

**Krzysztof ARNOLD**

POLITECHNIKA POZNAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTRONIKI I TELEKOMUNIKACJI,  
ul. Polanka 3, 60-965 Poznań

## Wpływ niskich temperatur na szeregową transmisję danych w systemach pomiarowych z mikrokontrolerem ATmega16A

Dr inż. Krzysztof ARNOLD

Absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Gdańskiej. Pracuje jako adiunkt w Katedrze Systemów Telekomunikacyjnych i Optoelektroniki na Wydziale Elektroniki i Telekomunikacji Politechniki Poznańskiej. W pracy naukowej zajmuje się problemami pomiarów charakterystyk i parametrów sygnałów stochastycznych, tematyką akwizycji danych w systemach pomiarowych oraz zagadnieniami projektowania, diagnostyki i rozwoju mikroprocesorowych systemów pomiarowych.



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

### Streszczenie

W pracy opisano problem cieplnych zmian szybkości transmisji szeregowej w bloku akwizycji danych systemu pomiarowego. Zaprezentowano wyniki badań oscylatora RC mikrokontrolera ATmega16A dla temperatur zmniejszanych do 77 K. Przedstawiono charakterystyki współczynnika dopasowania szybkości transmisji asynchronicznej oraz charakterystyki częstotliwości zegarowych i czasów transferu danych dla transmisji synchronicznej w systemach pomiarowych z układem ATmega16A, pracujących w zakresie niskich temperatur.

**Słowa kluczowe:** systemy pomiarowe, transmisja szeregowa, dryft temperaturowy, blok akwizycji danych.

### The influence of low temperatures on serial data transmission in measurement systems with ATmega16A microcontroller

#### Abstract

The paper presents a problem of the serial transmission between blocks of measurement system that works at different temperature ranges. There is also discussed the communication of system controller with ATmega16A device within data acquisition path (Fig. 1). In the paper the results of clock signal frequency tests conducted for internal RC oscillator of ATmega16A microcontroller at low temperatures with the lowest point at 77 K, are also presented (Fig. 2). Here are also considered conditions of effective asynchronous data transmission when USART module of ATmega16A microcontroller is used, because the USART internal baud rate clock depends on the temperature drift of internal RC oscillator. There are calculated characteristics of baud rate matching coefficient and achieved results are compared with total error and recommended receiver error defined for ATmega16A USART module (Fig. 3, 4). In the paper, the low-temperature characteristics of serial clock frequency (Fig. 5) and byte transmission time (Fig. 6) in SPI module of ATmega16A microcontroller are also presented. Moreover, there are shown the low-temperature characteristics of changes of serial clock frequency (Fig. 7) and data transmission time (Fig. 8) in TWI module of ATmega16A microcontroller. The author formulates conclusions concerning the clocking and the asynchronous and synchronous operational range of USART, SPI and TWI modules of ATmega16A microcontroller on measurement systems working at low temperatures.

**Keywords:** measurement systems, serial transmission, temperature drift, DAQ path.

### 1. Wstęp

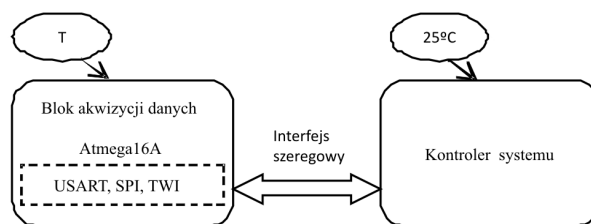
Pozyskiwanie i wstępne przetwarzanie badanych sygnałów w bloku akwizycji danych systemu pomiarowego odbywa się zwykle z wykorzystaniem lokalnego mikrokontrolera i przejęciem zadań sterujących i pomiarowych przez jego zasoby. W mniej złożonych systemach mikrokontrolery pełnią też często funkcje jednostek centralnych. Postępująca integracja zasobów przyczynia się do poprawy właściwości metrologicznych systemów pomiaro-

wych, ale rozwój struktur wbudowanych w naturalny sposób nie obejmuje systemów, których bloki są z konieczności terytorialnie rozproszone. Dotyczy to między innymi prowadzenia pomiarów w zakresie niskich i bardzo niskich temperatur, gdy blok akwizycji danych często musi być oddalony od kontrolera systemu i poddany działaniu niskiej temperatury.

