

Programowanie mikrokontrolerów

Wejścia analogowe

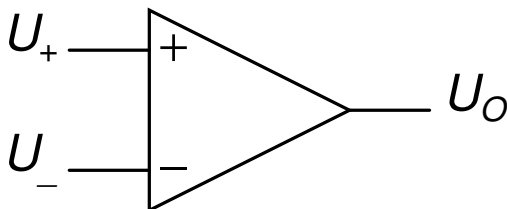
Marcin Engel Marcin Peczarski

Instytut Informatyki Uniwersytetu Warszawskiego

18 listopada 2012

Komparator idealny

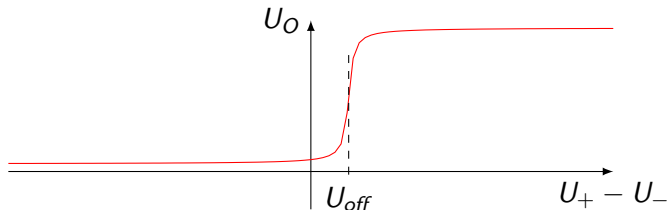
- ▶ Służy do porównywania wartości dwóch napięć elektrycznych.



- ▶ Wyjście U_O jest w stanie wysokim, gdy $U_+ > U_-$,
- ▶ a w stanie niskim, gdy $U_+ < U_-$.

Komparator rzeczywisty

- ▶ Charakterystyka



- ▶ Napięcie niezrównoważenia U_{off} – wartość różnicy napięć na wejściu, przy której napięcie wyjściowe U_O jest w połowie między poziomem niskim a wysokim.
- ▶ Typowe wartości $|U_{off}|$ wynoszą kilka mV.
- ▶ Wzmocnienie napięciowe – nachylenie charakterystyki w jej środku dla $U_+ - U_- = U_{off}$.
- ▶ Typowe wartości wzmocnienia to 10^3 V/V do 10^6 V/V.

Komparator w ATmega16

- ▶ $|U_{off}|$ nie przekracza 40 mV.
- ▶ Wzmocnienia producent nie podaje w danych katalogowych.
- ▶ Wejście U_+ może być podłączone do wyprowadzenia AIN0 (PB2) lub do wewnętrznego napięcia referencyjnego, którego wartość typowa wynosi 1,23 V, a wartość rzeczywista jest w przedziale 1,15 V do 1,35 V.
- ▶ Wejście U_- może być podłączone do wyprowadzenia AIN1 (PB3) lub do jednego z wyprowadzeń PA0 do PA7.

Komparator w ATmega16 – rejestry

ACSR

7	6	5	4	3	2	1	0
ACD	ACBG	ACO	ACI	ACIE	ACIC	ACIS1	ACIS0

SFIOR

7	6	5	4	3	2	1	0
				ACME			

ADCSRA

7	6	5	4	3	2	1	0
ADEN							

ADMUX

7	6	5	4	3	2	1	0
					MUX2	MUX1	MUX0

Komparator w ATmega16 – wybór wejścia

- ▶ $ACBG=0$
Wejście U_+ jest podłączone do AIN0.
- ▶ $ACBG=1$
Wejście U_+ jest podłączone do napięcia referencyjnego.
- ▶ $ACME=0$ lub $ADEN=1$
Wejście U_- jest podłączone do AIN1.
- ▶ $ACME=1$ i $ADEN=0$
Wejście U_- jest podłączone do portu A. Numer wyprowadzenia określają bity MUX2, MUX1, MUX0.

Komparator w ATmega16 – wyjście

- ▶ ACO to wyjście komparatora, zawiera wynik porównania.
- ▶ ACI to znacznik ustawiany, gdy zajdzie zdarzenie, które może wyzwolić przerwanie. Zerowany przez zapisanie 1.
- ▶ ACIE włącza przerwanie komparatora.
- ▶ ACIC dołącza wyjście komparatora bezpośrednio do wejścia przechwytyującego ICP1 licznika 1.
- ▶ ACIS1, ACIS0 wybierają zdarzenie na wyjściu komparatora służące do ustawiania znacznika ACI.

