

**Jakub PAJĄKOWSKI**POLITECHNIKA POZNAŃSKA, KATEDRA SYSTEMÓW TELEKOMUNIKACYJNYCH I OPTOELEKTRONIKI  
ul. Polanka 3, 60-965 Poznań**Wpływ niskiej temperatury na pracę czujnika optoelektronicznego OPT101**Dr inż. **Jakub PAJĄKOWSKI**

Studia magisterskie na Wydziale Elektrycznym politechniki Poznańskiej w zakresie Elektronicznej Aparatury i Systemów Pomiarowych. Pracuje jako adiunkt w Katedrze Systemów Telekomunikacyjnych i Optoelektroniki Wydziału Elektroniki i Telekomunikacji Politechniki Poznańskiej. Obszar zainteresowań naukowych obejmuje zagadnienia z zakresu rozproszonych systemów pomiarowych, krioelektroniki, nadprzewodnictwa oraz kwantowania przewodności elektrycznej.

e-mail: pajakow@et.put.poznan.pl

**Streszczenie**

W pracy przedstawiono wyniki badań zachowania czujnika optoelektronicznego OPT101, który jest fotodiodą zintegrowaną z wewnętrznym wzmacniaczem operacyjnym. Czujnik jest przetwornikiem natężenia oświetlenia/napięcie. Przedstawiono charakterystyki napięcia na wyjściu czujnika  $V_O$  w funkcji temperatury  $T$  dla różnych wartości natężenia oświetlenia. Przedstawiono wyniki badań prądu fotodiody  $I_D$  w funkcji temperatury i natężenia oświetlenia. Przebadano wzmocnienie wewnętrznego wzmacniacza operacyjnego. Pokazano wpływ temperatury na pasmo częstotliwościowe wewnętrznego wzmacniacza.

**Słowa kluczowe:** czujnik optyczny, fotodioda, niskie temperatury.

**Influence of low temperature on OPT101 optoelectronic sensor operation****Abstract**

The paper presents results of tests on behaviour of an OPT101 optoelectronic sensor (Figs. 1, 2) being a photodiode integrated with an internal operational amplifier. The sensor is a converter of luminous emittance to voltage. Fig. 3 shows a measuring position. The sensor was tested at temperature  $T_x$ , and the model sensor was at temperature  $T = 20^\circ\text{C}$ . In Figs. 4 and Fig. 5 there are presented characteristics of voltage  $V_I$  at the sensor output as a function of temperature  $T$  for five different values of the voltage at the sensor model output  $V_M$ . There are also included the results of determining the photodiode current  $I_D$  as a function of temperature for five different values of  $V_M$  (Fig. 8). The internal amplifier gain was also tested and it was proved that the amplifier gain in low temperatures close to 77K depended strongly on the current of the feedback loop consisting of the internal operational amplifier; the higher the current, the lower the amplification decrease (Fig. 10). In the paper there is also discussed the influence of the temperature on the internal amplifier frequency band (Fig. 11). In the summary there is stated that, when taking into consideration the maximum relative error of 3%, it is possible to use the sensor in the temperature range from  $-180^\circ\text{C}$  to  $20^\circ\text{C}$ .

**Keywords:** optical sensor, photodiode, low temperatures.

**1. Wstęp**

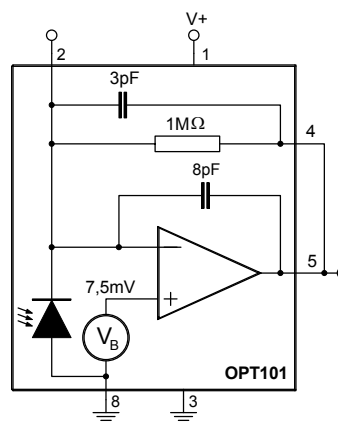
Praca podzespołów elektronicznych poniżej 200K nie jest typowym zakresem przewidzianym przez ich producentów. Wiele urządzeń technicznych znajduje zastosowanie w przedziale niższej temperatury, jak na przykład: w badaniach kosmicznych, badaniach z dziedziny ciała stałego, krioterapii, medycynie i przemyśle spożywczym [1]. Prowadzone przez autora wcześniej badania wykazały, że wzmacniacze operacyjne wykonane w technologii BiFET zachowują swoje właściwości wzmacniające w temperaturze wrzenia ciekłego azotu (77K) [2]. Wybrane typy wzmacniaczy operacyjnych CMOS są zdolne do pracy w temperaturze poniżej 50K [3] a niektóre w temperaturze wrzenia ciekłego helu (4,2K) [4]. Diody elektroluminescencyjne zachowują zdolności emisyjne przy 77K [5].

