

# Czujnik temperatury TMP01ESZ

Inicjatywa „Elektroniki Praktycznej” pod nazwą Klub Aplikantów Próbek – w skrócie KAP – pozwala konstruktorom elektronikom na bezpłatne zapoznanie się z wieloma ciekawymi elementami elektronicznymi. W ramach KAP można otrzymać, między innymi, moduły z układem termometru/termostatu TMP01ESZ firmy Analog Devices.

Ten moduł to płytka drukowana z przylutowanym układem. Na krawędziach umieszczono listwy goldpinów o rastrze 2,54 mm. Wyprowadzenia sensora są połączone z pinami listw i dokładnie opisane. Tak przygotowaną płytkę można wmontować w układ prototypowy lub połączyć kablami z odpowiednimi końcówkami z dowolnym układem.

## Układ TMP01

Schemat blokowy układu TMP01 pokazano na **rysunku 1**. Zasadniczym elementem TMP01 jest czujnik (sensor) temperatury. Na jego wyjściu występuje napięcie proporcjonalne do temperatury. Napięcie wyjściowe VPTAT zmienia się o 5 mV/K i dla temperatury +25°C jest równe 1,49 V. Producent podaje, że dokładność pomiaru temperatury wynosi  $\pm 1^\circ\text{C}$  i jest uzyskiwana w procesie produkcyjnym przez korygowanie struktury krzemowej promieniem lasera. Czujnik jest zintegrowany z precyzyjnym źródłem napięcia odniesienia 2,5 V. Jest on wyprowadzane na zewnątrz (wyjście VREF) i jest potrzebne do wykonania termostatu. W strukturę układu są wbudowane dwa komparatory i układ histerezy. Komparatory porównują napięcie z wyjścia modułu pomiaru temperatury z napięciami z wejść *SET\_HIGH* i *SET\_LOW*, tworząc układ komparatora okienkowego z histerezą. Napięcia na wejściach *SET\_HIGH* i *SET\_LOW* są ustalane przez podział dzielnikiem rezystancyjnym wysokostabilnego napięcia referencyjnego VREF. Do wykonania dzielnika można użyć rezystorów stałych lub dokładnych potencjometrów wielobrotowych. Napięcie na wejściu *SET\_HIGH* określa górną temperaturę działania termostatu, a *SET\_LOW* – dolną. Wyjścia komparatorów są połączone z tranzystorami pracującymi w układzie otwartego kolektora (wyprowadzenia *OVER* i *UNDER*). Działanie termostatu pokazano graficznie na **rysunku 2**. Prąd płynący ze źródła referencyjnego powoduje wewnątrz struktury układu spadek na rezystancji ok. 1 k $\Omega$  i ten spadek określa szerokość pętli histerezy (**rysunek 3**). Jeżeli wyjście komparatora nie jest aktywne, to obwód dodawania prądu IHSYS z lustra prądowego jest otwarty (sygnał

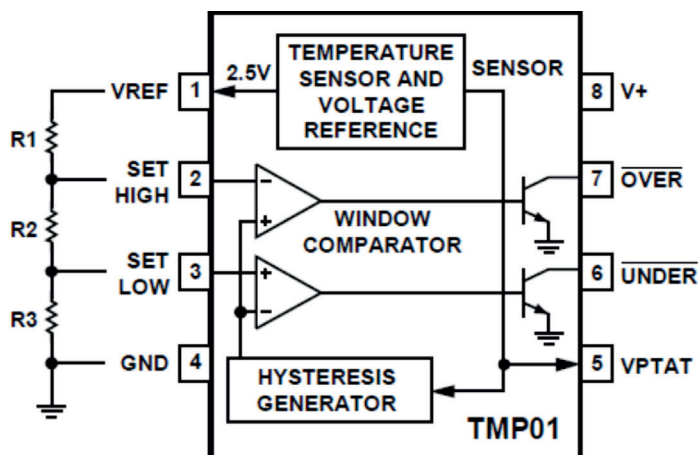
zezwole nie jest aktywny). Po przekroczeniu ustawionej temperatury na wejściu *SET\_x* komparator aktywuje wyjście i jednocześnie jest włączany układ dodawania prądu na wyprowadzeniu VREF (IHSYS).