ACIS1	ACIS0	zdarzenie
0	0	zmiana poziomu
0	1	zarezerwowane
1	0	zbocze opadające
1	1	zbocze narastające

Komparator w ATmega16 – wyłączanie

- ▶ Bit ACD wyłącza zasilanie komparatora, aby oszczędzać energię, gdy komparator nie jest używany.
- ▶ Zmiany bitu ACD powinny odbywać się przy wyłączonym przerwaniu ($ACIE=0$), gdyż w przeciwnym przypadku może dojść do wyzwolenia fałszywego przerwania.

Przetwornik analogowo-cyfrowy

- ▶ Zamienia sygnał analogowy na jego reprezentację cyfrową.
- ▶ Podstawowe parametry:
 - ▶ zakres przetwarzanych napięć wejściowych – minimalne U_0 i maksymalne U_1 napięcie wejściowe,
 - ▶ zwykle $U_0 = 0 \text{ V}$ lub $U_0 = -U_1$,
 - ▶ rozdzielczość w bitach – liczba bitów n wyznaczająca liczbę poziomów kwantowania 2^n ,
 - ▶ rozdzielczość napięciowa – wielkość kwantu $(U_1 - U_0)/2^n$,
 - ▶ czas przetwarzania – czas potrzebny dla wykonania jednego cyklu przetworzenia,
 - ▶ częstotliwość próbkowania – maksymalna częstotliwość z jaką mogą być wykonywane kolejne przetworzenia – nie może przekroczyć odwrotności czasu przetwarzania.
- ▶ Uwaga: powyższe dotyczy liniowej charakterystyki przetwarzania.
- ▶ Istnieją również przetworniki z nieliniową charakterystyką, ale nimi nie będziemy się zajmować.

Przetwornik analogowo-cyfrowy z przetwarzaniem bezpośrednim

- ▶ Napięcie wejściowe jest porównywane bezpośrednio przez 2^n komparatorów z 2^n napięciami odniesienia wytworzonymi za pomocą drabinki rezystorów.
- ▶ Metoda jest bardzo szybka.
- ▶ Metoda jest bardzo kosztowna – zwiększenie rozdzielczości o jeden bit wymaga podwojenia liczby elementów.
- ▶ Trudno jest osiągnąć dobrą liniowość przetwarzania – rozrzut parametrów poszczególnych komparatorów.

Przetwornik analogowo-cyfrowy z sukcesywną aproksymacją

- ▶ Napięcie wejściowe jest porównywane za pomocą komparatora z napięciem wyjściowym przetwornika cyfrowo-analogowego.
- ▶ Stosuje się algorytm wyszukiwania binarnego.
- ▶ Przetwarzanie podzielone jest na n kroków.
- ▶ W każdym kroku wyznacza się kolejny bit przetwarzanej wartości, począwszy od najstarszego do najmłodszego.
- ▶ Dokładność przetwarzania zależy od liniowości i dokładności przetwornika cyfrowo-analogowego.

Przetwornik analogowo-cyfrowy całkujący

- ▶ Najdokładniejsze przetworniki działają w oparciu o metodę przetwarzania napięcia na czas.
- ▶ Czas potrafimy mierzyć bardzo dokładnie.
- ▶ Napięcie na kondensatorze wyraża się zależnością

$$u(t) = u(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau,$$

gdzie C to wartość pojemności kondensatora, $u(t)$ napięcie w chwili t , $i(t)$ prąd ładujący pojemność w chwili t .

- ▶ Jeśli $u(t_0) = U_0$ i prąd jest stały, proporcjonalny do zakresu przetwarzanego napięcia $i(t) = (U_1 - U_0)/R$, to

$$u(t) = U_0 + \frac{U_1 - U_0}{RC}(t - t_0).$$

Przetwornik analogowo-cyfrowy z pojedynczym całkowaniem

- ▶ Mierzymy czas potrzebny do naładowania kondensatora od napięcia U_0 do napięcia wejściowego U_{in} .
- ▶ Ten czas zależy liniowo od napięcia wejściowego

$$\frac{U_{in} - U_0}{U_1 - U_0} RC.$$

- ▶ Do porównywania napięć używamy komparatora.
- ▶ Dokładność przetwarzania zależy od dokładności i stabilności stałej czasowej RC oraz napięć U_0 i U_1 .

