

# Praca przetwornika optoelektronicznego TSL250R w niskiej temperaturze

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wyniki badań zachowania czujnika optoelektronicznego TSL250R, który jest fotodiodą zintegrowaną z wewnętrznym wzmacniaczem operacyjnym. Przedstawiono charakterystyki przejściowe czujnika w funkcji temperatury. Zakres temperatury wynosił 77-300 K. Wyniki porównano z innymi czujnikami światła przebadanymi w niskich temperaturach.

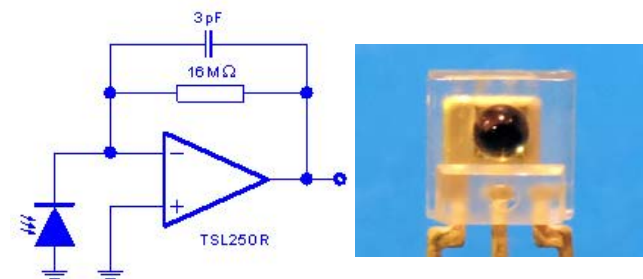
**Abstract.** In the paper the results of tests of behavior of a light-to-voltage optical sensor TSL250R, which is a photodiode integrated with an external operational amplifier are presented. There are also included transient characteristics of the sensor in function of temperature. The temperature ranged from 77 K to 300 K. The results were compared with other light sensors tested at low temperature. (**Operation of the light-to-voltage optical sensor TSL250R at low temperature**).

**Słowa kluczowe:** optoelektronika, czujnik światła, niska temperatura, kriogenika.

**Keywords:** optoelectronics, light sensor, low temperature, cryogenic.

## Wstęp

Przetwornik światło/napięcie TSL250R jest przewidziany do pracy w temperaturze z zakresu od 0°C do +70°C. Poprawne działanie układu w temperaturze niższej nie jest gwarantowane przez producenta. Jednak są urządzenia, które są zdolne do pracy w niższej temperaturze (badania kosmiczne, fizyka ciała stałego, etc.) Nie są one produkowane na masową skalę, chociaż są niezbędne. Projektowanie i wykonywanie specjalnych podzespołów zdolnych do pracy w danym urządzeniu i przy bardzo niskiej temperaturze, wydaje się być nieoptymalne. W związku z tym, producenci tego typu sprzętu mogą polegać jedynie na komercyjnie dostępnych podzespołach elektronicznych. Odnalezienie tych, zdolnych do pracy w niskiej temperaturze, odbywa się na zasadzie prób i błędów. Stąd też zainteresowanie autora możliwościami ich pracy w temperaturze wykraczającej poza zakres zapewniany przez producenta. Prowadzone wcześniej przez autora badania wykazały, że fotodiody zachowują swoje właściwości detekcyjne w niskiej temperaturze [1, 8, 9], a wzmacniacze operacyjne wykonane w technologii BiFET [2] zachowują swoje właściwości wzmacniające w temperaturze wrzenia ciekłego azotu (77 K). Wybrane typy wzmacniaczy operacyjnych CMOS są zdolne do pracy w temperaturze poniżej 50 K od 4 K włącznie [3, 4]. Również diody elektroluminescencyjne zachowują zdolności emisyjne przy 77 K [5]. Scalony przetwornik światło/napięcie OPT101 pracuje poprawnie dla niskiej temperatury z zakresu 100-300 K [8].



Rys.1. Obwód scalony TSL250R

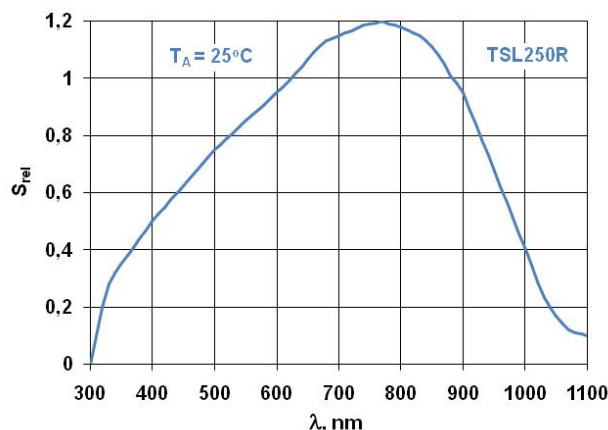
Rys. 2. TSL250R w obudowie SideLooker

## Układ TSL250R

Czujnik optoelektroniczny TSL250R jest zintegrowaną ze wzmacniaczem operacyjnym fotodiodą - rysunek 1. Posiada wbudowany rezystor 16 MΩ służący do realizacji przetwornika prąd/napięcie zbudowanego na wewnętrznym

