

Wpływ niskich temperatur na czas wykonania operacji w systemach pomiarowych z mikrokontrolerem ATmega16A

Streszczenie. W artykule przedstawiono problem współpracy bloków systemu pomiarowego, poddanych działaniu odmiennych temperatur. Zaprezentowano wyniki badań oscylatora RC mikrokontrolera ATmega16A dla temperatur zmniejszonych do 77 K. Wyznaczono temperaturowe charakterystyki błędu okresu sygnału zegarowego i zmiany czasu wstępnego przetwarzania danych w bloku akwizycji sygnałów. Sformułowano wnioski dotyczące przetwarzania danych przez mikroprocesor ATmega16A w systemach pomiarowych pracujących w niskich temperaturach.

Abstract. The paper presents the co-operation between the blocks of a measurement system that works in different temperatures. There are shown the results of RC oscillator tests for ATmega16A microcontroller with the lowest thermal point at 77 K. Then, the low-temperature characteristics of clock period error and preprocessing time changes are calculated. The author formulates conclusions concerning the data processing in systems working at low temperatures. (*Influence of low temperatures on operation time in measurement systems with ATmega16A microcontroller*).

Słowa kluczowe: niskie temperatury, czas operacji, mikrokontroler, systemy pomiarowe.

Keywords: low temperatures, operation time, microcontroller, measurement systems.

Wstęp

Badania właściwości wielu materiałów oraz struktur półprzewodnikowych, podejmowane w zakresie niskich temperatur, stymulują również pojawianie się w sferze eksperymentów kriogenicznych kolejnych narzędzi pomiarowych, w tym zwłaszcza sensorów i układów kondycjonowania sygnałów. Szczególnie ważne są badania materiałowe, wykonywane w obszarze nadprzewodnictwa, w temperaturach 20 K (-253°C) oraz 90 K ± 110 K (-183°C ÷ -163°C). Specyfika zagadnienia sprawia, że w badaniach tych dominują czujniki temperatury. Podstawowe właściwości kriogenicznych czujników temperatury są opisane, ale kontrola procesów zachodzących w niskich temperaturach może wymagać również odpowiedniego śledzenia w czasie następstw wymuszania zmian temperatury obiektu pomiarowego [1]. Z tego względu prowadzi się badania właściwości dynamicznych czujników temperatury w warunkach kriogenicznych. W ramach tych badań, w kriostacie chłodzonym przez zamknięty obieg helowy, testowano w przedziale 20 K ÷ 120 K (-253°C ÷ -153°C) odpowiedzi impulsowe czujnika rezystancyjnego Pt100 oraz termopar typu E i T [2].

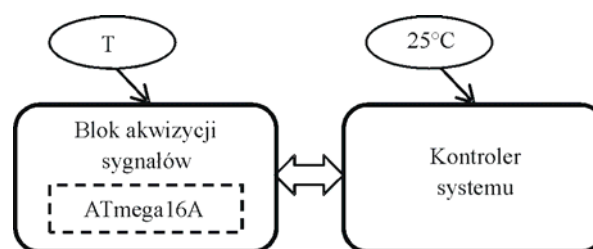
Prowadzenie wielopunktowych pomiarów temperatury poniżej progu 123 K (-150°C) i zwiększanie dokładności tych pomiarów jest możliwe przy ograniczaniu wymiany ciepła między kriostatem a jego otoczeniem, a więc przy zmniejszaniu liczby przepustów i przewodów łączących kriostat z urządzeniami zewnętrznymi [2]. Stanowi to jedną z zalet wprowadzania systemowego bloku akwizycji sygnałów do wnętrza kriostatu. Powodzenie tych działań zależy jednak przede wszystkim od funkcjonowania układów półprzewodnikowych, które wchodzi w skład bloku akwizycji, w zakresie niskich i bardzo niskich temperatur.

