

Sławomir MICHALAK

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

Korekcja częstotliwości oscylatora 8 MHz mikroprocesora ATmega88 w temperaturze 77K

Dr inż. Sławomir MICHALAK

Pracuje jako adiunkt w Katedrze Systemów Telekomunikacyjnych i Optoelektroniki na Wydziale Elektroniki i Telekomunikacji Politechniki Poznańskiej. W pracy naukowo-dydaktycznej zajmuje się zagadnieniami komputerowego wspomagania projektowania, symulacji układów elektronicznych, programowaniem układów mikroprocesorowych i układów programowalnych. Zajmuje się tematyką pozyskiwania informacji z inteligentnych czujników pomiarowych.



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

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki eksperymentów, w których sprawdzono zdolność prawidłowej pracy oraz możliwość dokonywania zmian częstotliwości wewnętrznego, kalibrowanego oscylatora RC układu ATmega88 pracującego w środowisku ciekłego azotu. Zasadniczym celem przeprowadzonych badań było stwierdzenie, czy zostanie uzyskany odpowiednio szeroki zakres zmian częstotliwości, umożliwiając wprowadzenie korekcji częstotliwości oscylatora. W temperaturze 77K przebadano kilka układów ATmega88 w obudowie PLCC, określając częstotliwość nominalną oraz dolny i górny zakres możliwych zmian częstotliwości dla skrajnych wartości rejestru OSCCAL. Dobór odpowiednich wartości rejestru OSCCAL umożliwił zmianę (kalibrację) podstawowej częstotliwości oscylatora oraz wyznaczenie dokładności kalibracji określonej jako względne procentowe odchylenie od wartości nominalnej.

Słowa kluczowe: ATmega, mikroprocesor, krioelektronika, ciekły azot.

Frequency correction for ATmega88 internal 8 MHz oscillator at 77K

Abstract

In this paper the results of experiments with ATmega88 microcontrollers in low temperature are presented. For most CMOS devices, including microprocessors, low temperature - in particular the temperature of liquid nitrogen 77K - is far below the typical range. The producers usually guarantee the proper work of their devices at -40°C for industrial devices. Even for special military devices the lowest temperature is -55°C . In the experiments the ability of proper work of a built-in, internal, calibrated RC oscillator in liquid nitrogen (at 77K) was examined. The examined devices were immersed in the Dewar flask (Fig. 1) and it was found that ATmega88 devices worked properly in such low temperature, and also could be programmed via SPI. There was determined the range of the 8 MHz frequency oscillator with respect to OSCCAL register values (Fig. 2). There was measured the oscillator frequency with nominal OSCCAL values (before calibration) and after calibration at 300K (Fig. 3) and 77K (Fig. 5). The calibration accuracy was calculated (Figs. 4 and 6). The experiments can be useful for a wide range of ATmega family devices with a similar, calibrated, internal RC oscillator working in the wide range of low temperature (Fig. 8). The obtained results can be applied to the self-calibration procedure of an internal RC oscillator.

Keywords: ATmega, microprocessor, cryoelectronic, liquid nitrogen.

1. Źródła sygnału zegarowego mikroprocesora ATmega88

Układy mikroprocesorowe AVR rodziny ATmega (ATMEL) umożliwiają pracę z różnymi źródłami sygnałów taktujących. Mogą to być zewnętrzne sygnały zegarowe, zewnętrzne układy oscylatorów (np. kwarcowych), a także wewnętrzne oscylatory wbudowane w strukturze układu. Poszczególne układy rodziny ATmega różnią się wielkością zasobów i liczbą wbudowanych

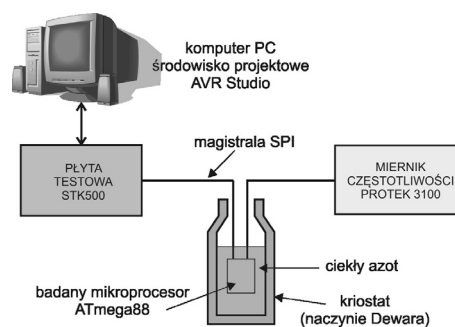
oscylatorów, jednak zazwyczaj zawierają co najmniej jeden taki wewnętrzny oscylator [1].