wzmacniaczu operacyjnym. Napięcie na wyjściu układu jest proporcjonalne do natężenia światła padającego na czujnik.

Wersje TSL251R i TSL252R mają wbudowany rezystor odpowiednio: 8 MΩ i 2,8 MΩ. Obwód jest zasilany pojedynczym napięciem zasilania z zakresu od 2,7 V do 5,5 V. Układ produkowany jest w dwóch typach obudów, SideLooker i Surface Mount SideLooker. Do badań w niskiej temperaturze wybrano TSL250R w obudowie SideLooker - rys. 2. Czułość  $N_e$  (ang. irradiance responsivity) wyznaczana dla światła o długości  $\lambda_p = 635$  nm czujników TSL250R, TSL251R i TSL252R wynosi odpowiednio: 137 mV/( $\mu$ W/cm<sup>2</sup>), 52 mV/( $\mu$ W/cm<sup>2</sup>) i 10,2 mV/( $\mu$ W/cm<sup>2</sup>). Współczynnik temperaturowy napięcia wyjściowego wynosi  $a_{VO} = 1,6$  mV/K dla pracy w zakresie od 0-70°C. Relatywną czułość fotodiody w funkcji widma (ang. photodiode spectral responsivity) z czujnika TSL250R przedstawiono na rysunku 3.

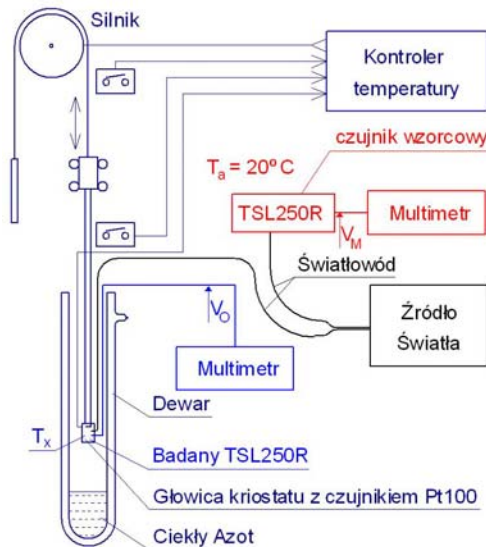


Rys. 3. Względna czułość fotodiody z czujnika TSL250R w funkcji długości fali promieniowania świetlnego ( $\lambda$ ) [10]

## TSL250R w niskiej temperaturze

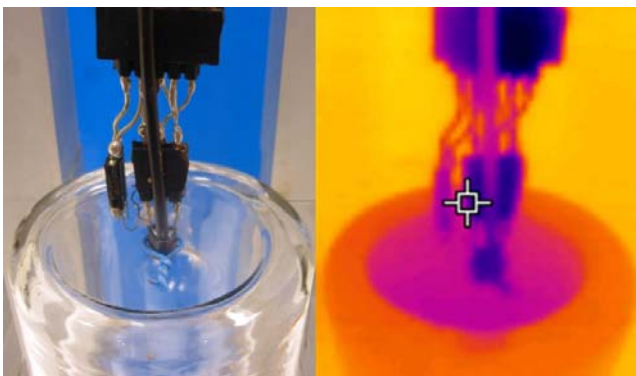
Czujnik badano w otwartym kriostacie azotowym [6]. Badany TSL250R umieszczony był w dewarze kriostatu, układ ten generował napięcie wyjściowe badanego przetwornika  $V_O$ . Czujnik wzorcowy TSL250R umieszczony był na zewnątrz kriostatu w temperaturze 20°C i generował napięcie  $V_M$ . Układ skalibrowano tak, aby przy nastawie temperatury w kriostacie na 20°C, oba czujniki badany i wzorcowy generowały  $V_M = V_O = 4,5$  V. Na rysunku 4 pokazano schemat blokowy stanowiska do badania charakterystyk czujnika TSL250R w przedziale temperatury 77-300 K. Jako regulator temperatury użyty został otwarty

