

## Sławomir MICHALAK

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

# Wyniki badań działania układu ATXmega64A3 w niskich temperaturach

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 wspomaganie 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 badań dotyczące pracy 8/16-bitowego mikrokontrolera ATXmega64A3 w warunkach kriogenicznych (w temperaturze 77K). W przeprowadzonych eksperymentach obserwowano zachowanie wewnętrznych oscylatorów 2 MHz (oscylator RC) i 32 MHz (oscylator pierścieniowy). Potwierdzono zdolność do prawidłowego działania w tak niskiej temperaturze, a także możliwość zwielokrotnienia sygnału zegarowego z wykorzystaniem pętli PLL, porównano wydajność obliczeniową układu dla różnych warunków pracy.

**Słowa kluczowe:** mikrokontroler, ciekły azot, wydajność obliczeniowa.

## Research results of ATXmega64A3 operation in low temperature

### Abstract

In this paper the results of experiments with an 8/16-bit ATXmega64A3 microcontroller (ATMEL) at low temperature are presented. The examined devices were immersed in a Dewar flask with liquid nitrogen (Fig. 1). First of all we focused on internal oscillators. There are four types of oscillators inside a microcontroller and we tested two of them: 2 MHz RC and 32 MHz ring oscillator. The results at 77K (liquid nitrogen) were compared to the results at 300K (room temperature). The frequency as a function of the supply voltage for 300K and 77K is shown in Fig. 2 and Fig. 3, respectively. According to the theory of silicon semiconductors, the activity of carriers increases in low temperatures, so there was expected increase in the oscillation frequency. For the ring oscillator (32 MHz) our expectations of the growth of the frequency were confirmed. Due to PLL there was a possibility to increase the frequency, and we reached 64 MHz. Figs. 4 and 5 show the frequency as a function of the supply voltage at 77K in detail. The power consumption was also measured (Fig. 6). With increase in the frequency the increase in the power consumption was obtained (Fig. 7). The value of the power depends on the supply voltage strongly, while on the temperature less, so the results at 300K and 77K do not differ too much (Fig. 8). We also calculated the energy efficiency for the microcontroller under various conditions. The frequency to power coefficient was defined, and the results are shown in Figs. 9 and 10. The energy consumption for the example task was estimated (Tab.1) and verified by experiments.

**Keywords:** microcontroller, liquid nitrogen, energy efficiency.

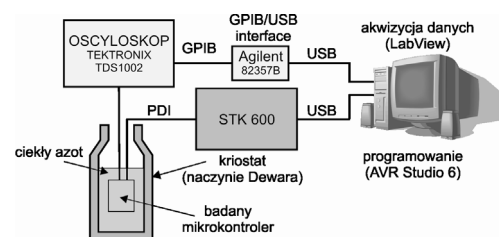
## 1. Wprowadzenie

Mikrokontroler ATXmega64A3 (ATMEL) jest 8/16-bitowym układem o architekturze RISC, którego lista rozkazów zawiera 138 działań wykonywanych w jednym, dwu, trzech taktach sygnału zegarowego, co pozwala osiągnąć wydajność 1 MIPS/MHz (*ang. Million Instructions Per Second/MHz*) [1]. Źródłem sygnału taktującego może być układ zewnętrzny, lub jeden z czterech wbudowanych oscylatorów wewnętrznych: 2 MHz, 32 MHz, 32,768 kHz oraz 32 kHz ULP (*ang. Ultra Low Power*) [2]. W badaniach testowano działanie wewnętrznych oscylatorów: RC 2 MHz i oscylatora pierścieniowego 32 MHz. W warunkach pracy kriogenicznej (w ciekłym azocie) stwierdzono ich poprawne dzia-

łanie, a także dzięki wykorzystaniu PLL (*ang. Phase Locked Loop*) możliwe było podwojenie częstotliwości (64 MHz).

## 2. Układ pomiarowy

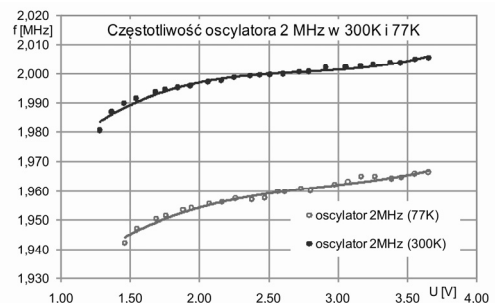
Na rysunku 1 przedstawiono schemat blokowy układu do pomiaru częstotliwości sygnału zegarowego mikrokontrolera. Badany mikrokontroler umieszczono w naczyniu Dewara (dla pomiarów w ciekłym azocie). Mikrokontroler programowano poprzez PDI z wykorzystaniem modułu STK600. Programy testowe napisane zostały w asemblerze w środowisku AVR Studio 6.



