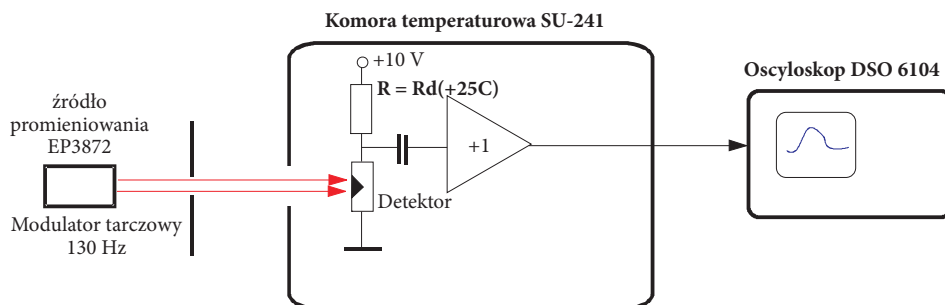
gdzie: β_d oznacza współczynnik materiałowy;
 T_0 — temperatura znamionowa równa 298 K.

Dla detektorów PbSe wartość współczynnika materiałowego wynosi $\beta_d = 0,028$ [1/K] (wartość przeciętna według firmy Hamamatsu).

Wartości względne odniesiono do czułości w temperaturze znamionowej $T_0 = 25^\circ\text{C}$.

3. Weryfikacja charakterystyk termicznych detektorów PbSe

W celu wstępnej weryfikacji danych katalogowych przeprowadzono serie pomiarów charakterystyk termicznych detektorów PbSe różnego typu trzech producentów. Badania charakterystyk czułości detektorów w funkcji temperatury wykonano w układzie, którego schemat blokowy przedstawiono na rysunku 2.



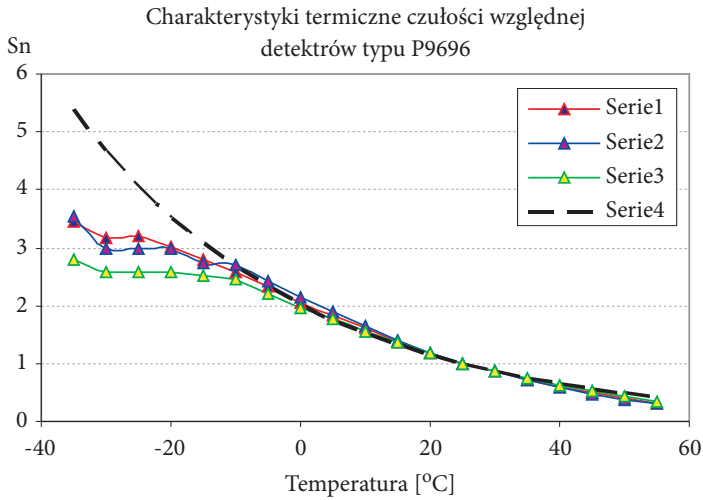
Rys. 2. Schemat układu do badania charakterystyk termicznych detektorów

Badane detektory umieszczono w komorze SU-241 firmy Espec stabilizującej temperaturę. Jako źródło promieniowania zastosowano ciało czarne typu EP3872 firmy Helioworks o temperaturze 1900 K generujące promieniowanie do $5,5 \mu\text{m}$ modulowane modulatorem tarczowym z częstotliwością 130 Hz. Do pomiarów amplitudy sygnału użyto cyfrowego oscyloskopu DSO6104 firmy Agilent Technologies. Pomiar przeprowadzono w zakresie temperatur $-35 \div +55^\circ\text{C}$ z rozdzielczością 5°C i dokładnością stabilizacji $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Obciążenie detektora wynosiło $R = R_d(+25^\circ\text{C})$.