kriostat azotowy, w którym nastawianą temperaturę badanej próbki uzyskuje się poprzez zawieszenie jej na odpowiedniej wysokości nad lustrem cieczy kriogenicznej. Kriostat składa się z wysokiego na metr naczynia Dewara, w którym powolnie odparowuje azot (temperatura wrzenia ciekłego azotu to 77,34 K przy ciśnieniu równym 1013,25 hPa). Do naczynia wprowadzana jest głowica z badanym układem i czujnikiem temperatury. Poprzez sterowanie wysokością nad lustrem cieczy uzyskuje się żadaną temperaturę w oparach azotu w zakresie 77 K-293 K. Rezystancja czujnika Pt100 przeliczana jest na temperaturę w programie komputerowym, który pełni jednocześnie rolę układu automatycznej regulacji (AUR). Aplikację sterującą pracą układów wykonawczych w kriostacie opracowano w programie Agilent VEE.



Rys. 4. Uproszczony schemat stanowiska do badań TSL250R

Do badanego TSL250R przymocowany jest prostopadłe światłowód. Jako źródło światła użyta jest dioda świecąca typu EWJ85EAC o mocy 5 W, która przy maksymalnym prądzie 1,2 A, emituje strumień świetlny o wartości 170 lm, o barwie białej z temperaturą barwową 5500 K [7]. Na rysunku 5 przedstawiono głowicę pomiarową po wysunięciu z kriostatu z badanym czujnikiem i czujnikiem temperatury Pt100.

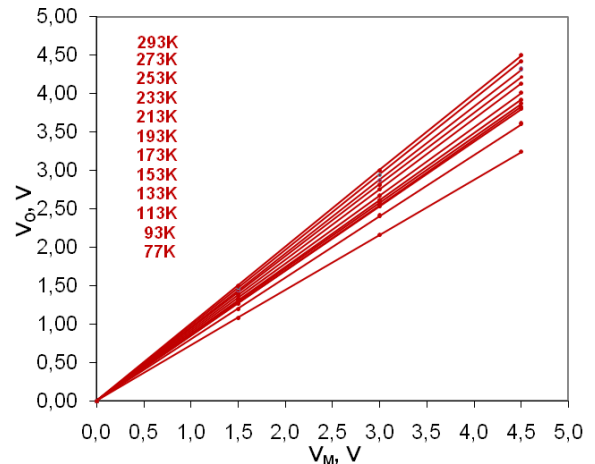


Rys. 5. Wysunięta głowica z badanym TSL250R i czujnikiem rezystancyjnym Pt100, obraz termalny (po prawej)

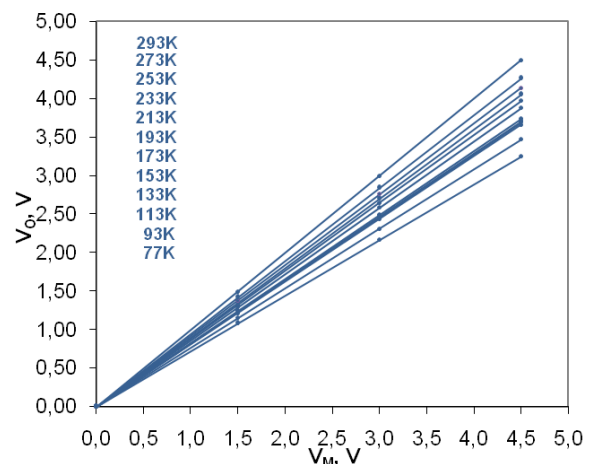
### Pomiary

Przebadano trzy egzemplarze czujnika TSL250R. Pomiary charakterystyk przejściowych czujnika wykonano dla dwunastu punktów temperaturowych w zakresie od temperatury wrzenia ciekłego azotu (77 K), do temperatury otoczenia  $T_a = 20^\circ\text{C}$ . Wyniki pomiarów przedstawiono na