Artykuł traktuje o pracy czujnika optoelektronicznego OPT101 w przedziale temperatury od 77K do 300K.

**2. Układ OPT101**

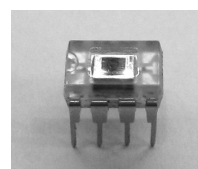
Czujnik optoelektroniczny OPT101 [6] jest zintegrowaną ze wzmacniaczem operacyjnym fotodiodą [Rys. 1]. Posiada wbudowany rezystor  $1\text{M}\Omega$  pomocny w konfiguracji przetwornika prąd/napięcie zrealizowanego na wewnętrznym WO. Napięcie na wyjściu wzmacniacza jest proporcjonalne do natężenia światła padającego na czujnik. Obwód może być zasilany pojedynczym napięciem zasilania z zakresu od  $+2,7$  do  $+36\text{V}$ . Fotodioda ma rozmiary  $0,09 \times 0,09\text{cm}$ . Układ produkowany jest w dwóch typach obudów, SIP5 i DIP8. Do badań w niskiej temperaturze wybrano OPT101 w obudowie DIP8 rys. 2.

Typowy zakres temperatury pracy to od 0 do  $70^\circ\text{C}$ .



Rys. 1. Obwód scalony OPT101 [6]

Fig. 1. Integrated circuit OPT101 [6]



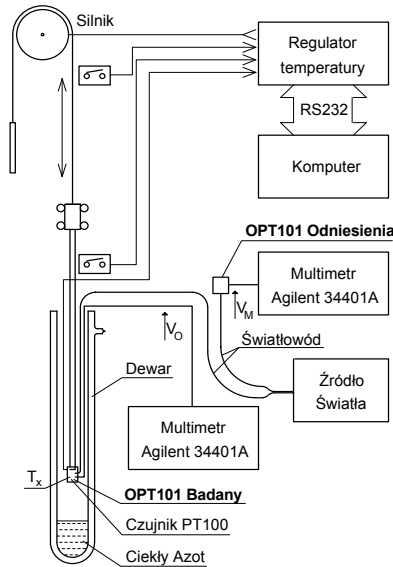
Rys. 2. OPT101 w obudowie DIP8

Fig. 2. OPT101 sensor in DIP8

**3. Badania czujnika optoelektronicznego**

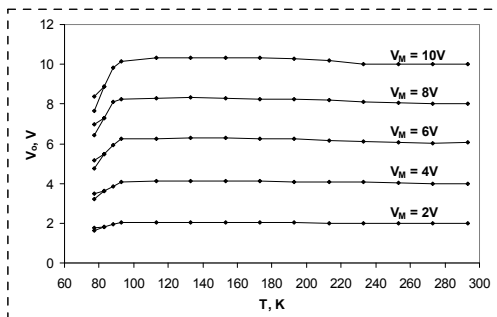
Na rysunku 3 pokazano schemat blokowy stanowiska do badania charakterystyk czujnika OPT101 w przedziale temperatury od 77 do 300K. Jako regulator temperatury użyty jest otwarty kriostat azotowy, w którym temperaturę uzyskuje się poprzez zawieszenie badanej próbki na odpowiedniej wysokości nad lustrem cieczy kriogenicznej [7]. Kriostat pozwala nastawić daną temperaturę i utrzymywać ją przez dłuższy czas. Długość czasu jest uzależniona ilością azotu w zbiorniku. Pomiar temperatury odbywa się przy użyciu czujnika platynowego PT100. Jedna charakterystyka jest mierzona ok. 1h.

Czujniki OPT101 badany i wzorcowy zasilane są napięciem  $+12\text{V}$ . Do czoła obu układów przymocowany jest prostopadłe światłowód. Jako źródło światła użyta jest dioda świecąca typu EWJ85EAC o mocy 5W, która świeci przy maksymalnym prądzie 1,2A strumieniem świetlnym 170lm, światłem białym o temperaturze barwowej 5500K [8].