Rys. 1. Schemat blokowy układu pomiarowego

Fig. 1. Block diagram of the experimental circuit

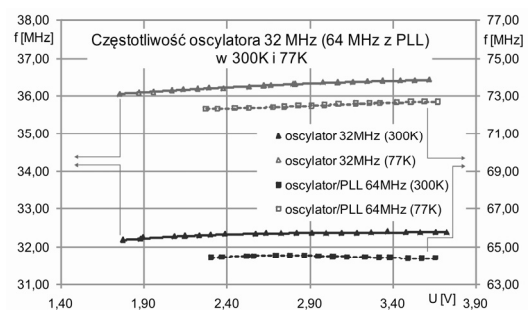
Na rysunku 2 pokazano wpływ zmian napięcia zasilającego na częstotliwość oscylatora 2 MHz w 300K i 77K. Wraz z obniżeniem napięcia zasilania, częstotliwość nieznacznie (1%) maleje. Natomiast obniżenie temperatury do 77K powoduje relatywnie większe (3%) zmiany częstotliwości [3].



Rys. 2. Częstotliwość oscylatora 2 MHz w funkcji napięcia zasilania

Fig. 2. Frequency of 2 MHz oscillator vs. supply voltage

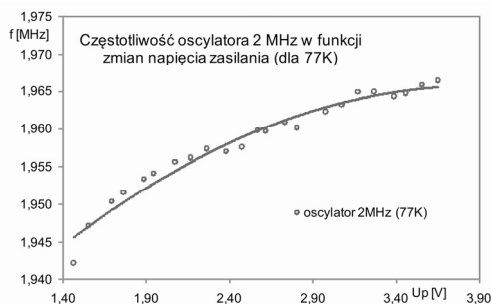
Rysunek 3 przedstawia zależności dla oscylatora pierścieniowego 32 MHz (64 MHz z pętlą PLL). W tym przypadku praca w 77K powoduje oczekiwany, typowy dla układów CMOS, wzrost (12%) częstotliwości działania [4].



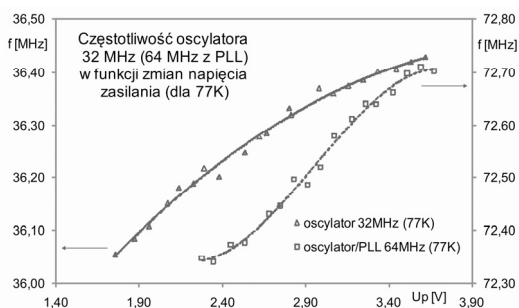
Rys. 3. Częstotliwość oscylatora 32 MHz (64 MHz) w funkcji napięcia zasilania

Fig. 3. Frequency of 32 MHz (64 MHz) oscillator vs. supply voltage

Wpływ zmian napięcia zasilającego na zmiany częstotliwości jest stosunkowo niewielki (zarówno dla 300K, jak i 77K - około 1%), co dokładniej pokazano na rys. 4 i rys. 5 dla temperatury 77K.



Rys. 4. Częstotliwość oscylatora 2 MHz w funkcji napięcia zasilania (77K)  
Fig. 4. Frequency of 2 MHz oscillator vs. supply voltage (77K)



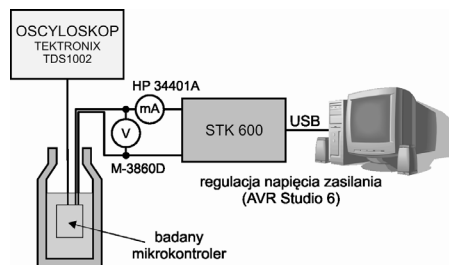
Rys. 5. Częstotliwość oscylatora 32 MHz (64 MHz z PLL) w funkcji napięcia zasilania (77K)  
Fig. 5. Frequency of 32 MHz (64 MHz with PLL) oscillator vs. supply voltage (77K)