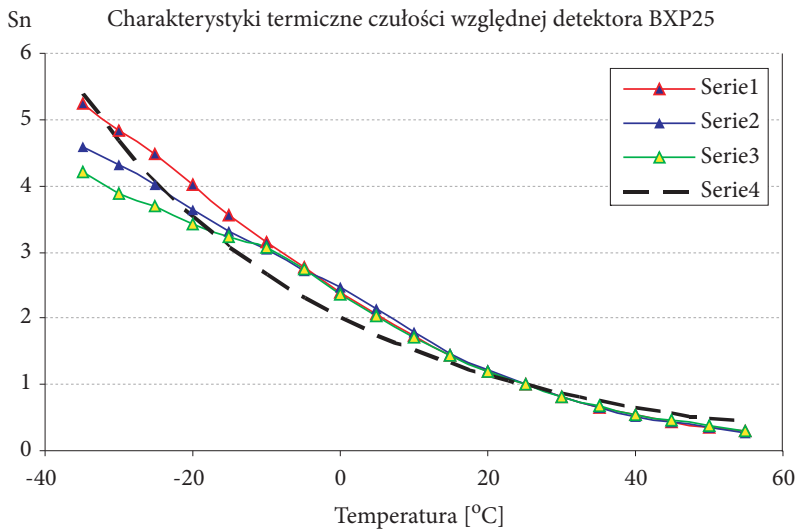
Na wykresach przedstawionych na rysunkach 3a, 3b, 3c pokazano termiczne charakterystyki czułości względnej detektorów PbSe P9696-02 Hamamatsu, BXP25 Cal Sensors oraz P43 Roithner Laser Technik.

Z przedstawionych na rysunku 3a wykresów wynikają następujące wnioski:

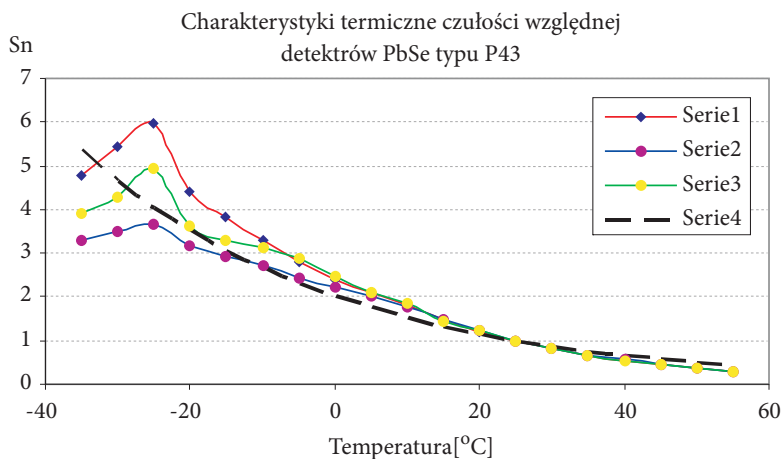
- wyznaczone charakterystyki detektorów P9696 są zbliżone do charakterystyki przedstawionej przez producenta w zakresie temperatur $-15 \div +55^\circ\text{C}$,
- w zakresie temperatur ujemnych $-35 \div -15^\circ\text{C}$ charakterystyki znacznie odbiegają od krzywej opisanej wzorem 1.1,
- w zakresie temperatur $-15 \div +55^\circ\text{C}$ rozrzut charakterystyk pomiędzy poszczególnymi detektorami z próbki nie przekracza 10%,
- czułość napięciowa detektora w zakresie $-35 \div +55^\circ\text{C}$ zmienia się ok. 9 razy.



