

Kurs programowania mikrokontrolerów PIC (7)

Obsługa przetwornika analogowo-cyfrowego



Większość nowoczesnych mikrokontrolerów (i to niezależnie od liczby dostępnych wyprowadzeń) jest wyposażanych w moduł przetwornika analogowo-cyfrowego. Jest on swego rodzaju pomostem pomiędzy „światem” analogowym i cyfrowym, a o użyteczności takiego mariażu nie trzeba już chyba przekonywać. W tym artykule zajmiemy się obsługą przetwornika A/D wbudowanego w strukturę mikrokontrolera PIC.

Przetwornik wykonuje konwersję wielkości analogowej – napięcia wejściowego na odpowiadającą mu liczbę. Dąży się do tego, aby zależność pomiędzy napięciem na wejściu a liczbą otrzymywaną w wyniku konwersji była liniowa tzn. aby wynik konwersji był wprost proporcjonalny do napięcia wejściowego konwertera A/D.

Jednym z ważniejszych parametrów przetwornika są rozdzielczość wyrażana w bitach i zakres pomiarowy. Obie te wartości są ze sobą związane. Załóżmy, że mamy do dyspozycji 8-bitowy przetwornik. Oznacza to, że liczba, którą otrzymujemy na jego wyjściu jest zakodowana na 8 bitach i może przyjmować 2^8 (256) dyskretnych wartości. Zatem jeżeli maksymalne napięcie wejściowe, będzie wynosiło 5 V, natomiast minimalne 0 V (w takiej sytuacji można mówić o zakresie pomiarowym 0...5 V), to zmiana wartości na najmłodszym bicie będzie odpowiadała zmianie napięcia wejściowego o $5 \text{ V}/256=0,01953 \text{ V}$.

Wyobraźmy sobie, że wejście przetwornika A/D dołączamy do suwaka wieloobrotowego potencjometru, który umożliwia precyzyjną regulację napięcia mierzonego przez przetwornik w zakresie 0...5 V. Niech w chwili rozpoczęcia analizy na wejściu przetwornika występuje napięcie 0 V, co odpowiada jednemu ze skrajnych położenia suwaka potencjometru. W sytuacji idealnej wartość bitowa zwracana przez przetwornik A/D po konwersji napięcia wejściowego będzie wynosiła binarnie 00000000. Teraz wolno zmieniamy napięcie wejściowe. Możemy zauważyć, że napięcie powoli wzrasta, a wartość zwracana przez przetwornik jest zerowa do momentu, gdy napięcie nie

osiągnie wartości 0,01953 V. Wtedy wartość binarna na wyjściu zmieni się na 00000001. Napięcie dalej powoli rośnie, ale bitowa wartość na wyjściu zmieni się dopiero, kiedy osiągnie $2 \times 0,01953 \text{ V}=0,03906 \text{ V}$. Można stąd wywnioskować, że przetwornik „zauważa” zmianę z dokładnością do własnej rozdzielczości (tzw. ziarna), które w tym wypadku wynosi 0,01953 V. Sygnał analogowy może przyjmować dowolne wartości, natomiast systemy cyfrowe są w stanie przetwarzać tylko sygnały reprezentowane słowami o skończonej liczbie bitów, więc reprezentacja sygnału cyfrowego wymaga skończonej liczby poziomów kwantyzacji. Proces polegający na przypisaniu wartości analogowych do najbliższych poziomów reprezentacji nosi nazwę **kwantyzacji**. Łatwo zauważyć, że informacja znajdująca się pomiędzy poziomami jest nieodwracalnie tracona (**rysunek 1**).

Żeby zarejestrować mniejsze zmiany napięcia wejściowego trzeba zastosować przetwornik o większej o większej rozdzielczości bitowej. Na przykład rozdzielczość przetwornika A/D o rozdzielczości 10 bitów i zakresie pomiarowym 0...5 V wynosi $5 \text{ V}/1024=0,004883 \text{ V}$.

