

doi:10.15199/48.2017.11.22

Możliwości pomiaru niskich temperatur z wykorzystaniem oscylatora RC mikrokontrolera ATmega16A

Streszczenie. W artykule zaprezentowano wyniki badań oscylatora RC mikrokontrolera ATmega16A dla temperatur zmniejszanych do 77K. Zaproponowano wykorzystanie oscylatora RC jako wbudowanego częstotliwościowego czujnika temperatury. Wyznaczono temperaturowe charakterystyki względnych zmian częstotliwości oraz charakterystyki czułości omawianego sensora. Sformułowano wnioski dotyczące właściwości cieplnych i nieliniowych charakterystyk sensora przy pracy w systemach pomiarowych w zakresie niskich temperatur.

Abstract. The article presents the results of RC oscillator tests for ATmega16A microcontroller with the lowest thermal point at 77K. The integrated RC oscillator was proposed as a cryogenic thermometer. Then, the temperature characteristics of the relative frequency changes and sensitivity of low-temperature sensor are calculated. The author formulates conclusions concerning the thermal properties and non-linear characteristics of the sensor at low temperatures. (**Low temperature measurement possibilities with internal RC oscillator in ATmega16A microcontroller**)

Słowa kluczowe: niskie temperatury, czujnik temperatury, mikrokontroler, systemy pomiarowe.

Keywords: low temperatures, temperature sensor, microcontroller, measurement systems.

Wstęp

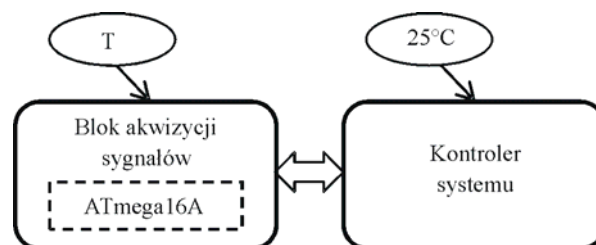
Pomiary temperatury należą, obok pomiarów częstotliwości i czasu, do najczęściej wykonywanych pomiarów wielkości fizycznych. W wielu przypadkach temperatura określa podstawowe warunki pomiaru innej wielkości, pozwalając na porównywanie właściwości kolejnych obiektów pomiaru lub przedstawianie ich charakterystyk metrologicznych i opisywanie właściwości użytkowych w zależności od warunków termicznych. Dotyczy to również badań prowadzonych w zakresie niskich i bardzo niskich temperatur. Obecnie szczególnie ważne są badania materiałowe, wykonywane w obszarze nadprzewodnictwa, w temperaturach poniżej 20K (-253°C) oraz 90÷110K (-183°C ÷ -163°C). Kontrola procesów zachodzących w przedmiotowym obszarze temperatur wymaga odpowiedniego doboru czujników temperatury oraz znajomości ich charakterystyk statycznych, a niekiedy również dynamicznych [1, 2]. Wykonywanie pomiarów temperatury poniżej poziomu 123K (-150°C) i zwiększanie dokładności tych pomiarów zależy też często od ograniczenia wymiany ciepła pomiędzy kriostratem a jego otoczeniem, co jest równoznaczne ze zmniejszeniem liczby przewodów i przepustów łączących kriostrat z urządzeniami zewnętrznymi [2]. Warto zauważyć, że takie dążenie do redukcji liczby połączeń przemawia za wykorzystaniem zalet rozwiązania, jakim jest integracja sensorów pomiarowych z blokiem akwizycji sygnałów i stosowanie czujników inteligentnych. Wprowadzenie systemowego bloku akwizycji sygnałów do wnętrza kriostratu pozwala bowiem na transfer danych pomiarowych do kontrolera systemu w postaci cyfrowej, z wykorzystaniem szeregowej transmisji asynchronicznej lub synchronicznej, co zwiększa odporność na zakłócenia i niezawodność transmisji oraz spełnia warunek zmniejszenia liczby połączeń komunikacyjnych.