Przetwornik analogowo-cyfrowy z podwójnym całkowaniem

- ▶ Ładujemy kondensator od napięcia U_0 przez 2^n taktów zegara T prądem proporcjonalnym do napięcia wejściowego U_{in} , dostajemy napięcie

$$U = U_0 + \frac{U_{in}}{RC} \cdot 2^n \cdot T.$$

- ▶ Następnie rozładowujemy go do napięcia początkowego U_0 prądem proporcjonalnym do napięcia odniesienia U_{ref} (z tym samym współczynnikiem proporcjonalności), dostajemy

$$U_0 = U - \frac{U_{ref}}{RC} \cdot x \cdot T.$$

- ▶ Czas rozładowania x w taktach jest proporcjonalny do stosunku napięcia wejściowego do napięcia odniesienia

$$x = \frac{U_{in}}{U_{ref}} \cdot 2^n.$$

Przetwornik analogowo-cyfrowy z podwójnym całkowaniem

- ▶ Jest to najdokładniejsza metoda przetwarzania.
- ▶ Dokładność opiera się na tym, że wynik nie zależy od wartości bezwzględnych pojemności, rezystancji czy czasu.
- ▶ Wynik przetwarzania zależy od stosunku czasów.
- ▶ Niedokładności sygnału taktującego i stałej czasowej kompensują się.
- ▶ Dokładność zależy przede wszystkim od dokładności i stabilności napięcia odniesienia.

Przetwornik analogowo-cyfrowy w ATmega16 (1)

- ▶ Procesor ATmega16 ma wbudowany przetwornik analogowo-cyfrowy.
- ▶ Rozdzielczość 10 bitów – rozróżnia 1024 wartości.
- ▶ Mierzy wartość napięcia elektrycznego względem masy układu:
 - ▶ wartość wyjściowa z przedziału 0 do 1023,
 - ▶ określona wzorem

$$\frac{V_{IN} \cdot 1024}{V_{REF}}.$$

- ▶ Mierzy różnicę wartości dwóch napięć elektrycznych (opcja nietestowana w obudowie DIP40):
 - ▶ wartość wyjściowa z przedziału –512 do 511 (kod U2),
 - ▶ określona wzorem

$$\frac{(V_{POS} - V_{NEG}) \cdot GAIN \cdot 512}{V_{REF}}.$$

Przetwornik analogowo-cyfrowy w ATmega16 (2)

- ▶ Jako wejścia V_{IN} , V_{POS} , V_{NEG} można wybrać nogi portu A.
- ▶ Współczynnik wzmocnienia $GAIN$ może wynosić 1, 10, 200.
- ▶ Napięcie odniesienia V_{REF} :
 - ▶ napięcie zasilania układu;
 - ▶ wewnętrzne napięcie odniesienia, nominalnie 2,56 V, wartość rzeczywista między 2,3 a 2,7 V;
 - ▶ zewnętrzne napięcie odniesienia podane na nogę AREF.
- ▶ Taktowany zegarem od 50 do 200 kHz.
- ▶ Przetwarzanie może być wyzwalane jednokrotnie lub automatycznie powtarzane.
- ▶ Koniec przetwarzania i gotowość do odczytania wyniku może być zgłaszana przerwaniem.

Przetwornik analogowo-cyfrowy w ATmega16 (3)

- ▶ Przed użyciem przetwornik trzeba skonfigurować.
- ▶ Rejestr ADMUX określa:
 - ▶ źródło napięcia odniesienia V_{REF} ;
 - ▶ sposób prezentacji wyniku;
 - ▶ wybór wejścia V_{IN} , V_{POS} , V_{NEG} ;
 - ▶ współczynnik wzmocnienia $GAIN$.
- ▶ Rejestr ADCSR(A) określa:
 - ▶ włączenie przetwornika;
 - ▶ wybór sposobu wyzwalania;
 - ▶ włączenie obsługi przerwania;
 - ▶ ustawienie częstotliwości taktowania.
- ▶ 3 najstarsze bity rejestru SFIOR określają wybór źródła automatycznego wyzwalania.
- ▶ Rejestry ADCL i ADCH zawierają przetworzoną wartość.