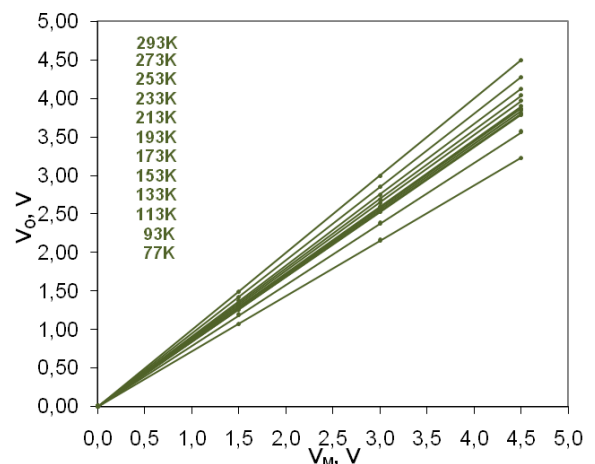
wykresach  $V_O = f(V_M, T)$ , gdzie temperatura  $T$  jest parametrem - rysunki 6, 7 i 8. Widoczne charakterystyki przejściowe mają różne nachylenie w zależności od temperatury, dla trzech przebadanych sztuk zmiany nachylenia są monotoniczne i najniższe występuje przy temperaturze 77 K. Błąd względny nieliniowości czujnika (liczony według wzoru 1) dla wszystkich egzemplarzy nie przekracza  $\pm 2\%$ .



Rys. 6. Charakterystyka przejściowa  $V_O = f(V_M)$ , czujnika TSL250R nr 1,  $T$  - parametr



Rys. 7. Charakterystyka przejściowa  $V_O = f(V_M)$ , czujnika TSL250R nr 2,  $T$  - parametr



Rys. 8. Charakterystyka przejściowa  $V_O = f(V_M)$ , czujnika TSL250R nr 3,  $T$  - parametr

$$(1) \quad \delta_{\%} = \left| \frac{U_{RZ} - U_T}{U_{MAX}} \right| \cdot 100\%$$

gdzie:  $\delta_{\%}$  - błąd względny nieliniowości,  $U_T$  - teoretyczna wartość napięcia,  $U_{RZ}$  - rzeczywista wartość napięcia

Poniżej w tabeli 1 przedstawiono współczynnik temperaturowy napięcia wyjściowego wyznaczony dla wszystkich najmniejszych przedziałów temperatury. Współczynnik temperaturowy napięcia wyjściowego wyrażono wzorem:

$$(2) \quad \alpha_{VO} = \frac{V_{O(2)} - V_{O(1)}}{T_2 - T_1}$$

gdzie:  $V_{O(2)}$  i  $V_{O(1)}$  to napięcie wyjściowe przetwornika przy temperaturze odpowiednio  $T_2$  i  $T_1$

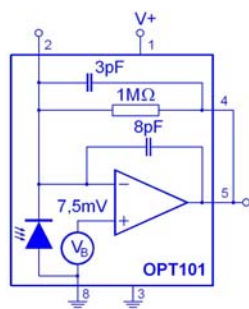
Tabela 1. Współczynnik temperaturowy napięcia wyjściowego

TSL250R nr:		1	2	3
$T, K$		$\alpha_{VO}, mV/K$		
77	93	22,5	13,8	20,6
93	113	10,0	9,50	11,5
113	133	1,50	1,50	1,00
133	153	2,00	0,50	1,50
153	173	2,50	2,00	1,50
173	193	4,50	7,00	1,50
193	213	6,00	4,50	3,50
213	233	4,50	4,00	3,50
233	253	4,50	4,50	4,50
253	273	5,50	6,00	7,50
273	293	4,00	12,0	11,0

Współczynnik  $\alpha_{VO}$  dla trzech przebadanych czujników ma największą wartość w przedziale temperatury od 77 K do 93 K, najmniejszą wartość w przedziale 113-173 K. Wartość katalogowa współczynnika była wyznaczana w zakresie od 0-70°C i wynosiła  $\alpha_{VO} = 1,6 mV/K$ . W temperaturze niższej, od najniższej - 77 K włącznie, wartość ta kilkakrotnie wzrasta, nie zmienia to jednak faktu, iż wszystkie trzy czujniki pracują w niskiej temperaturze i mają liniowe charakterystyki przejściowe.