Powodzenie tych działań zależy jednak od możliwości funkcjonowania układów półprzewodnikowych, które wchodzi w skład bloku akwizycji sygnałów, w obszarze niskich temperatur. Struktury półprzewodnikowe powinny być przechowywane w przedziale temperatur -65°C ÷ +150°C, a ich gwarantowany temperaturowy zakres pracy może obejmować przedział -55°C ÷ +125°C [3, 4]. Zmiany właściwości półprzewodników, jakie zachodzą poniżej temperatury -55°C, nie przeszkodziły jednak wykorzystaniu tranzystorowych stopni wzmacniających i wzmacniaczy operacyjnych do budowy układów, które w niskich temperaturach wzmacniają sygnały użyteczne przy małym

poziomie szumów własnych [5]. Z kolei wyniki prac doświadczalnych, które dotyczą wpływu temperatury na napięcie progowe przewodzenia i świećność diod elektroluminescencyjnych, potwierdziły możliwość zastosowania tych elementów do sygnalizacji i transmisji sygnałów optycznych w temperaturach rozszerzonych do zakresu 77K÷300K (-196°C ÷ +27°C) [6, 7]. Wykazano także, że możliwe jest wprowadzanie mikroprocesorowych struktur VLSI do wnętrza kriostratu i przejmowanie przez nie zadań sprzętowych i programowych w bloku akwizycji sygnałów [8, 9, 10]. Ostatni z wymienionych aspektów jest kluczowy dla rozwiązywania problemu integracji zasobów bloku akwizycji, który pracuje w obszarze niskich temperatur. Ponieważ częstotliwość oscylatora RC mikrokontrolera zmienia się wraz z temperaturą [9], warto przy tym zwrócić uwagę na możliwość pozyskania tej informacji przez kontroler systemu i wykorzystania jej do wyznaczenia temperatury, panującej wewnątrz kriostratu. Proponowane rozwiązanie jest równoważne umiejscowieniu czujnika temperatury w strukturze mikrokontrolera.

Współpraca kontrolera systemu z mikroprocesorowym blokiem akwizycji sygnałów

Badania wykazały, że zapewnienie szerokiego temperaturowego zakresu pracy mikrokontrolera AVR, sięgającego punktu 77K (-196°C), jest możliwe dzięki dystrybucji sygnału zegarowego z wewnętrznego oscylatora RC [9, 10]. Wbudowanie do bloku akwizycji sygnałów procesora taktowanego zegarem wewnętrznym zmniejsza stopień złożoności układowej bloku i wpływa na warunki jego współpracy z kontrolerem systemu (rys. 1).



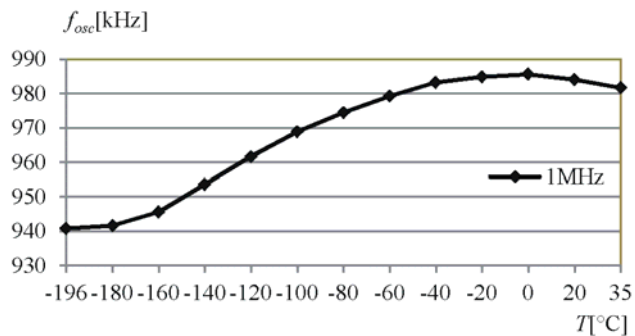
Rys.1. Temperaturowe warunki pracy systemu pomiarowego

Zasoby standardowego 8-bitowego mikroprocesora, takiego jak układ ATmega16A [3, 4], pozwalają na przeniesienie zadań obsługi czujników i wstępnej przetwarzania danych do bloku akwizycji sygnałów,

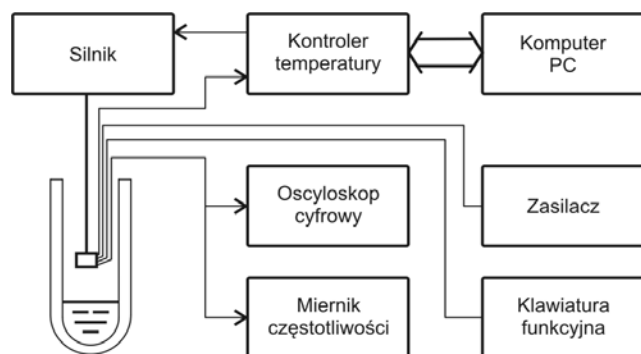
poddawanego działaniu niskiej temperatury. Ponieważ temperatura wpływa na częstotliwość pracy oscylatora RC układu ATmega16A [9], kontroler systemu i blok akwizycji będą zwykle taktowane sygnałami zegarowymi o różnych częstotliwościach. W tej sytuacji dobrym rozwiązaniem jest przekazywanie wyników pomiarów i obliczeń za pośrednictwem szeregowego interfejsu TWI (2-wire) lub SPI. Bloki systemowe komunikują się wówczas w hierarchii master – slave przy minimalnej liczbie połączeń. Dane są przekazywane synchronicznie i taktowane zegarem transmisji bloku master. Jeśli status „master” zostanie przydzielony mikrokontrolerowi w kriostacie, częstotliwość zegara transmisji dostarczy do kontrolera systemu informację o temperaturze, przy czym blok akwizycji sygnałów będzie prowadził pomiary w czasie własnym.