Odrębne umiejscowienie bloków systemu wymaga zapewnienia prawidłowej komunikacji między nimi. Do najczęściej spotykanych rozwiązań należy w tym względzie wykorzystanie asynchronicznej lub synchronicznej szeregowej transmisji przewodowej. Tak czujniki inteligentne, jak i mikrokontrolery rezydujące w blokach akwizycji danych, są standardowo wyposażone w jeden lub kilka interfejsów cyfrowych [1, 2, 3]. Dotyczy to również układów z rdzeniem AVR, posiadających wbudowane moduły USART, SPI i TWI, które mogą korzystać z wewnętrznego oscylatora RC [1]. Badania wykazały, że działa on nawet w niskich temperaturach, wykraczających poza nominalny zakres pracy [4]. Wpływ temperatury na mikrokontroler umieszczony w bloku akwizycji danych może jednak sprawić, że przyjęte dla niego parametry transmisji ulegną zmianie. W tym kontekście celowe jest podjęcie próby oceny następstw dryftu termicznego szybkości transmisji danych w bloku akwizycji na poprawność ich odbioru w bloku kontrolera systemu pomiarowego.

### 2. Transmisja szeregowa z wykorzystaniem mikrokontrolera ATmega16A

Przejęcie funkcji kontrolnych i pomiarowych w bloku akwizycji danych przez układy takie jak ATmega16A otwiera możliwość korzystania z trzech szeregowych interfejsów (rys. 1). Moduł USART zapewnia przede wszystkim asynchroniczną komunikację zarówno z innym mikrokontrolerem, jak i komputerem PC, w standardzie RS232C [1, 2]. Pozwala to na uzyskanie dużej odporności na zakłócenia, przy zasięgu łącza do 15 m (z pętlą prądową do kilkuset metrów) [5]. Przy współpracy z komputerem PC stosowana jest konwersja RS232/USB. Zbyt duże zmiany temperatury w bloku akwizycji danych mogą jednak spowodować niedopasowanie szybkości transmisji po obu stronach łącza i zagrożenie poprawności transferu danych do kontrolera systemu.



Yrs. 1. Schemat funkcjonalny połączenia bloku akwizycji danych z kontrolerem systemu pomiarowego

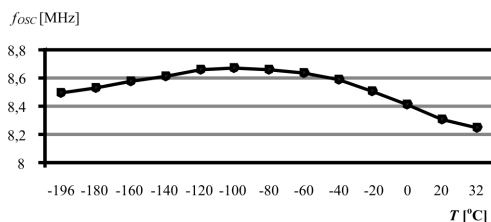
Fig. 1. Functional diagram of DAQ - system controller communication

Moduł SPI wspiera szybką transmisję synchroniczną, z sygnałem zegarowym SCK generowanym przez układ Master [1, 2]. Interfejs SPI jest powszechnie wykorzystywany w łączności między mikrokontrolerami lub mikrokontrolerem i innym układem, takim jak przetwornik c/a czy układ FPGA [6]. Transmisja jest prowadzona dla niewielkich odległości. Przekazywanie sygnału zegarowego do układu Slave sprawia, że temperaturowe zmiany szybkości transmisji są zgodne po obu stronach łącza. Ciepłe przyspieszenie napływu danych do odbiorcy może jednak spowodować, że określony programowo czas ich przyjęcia lub przetwarzania okaże się za długi.

Moduł TWI obsługuje zgodną ze standardem I<sup>2</sup>C dwuliniową transmisję synchroniczną [1, 2]. Dane są przekazywane dwukierunkową linią SDA, a sygnał zegarowy o częstotliwości do 400 kHz linią SCL. Mikrokontroler ATmega16a może jako Master operować 7-bitowymi adresami układów Slave. Komunikacja dotyczy niewielkich odległości, a temperaturowy dryft szybkości transmisji synchronicznej nie zagraża poprawności transmisji, może natomiast spowodować nadpisanie i utratę danych.

### 3. Właściwości temperaturowe oscylatora RC w układzie ATmega16A

Wbudowany oscylator RC mikrokontrolera ATmega16A jest optymalizowany i programowany dla wartości 1 MHz, 2 MHz, 4 MHz lub 8 MHz [1]. Rzeczywiste częstotliwości pracy oscylatorów mogą jednak już w temperaturze 25°C wykazywać rozrzut względem wartości zadanej. Badania wykazały, że oscylator RC taktuje rdzeń układu ATmega16A również w zakresie niskich temperatur, do temperatury 77 K włącznie [4]. Struktura ATmega16A może więc funkcjonować znacznie poniżej nominalnego przedziału -55°C÷125°C, ale temperaturowe zmiany częstotliwości oscylatora (rys. 2) wpływają na szybkość pracy modułów procesora, w tym także, zgodnie z (1), na szybkość transmisji danych pomiarowych, przesyłanych do kontrolera systemu.