Właściwości struktur półprzewodnikowych są w niskich temperaturach zróżnicowane. Tranzystorowe stopnie wzmacniające i wzmacniacze operacyjne, których parametry i charakterystyki są zależne od temperatury, mogą być wykorzystywane do wzmocnienia sygnału, przy korzystnie malejącym z temperaturą poziomie szumów własnych. Prace eksperymentalne, dotyczące wpływu temperatury na napięcie progowe i światłość diod LED, również dowodzą możliwości stosowania tych elementów dla celów sygnalizacji i transmisji sygnałów w przedziale 77 K ÷ 300 K (-196°C ÷ 27°C) [3]. Szczególnie istotne dla umiejscawiania bloku akwizycji sygnałów w obrębie kriostatu są badania właściwości układów mikroprocesorowych w niskich temperaturach [4, 5].

Wyniki badań, wykonanych w komputerowym systemie pomiarowym [3, 5], wskazują na możliwość wprowadzania mikrokontrolerów do wnętrza kriostatu oraz przejmowania przez nie zadań sterujących, pomiarowych i obliczeniowych w bloku akwizycji sygnałów. Ponieważ jednak częstotliwość zegarowa mikrokontrolera zmienia się z temperaturą [5], zmianie ulegają też czasy obsługi czujników, przetwarzania danych i transferu wyników do nadrzędnego procesora lub komputera. Z tego względu celowe jest podjęcie dyskusji na temat konsekwencji zmian szybkości działania mikrokontrolerów w funkcji temperatury.

Warunki pracy mikrokontrolera w bloku akwizycji sygnałów

Badania wykazały, że standardowe i często stosowane mikroprocesory z rdzeniem AVR, przeznaczone do pracy w przedziale -40°C ÷ 85°C [4] lub -55°C ÷ 125°C [6] oraz odporne na uszkodzenia cieplne w granicach -65°C ÷ 150°C [6], mogą funkcjonować w szerszym niż nominalny zakresie temperatur [4, 5]. Pozwala to na wbudowanie ich do bloku akwizycji sygnałów, poddawanego działaniu niskiej temperatury, implikując jednocześnie oddalenie lokalnego procesora w bloku akwizycji od kontrolera systemu i duże zróżnicowanie temperatur pracy obu bloków (rys. 1).



Rys. 1. Warunki pracy bloków systemu pomiarowego

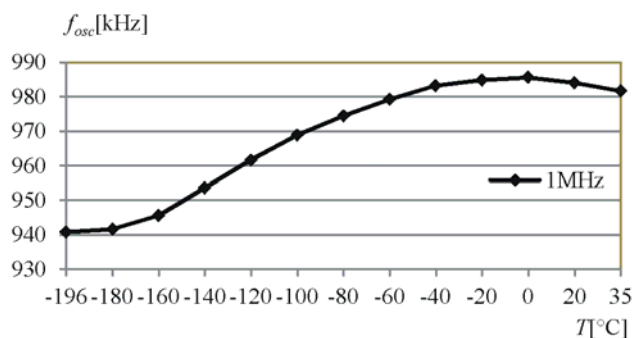
Zapewnienie szerokiego temperaturowego zakresu pracy mikrokontrolera, sięgającego do punktu 77 K (temperatura ciekłego azotu), jest możliwe dzięki dystrybucji sygnału zegarowego z wewnętrznego oscylatora RC. Wykorzystanie zintegrowanego oscylatora zmniejsza przy tym stopień złożoności układowej bloku akwizycji. Częstotliwość pracy oscylatora zmienia się jednak znacząco z temperaturą. Przy dużej różnicy temperatur między blokiem akwizycji sygnałów i kontrolerem systemu czas wykonania zadań przez lokalny procesor, rezydujący

w bloku akwizycji, może znacznie odbiegać od czasu szacowanego dla 25°C. Dotyczy to kolejno pozyskiwania informacji z czujników pomiarowych, wstępnego przetwarzania danych i komunikacji z kontrolerem systemu. Operacje te mogą być wykonywane w czasie własnym lokalnego mikrokontrolera, zależnym od temperatury, a ich kontynuowanie/zakończenie zgłaszane sygnałem zajętości/gotowości. Wykonanie zadań może się też odbywać na żądanie kontrolera systemu, jeśli interwał czasowy między żądaniami uwzględnia maksymalne wydłużenie czasu operacji po stronie bloku akwizycji sygnałów. Dotyczy to zwłaszcza wstępnego przetwarzania danych. W obu wymienionych przypadkach rejestracja znaczników czasowych przy wynikach pomiarów powinna opierać się o czas kontrolera systemu.