Zazwyczaj zakres pomiarowy przetwornika jest określany przez napięcie odniesienia (referencyjne). Jest to napięcie, dla którego liczba na wyjściu przetwornika ma maksymalną wartość (w zapisie binarnym będą to same jedynki). W naszym przykładzie dla przetwornika 8 bitowego przy napięciu wejściowym 5 V liczba binarna zwracana przez przetwornik będzie miała wartość 11111111. Podanie napięcia wyższego spowoduje powstanie błędu, bo przetwornik zwróci liczbę binarną 10000000.

Dodatkowe materiały na CD/FTP:
<ftp://ep.com.pl>, user: 17692, pass: 4yv87ftn
 • wszystkie poprzednie części kursu

Bit 9-ty zostaje ustawiony, ale tylko wirtualnie, ponieważ jego obsługa nie mieści się w fizycznych możliwościach przetwornika A/D i CPU. W takiej sytuacji przetwornik A/D zwróci wartość binarną 00000000.

Znając wartość napięcia referencyjnego można obliczyć liczbę zwracaną przez przetwornik A/D w wyniku konwersji:

$$\text{Liczba zwracana} = \frac{2^n \cdot V_{in}}{V_{ref}}$$

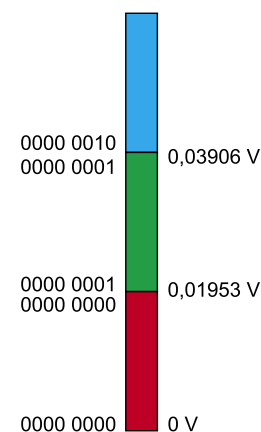
gdzie:

n – liczba bitów przetwornika,

V_{ref} – napięcie referencyjne [V],

V_{in} – napięcie wejściowe przetwornika [V].

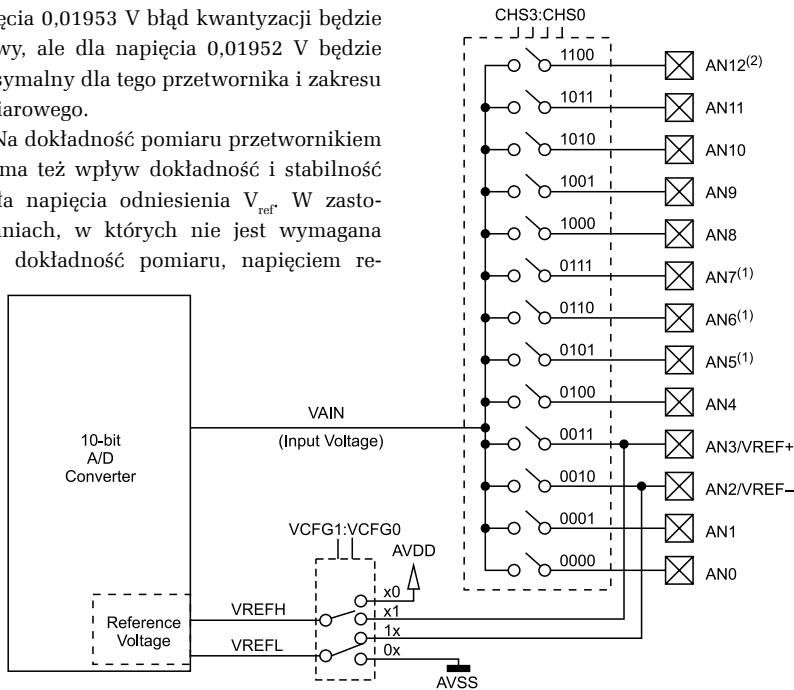
Na przykład dla napięcia wejściowego $V_{in}=1 \text{ V}$, $V_{ref}=5 \text{ V}$ i 8-bitowej rozdzielczości przetwornika otrzymamy $(2^8 \cdot 1 \text{ V})/5 \text{ V}=51,2$, a w wyniku kwantyzacji (przybliżenia do wartości całkowitej przez odrzucenie części ułamkowej) liczbę 51. Przemnożmy wynik pomiaru przez ziarno, otrzymamy $51 \times 0,01953 \text{ V}=0,99603 \text{ V}$. Przetwornik zwraca inną wartość napięcia, niż występujące na jego wejściu. Błąd pomiaru wynika z kwantyzacji i nazywa się błędem kwantyzacji. Jak się łatwo domyślić się, jego wartość ma k s y m a l n a będzie zależna od rozdzielczości bitowej. Błąd ten ma zmienną wartość. Na rys. 1 dla mierzonego



Rysunek 1. Kwantyzacja napięcia wejściowego dla przetwornika 8-bitowego o zakresie pomiarowym 0...5 V

napięcia 0,01953 V błąd kwantyzacji będzie zerowy, ale dla napięcia 0,01952 V będzie maksymalny dla tego przetwornika i zakresu pomiarowego.