Wpływ zmian temperatury na częstotliwość oscylatora RC wbudowanego w mikrokontroler ATmega16A

Procesor ATmega16A jest 8-bitowym mikrokontrolerem z rdzeniem AVR, który wyposażono w pamięci Flash, SRAM i EEPROM, podstawowe moduły peryferyjne oraz cztery 8-bitowe porty wejścia/wyjścia. Wewnętrzny oscylator RC mikrokontrolera opracowano dla wybieranych programowo częstotliwości 1MHz, 2MHz, 4MHz i 8MHz [3]. Rzeczywiste wartości częstotliwości oscylatora f_{osc} mogą już w temperaturze $T = 25^{\circ}\text{C}$ wykazywać rozrzuty względem wartości zadanej (rys. 2).



Rys. 2. Wyniki badań częstotliwości oscylatora RC dla układu ATmega16A przy ustawieniu programowym 1MHz



Rys. 3. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego

Badania przeprowadzono w kriostacie z ciekłym azotem (rys.3), z wykorzystaniem specjalistycznego systemu pomiarowego [10]. Dowiodły one, że oscylator RC taktuje rdzeń układu ATmega16A do temperatury -196°C [9]. Struktura ATmega16A może więc pracować znacznie poniżej nominalnego przedziału $-55^{\circ}\text{C} \div 125^{\circ}\text{C}$.

Uzyskane doświadczalnie charakterystyki opisują właściwości termiczne mikrokontrolerów typu ATmega16A, z których każdy był programowany dla innej częstotliwości. Na podstawie wyników tych badań można wnioskować, że częstotliwość oscylatora RC wbudowanego w układ może

być w temperaturze 77K (-196°C) większa lub mniejsza od częstotliwości dla 25°C .

Oscylator RC jako czujnik temperatury

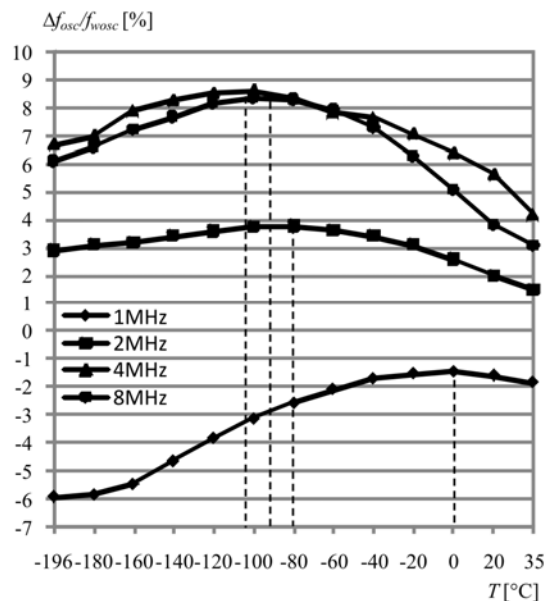
Po wykonaniu badań wybranego układu cieplne zmiany częstotliwości oscylatora RC (rys.2, 3) mogą być wykorzystane do uzyskania informacji, w jakiej temperaturze pracuje mikrokontroler. Określenie zakresu pomiarowego potencjalnego czujnika wymaga ilościowego przeanalizowania względnych zmian częstotliwości oscylatora (rys. 4, rys. 5).

Temperaturowe zmiany częstotliwości oscylatora RC, wbudowanego w mikrokontrolery AVR, mogą być odnieszone do wybieranej nastawy programowej, traktowanej jako częstotliwość wzorcowa i definiowane jako

$$(1) \quad \frac{\Delta f_{osc}}{f_{wosc}}(T) = \frac{f_{osc}(T) - f_{wosc}}{f_{wosc}}$$

gdzie: f_{osc} – częstotliwość oscylatora, f_{wosc} – wzorcowa częstotliwość w temperaturze 25°C , T – temperatura.