Na wejście nieodwracające komparatora jest podawana suma napięcia z wyjścia układu pomiaru temperatury i spadku na rezystancji 1  $\Omega$  przy przepływie prądu z wyprowadzenia VREF. Wyjście komparatora jest w stanie aktywnym dla napięcia na wejściu równym VPTAT plus spadek napięcia histerezy na rezystorze. Z tego wynika, że temperatura musi spaść niżej niż TSET o wartość napięcia histerezy. Wartość prądu histerezy jest wyliczana z równania  $I_{\text{HYS}} = I_{\text{VREF}} = 5 \mu\text{A}/^\circ\text{C} + 7 \mu\text{A}$ . Przy obciążeniu VREF rezystancją 357 k $\Omega$  lub większą histereza jest wyłączona, bo prąd płynący przez obciążenie jest mniejszy od 7  $\mu\text{A}$ .

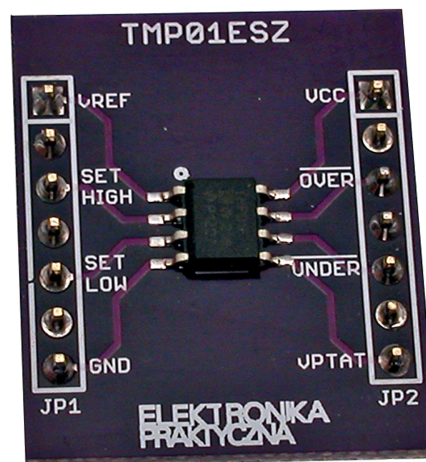
Jak już wspominałem, ustawienie progów termostatu realizuje się za pomocą dzielnika rezystancyjnego. Obliczenia wartości tych rezystorów można wykonać w kilku krokach:

1. Określenie histerezy temperatury w  $^\circ\text{C}$ .
2. Wyliczenie prądu histerezy  $I_{\text{VREF}}$  w  $\mu\text{A}$ .
3. Określenie progów temperaturowych.
4. Wyliczenie wartości każdego z rezystorów dzielnika.

Prąd histerezy łatwo wyliczyć. Na przykład, dla histerezy równej  $2^\circ\text{C}$  prąd  $I_{\text{VREF}} = 2 \cdot 5 \mu\text{A} + 7 \mu\text{A} = 17 \mu\text{A}$ .



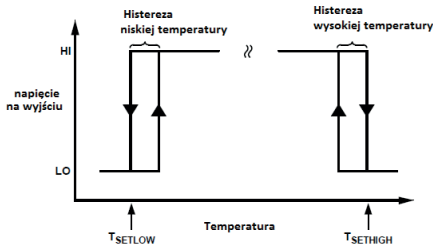
Rysunek 1. Schemat blokowy układu TMP01



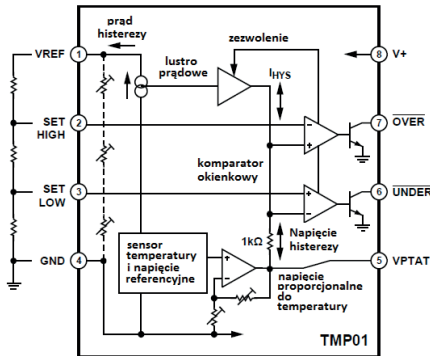
Progi temperaturowe  $VSETHIGH$  i  $VSETLOW$  określa współczynnik 5 mV/K oraz napięcie 1,49 V odpowiadające  $25^\circ\text{C}$ . Na podstawie tych danych wyliczymy rezystancje dzielnika (**rysunek 4**). Napięcie na wejściu *SETHIGH* jest równe  $VSETHIGH = (TSETHIGH [^\circ\text{C}] + 273,15) \cdot 5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ , natomiast na wejściu *SETLOW* jest równe  $VSETLOW = (TSETLOW [^\circ\text{C}] + 273,15) \cdot 5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ . Znając prąd  $I_{\text{VREF}}$  oraz napięcia  $VSETLOW$  i  $VSETHIGH$ , możemy wyliczyć wartość rezystancji  $R1 \dots R3$ :

- $R1 = (V_{\text{VREF}} - V_{\text{SETHIGH}}) / I_{\text{VREF}} = (2,5 \text{ V} - V_{\text{SETHIGH}}) / I_{\text{VREF}}$
- $R2 = (V_{\text{SETHIGH}} - V_{\text{SETLOW}}) / I_{\text{VREF}}$
- $R3 = V_{\text{SETLOW}} / I_{\text{VREF}}$