Na dokładność pomiaru przetwornikiem A/C ma też wpływ dokładność i stabilność źródła napięcia odniesienia V_{ref} . W zastosowaniach, w których nie jest wymagana duża dokładność pomiaru, napięciem re-



Rysunek 2. Schemat wyboru kanału pomiarowego i napięcia referencyjnego

ADCON0

B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1	B0
---	---	CHS3	CHS2	CHS1	CHS0	GO/!DONE	ADON

CHS3:CHS0	Wybrane wejście	CHS3:CHS0	Wybrane wejście
0000	AN0	0101	AN5
0001	AN1	0110	AN6
0010	AN2	0111	AN7
0011	AN3	1000	AN8
0100	AN4	1001	AN9

GO/!DONE – bit ustawiony podczas trwania konwersji, zerowany po jej zakończeniu
 ADON – ustawienie powoduje załączenie przetwornika A/C, wyzerowanie wyłączenie

Rysunek 3. Znaczenie i rozmieszczenie bitów w rejestrze ADCON0

ADCON1

B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1	B0
---	---	VCFG1	VCFG0	PCFG3	PCFG2	PCFG1	PCFG0

PCFG3:PCFG0	AN12	AN11	AN10	AN9	AN8	AN7	AN6	AN5	AN4	AN3	AN2	AN1	AN0
0000	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0001	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0010	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0011	D	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0100	D	D	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0101	D	D	D	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0110	D	D	D	D	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0111	D	D	D	D	D	A	A	A	A	A	A	A	A
1000	D	D	D	D	D	D	A	A	A	A	A	A	A
1001	D	D	D	D	D	D	D	A	A	A	A	A	A
1010	D	D	D	D	D	D	D	D	A	A	A	A	A
1011	D	D	D	D	D	D	D	D	D	A	A	A	A
1100	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	A	A	A
1101	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	A	A
1110	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	A
1111	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D

D – wejścia/wyjścia cyfrowe, A – wejścia analogowe
 Wejścia AN7, AN6, AN5 niedostępne w PIC18F2320
 VCFG1: 1=VREF- (AN2), 0=VSS
 VCFG0: 1=VREF+ (AN3), 0=VDD

Rysunek 4. Znaczenie i rozmieszczenie bitów w rejestrze ADCON1

ferencyjnym może być napięcie zasilające mikrokontroler. Często jest ono dostarczane przez popularny stabilizator liniowy typu 7805. Dla tego stabilizatora napięcie wyjściowe jest ustawiane z niepewnością $\pm 0,25$ V (4,75...5,25 V) i taką niepewność będzie miało napięcie referencyjne V_{ref} . Ponadto, napięcie zasilające mikrokontroler jest zakłócone przez impulsowy pobór prądu układów cyfrowych. Dużo lepszym rozwiązaniem jest podanie napięcia referencyjnego ze stabilnego, niezakłócanego źródła na przeznaczone do tego celu wyprowadzenia mikrokontrolera. Przy dokładnych pomiarach trzeba też pamiętać o stabilności temperaturowej tego źródła.

Mikrokontroler PIC18F2320 ma wbudowany przetwornik A/C o rozdzielczości 10 bitów i z umieszczonym na wejściu multiplexerem analogowym pozwalającym mierzyć napięcie występujące na 1 z 10 wejść analogowych AN0...AN9. Wejścia analogowe są współdzielone z liniami cyfrowych portów PORTA i PORTB. Warto wspomnieć, że po włączeniu mikrokontrolera wszystkie współdzielone linie są automatycznie ustawiane w tryb pracy jako wejścia przetwornika A/C. Źródłem napięcia referencyjnego może być napięcie zasilania mikrokontrolera lub napięcie doprowadzone pomiędzy nóżki V_{ref-} (AN2) i V_{ref+} (AN3).