Na podstawie wzoru (1) można wstępnie ocenić, że dla badanych układów kolejne nastawy częstotliwości oscylatora (1MHz, 2MHz, 4MHz i 8MHz) pozwalają na pomiar temperatury w zakresach ograniczonych od dołu odpowiednio wartościami około 0°C , -80°C , -103°C i -95°C (rys.4). Granice zakresów są wyznaczone przez położenie ekstremum danej charakterystyki, które zależy od programowanej częstotliwości i badanego układu.



Rys. 4. Temperaturowe zmiany częstotliwości oscylatora RC względem częstotliwości wzorcowej f_{wosc}

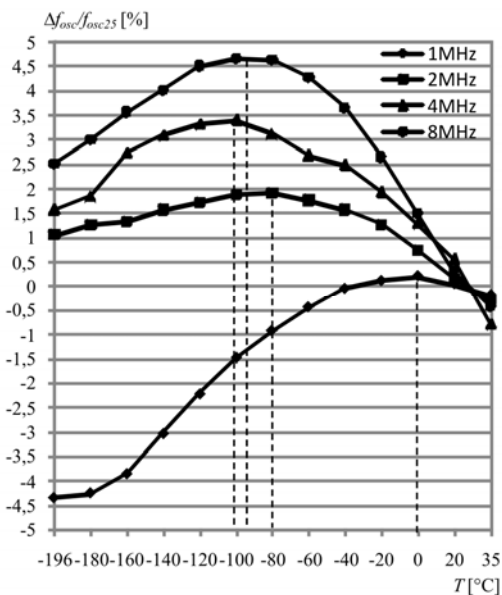
Temperatura określająca położenie ekstremum może być również traktowana jako styk dwóch przylegających podzakresów pomiarowych, które mogą być wykorzystane alternatywnie. W tym kontekście uzyskane doświadczalne wartości 0°C , -80°C , -103°C i -95°C mogą stanowić górne granice zakresów pomiarowych, podczas gdy dolna granica to punkt 77K (-196°C). Wykorzystanie obu podzakresów jednocześnie jest dyskusyjne, ponieważ wymaga nie tylko śledzenia kierunku cieplnych zmian częstotliwości oscylatora, ale i wyłączenia z zakresu pomiarowego otoczenia ekstremum charakterystyki (1), gdzie występuje strefa małej czułości oscylatora na zmiany temperatury otoczenia (rys. 4).

Zależność (1) uwzględnia całościowo nie tylko zmianę częstotliwości oscylatora RC w funkcji temperatury, ale również początkowy rozrzut wartości f_{osc} w temperaturze $T=25^{\circ}\text{C}$. Z tego względu odchylenia częstotliwości oscylatora, przedstawione na rysunku 4 i sięgające poziomu 9% przy zaprogramowaniu nastaw 4MHz i 8MHz, nie oddają właściwej skali zmian sygnału częstotliwościowego w pomiarach temperatury. Ponieważ dla wykorzystania zintegrowanego oscylatora RC jako czujnika temperatury istotne są zmiany częstotliwości f_{osc} względem rzeczywistej częstotliwości początkowej f_{osc25} , mierzonej dla temperatury $T=25^{\circ}\text{C}$, celowe jest wyznaczenie charakterystyk zmian częstotliwości w postaci

$$(2) \quad \frac{\Delta f_{osc}}{f_{osc25}}(T) = \frac{f_{osc}(T) - f_{osc}(25^{\circ}\text{C})}{f_{osc}(25^{\circ}\text{C})}$$

gdzie: f_{osc} – częstotliwość oscylatora, T – temperatura.

Charakterystyki (2) opisują rzeczywiste względne zmiany częstotliwości, zależne od temperatury oscylatora RC. Analiza przebiegu charakterystyk potwierdza ilościową ocenę potencjalnych zakresów pomiarowych, dokonaną na podstawie (1). Ponadto uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że temperaturowe zmiany częstotliwości oscylatora, zachodzące dla programowanych nastaw częstotliwości 1MHz, 2MHz, 4MHz i 8MHz, sięgają odpowiednio -4,3%, 2%, 3,4% i 4,6% (rys. 5). Charakterystyki (1) i (2) są nieliniowe (rys. 4, rys. 5), zatem temperaturowy współczynnik częstotliwości oscylatora RC w mikrokontrolerach ATmega16A zależy od temperatury.