### Porównanie TSL250R z innymi przetwornikami światło/napięcie

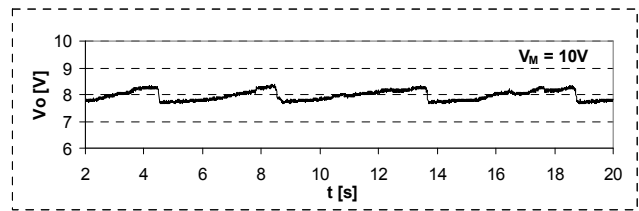
Autor wcześniej przebadał optoelektroniczny przetwornik światło/napięcie OPT101. Układ OPT101 (rys. 9) ma w swojej strukturze fotodiody i wzmacniacz operacyjny.



Rys. 9. Układ OPT101: fotografia (po lewej) i schemat ideowy (po prawej)

Posiada wbudowany rezystor 1 MΩ pomocny w konfiguracji układu do pracy, jako przetwornik. Możliwe jest korzystanie z samej fotodiody. Typowy zakres temperatury pracy to 0-70°C. Wykazano, iż układ OPT101 nie pracuje stabilnie w temperaturze 77 K [8]. Za niestabilną pracę odpowiada niestabilna praca fotodiody zintegrowanej w przetworniku. Na wyjściu przetwornika widoczny jest sygnał

pokazany na rysunku 10. Jest mocno prawdopodobne, iż za cykliczne, co ok. 3 s zmiany wartości napięcia wyjściowego odpowiedzialny jest efekt samopodgrzewania układu OPT101 w temperaturze 77 K.

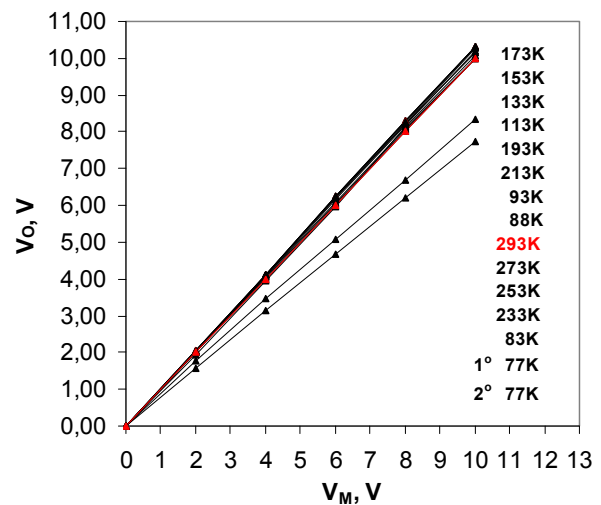


Rys. 10. Niestabilna praca układu OPT101 w temperaturze 77 K,  $V_O$  – napięcie na wyjściu czujnika OPT101 badanego,  $V_M$  – napięcie na wyjściu czujnika OPT101 wzorcowego,  $t$  – czas

Na rysunku 11 przedstawiono wykres napięcia na wyjściu czujnika OPT101 w funkcji napięcia wejściowego dla temperatury z zakresu 77-300 K. Widoczne są dwa przypadki liniowej charakterystyki przetwarzania przetwornika dla temperatury 77 K. Użyteczny zakres temperatury pracy przetwornika przyjęto dla wartości z zakresu 93-300 K, przy której błąd względny procentowy czujnika nie przekracza  $\pm 3\%$  [8]. Błąd względny procentowy  $\delta_{\%}$  wyznaczono wg wzoru:

$$(3) \quad \delta_{\%} = \left| \frac{V_O - V_M}{V_M} \right| \cdot 100\%$$

gdzie:  $V_O$  – napięcie na wyjściu czujnika badanego ( $T_s$ ),  $V_M$  – napięcie na wyjściu czujnika wzorcowego ( $T_a$ )

