

---

## Ćwiczenie 16: Wielokanałowy ADC sterowany maszyną stanów

Instrukcja laboratorium

Mariusz Chilmon <[mariusz.chilmon@ctm.gdynia.pl](mailto:mariusz.chilmon@ctm.gdynia.pl)>



2024-05-22

Computer science education cannot make anybody an expert programmer any more than studying brushes and pigment can make somebody an expert painter.

— Eric Steven Raymond

## Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z:

- prostą implementacją maszyny stanów,
- obsługą wielu kanałów ADC,
- złożonymi zależnościami czasowymi w peryferiach mikrokontrolera,
- zarządzaniem zasobami mikrokontrolera.

## Uruchomienie programu wyjściowego

1. Podłącz płytkę *LCD Keypad Shield* do *Arduino Uno*.
2. Podłącz termometr LM35DZ do linii A5.
3. Na wyświetlaczu widoczny jest odczyt wartości z kanału A0, do którego podłączona jest klawiatura analogowa, kod klawisza (w polu K) oraz zerowa wartość kanału A5 i obliczonej temperatury.
4. Urządzenie reaguje na wciśnięcie przycisku, ale nie mierzy temperatury.



```
A0: 1023 K:  
A5: 0 T: 0.0 °C
```

**Rysunek 1:** Wyjściowy stan wyświetlacza

## Zadanie podstawowe

Celem zadania podstawowego jest uruchomienie naprzemiennego, wyzwalanego timerem odczytu dwóch kanałów.

## Wymagania funkcjonalne

1. Urządzenie wciąż poprawnie reaguje na wciskanie klawiszy.

2. Wykonywany jest pomiar temperatury, choć jego wartość może być zaniżona.

Aby obsłużyć dwa (lub więcej) kanały ADC trzeba po każdym pomiarze przetaczać multiplekser, zmieniając kanał, a także, jeżeli jest konieczne, źródło napięcia referencyjnego. W przypadku naszego urządzenia musimy przetaczać się między dwoma konfiguracjami:

1. Kanał A0 i napięcie referencyjne  $V_{REF} = AV_{CC} = 5\text{ V}$ .
2. Kanał A5 i napięcie referencyjne  $V_{REF} = V_{BG} = 1,1\text{ V}$ .



Jeżeli chcemy zapewnić maksymalną rozdzielczość pomiaru temperatury, nie możemy uniknąć zmiany napięcia referencyjnego, gdyż dla pomiaru temperatury najkorzystniejsze jest niższe napięcie, zaś klawiatura wymaga pomiaru w zakresie całego napięcia zasilania.

Przy wykonywaniu pomiarów z dużą szybkością zmiana kanału ADC przysparza pewnych problemów, gdyż musi się ona odbyć w ściśle określonym czasie, byśmy mogli mieć gwarancję, że następny pomiar zostanie wykonany na nowym kanale. Opisuje to rozdział *Changing Channel or Reference Selection* dokumentacji mikrokontrolera:

Special care must be taken when updating the ADMUX Register, in order to control which conversion will be affected by the new settings.

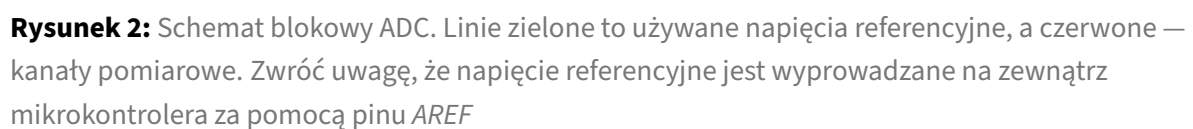
Jeżeli wyzwalamy pomiar sygnałem przepiętnienia timera, do którego nie jest podłączone przerwanie, można wykorzystać okno czasowe między pomiarem (konwersją) a zdjęciem flagi wyzwalającej ten pomiar (w naszym przypadku [TOV1](#)):