Standardowo układ ATXmega64A3 może być zasilany napięciem 1,6..3,6 V. Z przeprowadzonych badań w 77K wynika, że zakres napięć przy którym wewnętrzne oscylatory działają poprawnie jest dość szeroki i zmienia się zależnie od wybranej częstotliwości oscylatora. Najszerszy zakres napięć zasilających uzyskano dla oscylatora 2 MHz (1,4..3,6 V), dla oscylatora pierścieniowego 32 MHz (1,7..3,6 V), dla przetaktowania z układem pętli fazowej PLL (64 MHz) uzyskano zakres 2,3..3,6 V. Napięcie 3,6 V jest maksymalną wartością napięcia zasilającego zalecaną przez producenta w danych katalogowych (*ang. Absolute Maximum Ratings*), dlatego nie przeprowadzono badań pracy oscylatorów dla wyższych niż 3,6 V napięć.

### 3. Pomiar poboru mocy

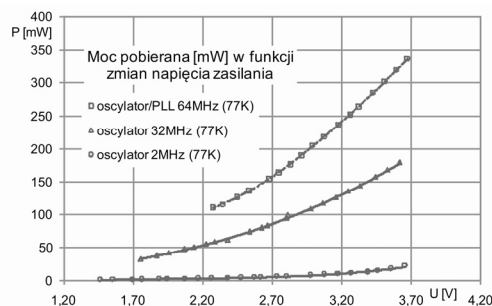
W celu oceny wpływu niskiej temperatury na wydajności obliczeniową mikroprocesora dokonano pomiarów pobieranej mocy. Na rysunku 6 przedstawiono układ pomiarowy, w którym mierzone wartości napięcia i prądu zasilania. Na podstawie pomiarów wyznaczano moc pobieraną przez układ. Zmiany napięcia zasilającego dokonywano poprzez zmiany wartości zasilania płyty uruchomieniowej STK600, w programie AVR Studio 6.

W układzie mikrokontrolera chwilowy pobór mocy zależy od wykorzystywanych zasobów wewnętrznych, co związane jest z rodzajem aktualnie wykonywanej instrukcji. Ze względu na właściwości przyrządów pomiarowych (woltomierza i amperomierza), w których zastosowano przetworniki integracyjne – relatywnie wolne w porównaniu do szybkości wykonywania instrukcji przez mikrokontroler, możemy mówić o pomiarze uśrednionej wartości mocy pobieranej przez układ.



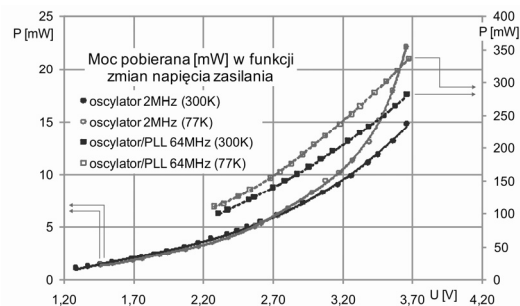
Rys. 6. Schemat blokowy układu do pomiaru napięcia i prądu  
Fig. 6. Block diagram of the circuit for voltage and current measurement

Na rysunku 7 przedstawiono wykres pobieranej mocy przez mikrokontroler w temperaturze 77K, dla częstotliwości pracy 2 MHz, 32 MHz i 64 MHz. Wzrost szybkości działania układu związany jest ze znacznym wzrostem pobieranej mocy. Moc pobierana przez mikrokontroler zależna jest przede wszystkim od typu oscylatora, wybranego jako źródła sygnału zegarowego, częstotliwości pracy oscylatora oraz od napięcia zasilania.



Rys. 7. Moc pobierana przez układ w funkcji zmian napięcia zasilania (77K)  
Fig. 7. Power consumption vs. supply voltage (77K)

Na rysunku 8 przedstawiono porównanie poboru mocy badanych oscylatorów dla 300K i 77K. Dla częstotliwości 2 MHz widoczny jest wzrost (50%) pobieranej mocy w temperaturze 77K (dla wyższych napięć zasilania) – mimo zmniejszenia częstotliwości oscylacji (por. rys. 1). Dla częstotliwości 64 MHz wzrost (20%) pobieranej mocy w 77K wynika ze zwiększenia częstotliwości oscylacji (por. rys. 2).