Rys. 2. Wyniki badań częstotliwości oscylatora RC w mikrokontrolerze ATmega16A dla wartości początkowej 8 MHz

Fig. 2. Experimental results of the RC oscillator of ATmega16A microcontroller for initial value 8 MHz

### 4. Ciepne zmiany szybkości transmisji dla modułu USART

Szybkość transmisji prowadzonej przez wbudowane do mikrokontrolerów ATmega16A moduły USART jest funkcją częstotliwości oscylatora  $f_{OSC}$  i współczynnika podziału częstotliwości  $UBRR$ . W trybie pracy Asynchronous Normal Speed, szybkość  $B$  jest wyrażana w bitach na sekundę i dana wzorem [1]:

$$B = \frac{f_{OSC}}{16 \cdot (UBRR + 1)} \quad (1)$$

W transmisji między blokami systemu szybkość nadawania  $B_N$  i szybkość odbioru  $B_O$  powinny być jednakowe lub odpowiednio zbliżone [1]. Miarą odchylenia szybkości nadawcy i odbiorcy jest współczynnik dopasowania:

$$R = \frac{B_N}{B_O} \cdot 100\% \quad (2)$$

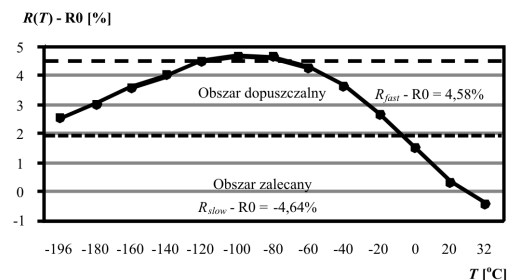
Dla identycznych szybkości  $B_N$  i  $B_O$  współczynnik dopasowania wynosi 100% i jest oznaczany jako R0. Maksymalna wartość  $R_{fast}$  i minimalna wartość  $R_{slow}$  współczynnika (2) określają przedział, w którym mimo niedopasowania szybkości nadajnika i odbiornika możliwy jest poprawny transfer informacji. Dla 8-bitowego słowa danych zalecany obszar niedopasowania wynosi  $\pm 2\%$  [1].

Zmiany temperatury wpływają na szybkość nadawania znaków przez moduł USART mikrokontrolera ATmega16A w bloku akwizycji danych, podczas gdy kontroler systemu pracuje przy

względnie stabilnej temperaturze otoczenia, co pozwala na utrzymanie ustalonej szybkości odbioru. Warunki przekazywania wyników pomiaru do kontrolera systemu można więc ująć w postaci:

$$R_N(T) = \frac{B_N(T)}{B_O(25^\circ C)} \cdot 100\% \quad (3)$$

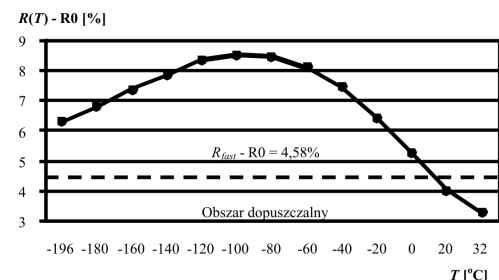
Jeśli mikroprocesor w bloku akwizycji danych komunikuje się w temperaturze 25°C z układem o podobnych właściwościach, umieszczonym w bloku kontrolera, wówczas współczynnik (3) przyjmuje małą wartość początkową [7]. Dzięki temu dopiero duże zmiany temperatury bloku akwizycji powodują znaczące odstrojenie jego szybkości transmisji od szybkości kontrolera. W takim przypadku transmisja może przebiegać prawidłowo w szerokim zakresie temperatur (rys. 3).



Rys. 3. Współczynnik dopasowania szybkości transmisji dla pary mikrokontrolerów ATmega16A, nastawa  $f_{OSC}=8$  MHz,  $B_N(T)=var$ ,  $B_O=2488$  bps

Fig. 3. Baud rate matching coefficient for a pair of ATmega16A microcontrollers, initial value  $f_{OSC}=8$  MHz,  $B_N(T)=var$ ,  $B_O=2488$  bps

W przypadku komunikacji mikroprocesora ze standardowym urządzeniem DTE różnica szybkości transmisji występujących po przeciwnych stronach łącza już w temperaturze 25°C może być znacząca, a zmiana temperatury bloku akwizycji jeszcze ją zwiększa [7]. W tej sytuacji charakterystyki współczynnika (3) mogą niekiedy całkowicie wykraczać poza obszar zalecany (rys. 4).