Rejestr ADMUX

7	6	5	4	3	2	1	0
REFS1	REFS0	ADLAR	MUX4	MUX3	MUX2	MUX1	MUX0

Bity 7:6

REFS1	REFS0	napięcie odniesienia
0	0	zewnętrzne, podane na nogę AREF
0	1	napięcie zasilania
1	0	wartość zarezerwowana
1	1	wewnętrzne 2,56 V

Bit 5 – rozmieszczenie bitów wyniku

ADLAR	rejestr ADCH								rejestr ADCL							
0	-	-	-	-	-	-	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	-	-	-	-	-	-

Rejestr ADMUX, cd.

- ▶ Bity 4:0 służą do wyboru wejścia przetwornika.
- ▶ Wartości od 0 do 7 wybierają odpowiednio jedno z wejść PA0 do PA7.
- ▶ Wartości od 8 do 29 wybierają parę wejść różnicowych i współczynnik wzmocnienia *GAIN* – szczegóły w dokumentacji.
- ▶ Wartości 30 i 31 podłączają wejście przetwornika odpowiednio do stałego napięcia 1,23 V i 0 V (masa).
- ▶ Przełączanie wejścia przetwornika między kolejnymi konwersjami umożliwia symultaniczne przetwarzanie kilku wejść.
- ▶ Przełączenie wejścia nie ma wpływu na aktualnie rozpoczęte przetwarzanie i będzie widoczne dopiero przy kolejnym przetwarzaniu.
- ▶ Przy n wejściach maksymalna częstotliwość próbkowania pojedynczego wejścia jest n razy mniejsza od maksymalnej częstotliwości próbkowania przetwornika.

Rejestr ADCSR(A)

7	6	5	4	3	2	1	0
ADEN	ADSC	ADATE	ADIF	ADIE	ADPS2	ADPS1	ADPS0

- ▶ ADEN – włączenie przetwornika
 - ▶ ADSC – start konwersji
 - ▶ ADATE – włączenie automatycznego trybu wyzwalania, źródło wyzwalania ustawiane w rejestrze SFIOR
 - ▶ ADIF – znacznik przerwania ustawiany, gdy przetwarzanie zakończone, zerowany automatycznie podczas obsługi przerwania
- Uwaga:** jeśli nie używamy przerwania, to zerowanie tego bitu odbywa się przez zapisanie do niego wartości 1!
- ▶ ADIE – włączenie przerwania

Rejestr ADCSR(A), cd.

Bity 2:0 – ustalenie częstotliwości taktowania przetwornika

ADPS2	ADPS1	ADPS0	współczynnik podziału
0	0	0	2
0	0	1	2
0	1	0	4
0	1	1	8
1	0	0	16
1	0	1	32
1	1	0	64
1	1	1	128

Wybór częstotliwości taktowania

- ▶ Przetwornik należy taktować z częstotliwością między 50 kHz a 200 kHz.
- ▶ Dla częstotliwość zegara systemowego 8 MHz wybieramy współczynnik podziału 64 lub 128.
- ▶ Jeśli nie zależy nam na dużej częstotliwości próbkowania, wybieramy 128.
- ▶ Daje to nam częstotliwość taktowania przetwornika równą 62,5 kHz.
- ▶ Typowa konwersja trwa 13 cykli, więc możemy osiągnąć próbkowanie z częstotliwością ok. 4,8 kHz.

Rejestr SFIOR

7	6	5	4	3	2	1	0
ADTS2	ADTS1	ADTS0					

Gdy ADATE=1 bity ADTS2, ADTS1, ADTS0 wybierają zdarzenie wyzwalające konwersję.

ADTS2	ADTS1	ADTS0	zdarzenie
0	0	0	zakończenie poprzedniej konwersji
0	0	1	komparator
0	1	0	wejście INT0
0	1	1	licznik 0 porównanie
1	0	0	licznik 0 przepełnienie
1	0	1	licznik 1 porównanie B
1	1	0	licznik 1 przepełnienie
1	1	1	licznik 1 przechwycenie

Co się dzieje po włączeniu konwersji?