W strukturze badanego układu ATmega88 wbudowane są dwa oscylatory: 8 MHz i 128 kHz. Podstawowym oscylatorem wewnętrznym jest kalibrowany oscylator RC o częstotliwości nominalnej 8 MHz. Inne, wykorzystywane do pracy częstotliwości (4 MHz, 2 MHz i 1 MHz) uzyskiwane są przez podział podstawowego sygnału 8 MHz. Oscylator 128 kHz jest oscylatorem o małym poborze mocy i może być wykorzystywany do pracy mikroprocesora w trybach z niskim poborem mocy.

Zakres niskich temperatur, w szczególności temperatura wrzenia ciekłego azotu, nie jest zakresem pracy przewidzianym przez producenta układów. Przeprowadzone wstępne testy wykazały jednak zdolność wybranych do badań 8-bitowych mikroprocesorów AVR, do pracy w niskich temperaturach, (poniżej nominalnego zakresu przewidzianego przez producenta) - w temperaturze 77K. W temperaturze wrzenia ciekłego azotu układy pracują poprawnie, jak również mogą być programowane przez interfejs SPI.

2. Układ pomiarowy

Schemat blokowy układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 1. Dla pomiarów w temperaturze 77K badany mikroprocesor został zanurzony w kriostacie zawierającym ciekły azot. Zasilanie oraz programowanie układu możliwe było poprzez złącze interfejsu SPI z płyty testowej STK500. Płyta testowa sterowana była za pomocą komputera poprzez interfejs RS232C. Program pracy mikroprocesora napisano w assemblerze w środowisku uruchomieniowym AVR Studio. Takie rozwiązanie pozwalało na szybką modyfikację algorytmu programu i przeprogramowywanie układu bez konieczności wyjmowania układu z kriostatu.



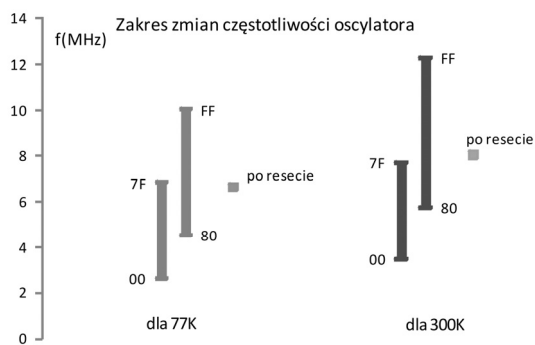
Rys. 1. Schemat blokowy układu pomiarowego
Fig. 1. Block diagram of the experimental circuit

Częstotliwość pracy wewnętrznego oscylatora mierzono wykorzystując rozwiązanie dostępne w nowszych układach rodziny mikroprocesorów ATmega - obecność sygnału zegarowego na wyjściu CLK0 (PB0), po uprzednim odpowiednim zaprogramowaniu bitów konfiguracyjnych. Częstotliwość sygnału mierzono częstotściomierzem PROTEK3100. Ustawiono czas bramkowania na 10s co pozwalało na wstępne uśrednienie wyników.

O dokładnej częstotliwości oscylatora układu ATmega88 decyduje zawartość rejestru OSCCAL. Domyślna wartość tego rejestru jest domyślnie zapisana przez producenta i po resecie układu automatycznie przepisywana do rejestru OSCCAL. Modyfikacja zawartości rejestru OSCCAL umożliwia zmianę częstotliwości oscylatora (kalibrację) przez użytkownika. Zastosowany podczas pomiarów program testowy umożliwiał zarówno odczyt i prezentację zawartości rejestru OSCCAL, jak i zmianę jego zawartości.

3. Badanie zakresu zmian częstotliwości oscylatora

Na wstępie sprawdzono możliwy zakres zmian częstotliwości oscylatora poprzez zapis możliwych skrajnych wartości do rejestru OSCCAL. Rejestr OSCCAL jest 8-bitowym rejestrem w którym zapisana jest domyślna wartość służąca do kalibracji częstotliwości oscylatora. Zmiana zawartości rejestru OSCCAL umożliwia programową zmianę częstotliwości oscylatora przez użytkownika, co umożliwia dokładniejsze ustawienie wartości częstotliwości. Zmiana możliwa jest w dwóch zakresach (dolnym i górnym) określonych przez najstarszy bit rejestru (0 lub 1). Skrajne wartości to 00 i 7F dla jednego zakresu, oraz 80 i FF dla drugiego zakresu, przy czym zakresy te częściowo się pokrywają. Na rys. 2 przedstawiono przykładowy zakres zmian częstotliwości dla jednego z przebadanych układów ATmega88 (układ nr 1).