Na **ryśunku 2** pokazano schemat wyboru kanału pomiarowego i napięcia referencyjnego. Rejestr **ADCON0** (**ryśunek 3**) steruje wyborem aktywnego wejścia analogowego i załączeniem przetwornika. Bit **GO/!DONE** jest przeznaczony do inicjowania konwersji, a bit **ADON** do włączania i wyłączenia przetwornika A/C. O tym, które doprowadzenie portu mikrokontrolera jest wejściem analogowym, a które linią I/O decydują wartości bitów **PCFG3...PCFG0** rejestru **ADCON1** (**ryśunek 4**). Dodatkowo, bity **VCFG1** i **VCFG0** przełączają napięcie referencyjne pomiędzy napięciem zasilającym mikrokontroler, a napięciem podawanym na V_{ref-} i V_{ref+} . Ostatni z rejestrów sterujących **ADCON2** (**ryśunek 5**) ustala format danych wyjściowych, czas akwizycji, i częstotliwość taktowania modułu przetwornika.

Po zakończeniu konwersji analogowo cyfrowej 10-bitowe słowo będące jej wynikiem jest wpisywane do pary rejestrów **ADRESH** i **ADRESL**. Sposób umieszczenia wyniku w rejestrach jest zależny od poziomu bitu **ADFM** w rejestrze **ADCON2**.

Przetwornik jest załączany po ustawieniu bitu **ADON**, a konwersja rozpoczyna się po ustawieniu bitu **GO/!DONE**. Kondensator **CHOLD** (*Charge Holding Capacitor*) jest odłączany od wejścia analogowego i od tego momentu przetwornik mierzy napięcie na jego okładkach. Czas trwania tego pomiaru (czas akwizycji) jest programowany bitami **ACQT2:0**. Kiedy konwersja jest zakończona,

to moduł przetwornika zeruje bit *GO/DONE*, ustawia flagę przerwania *ADIF* i zapisuje rejestry *ADRESH* i *ADRESL*. Wyliczenia pozwalające oszacować potrzebny czas akwizycji można znaleźć w dokumentacji mikrokontrolera.

Na **rysunku 6** zilustrowano przebieg konwersji dla *ACQT=000*. Sposób zapisywania rejestrów *ADRESH* i *ADRESL* w zależności od zaprogramowanego formatu (bit *ADFM* z rejestru *ADCON2*) pokazano na **rysunku 7**.

Przed użyciem przetwornika analogowo cyfrowego trzeba go skonfigurować. Załóżmy, że będziemy mierzyli napięcie na wejściu *AN0*, które jest współdzielone z linią cyfrową *RA0*. Na początek ustawimy *RA0* jako linię wejściową (*TRISA0=1*), oraz *AN0* jako wejście analogowe (bity *PCFG3:PCFG0*), a pozostałe wejścia będą liniami cyfrowymi. Dla uproszczenia konfiguracji sprzętowej przyjmijmy, że napięciem odniesienia będzie napięcie zasilające mikrokontroler i dlatego bity *VCFG1* i *VCFG0* trzeba wyzerować. Na koniec ustawiamy format „dosunięte do prawej” (*ADFM=1*), czas akwizycji *0TAD* (*ACQT2:ACQT0=000*) i taktowanie modułu za pomocą sygnału z wewnętrznego oscylatora FRC (*ADCS2:ADCS0=000*).

Na **listingu 1** zamieszczono fragment programu inicjalizującego przetwornik. W module AVT5275 został zamontowany potencjometr P2 zasilany z napięcia +5 V. Jego suwak przez rezystor R14 jest połączony z wyprowadzeniem *VREG* złącza J22. Po połączeniu wyprowadzenia *VREG* z linią *RA0* przetwornik może mierzyć napięcie ustawiane potencjometrem P2 w zakresie od 0...V_{dd}. Przetwornik może mierzyć z rozdzielczością 10 bitów, ale dla naszych celów jest ona zbyt duża zważywszy na wspomniane niedoskonałości napięcia zasilania, które wykorzystamy jako napięcie odniesienia (referencyjne). Dlatego odczytywana rozdzielczość zostanie ograniczona programowo do 8 bitów (2 najmłodsze bity zostaną wyzerowane).