Suma rezystancji  $R1 + R2 + R3$  stanowi obciążenie wymuszające prąd  $I_{\text{VREF}}$  konieczny



Rysunek 2. Działanie termostatu

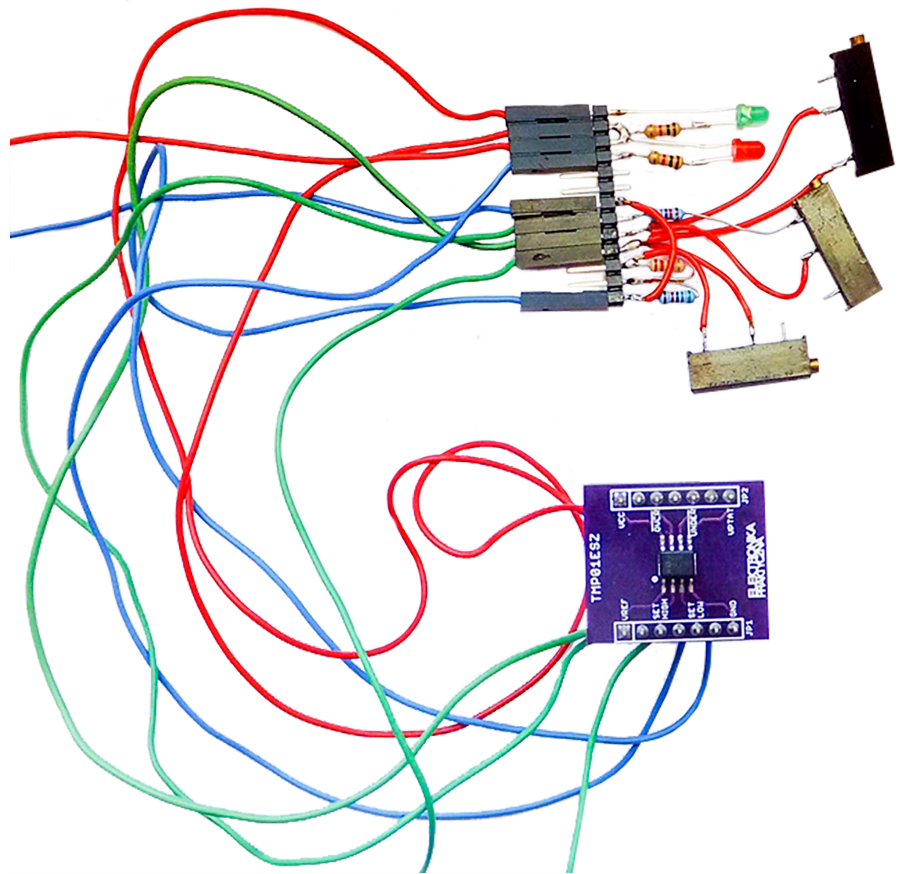


Rysunek 3. Schemat działania układu

do poprawnego działania histerazy. Kiedy wejście *SET\_HIGH* jest nieużywane, trzeba je połączyć z napięciem zasilania *V+*. Jeżeli wejście *SET\_LOW* jest nieużywane, to należy je połączyć z masą *GND*.

W części aplikacji stosujących termostaty cyfrowe duże znaczenie ma precyzja pomiaru temperatury (napięcia) progowej i precyzja histerazy działania komparatora. Na błędy działania ma wpływ wiele czynników. Sam układ czujnika jest źródłem błędów pomiaru, ale jego dokładność w funkcji mierzonej temperatury jest znana i można próbować ją minimalizować. Źródło napięcia referencyjnego *VREF* charakteryzuje się dрифtem temperaturowym i tolerancją wynikającą z procesu produkcji. Trzeba jednak pamiętać, że niedokładności napięcia *VREF* są redukowane przez dzielniki rezystancyjne podające napięcie na wejścia *SET\_HIGH* i *SET\_LOW*.