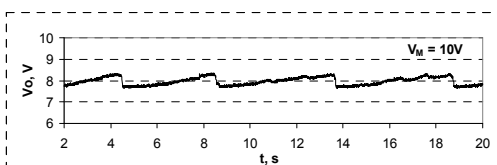
Rys. 3. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego  
Fig. 3. Block diagram of measuring position

Na rys. 4. przedstawiono wykres napięcia na wyjściu czujnika badanego w funkcji temperatury dla 5 różnych nastaw natężenia oświetlenia powodujących wystąpienie napięcia  $V_M$  na wyjściu czujnika wzorcowego.



Rys. 4. Napięcie wyjściowe  $V_o$  czujnika OPT101 w funkcji temperatury  $T$  dla 5 wartości wymuszenia świetlnego  
Fig. 4. OPT101 sensor output voltage  $V_o$  vs. temperature  $T$  for 5 values of light input function

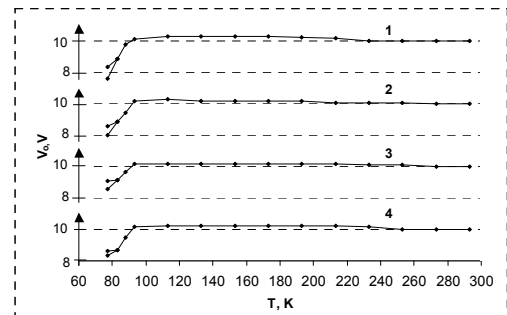
Czujnik badany jest umiejscowiony w ścisłym sąsiedztwie czujnika temperatury PT100, a czujnik wzorcowy znajduje się w temperaturze 20°C. Przed pomiarem każdej charakterystyki oba czujniki mają nastawione natężenie oświetlenia na wartość powodującą jednakowe odczyty z woltomierzy mierzących napięcia na wyjściach czujników. W przedziale temperatury od 93K (-180°C) do temperatury otoczenia widoczna jest prawidłowa praca czujnika optycznego. Dla niższej temperatury układ staje się niestabilny i przy temperaturze 77K napięcie na wyjściu czujnika zmienia się w czasie. Skrajne wartości napięcia zilustrowane są na wykresie jako dwa punkty napięcia wyjściowego występujące przy jednej temperaturze. Na rys. 5 przedstawiono przebieg czasowy zmian napięcia na wyjściu układu OPT101 przy temperaturze 77K dla wymuszenia świetlnego powodującego wystąpienie napięcia  $V_M = 10V$  na wyjściu czujnika wzorcowego.



Rys. 5. Niestabilna praca układu OPT101 w temperaturze 77K  
Fig. 5. Unstable operation of OPT101 at temperature of 77K

Na rys. 6. przedstawiono wykresy napięcia wyjściowego  $V_o$  w funkcji temperatury dla 4 egzemplarzy czujnika OPT101 dla napięcia  $V_M = 10V$ . Dla zakresu od -180°C do 20°C wyznaczono błąd względny procentowy wyrażony wzorem:

$$\delta_{\%} = \left| \frac{V_o - V_M}{V_o} \right| \cdot 100\% \quad (1)$$



Rys. 6. Wykres porównawczy napięcia wyjściowego  $V_o$  czterech czujników OPT101 w funkcji temperatury  $T$   
Fig. 6. Comparative diagram of output voltage  $V_o$  of four OPT101 sensors vs. temperature  $T$

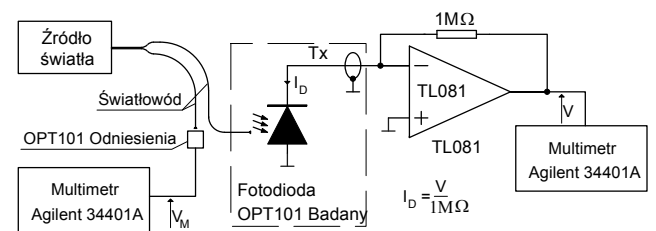
W tabeli 1 zestawiono błędy poszczególnych egzemplarzy.