Na **listingu 2** pokazano procedurę pomiaru napięcia przez przetwornik A/C. Pomiar jest inicjowany po ustawieniu bitu *GO/DONE*. Jak wspomniano, koniec konwersji jest sygnalizowany przez moduł przetwornika przez wyzerowanie tego bitu. Po zakończeniu pomiaru do 16-bitowej zmiennej *adc* jest zapisywana 10-bitowa wartość konwersji. Ta wartość jest potem degradowana do rozdzielczości 8-bitowej, ale jeżeli to konieczne, to można usunąć linię *adc=adc>>2*; i funkcja będzie zwracała wartość 10-bitową.

Przy rozdzielczości 8-bitowej i napięciu referencyjnym 5 V zmiana na najmłodszym bicie odpowiada napięciu 5 V/256=0,01953 V. Jednak okazało się, że na mojej płytce napięcie zasilania wynosi 5,1 V. Przy tym napięciu zmiana na jednym bicie odpowiada 0,01992 V. Żeby wyliczyć zmierzone napięcie trzeba wartość z wyjścia

ADCON2:

B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1	B0
ADFM	---	ACQT2	ACQT1	ACQT0	ADCS2	ADCS1	ADCS0

ADFM format danych wyjściowych: 1=dosunięte do prawej, 0=dosunięte do lewej.

ACQT2:ACQT0	Czas akwizycji	ACQT2:ACQT0	Czas akwizycji
111	20TAD	011	6TAD
110	16TAD	010	4TAD
101	12TAD	001	2TAD
100	8TAD	000	0TAD

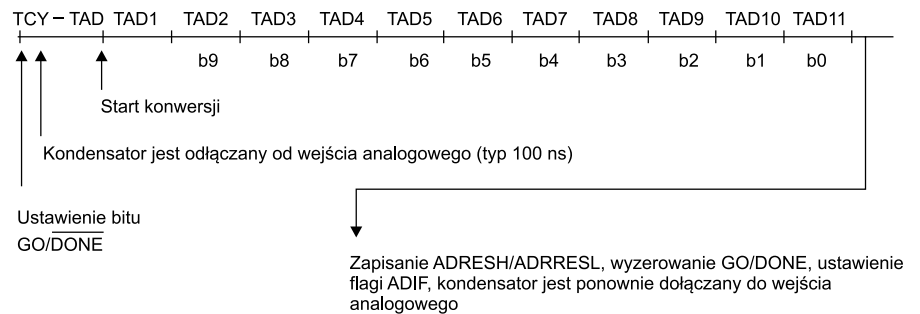
ADCS2:ADCS0	Częstotliwość taktowania A/C	ADCS2:ADCS0	Częstotliwość taktowania A/C
111	FRC	011	FRC
110	Fosc/64	010	Fosc/32
101	Fosc/64	001	Fosc/8
100	Fosc/4	000	Fosc/2

Legenda:

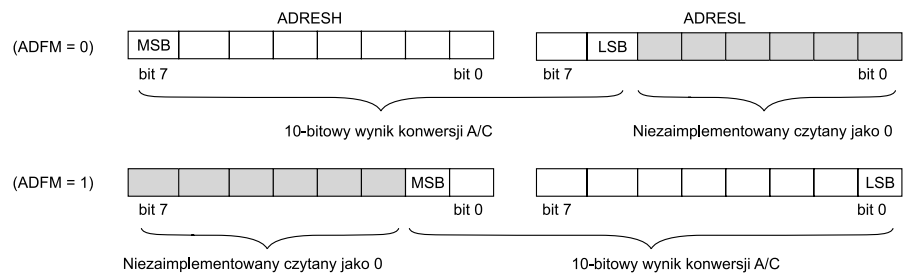
FRC – sygnał taktujący generowany przez wbudowany generator RC sterujący pracą przetwornika A/C