Rys. 4. Współczynnik dopasowania szybkości transmisji dla mikrokontrolera ATmega16A i urządzenia DTE, nastawa  $f_{OSC}=8$  MHz,  $B_N(T)=var$ ,  $B_O=2400$  bps

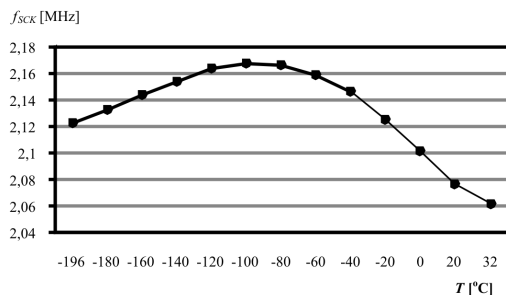
Fig. 4. Baud rate matching coefficient for ATmega16A microcontroller and DTE unit, initial value  $f_{OSC}=8$  MHz,  $B_N(T)=var$ ,  $B_O=2400$  bps

### 5. Ciepne zmiany szybkości transmisji dla modułu SPI

W zakresie niskich temperatur moduł SPI mikrokontrolera ATmega16A może jako układ Slave przyjmować sygnał zegarowy SCK generowany przez kontroler systemu lub jako Master korzystać z wbudowanego oscylatora RC, wystawiając sygnał SCK.

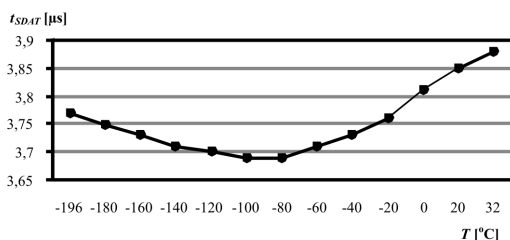
W pierwszym przypadku transfer każdego bajtu danych z bloku akwizycji rozpoczyna się na żądanie kontrolera, mającego status układu Master. Kontroler arbitralnie określa momenty pobrania wyników pomiaru, które muszą być z wyprzedzeniem czasowym wprowadzane do bufora nadawczego w rejestrze SPDR układu ATmega16A, nadzorującego blok akwizycji danych. Częstotliwość sygnału zegarowego SCK jest w tym rozwiązaniu ustalana przez kontroler systemu i tym samym nie zależy od warunków cieplnych, panujących w bloku akwizycji danych.

W drugim przypadku moduł SPI dysponuje jako Master sygnałem zegarowym SCK i określa momenty przekazania wyników pomiaru do kontrolera systemu. Częstotliwość  $f_{SCK}$  zegara SCK jest przy tym zależna od częstotliwości oscylatora RC, a więc pośrednio od temperatury (rys. 5). Zmniejszanie temperatury powoduje najpierw przyspieszenie transmisji i skrócenie czasu transferu bajtu danych  $t_{SDAT}$  na poziomie 4,6% (rys. 6). Może to spowodować nadpisanie i utratę danych w buforze odbiorczym kontrolera systemu.



Rys. 5. Częstotliwość zegara SPI dla mikrokontrolera ATmega16A z wewnętrznym oscylatorem RC przy wartości początkowej 8 MHz i dzielniku 4

Fig. 5. Serial clock frequency in SPI for ATmega16A microcontroller with an internal RC oscillator at 8 MHz initial value and divider 4

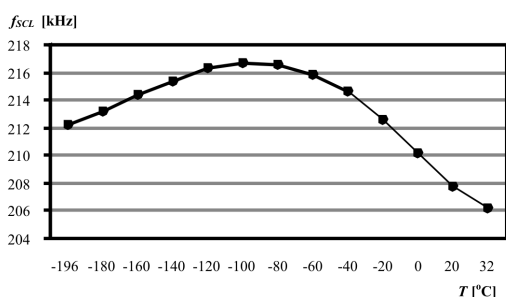


Rys. 6. Czas transmisji bajtu w łączu SPI dla mikrokontrolera ATmega16A z wewnętrznym oscylatorem RC przy wartości początkowej 8 MHz i dzielniku 4

Fig. 6. Byte transmission time in SPI for ATmega16A microcontroller with an internal RC oscillator at 8 MHz initial value and divider 4

## 6. Ciepne zmiany szybkości transmisji dla modułu TWI

Moduł TWI mikrokontrolera ATmega16A może pracować w trybach Slave lub Master [1, 2]. Jako układ Slave jest taktowany stabilnym zegarem transmisji SCL przez kontroler systemu.