Rys. 3a. Charakterystyka termiczna napięciowej czułości względnej detektorów P9696 firmy Hamamatsu według przeprowadzonych pomiarów dla 3 egzemplarzy. Linią przerywaną zaznaczono charakterystykę wynikającą ze wzoru 1.1 dla współczynnika materiałowego $\beta_d = 0,028$



Rys. 3b. Charakterystyka termiczna czułości względnej detektorów BXP25 firmy Cal Sensors według przeprowadzonych pomiarów dla 3 egzemplarzy. Linią przerywaną zaznaczono charakterystykę wynikającą ze wzoru 1.1 dla współczynnika materiałowego $\beta_d = 0,028$



Rys. 3c. Charakterystyka termiczna czułości względnej detektorów P43 firmy Roithner według przeprowadzonych pomiarów 3 sztuk. Linia przerywaną zaznaczono charakterystykę wynikającą ze wzoru 1.1 dla współczynnika materiałowego $\beta_d = 0,028$

Z przedstawionych na rysunku 3b wykresów wynikają następujące wnioski:

- wyznaczone charakterystyki detektorów BXP25 są zbliżone do charakterystyki wzorcowej (zależność 1.1) z dokładnością nie gorszą niż 25% w zakresie temperatur $-20 \div +55^\circ\text{C}$,
- w zakresie temperatur $-35 \div -20^\circ\text{C}$ charakterystyki znacznie odbiegają od opisanej zależnością 1.1,
- w zakresie temperatur $-35 \div +55^\circ\text{C}$ rozrzut charakterystyk pomiędzy poszczególnymi detektorami z próbki nie przekracza 20%,
- czułość napięciowa detektora w zakresie $-35 \div +55^\circ\text{C}$ zmienia się ok. 10 razy.

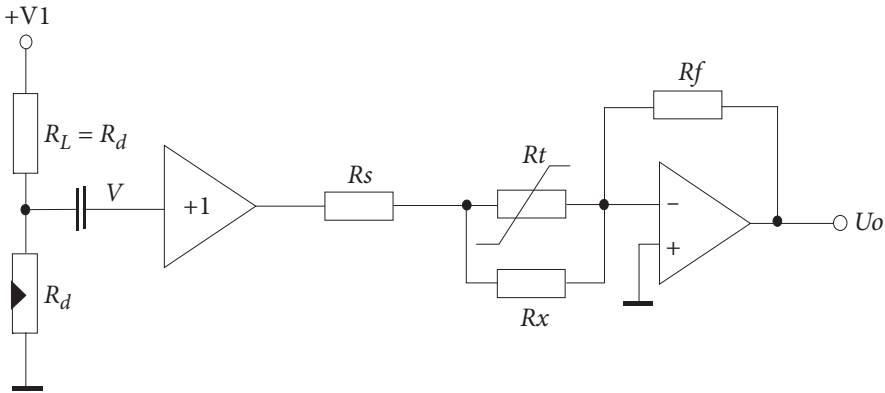
Z przedstawionych na rysunku 3c wykresów wynikają następujące wnioski:

- wyznaczone charakterystyki detektorów P43 są zbliżone do charakterystyki opisanej zależnością 1.1 z dokładnością nie gorszą niż 25% w zakresie temperatur $-20 \div +55^\circ\text{C}$,
- w zakresie temperatur ujemnych $-35 \div -20^\circ\text{C}$ charakterystyki znacznie odbiegają od opisanej wzorem 1.1,
- w zakresie temperatur $-20 \div +55^\circ\text{C}$ rozrzut charakterystyk pomiędzy poszczególnymi detektorami z próbki nie przekracza 25%,
- czułość detektora w zakresie $-35 \div +55^\circ\text{C}$ zmienia się ok. 10 razy.

Przeprowadzone badania umożliwiają wstępną weryfikację charakteru zmian termicznych czułości detektorów PbSe, zatem pozwalają na opracowanie koncepcji układu stabilizacji termicznej czułości układu detekcyjnego.

4. Koncepcja układu stabilizacji czułości

Na rysunku 4 przedstawiono schemat układu detekcyjnego z fotorezystorem PbSe i stabilizacją termiczną czułości.