Fosc – częstotliwość sygnału taktującego mikrokontroler

Rysunek 5. Znaczenie i rozmieszczenie bitów w rejestrze ADCON2



Rysunek 6. Przebieg konwersji analogowo cyfrowej



Rysunek 7. Formatowanie wyniku konwersji

Listing 1. Przykładowa konfiguracja przetwornika.

```
TRISA0=1; //PA0 wejściowy
ADCON0=1; //kanał 0 (AN0) i przetwornik włączony
ADCON1=0x0e; //Vref=zasilanie uC, wybór AN0
ADCON2=0x87; //format dosunięte do prawej, ACQT=0,oscylator FRC
```

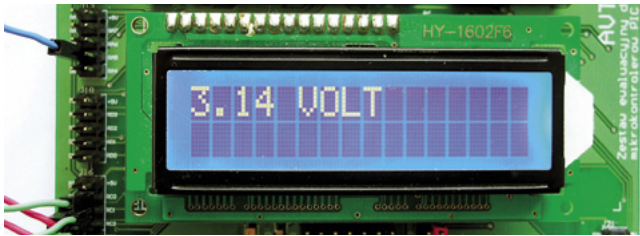
Listing 2. Pomiar napięcia przez przetwornik

```
unsigned int read_adc(void){
    unsigned int adc;
    ADCON0=0x03; //start pomiaru na wejściu AN0 ( RA0) .
    while((ADCON0&2)==2); //czekaj na wyzerowanie GO/DONE
    adc=ADRESH;
    adc=(adc<<8)|ADRESL;
    adc=adc>>2; //konwersja do rozdzielczości 8 bitowej
    return adc;
}
```

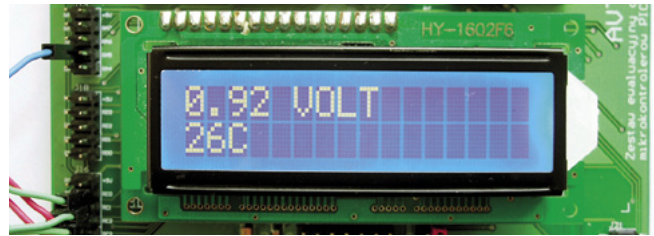
przetwornika pomnożyć przez 0,01992 V. Kompilator ma bibliotekę działań zmiennoprzecinkowych, ale tutaj lepiej będzie wykonać działania na liczbach całkowitych. Wartość 0,01992 można zaokrąglić do 0,02. Żeby liczbę z przetwornika pomnożyć przez 0,02, mnożymy ją najpierw przez

(0,02*10000=200). Dla napięcia 2,3 V na wejściu przetwornika w wyniku konwersji otrzymujemy (256*2,3)/5,1 V=115 → 115*200=23000.

Podzielenie tego wyniku przez 10000 nic nam nie da, bo otrzymamy iloraz 2,3 po dzieleniu stałoprzecinkowym zaokrąglony do 2.



Fotografia 8. Wynik pomiaru napięcia na potencjometrze P2



Fotografia 9. Wynik pomiaru temperatury

Listing 3. Pętla odczytywania napięcia przez przetwornik

```
while(1){
    delay_ms(50);
    adc=read_adc();
    volt=adc*200;
    volt=volt/100;
    DispDec(volt,1,1);
}
```

ków (fotografia 8). Sposób i procedury obsługi wyświetlacza były opisane w jednym z poprzednich odcinków kursu.

Pomiar napięcia z potencjometru to przydatne ćwiczenie. Można przetestować w praktyce inicjalizację i działanie przetwornika A/C. Bardziej praktyczne zastosowanie

zrzyć temperaturę od -20°C . W temperaturze 20°C na wyjściu układu występuje napięcie 390 mV ($20 \times 19,5\text{ mV}$). W temperaturze -20°C napięcie na wyjściu Vout wynosi $400\text{ mV} - 390\text{ mV} = 10\text{ mV}$. Dla temperatury poniżej $-20,5^{\circ}\text{C}$ napięcie Vout zawsze będzie zerowe.