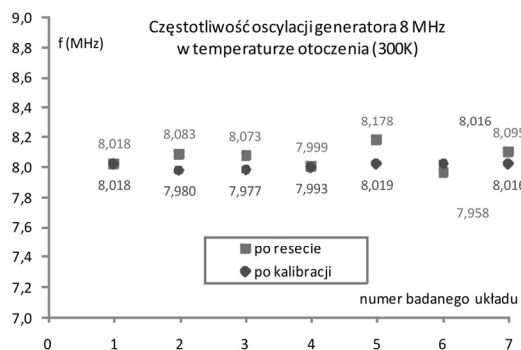


Rys. 2. Zakres częstotliwości oscylatora 8 MHz dla skrajnych wartości rejestru OSCCAL
 Fig. 2. The frequency range of 8 MHz oscillator with respect to OSCCAL register values

Zapis rejestru OSCCAL umożliwia zmianę częstotliwości oscylatora w bardzo szerokim zakresie, zarówno w temperaturze 300K, jak i w 77K.

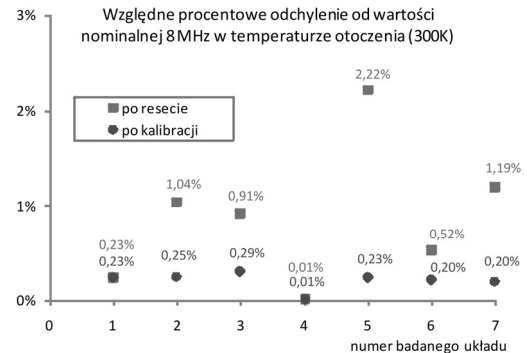
4. Kalibracja częstotliwości oscylatora

Podczas procesu kalibracji zmierzono nominalną częstotliwość oscylacji po reseście (dla domyślnych wartości OSCCAL). Następnie dokonano korekty zawartości rejestru OSCCAL tak, aby uzyskać oczekiwaną częstotliwość 8 MHz. Testy przeprowadzono dla 7 losowo wybranych układów ATmega88. Wyniki pomiarów w temperaturze otoczenia (300K) przedstawiono na rys. 3.



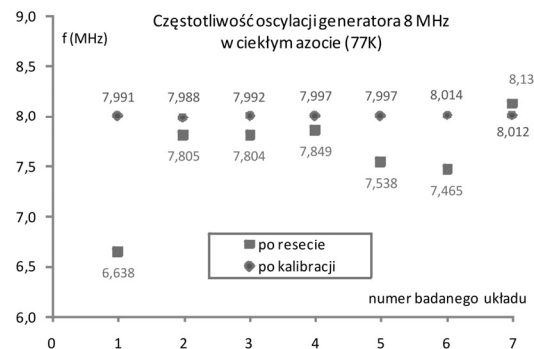
Rys. 3. Częstotliwość oscylacji generatora 8 MHz w temperaturze otoczenia (300K) - przed i po kalibracji
 Fig. 3. The oscillation frequency of 8 MHz oscillator at room temperature (300K) – before and after calibration

Na rys. 4 przedstawiono dokładność kalibracji określoną jako względne, procentowe odchylenie częstotliwości oscylatora od wartości nominalnej (8 MHz).

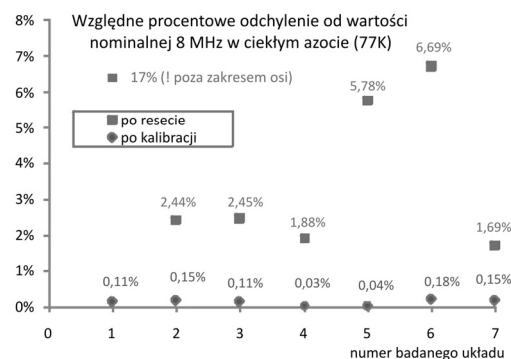


Rys. 4. Dokładność kalibracji - względne procentowe odchylenie częstotliwości oscylatora od wartości nominalnej w temperaturze otoczenia (300K)
 Fig. 4. Calibration accuracy - percentage deviation from the nominal value at room temperature (300K)

W temperaturze otoczenia dokładność kalibracji nie przekracza 2,3% dla domyślnych wartości rejestru OSCCAL. Przeprowadzenie kalibracji umożliwia uzyskanie wartości odchylenia poniżej 0,3%. Pomiary powtórzone dla temperatury 77K zanurzając układ w ciekłym azocie. Wyniki przedstawiono na rys. 5 i rys. 6.