Rys. 5. Temperaturowe zmiany częstotliwości oscylatora RC względem częstotliwości f_{osc25} dla $T = 25^{\circ}\text{C}$

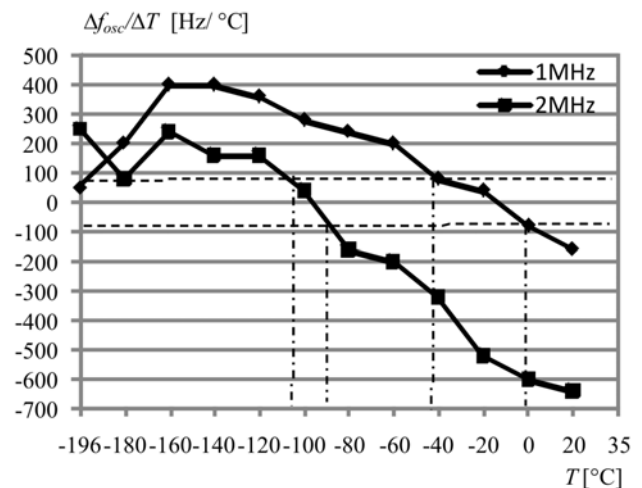
Temperaturowy współczynnik częstotliwości

Wyniki pomiarów częstotliwości oscylatora RC mikrokontrolerów ATmega16A podano dla temperatur, zmienianych co 20°C , w zakresie $-196^{\circ}\text{C} \div +35^{\circ}\text{C}$ (rys. 2). W oparciu o te dane temperaturowy współczynnik częstotliwości wbudowanego oscylatora RC można przyrostowo wyrazić w postaci

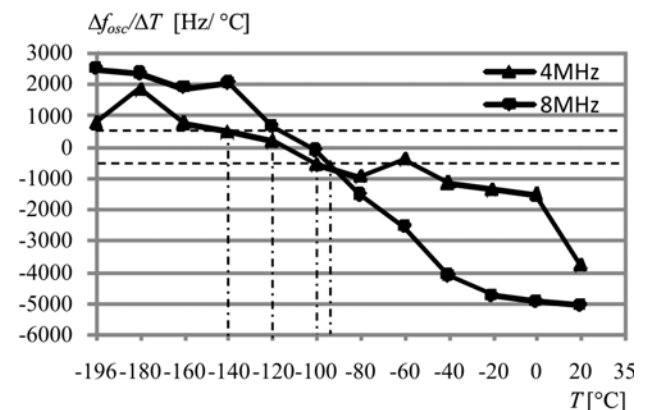
$$(3) \quad \frac{\Delta f_{osc}}{\Delta T}(T) = \frac{f_{osc}(T + 20^{\circ}\text{C}) - f_{osc}(T)}{20^{\circ}\text{C}}$$

gdzie: f_{osc} – częstotliwość oscylatora, T – temperatura.

Wartości współczynnika (3) obliczono dla względnie dużych przyrostów temperatury $\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$. Zależność (3) zmodyfikowano na granicach zakresu pomiarowego (pary temperatur -196°C i -180°C oraz $+20^{\circ}\text{C}$ i $+35^{\circ}\text{C}$, którym odpowiadają przyrosty temperatury $\Delta T = 16^{\circ}\text{C}$ i $\Delta T = 15^{\circ}\text{C}$). Tak wyznaczone charakterystyki temperaturowego współczynnika częstotliwości przyjmują wartości uśrednione w przedziałach ΔT (rys. 6, rys. 7). Uzyskane wyniki obrazują jednak dobrze właściwości opisywanego czujnika temperatury w całym obszarze $-196^{\circ}\text{C} \div +35^{\circ}\text{C}$. Pozwalają też na wskazanie zakresu temperatur, dla którego pomiar częstotliwości sygnału, niosącego informację o wartości temperatury, odbywa się z założoną rozdzielczością.