Kolejnym źródłem błędów może być upływność wejść komparatorów (*SET\_HIGH* i *SET\_LOW*). W układzie *TMP01* prąd upływu jest typowo mniejszy od 1 nA, co w pewnym warunkach może być źródłem błędów. Jednak sam układ produkowany w kontrolowanych warunkach ze zmierzonymi parametrami będzie sprawiał mniej problemów niż zewnętrzny dzielnik rezystancyjny. Po wyliczeniu wartości rezystancji musimy dobrać rezystory jak najbliższej wyliczonej wartości. Rezystory są produkowane z tolerancjami od 0,1%. Jeżeli zależy nam na jak największej dokładności, to najprawdopodobniej trzeba będzie wykonać rezystory dzielnika na zamówienie. Ale to nie koniec problemów. Jeżeli układ ma pracować w szerokim zakresie temperatury, to trzeba zastosować rezystory o dobrej stabilności temperaturowej. Niekiedy konieczne może okazać się umieszczenie rezystorów z dala od czujnika mierzącego temperaturę. W obwodach,



w których płyną małe prądy, istotne jest również właściwe zaprojektowanie obwodu drukowanego z prawidłowym prowadzeniem masy i rozmieszczeniem elementów.

Kolejnym ważnym czynnikiem jest szybkość pomiaru temperatury. Jeżeli temperatura zewnętrzna zmienia się z pewną szybkością, to może zdarzyć się, że termostat nie zdąży zareagować w wymaganym czasie i nawet najlepiej zaprojektowany układ elektryczny na niewiele się zda. Sensor ma pewną „bezwładność” temperaturową i wymaga czasu, aby zareagował na zmianę temperatury.

W praktycznej aplikacji źródłem błędów pomiaru temperatury będzie też sam układ *TMP01*. Każdy elektroniczny termometr w trakcie działania wytwarza ciepło, które

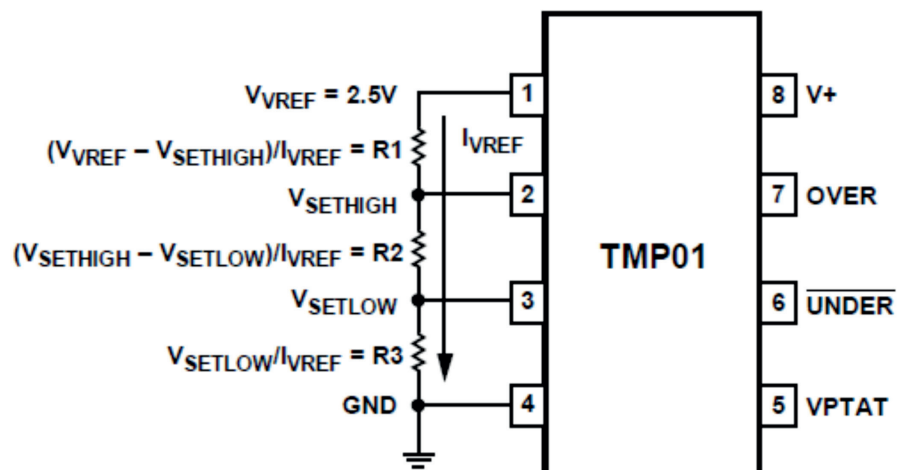
powoduje wzrost temperatury wewnętrznej. Powoduje to wskazania pomiaru wyższe niż rzeczywista wartość. Głównym winowajcą zwiększonego poboru energii może być wyjście z otwartym kolektorem. Jeżeli przez to wyjście płynie ciągle prąd o maksymalnym natężeniu 20 mA, to w układzie wydziela się dodatkowa moc

$$P_{DISS} = 0,6 \text{ V} \cdot 0,02 \text{ A} = 12 \text{ mW}$$

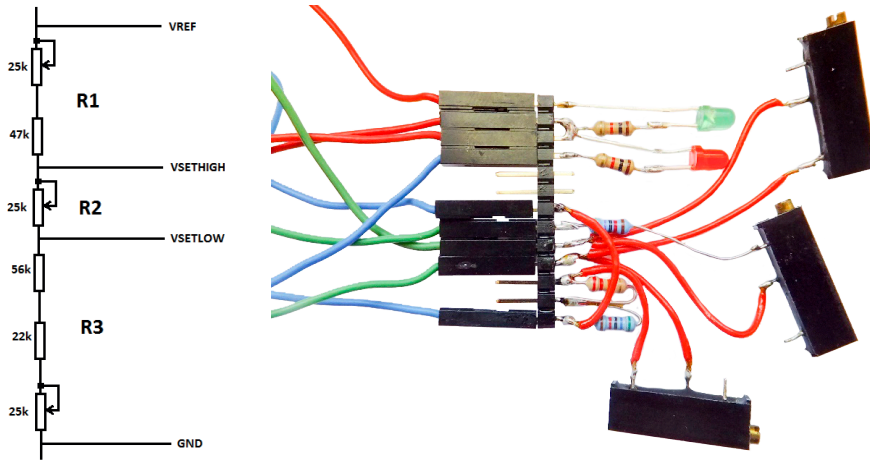
Przyrost temperatury wyliczymy z równania

$$\Delta T = P_{DISS} \cdot \theta_{JC} = 0,012 \text{ W} \cdot 158^\circ\text{C/W} = 1,9^\circ\text{C}$$