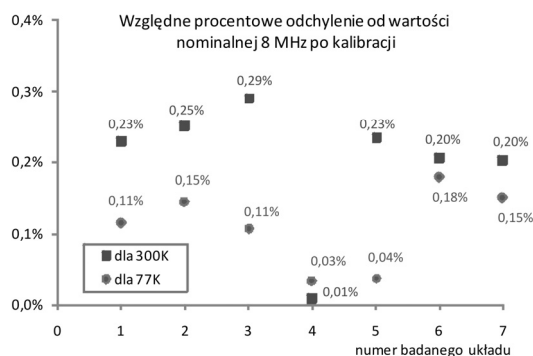


Rys. 5. Częstotliwość oscylacji generatora 8 MHz w temperaturze ciekłego azotu (77K) - przed i po kalibracji
 Fig. 5. The oscillation frequency of 8 MHz oscillator at liquid nitrogen temperature (77K) – before and after calibration



Rys. 6. Dokładność kalibracji - względne procentowe odchylenie częstotliwości oscylatora od wartości nominalnej w temperaturze ciekłego azotu (77K)
 Fig. 6. Calibration accuracy - percentage deviation from the nominal value at liquid nitrogen temperature (77K)

W temperaturze 77K procentowe odchylenie dla oscylatora bez kalibracji jest większe (dla badanego układu nr 1 przekracza 17%). Jednak po przeprowadzeniu kalibracji uzyskujemy wartości poniżej 0,18% (co dla oczekiwanej częstotliwości 8 MHz okazało się wynikiem lepszym niż w temperaturze 300K). Porównanie rezultatów kalibracji w 300K i 77K przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Porównanie dokładności kalibracji dla 77K i 300K

Fig. 7. The calibration accuracy at 77K compared to results at 300K

Według informacji producenta zawartych w nocie katalogowej liniowa zmiana wartości rejestru OSCCAL nie powoduje liniowych zmian (korekty) częstotliwości oscylatora, zatem dla innych częstotliwości niż nominalna 8 MHz, efekt kalibracji może być odmienny.

5. Podsumowanie

Zazwyczaj wewnętrzny oscylator RC nie jest tak dokładnym i stabilnym źródłem sygnału zegarowego, jak np. zewnętrzny oscylator kwarcowy lub też specjalizowany, stabilizowany termicznie scalony układ generatora sygnału zegarowego. Jednak jego zaletą jest to, że jest integralną częścią mikroprocesora oraz, że pomimo dużej zależności od zmian napięcia zasilania i zmian temperatury, może być bardzo dokładnie kalibrowany przez użytkownika. Dla badanych układów ATmega88 nominalna wartość częstotliwości oscylatora 8 MHz jest fabrycznie kalibrowana z dokładnością $\pm 10\%$ (dla napięcia zasilania 3 V i temperatury otoczenia 25°C). Według danych katalogowych, wykorzystując możliwość kalibracji oscylatora przez użytkownika, można uzyskać dokładność $\pm 1\%$ dla szerokiego zakresu napięć zasilania od 1,8 V do 5,5 V oraz zakresu temperatury od -40°C do 85°C.

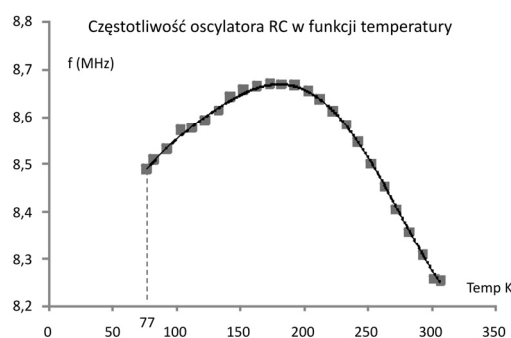
Przeprowadzone badania mikroprocesorów rodziny ATmega pokazały zdolność układów do pracy w niskich temperaturach (badania prowadzono do 77K) oraz możliwość wykorzystania wewnętrznego oscylatora RC jako źródła sygnału zegarowego dla mikroprocesora, jak też układów peryferyjnych. Możliwość przeprowadzenia kalibracji częstotliwości oscylatora może zostać wykorzystana do poprawy dokładności sygnału zegarowego, również w warunkach kriogenicznych.