Tab. 1. Maksymalny błąd względny czujnika OPT101 w przedziale temperatury od -180°C do 20°C  
Tab. 1. OPT101 sensor maximum relative error in the temperature interval from -180°C to 20°C

Lp.	1	2	3	4
$\delta$ [%]	3,1	2,0	1,6	2,5

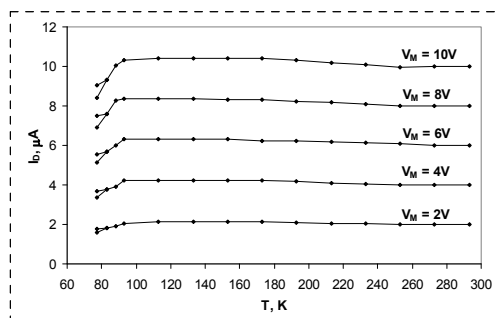
#### 4. Badania fotodiody czujnika OPT101

Fotodioda w czujniku ma pole 5,2mm<sup>2</sup>. Typowa czułość na światło o długości 650nm równa jest 0,45 A/W. Końcówka nr 2 w obudowie czujnika pozwala wykorzystać samą fotodiode. Na rys. 7 przedstawiono schemat blokowy układu do pomiaru prądu fotodiody w funkcji temperatury. Układ ma odłączone zasilanie, a przetwornik prąd/napięcie, zbudowany ze wzmacniacza TL082, jest umieszczony w temperaturze otoczenia tuż za wyjściem z kriostatu.



Rys. 7. Układ do badania fotodiody  
Fig. 7. Circuit for photodiode testing

Na rysunku 8 przedstawiono wykres prądu diody dla 5 wartości wymuszenia świetlnego (takich samych jak w charakterystyce z rys. 4). Widoczne jest podobieństwo charakterystyk z tymi z rysunku 4.

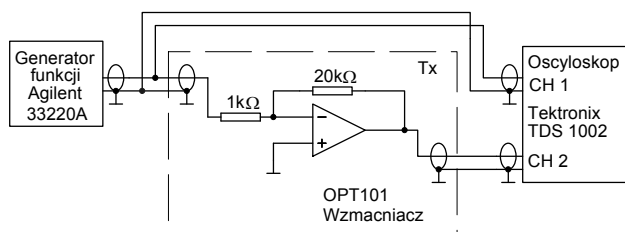


Rys. 8. Prąd fotodiody  $I_D$  w funkcji temperatury  $T$  dla 5 wartości wymuszenia świetlnego

Fig. 8. Photodiode current  $I_D$  vs. temperature  $T$  for 5 values of light input function

## 5. Badania wzmacniacza operacyjnego czujnika OPT101

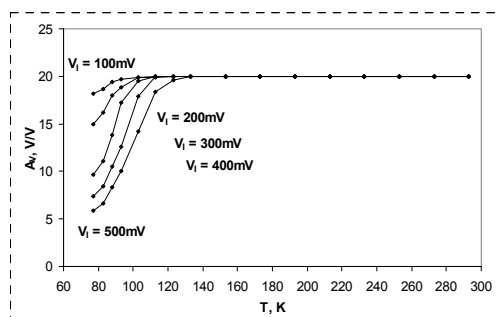
Wzmacniacz operacyjny zawarty w strukturze OPT101 ma wzmocnienie z otwartą pętlą  $A_{OL} = 90\text{dB}$ , typową wartość napięcia niezrównoważenia  $V_{OS} = \pm 0,5\text{mV}$  oraz pasmo częstotliwościowe  $GBP = 2\text{MHz}$ . Na rys. 9 przedstawiono schemat do pomiaru charakterystyk wzmacniacza operacyjnego ze struktury OPT101.



Rys. 9. Układ do badania wzmacniacza operacyjnego

Fig. 9. Circuit for testing operational amplifier

W układzie przedstawionym na rysunku zmierzono charakterystyki wzmocnienia wzmacniacza skonfigurowanego jako odwracający fazę o wzmocnieniu  $A_V = 20\text{V/V}$  w funkcji temperatury (rys. 10) oraz pasmo  $GBP$  w funkcji temperatury (rys. 11). W przedziale temperatury od 133K ( $-140^\circ\text{C}$ ) do temperatury otoczenia wzmacniacz wzmacnia ze stałym wzmocnieniem  $20\text{V/V}$ ; dla niższej temperatury wartość wzmocnienia maleje i dla temperatury 77K wynosi w skrajnych przypadkach napięcia wejściowego  $V_I = 100\text{mV}$  i  $500\text{mV}$  odpowiednio  $A_V = 18\text{V/V}$  i  $A_V = 6\text{V/V}$ .