Rys. 6. Wyniki badań temperaturowego współczynnika częstotliwości dla układu ATmega16A przy ustawieniach programowych $f_{osc} = 1\text{MHz}$ i $f_{osc} = 2\text{MHz}$



Rys. 7. Wyniki badań temperaturowego współczynnika częstotliwości dla układu ATmega16A przy ustawieniach programowych $f_{osc} = 4\text{MHz}$ i $f_{osc} = 8\text{MHz}$

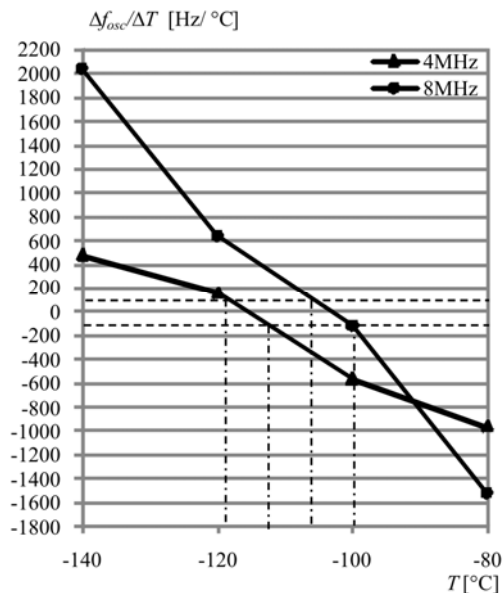
Charakterystyki temperaturowego współczynnika częstotliwości przedstawiono dla czterech badanych mikrokontrolerów, z których każdy został zaprogramowany na inną częstotliwość pracy wewnętrznego oscylatora RC.

W przypadku nastawy 1MHz czujnik może pracować, zachowując współczynnik temperaturowy na poziomie lepszym niż $100\text{Hz}/^{\circ}\text{C}$, w zakresie temperatur $0^{\circ}\text{C} \div +35^{\circ}\text{C}$ lub $-190^{\circ}\text{C} \div -45^{\circ}\text{C}$. Zaprogramowanie 2MHz pozwala na pracę drugiego z czujników w temperaturach $-90^{\circ}\text{C} \div +35^{\circ}\text{C}$ lub $-196^{\circ}\text{C} \div -110^{\circ}\text{C}$, również przy $100\text{Hz}/^{\circ}\text{C}$ (rys. 6).

Nastawa 4MHz daje możliwość pracy kolejnego czujnika, przy współczynniku temperaturowym lepszym niż $500\text{Hz}/^{\circ}\text{C}$, w przedziałach temperatur $-100^{\circ}\text{C} \div +35^{\circ}\text{C}$ lub $-196^{\circ}\text{C} \div -140^{\circ}\text{C}$. Programowy wybór częstotliwości 8MHz

pozwala na pracę ostatniego z omawianych czujników, przy zachowaniu poziomu 500Hz/°C, w zakresie -95°C ÷ +35°C lub -196°C ÷ -120°C (rys. 7).

Wybór nastawy 8MHz i dążenie do dużej rozdzielczości pomiaru częstotliwości sygnału z czujnika są możliwe (rys. 8). Nie rozszerza to jednak znacząco zakresu pomiaru (-100°C ÷ +35°C), nakłada natomiast większe wymagania na pomiar częstotliwości w bloku kontrolera systemu.



Rys. 8. Ocena zakresu pomiaru temperatury dla oscylatora RC przy ustawieniach programowych $f_{osc} = 4\text{MHz}$ i $f_{osc} = 8\text{MHz}$ i współczynnikiem temperaturowym 100Hz/°C

Przetwarzanie sygnału z czujnika przez kontroler systemu

Taktowanie zegarów transmisji szeregowej TWI i SPI zależy od wyboru dystrybuowanej częstotliwości systemu zegarowego mikrokontrolera, w tym od częstotliwości oscylatora RC. Temperaturowe zmiany częstotliwości oscylatora RC przenoszą się więc do zegarów TWI i SPI. Transmisja danych z wykorzystaniem wymienionych interfejsów odbywa się w synchronicznie taktowanych ramach. Bezpośredni pomiar częstotliwości sygnału informacyjnego, wykonywany przez kontroler systemu dla 8-bitowej ramki SPI, byłby obciążony niedopuszczalnym błędem dyskretyzacji. Jednym z możliwych rozwiązań jest pomiar czasu dla spowolnionego zegara transmisji. Ponieważ charakterystyka przejściowa czujnika jest nieliniowa, wskazana jest rezygnacja z drogi obliczeń analitycznych na rzecz wykorzystania tablic, efektywnych przy przetwarzaniu funkcji nieliniowych [11].