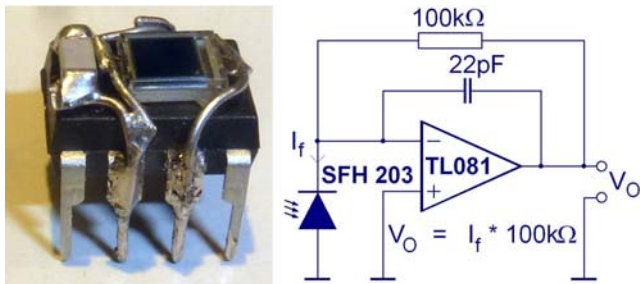


Rys. 11. Charakterystyka przejściowa  $V_O = f(V_M)$ , czujnika OPT101,  $T$  – parametr [8]

Autor wcześniej też skonstruował kriogeniczny przetwornik światło/napięcie (rys. 12) składający się z fotodiody BPW34S i wzmacniacza operacyjnego wzmacniającego w temperaturze 77 K. Został użyty wzmacniacz operacyjny TL081, który jest wykonany w technologii BiFET, co oznacza, iż jego stopień wejściowy zbudowane są z tranzystorów FET, a stopień wyjściowy z bipolarnych. Wzmacniacz ten pracuje w temperaturze 77 K ze zmniejszonym wzmocnieniem z otwartą pętlą, równym ok.  $10^5 V/V$  (odpowiedzialny jest za to spadek wzmocnienia prądowego tranzystorów bipolarnych). Zaletą zastosowania wzmacniacza BiFET jest jego zasilanie równe  $\pm 15 V$ , przez co zakres napięć wyjściowych przetwornika wynosi 0-10 V, – co jest ważne ze względu na  $S/N$  (stosunek sygnału do szumu). Przetwornik zbudowany z fotodiody wzmacniacza operacyjnego BiFET jednego rezystora i jednego

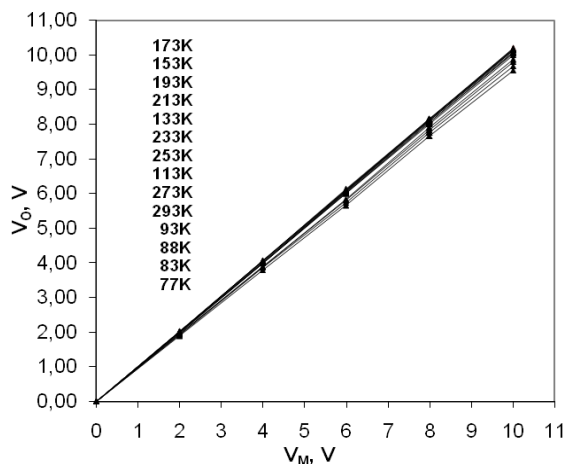


kondensatora charakteryzuje się zdolnością do pracy w niskiej temperaturze od 77 K. Użyty rezystor SMD był metalizowany, przez co wartość współczynnika temperaturowego rezystancji wynosiła około 50 ppm/K.



Rys. 12. Kriogeniczny przetwornik światło/napięcie: fotografia (po lewej) i schemat ideowy (po prawej)

Przetwornik kriogeniczny światło/napięcie pracował w zakresie temperatury 77-300 K. Badano odpowiedź przetwornika dla wymuszeń  $V_M = 2, 4, 6, 8$  i 10 V dla różnej temperatury z zakresu. Na rysunku 13 przedstawiono charakterystyki  $V_O = f(V_M)$ , gdzie  $T$  jest parametrem.



Rys. 13. Charakterystyka przejściowa  $V_O = f(V_M)$ , kriogenicznego przetwornika światło/napięcie,  $T$  – parametr

Błąd względny procentowy przetwornika kriogenicznego nie przekracza  $\delta\% = \pm 6\%$ . Błąd  $\delta\%$  wyznaczono w oparciu o zależność ze wzoru 3.

#### Podsumowanie

Przebadano przetworniki światło/napięcie TSL250R, OPT101 i kriogeniczny hybrydowy.

W przypadku TSL250R firmy TAOS można stwierdzić, iż zachowuje swoje zdolności do pracy w niskiej temperaturze z zakresu 77-300 K.