Rys. 4. Schemat układu detekcji z fotorezystorem PbSe i stabilizacją termiczną czułości napięciowej

Zasada stabilizacji termicznej układu detekcyjnego przedstawionego na rysunku 4 polega na zastosowaniu stopnia wzmacniającego zwierającego nieliniowy w funkcji temperatury element w postaci termistora NTC. Wzmocnienie tego stopnia wyraża się w tym przypadku wzorem:

$$K(T) = - \frac{R_f [R_t(T) + R_x]}{R_t(T) R_x + R_s [R_t(T) + R_x]} \quad (1.2)$$

Wzmocnienie względne odniesione do wartości wzmocnienia dla temperatury $T_0 = 25^\circ\text{C}$ wynosi:

$$\begin{aligned} \eta_k(T) &= \frac{K(T)}{K(T_0)} = \frac{R_t(T) + R_x}{R_t(T) R_x + R_s [R_t(T) + R_x]} \frac{R_t(T_0) R_x + R_s [R_t(T_0) + R_x]}{R_t(T_0) + R_x} = \\ &= \frac{R_t(T) + R_x}{R_t(T) R_x + R_s [R_t(T) + R_x]} \frac{R_{mom} R_x + R_s [R_{mom} + R_x]}{R_{mom} + R_x}, \end{aligned} \quad (1.3)$$

przy czym $R_{mom} = R_t(T_0)$.

Jeżeli jako element nieliniowy zależny od temperatury zostanie zastosowany termistor NTC, to charakterystykę zmian jego wartości można opisać za pomocą zależności:

$$R_t(T) = R_{nom} e^{\beta_t \frac{T - T_{nom}}{T T_{nom}}}, \quad (1.4)$$

gdzie: T_{nom} [K] — temperatura znamionowa (zwykle $T_{nom} = 298$ [K]);
 R_{tnom} [Ω] — rezystancja termistora w temperaturze znamionowej;
 β_t [K] — stała materiałowa termistora.

Podstawiając zależność 1.4 do wzoru 1.3, otrzymujemy:

$$\eta_K(T) = \frac{R_{nom} e^{\beta_t \frac{T - T_{nom}}{T T_{nom}}} + R_x}{R_{nom} e^{\beta_t \frac{T - T_{nom}}{T T_{nom}}} R_x + R_s [R_{nom} e^{\beta_t \frac{T - T_{nom}}{T T_{nom}}} + R_x]} \frac{R_{nom} R_x + R_s [R_{nom} + R_x]}{R_{nom} + R_x}. \quad (1.5)$$

Przekształcając powyższy wzór, otrzymujemy ostatecznie:

$$\begin{aligned} \eta_K(T) &= \frac{e^{\beta_t \frac{T - T_{nom}}{T T_{nom}}} + \frac{R_x}{R_{nom}} R_x + R_s \left(1 + \frac{R_x}{R_{nom}}\right)}{R_x e^{\beta_t \frac{T - T_{nom}}{T T_{nom}}} \left(1 + \frac{R_x}{R_{nom}}\right)} = \\ &= \frac{R_x + R_s \left(1 + \frac{R_x}{R_{nom}}\right) e^{\beta_t \frac{T - T_{nom}}{T T_{nom}}} + \eta_x}{1 + \eta_x} = \\ &= \frac{1 + \eta_s (1 + \eta_x) e^{\beta_t \frac{T - T_{nom}}{T T_{nom}}} + \eta_x}{1 + \eta_x} = \left(\frac{1}{1 + \eta_x} + \eta_s \right) e^{\beta_t \frac{T - T_{nom}}{T T_{nom}}} + \eta_x, \end{aligned} \quad (1.6)$$

przy czym współczynniki korekcyjne η_s i η_x mają postać:

$$\eta_s = \frac{R_s}{R_x}, \quad \eta_x = \frac{R_x}{R_{nom}}. \quad (1.7)$$

Analizując zależność 1.6, można zauważyć, że czynnik η_s powoduje dodatkowe „wzmocnienie” charakterystyki względnej, co jest niekorzystne w procesie

stabilizacji. Wynika stąd, że wartość tego współczynnika powinna być jak najbliższa zeru, co w praktyce oznacza, że rezystor szeregowy $R_s = 0$. Wówczas wzór 1.6 przybiera postać:

$$\eta_K(T) = \left(\frac{1}{1 + \eta_x} \right) e^{\frac{\beta_i \frac{T - T_{nom}}{T T_{nom}} + \eta_x}{e^{\frac{\beta_i \frac{T - T_{nom}}{T T_{nom}}}}}}. \quad (1.8)$$