Sterowanie wyjściem np. *OVER* może wymagać pomiar o około 2°C. Można temu zapobiec przez przymocowanie (przyklejenie) układu do radiatora. Wtedy przyrost temperatury będzie wynosił około



Rysunek 4. Sposób obliczenia rezystorów dzielnika



Rysunek 5. Testowy dzielnik dla układu TMP01

$$\Delta T = P\_DISS \cdot \Theta_{JC} = 0,012 \text{ W} \cdot 43^\circ\text{C}/\text{W} = 0,52^\circ\text{C}$$

Jednak wtedy na pewno zmniejszy się szybkość rejestracji zmian temperatury.

### Testy praktyczne

Ponieważ mamy gotowy moduł z wyprowadzeniami, nic nie stoi na przeszkodzie, by przetestować działanie termostatu w praktyce. Załóżmy, że histereza pomiaru będzie wynosiła 2°C. Wtedy prąd wypływający z wyjścia VREF musi mieć natężenie 17 μA (wylczyliśmy to już wcześniej). VSETHIGH ustawimy na 40°C, a VSETLOW na 27°C. Wylczymy VSETHIGH dla 40°C i VSETLOW dla 27°C:

$$1. VSETHIGH = (40 + 273,15) \cdot 0,005 = 1,56575 \text{ V}$$

$$2. VSETLOW = (27 + 273,15) \cdot 0,005 = 1,50075 \text{ V}$$

Następnie rezystory dzielnika:

- $R1 = (2,5 \text{ V} - 1,56575 \text{ V}) / 0,000017 = 54955 \Omega$
- $R2 = (1,56575 \text{ V} - 1,50075 \text{ V}) / 0,000017 = 3824 \Omega$
- $R3 = 1,50075 / 0,000017 = 88279 \Omega$

Nasze wylczenia można sprawdzić, dodając  $R1 + R2 + R3 = 147058 \Omega$ . Z prawa Ohma  $147058 \Omega \cdot 0,000017 \text{ A} = 2,499986 \text{ V}$ . Jak wspomniałem, dość trudno będzie dobrać rezystory o takich wartościach z szeregu o tolerancji np. 1%. Do celów testowych można użyć rezystorów stałych połączonych szeregowo z potencjometrami montażowymi. W ten sposób wykonałem dzielnik w prototypie – wykonałem go z rezystorów stałych połączonych szeregowo z wielobrotowymi, precyzyjnymi potencjometrami o rezystancji 25 kΩ, jak pokazano na rysunku 5. Elementy dzielnika zamocowano do listwy goldpinów i połączono z płytką ewaluacyjną za pomocą kabli z odpowiednimi końcówkami. Na tej samej listwie umieszczono dwie diody LED z rezystorami 1 kΩ ograniczającymi prąd. Te diody zostały przeznaczone do sygnalizowania stanu wyjść OVER i UNDER.

Po ustawieniu za pomocą omiornierza wylczonych wartości rezystorów R1, R2 i R3 połączyłem układ dzielnika z płytką ewaluacyjną

i zasililem napięciem +5 V. W prawidłowo działającym układzie na wyprowadzeniu VREF powinno być napięcie +2,5 V, a na wejściach VSETHIGH i VSETLOW, odpowiednio: 1,565 V i 1,500 V. W praktyce, ustawienie wylczonych wartości było bardzo trudne, jednak celem tego testu nie było uzyskanie bardzo dokładnych progów przełączania, tylko sprawdzenie działania sensora. Po zasileniu wystarczyło lekko podgrzać układ przez dotknięcie palcem, a zaświecała się dioda podłączona do wyjścia UNDER. Przypomnijmy, że próg zdziałania w tym wypadku miał wynosić 27°C. Drugi próg temperatury OVER uzyskałem, umieszczając układ w pewnej odległości nad grotiem rozgrzanej lutownicy. Po zmierzeniu napięcia na wyjściu VPTAT okazało się, że przełączanie wyjścia UNDER następowało w temperaturze +28°C, a wyjścia OVER w temperaturze +38°C.