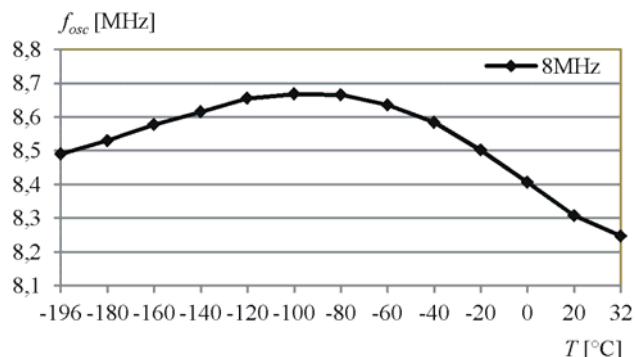
Skutki temperaturowych zmian czasu operacji można całkowicie ominąć, radykalnie przyspieszając przetwarzanie danych w bloku akwizycji sygnałów z wykorzystaniem równoległego wykonywania zadań [7]. Jako alternatywa dla pojedynczego standardowego mikrokontrolera jest to jednak nadmiarowe rozwiązanie, wymagające też innych nakładów sprzętowych.

Właściwości cieplne oscylatora RC dla mikrokontrolera ATmega16A

Procesor ATmega16A jest 8-bitowym mikrokontrolerem z rdzeniem AVR, który wyposażono w pamięci Flash, SRAM i EEPROM, wszystkie podstawowe moduły peryferyjne oraz cztery 8-bitowe porty wejścia/wyjścia. Wewnętrzny oscylator RC mikrokontrolera zaprojektowano z optymalizacją dla wybieranych programowo częstotliwości 1 MHz, 2 MHz, 4 MHz i 8 MHz [6, 8]. Rzeczywiste wartości częstotliwości oscylatora f_{osc} mogą w temperaturze $T = 25^\circ\text{C}$ posiadać rozrzut względem wartości zadanej (rys. 2, 3).



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



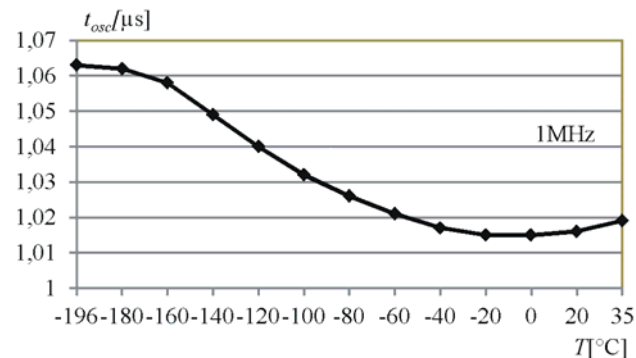
Rys. 3. Wyniki badań częstotliwości oscylatora RC dla układu ATmega16A przy ustawieniu programowym 8 MHz

Przeprowadzone badania wykazały, że oscylator taktuje rdzeń układu ATmega16A również w zakresie niskich temperatur, do temperatury ciekłego azotu włącznie [5].

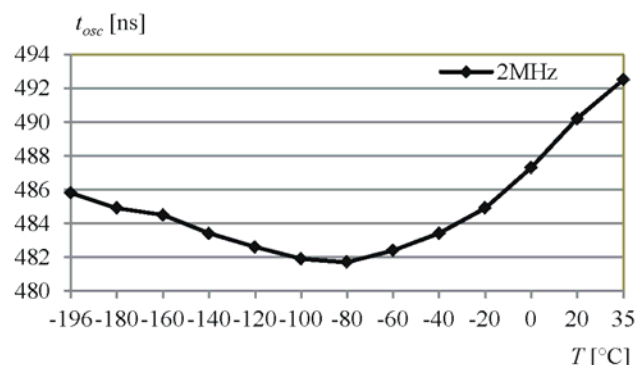
Struktura ATmega16A może więc pracować znacznie poniżej nominalnego przedziału $-55^\circ\text{C} \div 125^\circ\text{C}$, ale temperaturowe zmiany częstotliwości oscylatora (rys. 2, 3) wpływają na szybkość pracy modułów procesora i czas wykonywania instrukcji.