Stabilność termiczna sygnału wyjściowego U_0 może być uzyskana w założonym przedziale temperatur, jeśli dla każdej wartości temperatury T spełniona będzie zależność:

$$U_0(T) = V_d(T)K(T) = U_0(T_0). \quad (1.9)$$

Wynika stąd, że charakterystyka wzmocnienia powinna spełniać zależność:

$$K(T) = \frac{U_0(T_0)}{V_d(T)} = \frac{K(T_0)V_d(T_0)}{V_d(T)}. \quad (1.10)$$

Przekształcając zależność 1.10, otrzymujemy ostatecznie:

$$\frac{K(T)}{K(T_0)} = \frac{V_d(T_0)}{V_d(T)}. \quad (1.11)$$

Równanie 1.11 można również zapisać w postaci:

$$\eta_K(T) = \frac{1}{S_{\lambda n}(T)}. \quad (1.12)$$

Oczywiście spełnienie zależności 1.12 w całym przedziale temperatur jest zwykle niemożliwe, zatem w projektowaniu układu stabilizacji należy posłużyć się kryterium jakości stabilizacji. Jako kryterium odpowiedniego dopasowania charakterystyki wzmocnienia do charakterystyki termicznej detektora można posłużyć się kryterium średniego dopasowania definiowane jako:

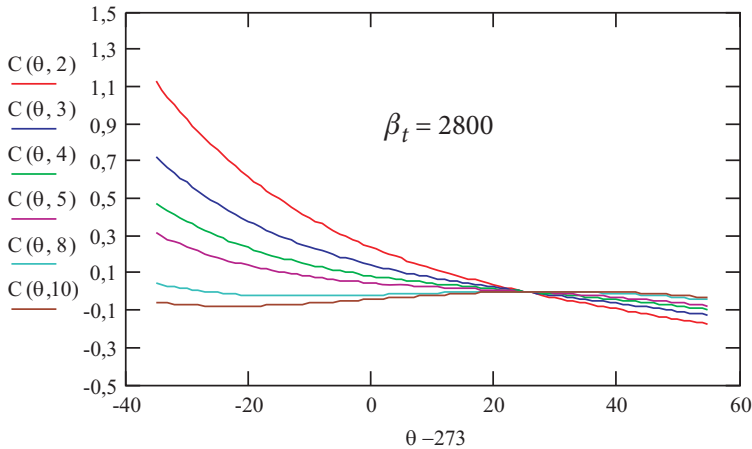
$$\delta_s = \frac{1}{T_{\max} - T_{\min}} \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} \eta_K(T) S_{\lambda n}(T) dT. \quad (1.13)$$

Łatwo zauważyć, że w przypadku idealnego dopasowania wskaźnik dopasowania δ_s przyjmuje wartość 1. Projektowanie układu stabilizacji termicznej polega więc na takim doborze termistora i rezystora R_x , aby wartość współczynnika dopasowania była jak naj-

bliższa wartości 1. Ponieważ wskaźnik dopasowania δ_s jest pewną wartością średnią, zatem nie daje gwarancji, że błąd dopasowania charakterystyk w określonych temperaturach nie przekroczy dopuszczalnego błędu maksymalnego. Dlatego dokładniejszym, choć bardziej żmudnym, sposobem jest wyliczanie wartości iloczynu $C(T) = \eta_K(T)S_{\lambda_n}(T)$ dla wybranych β_t i η_x .