Wnioski

Przedstawione w pracy wyniki badań przemawiają za możliwością wykorzystania efektu cieplnej zmiany częstotliwości oscylatora RC, powszechnie stosowanego do taktowania standardowych mikrokontrolerów, do pomiaru niskich temperatur, aż do temperatury ciekłego azotu $T = 77\text{K}$ (-196°C). Ponieważ charakterystyki temperaturowe zintegrowanych z mikrokontrolerami oscylatorów RC wykazują ekstremum, wskazane jest stosowanie proponowanego czujnika w podzakresach rozdzielonych

strefą nieczułości. Położenie strefy nieczułości i szerokość podzakresów można w pewnym stopniu zmieniać, programując nastawę częstotliwości oscylatora.

Czujnik oparty na oscylatorze RC musi być wcześniej indywidualnie zbadany i skalibrowany. Charakterystyki przejściowe czujników są powtarzalne. Względne ciepłe zmiany częstotliwości dla badanych układów przyjmują wartości -4,4%÷+4,6%, a temperaturowe współczynniki częstotliwości mogą wynosić 100Hz/°C. Odpowiednio dokładny pomiar częstotliwości przez kontroler systemu może predestynować czujnik do pomiaru niskich temperatur z dokładnością rzędu kilku °C lub nawet lepszą.

Właściwości proponowanego częstotliwościowego czujnika temperatury i wyniki przeprowadzonej analizy metrologicznej mogą ułatwić korzystne wnikanie bloku akwizycji sygnałów do wnętrza kriostatu i zmniejszenie liczby elementów i połączeń w systemie pomiarowym, a tym samym ułatwienie prowadzenia prac badawczych w niskich temperaturach, w zakresie 77÷300K.

Autor: dr inż. Krzysztof Arnold, Politechnika Poznańska, Wydział Elektroniki i Telekomunikacji, ul. Polanka 3, 60-965 Poznań, E-mail: krzysztof.arnold@put.poznan.pl

Praca finansowana ze środków przyznanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego na działalność statutową w roku 2017.

LITERATURA

- [1] Lebioda M., Rymaszewski J., Korzeniewska E., Applications of second-generation superconducting tapes to produce strong magnetic fields, *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013), nr.12, 265-268
- [2] Lebioda M., Rymaszewski J., Dynamic properties of cryogenic temperature sensors, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (2015), nr.2, 225-227
- [3] ATmega16A, 8-bit AVR microcontroller with 16K Bytes In-System Programmable Flash, Atmel Corporation, 2014
- [4] Baranowski R., Mikrokontrolery AVR ATmega w praktyce, BTC Warszawa, 2005
- [5] Pająkowski J., Pomiar wzmocnienia napięciowego scalonych wzmacniaczy operacyjnych CMOS w zakresie temperatur 4,2 do 300K, *Pomiary Automatyka Kontrola*, vol.54 (2008), nr.6, 371-373
- [6] Pająkowski J., Behavior of light emitting diodes at low temperatures, *Elektronika*, vol.52 (2011), nr.6, 49-51
- [7] Pająkowski J., Praca przetwornika optoelektronicznego TSL250R w niskiej temperaturze, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (2015), nr.12, 284-287
- [8] Michalak S., Behaviour of ATtiny microprocessors at low temperatures, Proceedings of the Twenty-Third International Cryogenic Materials Conference 2010, July 2010, Wrocław, Poland, 581-584
- [9] Arnold K., Properties of internal RC oscillator of ATmega16A structure at low temperatures, Proceedings of the Twenty-Third International Cryogenic Materials Conference 2010, July 2010, Wrocław, Poland, 567-570
- [10] Arnold K., Michalak S., Pająkowski J., Evaluation of self-heating of AVR microcontrollers in low temperatures, Proceedings of the Twenty-Third International Cryogenic Materials Conference 2010, July 2010, Wrocław, Poland, 571-574
- [11] Konopko K., Realizacja nieliniowych metod przetwarzania sygnałów w systemach cyfrowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (2015), nr.1, 77-80