Temperaturowy dryft cyklu zegarowego

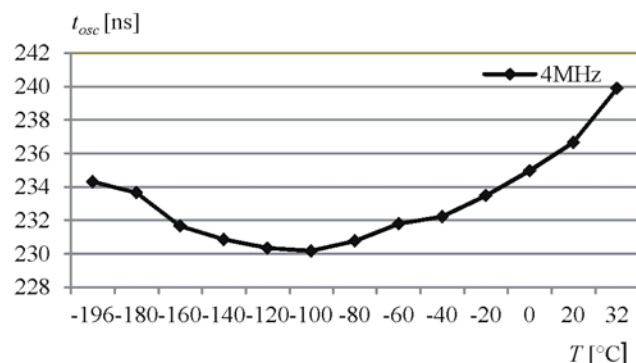
Wyniki pomiarów częstotliwości oscylatora RC, zintegrowanego w układach ATmega16A, pozwoliły na wyznaczenie zależności okresu zegara taktującego procesor od temperatury. Na rysunkach 4, 5, 6 i 7 przedstawiono temperaturowe charakterystyki czasu trwania cyklu zegarowego t_{osc} dla czterech badanych mikrokontrolerów. Temperaturę pracy testowanych układów obniżano podczas eksperymentu do punktu $T = 77\text{ K}$ (-196°C , temperatura ciekłego azotu).



Rys. 4. Wyniki badań taktu zegarowego dla układu ATmega16A przy ustawieniu programowym $f_{osc} = 1\text{ MHz}$



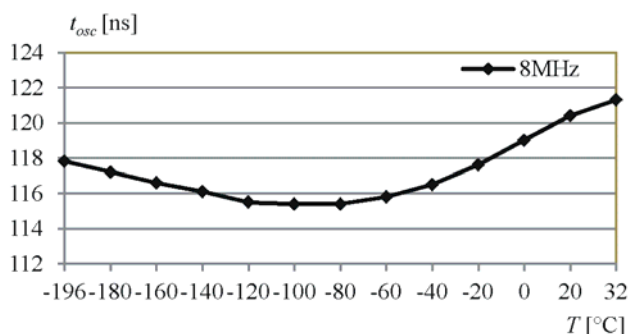
Rys. 5. Wyniki badań taktu zegarowego dla układu ATmega16A przy ustawieniu programowym $f_{osc} = 2\text{ MHz}$



Rys. 6. Wyniki badań taktu zegarowego dla układu ATmega16A przy ustawieniu programowym $f_{osc} = 4\text{ MHz}$

Przy dystrybucji sygnału zegarowego mikrokontrolerów z wewnętrznego oscylatora RC znaczny spadek temperatury może spowodować tak wydłużenie (rys. 4), jak i skrócenie (rys. 5, 6, 7) cyklu zegara. Charakterystyki

okresu taktowania badanych układów są nieliniowe i mają lokalne minimum (maksimum), które przy programowaniu większej wartości początkowej częstotliwości oscylatora przesuwają się w stronę niskich temperatur (rys. 4, 5, 6, 7).



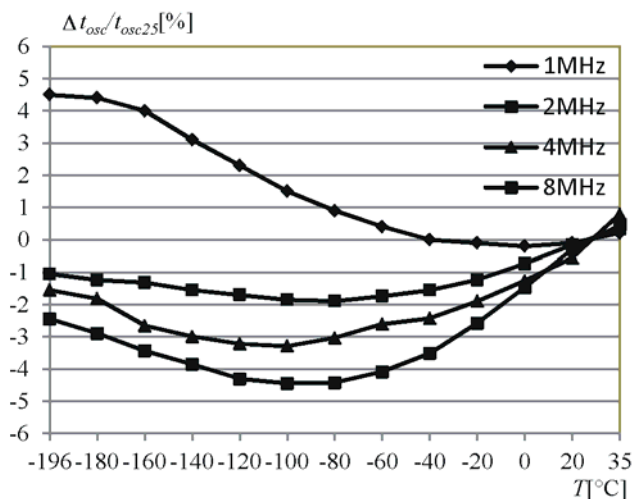
Rys. 7. Wyniki badań taktu zegarowego dla układu ATmega16A przy ustawieniu programowym $f_{osc} = 8$ MHz