Rys. 7. Częstotliwość zegara TWI dla mikrokontrolera ATmega16A z wewnętrznym oscylatorem RC przy wartości początkowej 8 MHz i TWBR = 3

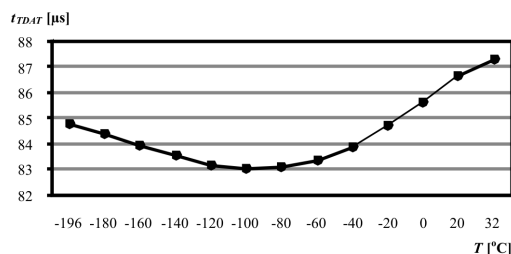
Fig. 7. Serial clock frequency in TWI for ATmega16A microcontroller with an internal RC oscillator at 8 MHz initial value and TWBR = 3

Transfer danych z bloku akwizycji rozpoczyna się więc na żądania kontrolera. Natomiast w trybie Master moduł TWI generuje sygnał zegarowy SCL i wyznacza momenty przekazania wyników pomiaru do kontrolera systemu. Częstotliwość  $f_{SCL}$

zegara SCL jest wówczas funkcją częstotliwości  $f_{OSC}$  oraz nastaw  $TWBR$  i  $TWPS$  w rejestrach mikroprocesora ATmega16A [1]:

$$f_{SCL} = \frac{f_{OSC}}{16 + 2 \cdot (TWBR) \cdot 4^{TWPS}} \quad (4)$$

Z tego względu częstotliwość  $f_{SCL}$  i czas transmisji adresu i danej  $t_{TDAT}$  także zależą od temperatury w bloku akwizycji (rys. 7, 8).



Rys. 8. Czas transmisji pakietu w łączu TWI dla mikrokontrolera ATmega16A z wewnętrznym oscylatorem RC przy wartości początkowej 8 MHz i TWBR = 3

Fig. 8. Packet transmission time in TWI for ATmega16A microcontroller with an internal RC oscillator at 8 MHz initial value and TWBR = 3

## 7. Podsumowanie

Wykorzystanie wewnętrznego oscylatora RC układu ATmega16A w znacznie szerszym niż dotychczas obszarze temperatur uniezależnia układ od dołączanego rezonatora lub zewnętrznego generatora zegarowego i sprawia, że zaawansowany mikrokontroler może przejąć funkcje bloku akwizycji danych. Należy jednak zauważyć, że wpływ temperatury na oscylator RC przekłada się na zmiany szybkości transmisji i czasu transferu wyników pomiaru.

Przy pracy modułu USART konieczne jest utrzymanie niedopasowania szybkości transmisji asynchronicznej w wymaganych granicach. W tym celu wskazane jest stosowanie selekcyonowanych układów ATmega po obu stronach łącza.

Wykorzystanie transmisji synchronicznej, wspieranej przez moduły SPI i TWI, wymaga uwzględnienia temperaturowych zmian przepływności danych przy hierarchizowaniu i programowaniu obsługi przerwań. Możliwe jest wówczas przekazywanie wyników pomiarów z bloku akwizycji danych, pracującego nawet w temperaturze ciekłego azotu.

Praca realizowana w ramach tematu 08/83/DSPB/4709.

## 8. Literatura

- [1] ATmega16A. 8-bit AVR Microcontroller with 16K Bytes In-System Programmable Flash. 2008 Atmel Corporation.
- [2] Baranowski R.: Mikrokontrolery AVR ATmega w praktyce. BTC, Warszawa 2005.
- [3] Bogusz J.: Lokalne interfejsy szeregowy w systemach cyfrowych. BTC, Warszawa 2004.
- [4] Arnold K.: Properties of internal RC oscillator of ATmega16A structure at low temperatures. Proceedings of the Twenty-Third International Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference 2010. July 19-23 2010, Wrocław, Poland, pp. 567-570.
- [5] Mielczarek W.: Szeregowy interfejsy cyfrowe. Helion, Gliwice 1993.
- [6] Jamro E., Wielgosz M., Cioch W., Bieniasz S.: Efektywna komunikacja ARM-FPGA z użyciem interfejsu SPI. Pomiary Automatyka Kontrola, vol. 57, nr 8/2011, s.874-876.
- [7] Arnold K.: Wpływ niskich temperatur na szeregową asynchroniczną transmisję danych w systemach pomiarowych z mikrokontrolerem ATmega16A. Pomiary, Automatyka, Kontrola, vol. 57, nr 12/2011, s.1534-1536.