Poprawę dokładności i stabilności wewnętrznego oscylatora RC można rozpatrywać w różnych aspektach. Przede wszystkim, zanurzenie układu w ciekłym azocie umożliwia stabilizację termiczną warunków pracy mikroprocesora i wbudowanego oscylatora RC. Przeprowadzenie kalibracji pozwala na dokładne ustalenie wybranej częstotliwości oscylatora. Możliwość przeprowadzenia dalszej kalibracji w trakcie pracy układu (wprowadzenie algorytmu kalibracji jako podprogramu), pozwala na dodatkową korektę ewentualnego efektu samopodgrzewania układu [2]. W najprostszym zastosowaniu mikroprocesor może zatem pracować jako niezależne, stabilizowane temperaturowo ciekłym azotem, źródło sygnału zegarowego.

Zakres niskich temperatur (temperatur kriogenicznych) nie jest typowym zakresem pracy przewidzianym przez producentów

typowych układów scalonych CMOS, w tym badanych układów mikroprocesorowych. Zazwyczaj dolna granica temperatury, przy której producent gwarantuje poprawną pracę układów wynosi 0°C – dla układów przeznaczonych do zastosowań w urządzeniach powszechnego użytku (*commercial devices*), -40°C – dla układów przeznaczonych do zastosowań przemysłowych (*industrial devices*), oraz -55°C – dla układów w wykonaniu do zastosowań specjalnych (*military devices*). Istotnym wynikiem przeprowadzonych badań jest potwierdzenie zdolności badanych układów mikroprocesorowych do pracy w warunkach kriogenicznych, znacznie poniżej dolnej granicy temperatur typowego zakresu zastosowania zalecanego przez producenta [3].

Przedstawione rezultaty badań (dotyczące pracy oscylatora w niskich temperaturach i uzyskane dla układu ATmega88), mogą być użyteczne do prognozowania zachowania się w warunkach kriogenicznych innych układów rodziny ATmega, w których zastosowano podobne rozwiązanie wewnętrznego kalibrowanego oscylatora RC (rodzina ATmega obejmuje grupę kilkunastu typów mikroprocesorów 8-bitowych, o różnej konfiguracji zasobów wewnętrznych). Na rys. 8 pokazano przykładową zależność zmian częstotliwości wewnętrznego oscylatora RC dla popularnego układu z rodziny mikroprocesorów ATmega (ATmega16A), w szerokim zakresie zmian temperatury od 300K do 77K.



Rys. 8. Częstotliwość oscylatora RC układu ATmega16A w funkcji temperatury [4]
Fig. 8. The RC oscillator frequency of ATmega16A vs. temperature [4]

Wykorzystując możliwość kalibracji wewnętrznego oscylatora RC można opracować algorytm kalibracji (autokalibracji), który pozwoliłby na stabilizację częstotliwości oscylatora nie tylko w temperaturze 77K, ale w bardzo szerokim zakresie zmian temperatury - również w zakresie zastosowań kriogenicznych. Opracowanie takiego algorytmu oraz ocena dokładności i stabilności częstotliwości takiego układu jest tematem dalszych zaplanowanych badań.

6. Literatura

- [1] ATmega88 – nota katalogowa, www.atmel.com.
- [2] Arnold K., Michalak S., Pająkowski J.: Evaluation of self-heating of AVR microcontrollers in low temperatures, International Cryogenic Engineering Conference 23 - International Cryogenic Materials Conference 2010 (ICEC23/ICMC2010), Wrocław, Poland, 2010.
- [3] Gutierrez-D E.A., Jamal Deen M., Claeys C. L.: Low Temperature Electronics - Physics, Devices, Circuits, and Applications. Academic Press, San Diego, 2001.
- [4] Arnold K.: Properties of internal RC oscillator of ATmega16A structure at low temperatures, International Cryogenic Engineering Conference 23 - International Cryogenic Materials Conference 2010 (ICEC23/ICMC2010), Wrocław, Poland, 2010.