Współczynnik temperaturowy jest kilkakrotnie większy od gwarantowanego przez producenta dla temperatury 0-70°C, dlatego praca przetwornika w torze pomiarowym jest możliwa w niskiej temperaturze, pod warunkiem, że nie będzie się ona zmieniała. Do wad można zaliczyć niską wartość dopuszczalnego napięcia zasilania, wynosząca

zaledwie 5,5 V. Niewątpliwą zaletą są jego małe rozmiary i pojedyncze zasilanie.

W przypadku przetwornika OPT101 firmy Burr-Brown zaobserwowano, iż jest on zdolny do pracy w niskiej temperaturze mieszczącej się w zakresie od ok. 90 K do 300 K, nie pracuje jednak stabilnie w temperaturze wrzenia ciekłego azotu (77 K). Błąd względny procentowy dla zakresu temperatury w której pracuje stabilnie nie przekracza  $\pm 3\%$ . Do zalet można zaliczyć pojedyncze napięcie zasilania i dużą wartość napięcia zasilania mieszcząca się w zakresie 2,7-36 V. W układzie można dowolnie konfigurować wzmacnienie przetwornika prąd/napięcie w wewnętrznym wzmacniaczu.

Kriogeniczny hybrydowy przetwornik światło/napięcie zbudowany na wzmacniaczu TL081 firmy National Semiconductor i fotodiody BPW34S firmy Siemens, zachowuje swoją zdolność do pracy w całym zakresie niskiej temperatury 77-300 K. Błąd względny procentowy przetwornika dla zakresu niskiej temperatury nie przekracza  $\pm 6\%$ . Do zalet można również zaliczyć wysokie napięcie zasilania wzmacniacza (15 V). Układ w odróżnieniu od opisanych wyżej wymaga podwójnego zasilania. Ponadto gabarytami nie różni się od przetwornika OPT101.

Do pracy w niskiej temperaturze w zakresie od 77 K do 300 K wybrano przetworniki światło/napięcie: TSL250R i kriogeniczny hybrydowy. Te układy mogą być zastosowane w urządzeniach wykorzystywanych na przykład w nadprzewodnictwie wysokotemperaturowym.

#### LITERATURA

- [1] Wauters F., i inni, Performance of silicon PIN photodiodes at low temperatures and in high magnetic fields, *Nuclear Experiment, Elsevier*, (2008)
- [2] Pająkowski J., Zmiany wybranych parametrów wzmacniaczy operacyjnych w niskich temperaturach, *Poznańskie Warsztaty Telekomunikacyjne*, (2004), 210-212
- [3] Swenson J.A., Baker K.D., CMOS operational amplifier performance at cryogenic temperatures, *Cryogenics*, Vol. 33, N.2. 215-221
- [4] Pająkowski J., Pomiar wzmacnienia napięciowego scalonych wzmacniaczy operacyjnych CMOS w zakresie temperatur od 4,2 do 300K, *Pomiary Automatyka Kontrola*, vol. 54, nr.6 (2008), 371-373
- [5] Pająkowski J., Behavior of light emitting diodes at low temperature, *Elektronika*, Vol. 52, nr.6, (2011), 49-51
- [6] Pająkowski J., Otwarty kriostat azotowy, *Elektronika*, Vol. 45, nr.5, (2004), 33-34
- [7] EWJ85EAC.pdf datasheet – *Honglitrionic*.
- [8] Pająkowski J., Wpływ niskiej temperatury na pracę czujnika optoelektronicznego OPT101, *PAK*, vol. 57, nr.12, (2011), 1537-1539
- [9] Pająkowski J., Optoelektroniczny przetwornik E/U operujący w 77 K, *PAK*, vol. 60, nr.8, (2014), 583-586
- [10] TSL250R-2R\_eng.pdf datasheet *TAOS Inc.* (2007)
- [11] OPT101.pdf datasheet – *Burr-Brown USA 3*, (1998)

**Autor:** dr inż. Jakub Pająkowski, Politechnika Poznańska, Katedra Systemów Telekomunikacyjnych i Optoelektroniki, ul. Polanka 3 60-965 Poznań, E-mail: pajakow@et.put.poznan.pl