Ten test pokazał, że aplikowanie okienkowego termostatu z histerezą przełączania jest z jednej strony bardzo łatwe do wykonania – wystarczą 3 rezystory. Z drugiej strony, jeżeli zależy nam na dokładności, to musimy się liczyć z tym, że niezbędne będzie zastosowanie nietypowych rezystorów, stabilnych temperaturowo i o małej tolerancji wykonania.

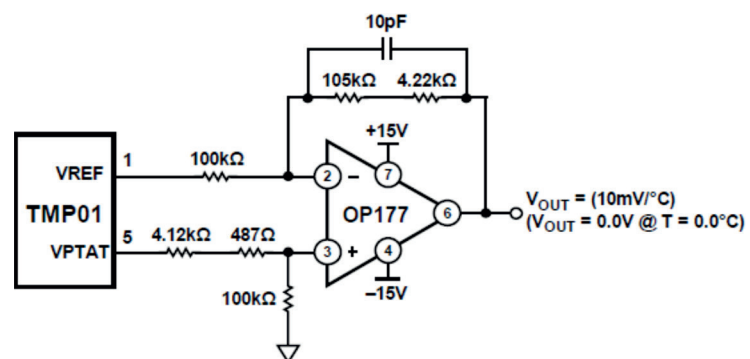
Kiedy zetknąłem się z TMP01, pierwszą myślą było zastosowanie go w roli czujnika temperatury dla cyfrowego termometru zbudowanego z użyciem mikrokontrolera wyposażonego w przetwornik A/C. Jednak wystarczy rzut oka na charakterystykę zmian

napięcia wyjściowego, aby zdać sobie sprawę, że nie jest to dobry pomysł. W całym zakresie temperatury napięcie wyjściowe VPTAT zmienia w zakresie 1,09...1,99 V. Jak pamiętamy, zmiana temperatury o 1°C powoduje zmianę napięcia o 5 mV. Jeżeli weźmiemy typowy przetwornik o rozdzielczości 10 bitów i napięciu referencyjnym 3,3 V, to potrafi on zarejestrować zmianę napięcia o wartości 3,2 mV. Byłoby to do zaakceptowania, gdyby napięcie na wyjściu zmieniało się od 0 V do 3,3 V, jednak my wykorzystujemy tylko część zakresu. Gdybyśmy nawet pominęli trudności w przeliczaniu rozdzielczości dla jednego bita równej 3,3 mV przy zmianie 5 mV/°C, to i tak wykorzystujemy tylko 30% zakresu pomiarowego przetwornika. Można by było temu zaradzić przez stosowanie analogowych układów dodatkowych przesuwających poziom o -1 V i 3-krotnie wzmacniających sygnał, ale wiąże się to z rozbudową układu. W dokumentacji sensora pokazano konwerter współczynnika napięcia wyjściowego z 5 mV/K na 10 mV/°C i z napięciem wyjściowym 0 V dla temperatury 0°C (rysunek 6). Jak widać, potrzebny jest wzmacniacz operacyjny zasilany napięciem symetrycznym ±15 V oraz garść rezystorów o nietypowej rezystancji. W dokumentacji można również znaleźć gotowe rozwiązanie alarmu termicznego, który sygnalizuje obniżenie temperatury do +15°C lub jej wzrost do +35°C.

### Podsumowanie

Czujnik TMP01 to bardzo ciekawy układ przeznaczony głównie do budowania precyzyjnych termostatów z możliwością sprzętowego ustalania histerezy w punkcie przełączania. To układ analogowy, nie ma interfejsów cyfrowych i nie jest optymalizowany do zastosowania w technice cyfrowej. Może to być postrzegane jako wada, ale jest zaletą. Jedynie dzięki dołączeniu do układu trzech rezystorów możemy zbudować dokładny, regulowany w szerokim zakresie termostat okienkowy z histerezą. Nie potrzeba do tego mikrokontrolera i żadnych dodatkowych układów, co upraszcza aplikację i znacząco obniża cenę gotowego urządzenia.

Tomasz Jabłoński, EP



Rysunek 6. Konwerter z 5 mV/K na 10 mV/°C