Taktowanie standardowych i znajdujących wiele zastosowań mikrokontrolerów ATmega szybkim sygnałem zegarowym o częstotliwościach 1, 2, 4 i 8 MHz [8] sprawia, że temperaturowe zmiany pojedynczego taktu zegara, wyrażane jako błąd bezwzględny, przyjmują małe wartości czasowe. Aby lepiej ocenić zmiany, widoczne na rysunkach 4 - 7, odchyłki okresu zegara można przedstawić w postaci błędu względnego

$$(1) \quad \frac{\Delta t_{osc}}{t_{osc25}}(T) = \frac{t_{osc}(T) - t_{osc}(25^{\circ}\text{C})}{t_{osc}(25^{\circ}\text{C})}$$

gdzie: t_{osc} – okres sygnału zegarowego, T – temperatura.

Na rysunku 8 przedstawiono charakterystyki względnego błędu okresu sygnału zegarowego, wyznaczone dla czterech badanych mikrokontrolerów, z których każdy został zaprogramowany na inną częstotliwość pracy wewnętrznego oscylatora RC.



Rys. 8. Błąd względny okresu sygnału zegarowego dla układów ATmega16A przy ustawieniach programowych $f_{osc} = 1, 2, 4, 8$ MHz

Prezentowane charakterystyki wykazują, że względny błąd okresu zegara dla układu z ustawieniem początkowym 1 MHz sięga 4,5% (wydłużenie cyklu zegarowego), podczas gdy w pozostałych przypadkach błędy dochodzą do -4,4% (skrócenie cyklu zegarowego). Wartości te nie ujawniają jeszcze pełnej skali problemu. Wynika to z faktu, że charakterystyki wyznaczone na podstawie definicji (1) dobrze opisują temperaturowe zmiany właściwości oscylatorów dla poszczególnych układów, ale jednocześnie nie zawierają informacji o rozrzucie początkowych wartości

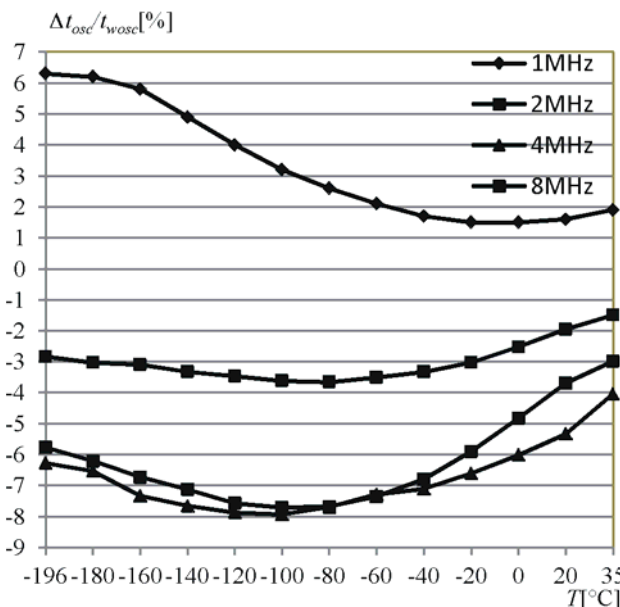
częstotliwości oscylatora dla danego ustawienia. Oznacza to, że różnica czasów trwania cyklu zegarowego między mikrokontrolerem pracującym w bloku akwizycji sygnałów, w zakresie niskich temperatur, a procesorem tego samego typu, pracującym w temperaturze 25°C, może być większa, niż wynika to z danych przedstawionych na rysunku 8.

Rzeczywistą różnicę między taktami zegarowymi współpracujących układów można lepiej oszacować, definiując błąd w odniesieniu do wzorcowego okresu sygnałów zegarowych 1, 2, 4 i 8 MHz. Temperaturowy błąd względny przyjmuje wówczas postać

$$(2) \quad \frac{\Delta t_{osc}}{t_{wosc}}(T) = \frac{t_{osc}(T) - t_{wosc}}{t_{wosc}}$$

gdzie: t_{osc} – okres sygnału zegarowego, t_{wosc} – okres wzorcowy w temperaturze 25°C, T – temperatura.