Rys. 10. Wzmocnienie napięciowe  $A_V$  wzmacniacza w funkcji temperatury  $T$

Fig. 10. Amplifier voltage gain  $A_V$  vs. temperature  $T$

Porównując z sobą kształty charakterystyk  $V_O = f(T)$  i  $I_D = f(T)$  oraz  $A_V = f(T)$  można zauważyć zależność taką, że im mniejszy

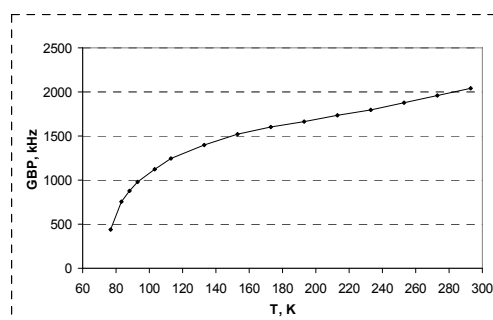
prąd płynie w sprzężeniu zwrotnym przetwornika prąd/napięcie, tym mniejsze są zmiany wzmocnienia wzmacniacza w niskiej temperaturze. Pasma 2MHz wzmacniacza maleje wraz z obniżaniem temperatury i osiąga wartość  $GBP = 440\text{kHz}$  w temperaturze 77K. Pasma GBP (Gain Bandwidth Product) zdefiniowane jest wg zależności:

$$GBP = f_{3dB} \cdot A_V, \quad (2)$$

gdzie  $f_{3dB}$  jest częstotliwością trzydecybelowego spadku sygnału a  $A_V$  wzmocnieniem napięciowym wzmacniacza.

## 6. Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki wpływu temperatury w przedziale od 77 do 300K na pracę czujnika optycznego OPT101. Wyznaczono zakres temperatury (od 93K;  $-180^\circ\text{C}$  do 293K;  $20^\circ\text{C}$ ), dla którego czujnik pracuje poprawnie z błędem mniejszym od 3%. Wykazano, że za niestabilność czujnika w temperaturze 77K odpowiada niestabilny prąd fotodiody w temperaturze wrzenia ciekłego azotu. Pokazano, że wzmocnienie wzmacniacza operacyjnego w niskiej temperaturze jest większe dla mniejszego prądu płynącego w pętli sprzężenia zwrotnego. Wykazano zmniejszanie pasma częstotliwościowego wraz z obniżaniem temperatury od  $GBP = 2040\text{kHz}$  przy  $T=293\text{K}$  do  $GBP= 440\text{kHz}$  w 77K.



Rys. 11. Pasma wzmacniacza w funkcji temperatury

Fig. 11. Frequency band vs. temperature

## 7. Literatura

- [1] Nawrocki W., Michalak S., Pająkowski J.: Operational Amplifiers and Bipolar Transistors at 77K. Proceedings Eighteenth International Cryogenic Engineering Conference (ICEC18), Mumbai India, 2000. pp. 647-650.
- [2] Pająkowski J.: Zmiany wybranych parametrów wzmacniaczy operacyjnych w niskich temperaturach. Poznańskie Warsztaty Telekomunikacyjne 2004. pp. 210-212.
- [3] Swenson J.A., Baker K.D.: CMOS operational amplifier performance at cryogenic temperatures. Cryogenics vol. 33, No 2. pp. 215-221.
- [4] Pająkowski J.: Pomiar wzmocnienia napięciowego scalonych wzmacniaczy operacyjnych CMOS w zakresie temperatur od 4,2 do 300K. PAK vol. 54, 6/2008. pp. 371-373.
- [5] Pająkowski J.: Behavior of light emitting diodes at low temperature. Elektronika, vol. 52, 6/2011. pp. 49-51.
- [6] OPT101.pdf datasheet – Burr-Brown USA 3,1998
- [7] Pająkowski J.: Otwarty kriostat azotowy, Elektronika vol. 45, 5/2004. pp. 33-34.
- [8] EWJ85EAC.pdf datasheet – Honglitricon.

otrzymano / received: 14.09.2011

przyjęto do druku / accepted: 02.11.2011

artykuł recenzowany