Listing 4. Funkcja wyświetlania napięcie w postaci dziesiętnej z przecinkiem

```
void DispDec(unsigned int dana, char x, char y){
    unsigned int dec[4];
    dec[0]=dana/100;
    dec[1]=(dana-(dec[0]*100))/10;
    dec[2]=(dana-((dec[0]*100)+(dec[1]*10)));
    PosLcd(x,y);
    WriteRd(dec[0]+0x30);
    WriteRd('.');
    WriteRd(dec[1]+0x30);
    WriteRd(dec[2]+0x30);
    DispLcd(" VOLT");
}
```

Listing 5. Pętla pomiaru temperatury

```
while(1){
    delay_ms(100);
    adc=read_adc();
    DispTemp(adc,1,2);
    volt=adc*200;
    volt=volt/100;
    DispDec(volt,1,1);
}
```

przetwornika znajdziemy w czasie pomiarów napięcia wyjściowego z umieszczonego na płytce AVT5275 scalonego termometru z MCP9701 (U7). Napięcie na wyjściu układu jest proporcjonalne do temperatury otoczenia i zmienia się według zależności:

$$V_{out} = T_c \times T_a + V_0,$$

Listing 6. wyświetlanie temperatury

```
void DispTemp(unsigned char temp, char x, char y){
    PosLcd(x,y);
    temp-=20;
    WriteRd(temp/10+0x30);
    WriteRd(temp%10+0x30);
    WriteRd('C');
}
```

Jeżeli jednak podzielimy 23000 przez 100, otrzymamy 230. Wystarczy teraz wyświetlić przecinek przesunięty o 2 pozycje w lewo (odpowiada to kolejnemu dzieleniu przez 100) i otrzymamy 2,30. Na **listingu 3** zamieszczono pętlę nieskończoną pomiaru napięcia z suwaka potencjometru. Przeliczona wartość jest wyświetlana na wyświetlaczu w postaci dziesiętnej przez funkcję *DispDec* (**listing 4**). W programie testowym użyłem wyświetlacza alfanumerycznego 2×16 zna-

gdzie
 T_c – współczynnik temperaturowy,
 T_a – temperatura otoczenia,
 V_0 – napięcie na wyjściu dla 0°C .

Współczynnik temperaturowy ustalono na wartość $19,5\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$, a napięcie V_0 dla 0°C wynosi 400 mV . W danych technicznych układu producent podaje zakres mierzonej temperatury od -40°C do $+125^{\circ}\text{C}$. dla rodziny układów MCP9700/9701. W praktyce jednak MCP9701 może mie-

Przeliczenie temperatury otoczenia w zależności od mierzonego napięcia Vout przy rozdzielczości 10-bitowej jest dość kłopotliwe. Wymaga to zastosowania do obliczeń arytmetyki zmiennoprzecinkowej. Producent jednak zadbał o to, aby pomiar był tak łatwy, jak to tylko możliwe pod warunkiem, że wystarczy nam rozdzielczość 8-bitowa. Współczynnik $19,5\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ został tak dobrany, aby dla napięcia referencyjnego $V_{ref} = 5\text{ V}$ i przy rozdzielczości 8-bitów uzyskać $1^{\circ}\text{C}/\text{bit}$. Wystarczy odczytać pomiar z przetwornika, odjąć od niego 20 (bo układ mierzy od -20°C) i otrzymujemy dodatnią temperaturę w stopniach Celsjusza.

Do prób podłączyłem wyjście MCP9701 doprowadzone do wyprowadzenia VTEMP złącza J22 z wejściem analogowym AN0. Na **listingu 5** pokazano pętlę mierząca za pomocą przetwornika napięcia z VTEMP. W górnej linijce wyświetlacza jest wyświetlana wartość mierzonego napięcia, a w dolnej wyliczona temperatura. Wyświetlanie jest realizowane przez procedurę *DispTemp* pokazaną na **listingu 6**. Na **fotografii 9** pokazano wynik pomiaru. Dla napięcia $0,92\text{ V}$ mamy temperaturę $(920 - 400)/19,5 = 26,6^{\circ}\text{C}$. Na wyświetlaczu widzimy 26°C . Zaokrąglenie w dół wyniku z przyjętych zaokrągleń przy wyliczaniu mierzonego napięcia.

W module AVT5275 jest również zamontowany zewnętrzny przetwornik analogowo cyfrowy MCP3021. Jego działanie opiszę przy okazji omawiania magistrali szeregowej I²C.

Tomasz Jabłoński, EP

REKLAMA

**Minimoduł ATTiny2313
 AVT1610**

www.sklep.avt.pl