Na rysunku 9 przedstawiono charakterystyki względnego błędu okresu sygnału zegarowego dla czterech mikrokontrolerów, wyznaczone z zależności (2). Ujawniają one pojawianie się błędów nawet w zakresie -7,9% ÷ 6,3%.



Rys. 9. Błąd względny okresu sygnału zegarowego dla układów ATmega16A przy odniesieniu do cykli wzorcowych

Czasowe uwarunkowania wstępnego przetwarzania danych w bloku akwizycji sygnałów

Przedstawione charakterystyki błędów (rys. 8, 9) dowodzą, że podstawowe parametry dynamiczne mikrokontrolerów ulegają istotnym zmianom w zakresie niskich temperatur. Ponieważ poszczególne instrukcje mikrokontrolera wykonywane są w jednym lub kilku taktach zegara [6, 8], wyznaczone według zależności (1) lub (2) poziomy błędów względnych obowiązują też dla czasów wykonywania programu

$$(3) \quad t = n \times t_{osc}(T)$$

gdzie: n – liczba taktów zegara, t_{osc} – okres sygnału zegarowego, T – temperatura.

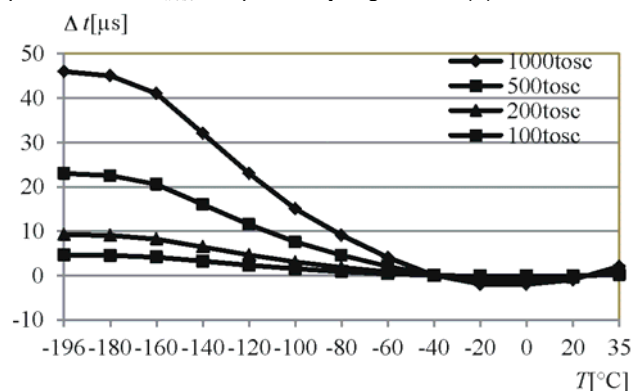
Charakterystyki (1) mogą być bezpośrednio stosowane w przypadku współpracy dwóch procesorów o jednakowych lub podobnych początkowych częstotliwościach zegarowych, z których jeden rezyduje w bloku akwizycji sygnałów i podlega oddziaływaniu niskich temperatur, drugi

natomiast utrzymuje parametry w stałej temperaturze 25°C. Charakterystyki (2) odnoszą się do sytuacji, gdy częstotliwości początkowe różnią się już w temperaturze 25°C. Zwykle procesory w blokach systemu i ich częstotliwości zegarowe dobierane są do wymagań projektu. Zależność (2) może być wówczas wykorzystana do wyznaczenia temperaturowych zmian czasu wykonania programu względem ustalonej wartości początkowej.

Temperaturowy dryft czasu trwania cyklu zegarowego ma wpływ na wszystkie zadania wykonywane przez mikrokontroler w bloku akwizycji sygnałów, ale jego skutki są różne dla odczytu informacji z czujników pomiarowych, wstępnego przetwarzania danych oraz ich transferu do kontrolera systemu. Ponieważ błędy (1) i (2), wyznaczone na podstawie danych eksperymentalnych, nie przekroczyły wartości 10 % (rys. 8, 9), zmiany czasu obsługi czujników temperatury można uznać za mało istotne. Nie można tego powiedzieć o wstępnym przetwarzaniu danych, gdyż zmiana czasu wykonania programu dotyczy tu większych wymagań czasowych i większych plików, a ponadto jest zależna od ich pojemności. Natomiast wpływ zmian cyklu zegara na komunikację z kontrolerem systemu zależy od rodzaju transmisji. Przy często stosowanej transmisji szeregowej asynchronicznej dopuszczalna zmiana szybkości transmisji po jednej stronie łącza nie może przekroczyć poziomu 2 % [6]. Transmisja synchroniczna master/slave wyklucza efekt niedopasowania szybkości, ale nie eliminuje zmian czasu wykonania podprogramów obsługi przerw w bloku akwizycji.