5. Dobór termistora i rezystora korekcyjnego R_x w układzie stabilizacji czułości napięciowej układu detekcyjnego

Dobór odpowiedniego termistora stanowi najistotniejszy element w projektowaniu układu stabilizacji czułości. Produkowane seryjnie termistory NTC mają ograniczony zakres stałej β_t mieszczący się w przedziale $2500 \div 4800$. Dobór odpowiednich wartości elementów kształtujących charakterystykę wzmocnienia polega na wyborze typu termistora i znalezieniu takiej wartości współczynnika korekcji η_x , przy których odchyłka $C_x(T) = \eta_K(T)S_{\lambda_n}(T) - 1$ nie będzie przekraczała z góry założonej wartości w wybranym przedziale temperatur. Na rysunkach 5, 6, 7 przedstawiono rodziny charakterystyk termicznych odchyłki $C_x(T)$ dla trzech różnych termistorów i różnych wartości współczynnika korekcyjnego.

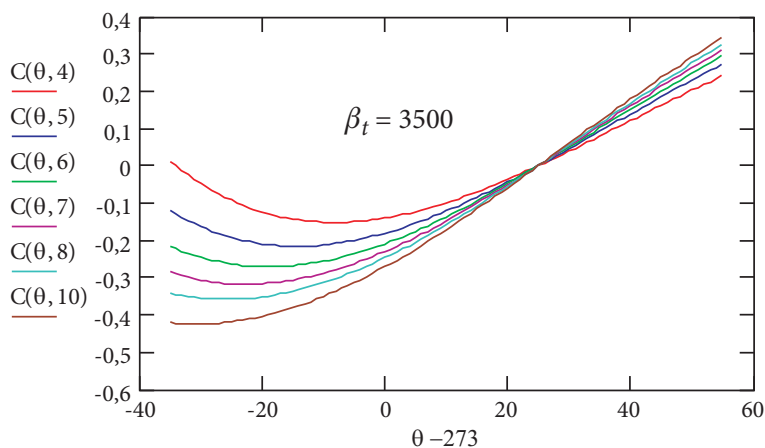
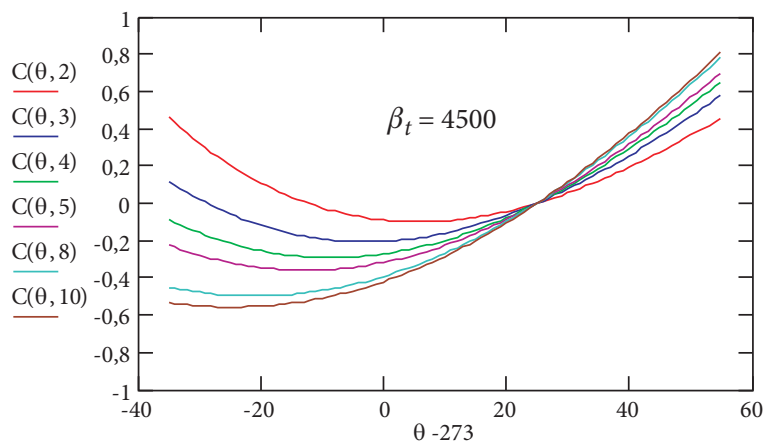


Rys. 5. Odchyłka $C_x(T)$ dla $\beta_t = 2800$

Z przedstawionych wykresów 5-7 wynikają następujące wnioski praktyczne:

- najlepsza stabilizacja występuje w całym zakresie temperatur dla najmniejszej wartości współczynnika β_t termistora przy współczynniku korekcji η_x bliskim 8,