Rys. 8. Moc pobierana przez układ w funkcji zmian napięcia zasilania (dla 300K i 77K) dla częstotliwości 2 MHz i 64 MHz  
Fig. 8. Power consumption vs. voltage supply (at 300K and 77K) for 2 MHz and 64 MHz frequencies

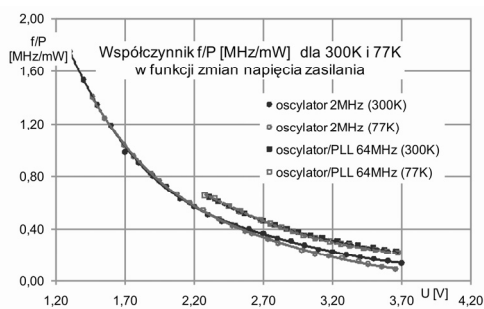
Należy zaznaczyć, że pobór mocy układu zależny jest również od aktualnie wykonywanego programu a więc zastosowanych rozkazów. Poszczególne rozkazy różnią się nie tylko liczbą cykli zegarowych, lecz także wykorzystaniem zasobów mikrokontrolera, co skutkuje różnym poborem mocy dla odmiennych instrukcji.

#### 4. Wydajność obliczeniowa

Parametrem stosowanym do oceny wydajności obliczeniowej układów cyfrowych (mikrokontrolerów) jest tzw. wydajność energetyczna (*ang. Eenergy Efficiency*), określana jako liczba operacji MIPS lub FLOPS (*ang. Floating-Point Operations Per Second*) na jednostkę dostarczonej mocy. Parametr ten wiąże ze sobą szybkość wykonywania operacji i moc pobieraną przez układ. Poprawę (zwiększenie) tego parametru osiąga się, między innymi, poprzez zwiększenie szybkości pracy układów (częstotliwości sygnału taktującego), obniżenie temperatury ich struktury (chłodzenie) oraz obniżenie mocy dostarczanej do układu (układy niskonapięciowe) [5]. W niniejszej pracy, jako parametr do oceny wydajności obliczeniowej przyjęto relację częstotliwości sygnału zegarowego (oscylacji)  $f$  do mocy  $P$  pobranej przez układ:

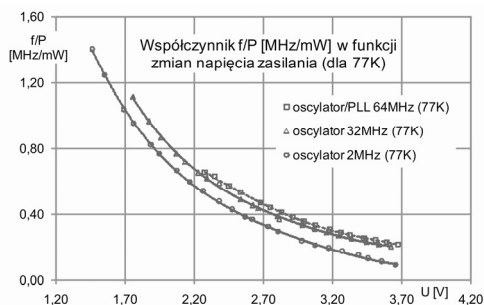
$$\text{parametr\_oceny} = \frac{f}{P} \left[ \frac{\text{MHz}}{\text{mW}} \right] \quad (1)$$

Umieszczenie układu w ciekłym azocie nie wpływa istotnie na zmianę wartości tak zdefiniowanego współczynnika efektywności. Na rysunku 9 przedstawiono wykresy zależności  $f/P$  dla 2 MHz i 64 MHz w 300K i 77K. Obserwujemy trochę większą wartość współczynnika dla 64 MHz, niezależnie od tego czy układ pracuje w 300K czy 77K.



Rys. 9. Współczynnik  $f/P$  dla częstotliwości 2 MHz i 64 MHz (dla 300K i 77K)  
Fig. 9. The  $f/P$  coefficient for 2 MHz and 64 MHz frequencies (at 300K and 77K)

Natomiast wartość współczynnika  $f/P$  rośnie znacząco (dla 2 MHz ponad 10-krotnie) wraz ze zmniejszaniem napięcia zasilającego. Jest to cecha charakterystyczna dla układów niskonapięciowych [6]. Zatem zwiększenie efektywności obliczeniowej (również w warunkach kriogenicznych) związane jest przede wszystkim z możliwością pracy układu z obniżonym napięciem zasilania. Na rysunku 10 przedstawiono porównanie współczynnika  $f/P$  dla układu pracującego w ciekłym azocie dla trzech analizowanych częstotliwości.



Rys. 10. Współczynnik  $f/P$  dla częstotliwości 2 MHz, 32 MHz i 64 MHz (77K)  
Fig. 10. The  $f/P$  coefficient for 2 MHz, 32 MHz and 64 MHz frequencies (77K)

W tabeli 1 przedstawiono szacunkowe (zweryfikowane doświadczalnie) porównanie czasu i wartości pobranej energii potrzebnych do wykonania przykładowego programu (wyznaczenie liczb pierwszych) dla różnych warunków pracy mikrokontrolera.