W każdym przypadku cykle zegarowe po stronie bloku akwizycji sygnałów podlegają zmianom temperaturowym, które mogą tak przyspieszyć (rys. 4), jak i opóźnić (rys. 5, 6, 7) wykonanie programu. Efekty te są widoczne zwłaszcza dla programów wymagających przejścia wielu taktów zegara. Dotyczy to więc w szczególności algorytmów wstępnego przetwarzania danych, zwłaszcza w kontekście tendencji do przekazywania takich zadań mikrokontrolerom, lokowanym w systemowych blokach akwizycji.

Na rysunku 10 przedstawiono wyniki ilościowej oceny zmian czasu wykonania programów Δt dla mikrokontrolera pracującego z nominalnym ustawieniem $f_{osc} = 1\text{MHz}$. Zmniejszenie temperatury do punktu 77 K powoduje spowolnienie ciągu rozkazów, realizowanych z udziałem 1000 taktów sygnału zegarowego, o 46 μs . Wartość ta została wyznaczona w oparciu o definicję (1). Opóźnienie ulega zwiększeniu do 63 μs , jeśli jest szacowane przez porównanie z $t_{wosc} = 1 \mu\text{s}$, a więc zgodnie z (2).



Rys. 10. Temperaturowe zmiany czasu wykonania programów obejmujących 100, 200, 500 i 1000 taktów zegara dla układu ATmega16A przy ustawieniu programowym $f_{osc} = 1\text{MHz}$

Wyznaczonym opóźnieniom odpowiada do kilkaset linii kodu, napisanych w języku assemblera. Oznacza to, że przy zgłaszaniu wykonania zadania przez blok akwizycji, pracujący w zaleźnym od temperatury czasie własnym,

trzeba z góry założyć możliwość opóźnień w splywaniu raportów, natomiast przy odpowiedziach bloku akwizycji udzielanych w trybie „na żądanie” należy zapewnić odpowiedni interwał czasowy między żądaniami wyników.

Wnioski

Mikrokontroler ulokowany w bloku akwizycji sygnałów pracuje w zaleźnym od temperatury czasie własnym, co implikuje kilka problemów. Dotyczą one poprawności transmisji danych między blokami oraz zmian czasu wykonania programów, zwłaszcza w zakresie wstępnego przetwarzania danych.

Przedstawione w pracy wyniki eksperymentów pozwalają na oszacowanie względnych temperaturowych błędów czasu trwania cyklu zegarowego i czasu wykonania programu. W zaleźności od rozrzutu początkowych częstotliwości oscylatora może wystąpić tak przyspieszenie, jak i wydłużenie wykonywania operacji.

Wyznaczone na podstawie danych pomiarowych błędy mieszczą się w granicach $-4,4\% \div 4,5\%$ oraz $-7,9\% \div 6,3\%$, odpowiednio w odniesieniu do własnego cyklu zegara i do cyklu nominalnego w temperaturze 25°C. Taki zakres zmienności czasu przetwarzania danych powinien być brany pod uwagę przy określaniu czasowych zasad współpracy bloku akwizycji z kontrolerem systemu.

Wyniki przeprowadzonej analizy metrologicznej ułatwiają projektowanie i uruchamianie systemów pomiarowych, przeznaczonych do prowadzenia prac badawczych w zakresie 77 K \div 300 K ($-196^\circ\text{C} \div 27^\circ\text{C}$). Są przydatne do szacowania maksymalnych czasów wykonania programów w warunkach zgłaszania gotowości lub wywołania na żądanie, w zaleźności od rodzaju współpracy między blokami systemu.

Praca finansowana ze środków przyznanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego na działalność statutową w roku 2015 w ramach zadania 08/83/DSPB/4714.

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] Pająkowski J., High efficiency light emitting diodes in low temperatures, *Proceedings of the Twenty-Third International Cryogenic Materials Conference 2010*, July 2010, Wrocław, Poland, 91-593
- [4] 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
- [5] 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
- [6] ATmega16A, 8-bit AVR microcontroller with 16K Bytes In-System Programmable Flash, Atmel Corporation, (2008)
- [7] Kamińska A., Bielecki W., Model for the estimation of the execution time of parallel program loops, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr.2, 125-127
- [8] Baranowski R., Mikrokontrolery AVR ATmega w praktyce, BTC Warszawa, (2005)

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