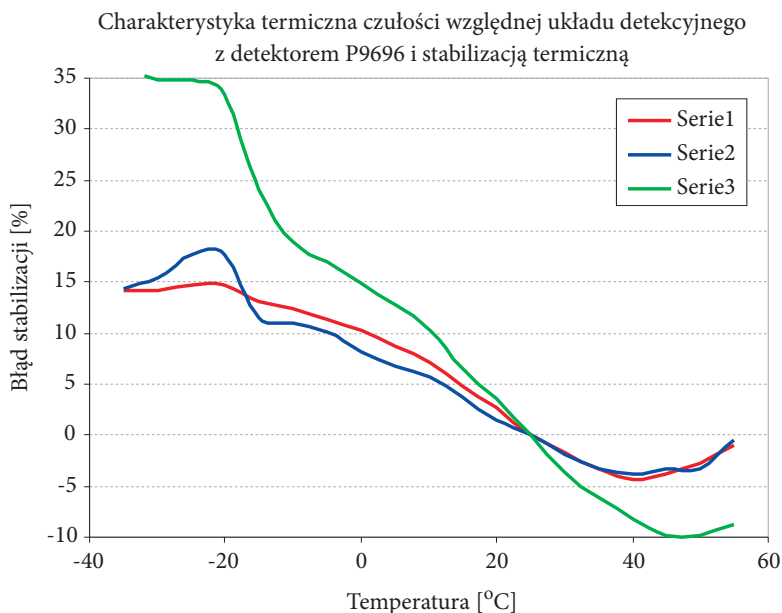
- dla termistorów o współczynniku β_t bliskim wartości 4500 minimalne odchyłki występują dla współczynnika korekcji η_x bliskim wartości 4 z maksymalnym błędem stabilizacji wynoszącym ok. 50%.

Rys. 6. Odchyłka $C_x(T)$ dla $\beta_t = 3500$ Rys. 7. Odchyłka $C_x(T)$ dla $\beta_t = 4500$

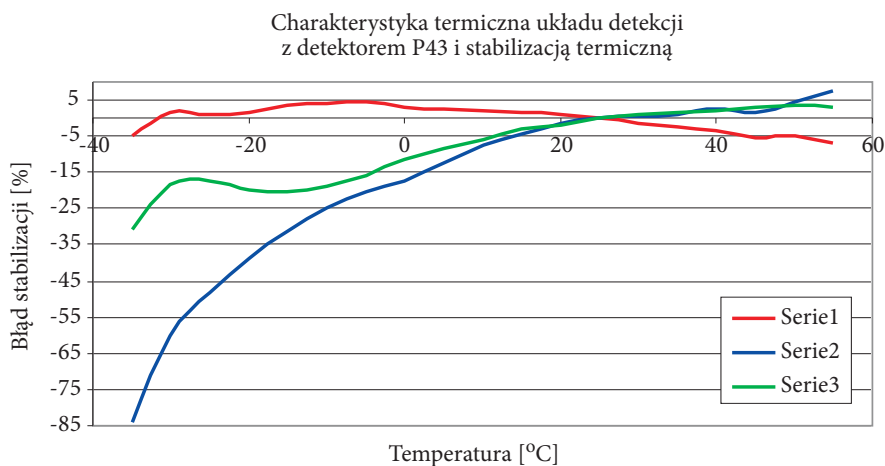
6. Realizacja praktyczna i wyniki badań układu detekcyjnego ze stabilizacją termiczną czułości napięciowej

W celu weryfikacji proponowanej metody stabilizacji czułości napięciowej zaprojektowano i zbudowano układ detekcyjny składający się z trzech niezależnych torów detekcyjnych, który został następnie zbadany w ukła-