Tab. 1. Czas, pobór mocy i energii potrzebne do wykonania testowego programu  
Tab. 1. Time, power and energy consumption required for executing the example task

|               | U [V] | czas [h,min,s]          | moc [mW]         | energia [mW·h]   |
|---------------|-------|-------------------------|------------------|------------------|
| 64 MHz (300K) | 3,6   | 4 min 20 s              | 269,9            | 19,6             |
|               | 2,3   | 4 min 20 s              | 99,2             | 7,2              |
| 64 MHz (77K)  | 3,6   | <b>(min) 3 min 50 s</b> | 320,0            | 20,5             |
|               | 2,3   | 3 min 52 s              | 111,5            | 7,2              |
| 32 MHz (300K) | 3,6   | 8 min 39 s              | 150,4            | 21,7             |
|               | 1,8   | 8 min 41 s              | 28,9             | 4,2              |
| 32 MHz (77K)  | 3,6   | 7 min 41 s              | 176,4            | 22,6             |
|               | 1,8   | 7 min 45 s              | 34,4             | 4,4              |
| 2 MHz (300K)  | 3,6   | 2 h 22 min 35 s         | 13,7             | 32,5             |
|               | 1,6   | 2 h 23 min 49 s         | 1,7              | 4,2              |
| 2 MHz (77K)   | 3,6   | 2 h 22 min 35 s         | 20,1             | 47,8             |
|               | 1,6   | 2 h 23 min 49 s         | <b>(min) 1,6</b> | <b>(min) 4,0</b> |

Biorąc pod uwagę jedynie szybkość wykonania przykładowego programu optymalne warunki pracy mikrokontrolera są dla częstotliwości 64 MHz,  $U = 3,6$  V i 300K. Jeżeli jednak jako kryterium przyjmujemy minimalny pobór energii, to najbardziej efektywnym rozwiązaniem będzie praca przy 2 MHz,  $U = 1,6$  V i 77K.

#### 5. Podsumowanie

W przeprowadzonych badaniach potwierdzono zdolność układu ATXmega64A3 do pracy w warunkach kriogenicznych (w temperaturze ciekłego azotu). Badane oscylatory wewnętrzne 2 MHz i 32 MHz (64 MHz z pętlą PLL) działają prawidłowo w szerokim zakresie napięć zasilających. Dla oscylacji 32 MHz i 64 MHz, uzyskano oczekiwany w 77K wzrost częstotliwości (wynikający z właściwości oscylatora pierścieniowego w niskich temperaturach). Mimo to umieszczenie mikrokontrolera w ciekłym azocie i praca z wewnętrznym oscylatorem, jako źródłem sygnału zegarowego nie wpływa znacząco na zmianę (polepszenie lub pogorszenie) współczynnika efektywności obliczeniowej. W przypadku stosowania wewnętrznych oscylatorów zwiększenie szybkości działania układu znacznie jest jednocześnie ze zwiększonym poborem mocy, co w pewnym stopniu niweczy efekt szybszej pracy układu. Znaczne polepszenie wydajności obliczeniowej układu (niezależnie od temperatury pracy) uzyskuje się poprzez obniżenie napięcia zasilającego, co istotnie redukuje moc pobieraną przez układ.

#### 6. Literatura

- [1] 8/16-bit AVR XMEGA A Microcontroller. XMEGA A Manual, www.atmel.com
- [2] AVR1506: Xplain training - XMEGA clock system. Application Note, www.atmel.com
- [3] 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.
- [4] Colonna-R., L.M., Deverell, D.R.: Operation of a CMOS microprocessor while immersed in liquid nitrogen, IEEE J. Solid-State Circuits SC-21(3), pp. 491-492, 1986.
- [5] Vassighi A., Keshavarzi A., Narendra S., Schrom G., Ye Y., Lee S., Chrysler G., Sachdev M., De V.: Design Optimizations for Microprocessors at Low Temperature. Design Automation Conference, Proceedings, 41st, pp. 2-5, San Diego, 2004.
- [6] Daga J.M., Ottaviano E., Auvergne D.: Temperature Effect on Delay for Low Voltage Applications. Design, Automation and Test in Europe, IEEE Proceedings, pp. 680-685, 1998.

otrzymano / received: 29.08.2012

przyjęto do druku / accepted: 01.10.2012

artykuł recenzowany / revised paper