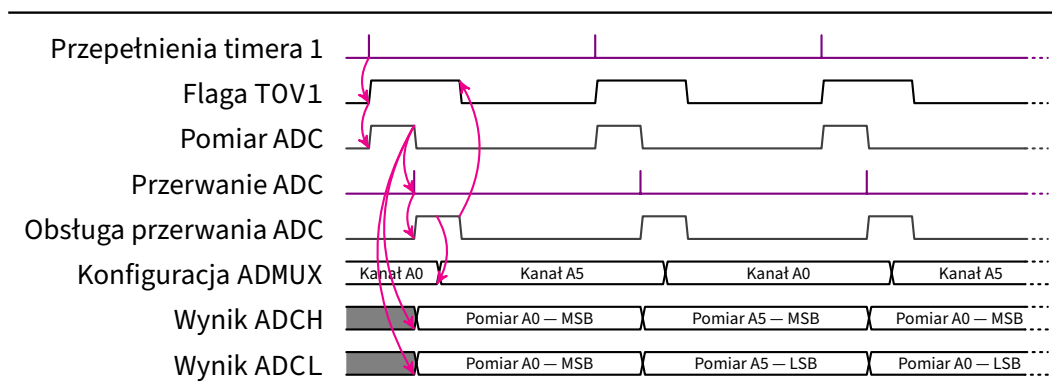
- c. After a conversion, before the Interrupt Flag used as trigger source is cleared.

Mamy wówczas następujący reżim pracy:

1. Timer 1 ulega przepiętnieniu.
2. Przepiętnienie timera ustawia flagę [TOV1](#) (*Timer/Counter 1 Overflow Flag*)<sup>1</sup>.
3. Flaga wyzwała pomiar ADC.
4. Po zakończeniu pomiaru ADC zgłasza swoje przerwanie.
5. Procedura obsługi przerwania przetwarza pomiar, dostępny w rejestrach [ADCH](#) i [ADCL](#), a następnie ustawia nowy kanał pomiarowy i zdejmuje (zeruje) flagę [TOV1](#).

<sup>1</sup>Gdyby przerwanie timera było włączone, spowodowałoby to wywołanie obsługi przerwania i natychmiastowe, automatyczne zdjęcie flagi.





**Rysunek 3:** Zależności czasowe przy zmianie kanałów

## Modyfikacja programu

### Wyzwalanie ADC timerem

W programie wyjściowym przetwornik pracuje w trybie pracy swobodnej (*Free Running Mode*). Aby włączyć tryb wyzwalania Timerem 1 należy odpowiedni ustawić bity `ADTS0...ADTS2` oraz włączyć taktowanie timera, ustawiając bit `CS10`. W obsłudze przerwania ADC należy na końcu wyczyścić flagę `TOV1`.



Ze względu na możliwość interakcji z procesem zgłaszania przerw, flagi przerw są czyszczone w specyficzny sposób. Szczegóły znajdziesz w opisie rejestru `TIFR1`.



W tym momencie funkcjonalność urządzenia pozostaje bez zmian (reaguje tylko na klawisze), ale ADC jest już wyzwalane w inny sposób.

### Maszyna stanów

Przełączanie między kanałami można zaimplementować w maszynie stanów. Jako punkt wyjścia można przyjąć maszynę złożoną z dwóch stanów:

**pomiar  $k_0$**  Odczytuje pomiar klawiatury, zapisuje go do zmiennej globalnej i przełącza ADC na kanał termometru.

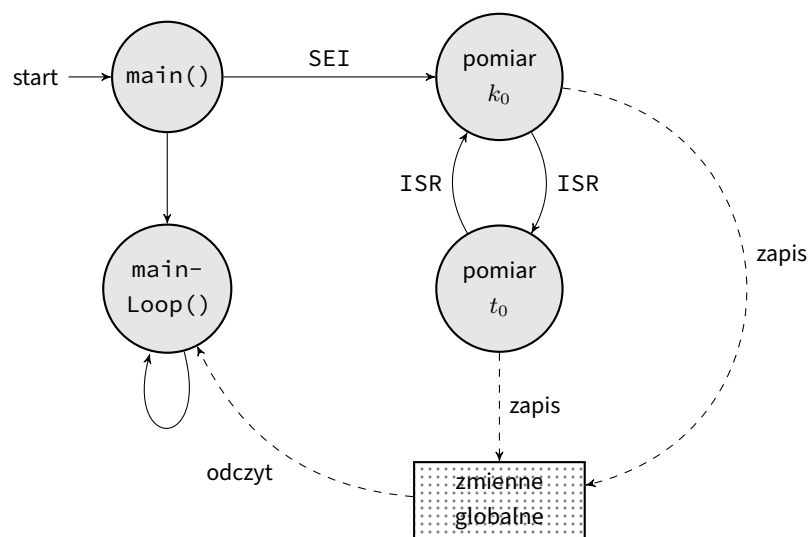
**pomiar  $t_0$**  Odczytuje pomiar termometru, zapisuje go do zmiennej globalnej i przełącza ADC na kanał klawiatury.