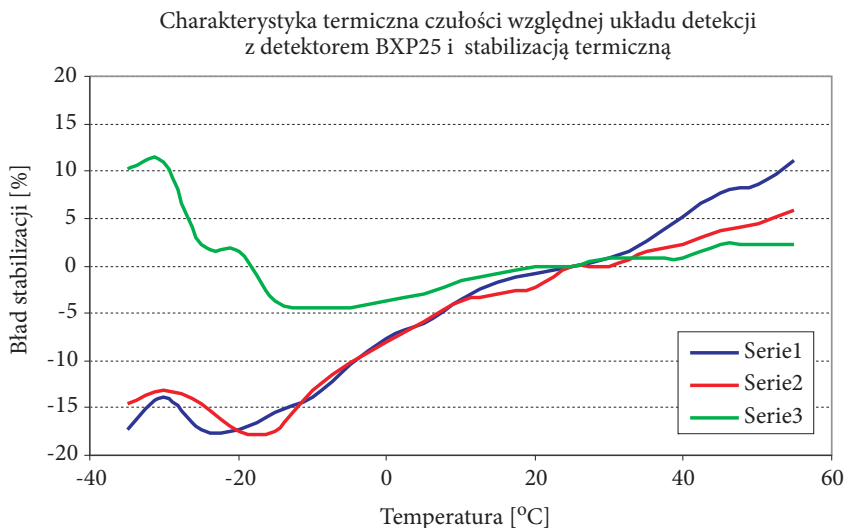
dzie pokazanym na rysunku 2. Projekt wykonano według wytycznych wynikających z zaproponowanej metody stabilizacji. Wyniki badań przedstawiono w postaci wykresów czułości względnej uzyskanych dla przedziału temperatur



Rys. 8. Charakterystyki termiczne błęd napięciowej czułości względnej układu detekcji z detektorami typu P9696-02 firmy Hamamatsu



Rys. 9. Charakterystyki termiczne błęd napięciowej czułości względnej układu detekcji z detektorami typu P43 firmy Roithner



Rys. 10. Charakterystyki termiczne błęd napięciowej czułości względnej układu detekcji z detektorami typu BXP25 firmy Cal Sensors

$-35 \div +55^{\circ}\text{C}$. Wykresy napięciowej czułości względnej układów detekcyjnych dla poszczególnych typów detektorów pokazano na rysunkach 8, 9, 10.

6. Wnioski końcowe

Przedstawiona metoda termicznej stabilizacji czułości układów detekcyjnych z fotorezystorami PbSe pozwala na znaczne zredukowanie zmian czułości z poziomu rzędu 1000% do poziomu kilkudziesięciu, a nawet 10% zmian w stosunku do czułości w temperaturze znamionowej. Najlepszą stabilizację uzyskuje się dla temperatur dodatnich, gdzie charakterystyka detektora jest w przybliżeniu zgodna z krzywą teoretyczną. Największe błędy stabilizacji występują dla temperatur poniżej -10°C . W badaniach wykorzystano nieselekcjonowane termistory NTC różniące się między sobą współczynnikami materiałowymi, co w połączeniu z rozrzutem charakterystyk termicznych detektorów powoduje zwiększenie błędów stabilizacji widocznych szczególnie wyraźnie na rysunku 8 (detektory typu P43). Wynika stąd, że w celu zapewnienia lepszej powtarzalności parametrów układu stabilizacji należy stosować termistory precyzyjne charakteryzujące się dużą dokładnością i stabilnością parametrów, na przykład typu ACC-00x lub ACW-00x firmy Rhopoint.

Artykuł wpłynął do redakcji 6.03.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w listopadzie 2008 r.

LITERATURA

- [1] *Characteristics and use of infrared detectors*, materiały informacyjne firmy Hamamatsu.
- [2] *Selection Guide for PbS and PbSe infrared detectors*, materiały informacyjne firmy Laser Components.
- [3] Z. KULKA, M. NADACHOWSKI, *Wzmacniacze operacyjne i ich zastosowania*, WNT, 1982.
- [4] *NTC Thermistors*, materiały informacyjne firm Bowthorpe Thermometrics, Thermometrics Inc., Keystone Thermometrics Corporation.
- [5] A. ROGALSKI, Z. BIELECKI, *Detekcja sygnałów optycznych*, WNT, 2001.

A. MŁODZIANKO, M. ZYGMUNT, P. KNYSAK

Method of thermal stabilization of noncooled photoresistor PbSe

Abstract. A method of thermal responsivity compensation of 1-5 μm detection system with uncooled PbSe photoresistor has been presented. It includes theoretical description and experimental results of thermal measurements.

Keywords: PbSe photoresistor, stabilization, IR detection, IR photodetectors

Universal Decimal Classification: 535-15