Stany można zdefiniować za pomocą typu wyliczeniowego:

```
1 /**
2  * Stany maszyny pomiarowej.
3  */
4  enum ADC_STATE {
5      ADC_STATE_K0, ///< Pomiar klawiatury.
6      ADC_STATE_T0, ///< Pomiar temperatury.
7  };
```

Maszynę stanów można zaś zaimplementować za pomocą wyrażenia **switch()**, np.:

```
1 static ADC_STATE adcState;
2
3 switch (adcState) {
4 case ADC_STATE_K0:
5     // Pomiar klawiatury.
6     break;
7 case ADC_STATE_T0:
8     // Pomiar temperatury.
9     break;
10 default:
11     break;
12 }
```



**Rysunek 4:** Maszyna stanów obsługująca dwukanałowy ADC

## Zadanie rozszerzone

Celem zadania rozszerzonego jest poprawa pomiaru temperatury.

Pierwszy odczyt po zmianie napięcia referencyjnego może być z założenia nieprawidłowy, o czym mówi dokumentacja mikrokontrolera:

The first ADC conversion result after switching reference voltage source may be inaccurate, and the user is advised to discard this result.

W przypadku klawiatury problem ten nie jest na ogół zauważalny, ale, oczywiście, dla pomiaru klawiszy też należy uwzględnić tę uwagę. W przypadku temperatury problem jest z kolei szerszy, gdyż napięcie  $V_{BG} = 1,1\text{ V}$  pochodzi ze źródła o wysokiej impedancji (niskiej wydajności prądowej), a ponieważ aktywne napięcie referencyjne jest zwierane do nóżki *AREF*, do której z kolei podłączony jest kondensator filtrujący to napięcie, potrzebny jest dodatkowy czas na ustabilizowanie napięcia referencyjnego (rozładowanie kondensatora z napięcia 5 V do 1,1 V):

When the bandgap reference voltage is used as input to the ADC, it will take a certain time for the voltage to stabilize. If not stabilized, the first value read after the first conversion may be wrong.

## Wymagania funkcjonalne

1. Temperatura jest mierzona poprawnie.
2. Pomiar temperatury odbywa się około 2 razy na sekundę.

## Modyfikacja programu

### Ignorowanie pierwszego pomiaru po zmianie kanatu

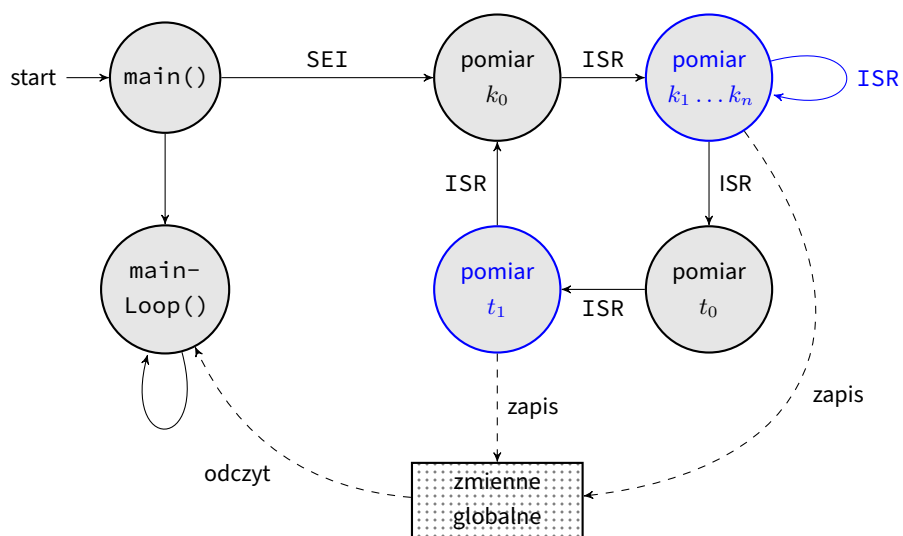
Należy rozszerzyć maszynę stanów o dwa dodatkowe stany, dzięki czemu będzie możliwe rozróżnienie między pierwszym, potencjalnie błędnym pomiarem, a kolejnymi, poprawnymi.



Ze względu na stosunkowo duży odstęp czasowy między pomiarami, prawdopodobnie nawet dla termometru już drugi odczyt będzie poprawny.

### Spowolnienie pomiaru temperatury

Aby pomiar temperatury był bardziej czytelny, należy go spowolnić. Nie można tego zrobić przez zmianę częstotliwości pracy timera, gdyż spowolni to również reakcję klawiatury. Można to zrealizować, wykonując pomiar temperatury co  $n$  pomiarów klawiatury.



**Rysunek 5:** Ostateczna wersja maszyny stanów, uwzględniająca czas przetwarzania kanałów i rzadszy odczyt temperatury