- ▶ Układ zajmuje się przetwarzaniem (w tle).
- ▶ Po jego zakończeniu ustawia bit ADIF w rejestrze ADCSR (i ewentualnie zgłasza przerwanie).
- ▶ Można teraz odczytać wartość w ADCH:ADCL i (jeśli robimy to poza przerwaniem) wyzerować bit ADIF.
- ▶ Wyzerowanie ADIF odbywa się przez ustawienie go na ...1!

Odczyt wyniku konwersji

- ▶ Jeśli potrzebujemy odczytać oba rejestry, to najpierw czytamy ADCL, a potem ADCH.

```
in r16, ADCL
```

```
in r17, ADCH
```

- ▶ Możemy też odczytać tylko sam rejestr ADCH, gdy np. ADLAR=1.

```
in r17, ADCH
```

Przykłady konfiguracji rejestru ADMUX

- ▶ Napięcie odniesienia równe napięciu zasilania, wyrównanie wyniku do prawej, korzystamy z wejścia PA7:

```
ldi r16, 1 << REFS0 | PA7
out ADMUX, r16
```

- ▶ Wewnętrzne napięcie odniesienia 2,56 V, wyrównanie do lewej, wejście PA0:

```
ldi r16, 1 << REFS1 | 1 << REFS0 |
          1 << ADLAR | PA0
out ADMUX, r16
```

Przykład – aktywne czekanie na zakończenie konwersji

- ▶ Włączenie przetwornika, współczynnik podziału 128

```
ldi r16, 1 << ADEN | 1 << ADPS0 |  
      1 << ADPS1 | 1 << ADPS2  
out ADCSR, r16
```

- ▶ Włączenie konwersji

```
sbi ADCSR, ADSC
```

- ▶ Aktywne czekanie na jej zakończenie

czekaj:

```
sbis ADCSR, ADIF  
rjmp czekaj
```

- ▶ Odczyt wyniku konwersji

```
in r16, ADCL  
in r17, ADCH
```

- ▶ Wyzerowanie znacznika zdarzenia

```
sbi ADCSR, ADIF
```

Przykład – przerwanie po każdej konwersji

- Pojedyncza konwersja

```
ldi r16, 1 << ADEN | 1 << ADSC | 1 << ADIE |  
      1 << ADPS0 | 1 << ADPS1 | 1 << ADPS2  
out ADCSR, r16
```

- Kolejna konwersja startuje natychmiast po zakończeniu poprzedniej

```
ldi r16, 1 << ADEN | 1 << ADSC | 1 << ADATE |  
      1 << ADIE |  
      1 << ADPS0 | 1 << ADPS1 | 1 << ADPS2  
out ADCSR, r16
```

- Konwersja startuje za każdym razem, gdy zajdzie zdarzenie zgodnego porównania licznika 0

```
ldi r16, 1 << ADEN | 1 << ADATE | 1 << ADIE |  
      1 << ADPS0 | 1 << ADPS1 | 1 << ADPS2  
out ADCSR, r16  
ldi r16, $60  
out SFIOR, r16
```

Obsługa przerwania (1)

```
;skok w wektorze przerw
```

```
.org ADCCaddr
```

```
    jmp ADC_interrupt
```

```
;procedura obsługi przerwania
```

```
ADC_interrupt:
```

```
    ; odłożenie na stos używanych rejestrów
```

```
    ; i rejestru znaczników
```

```
    push r16
```

```
    in    r16, SREG
```

```
    push r16
```

```
    push r17
```

```
    ; wczytanie wartości napięcia
```

```
    in r16, ADCL
```

```
    in r17, ADCH
```

Obsługa przerwania (2)

```
; kod korzystający z wczytanej wartości
```

```
...
```

```
; odtworzenie wartości rejestrów
```

```
; i rejestru znaczników
```

```
pop r17
```

```
pop r16
```

```
out SREG, r16
```

```
pop r16
```

```
; powrót z przerwania
```

```
reti
```

Konfiguracja w VMLAB

- ▶ Źródła mierzonego napięcia możemy symulować za pomocą suwaków (emulujących potencjometry) w Control Panel.
- ▶ Przykład – suwak 1 podłączony do wyprowadzenia PA0, zmieniający wartość napięcia w zakresie od 0 do 5 V:

`V0 PA0 VSS SLIDER_1(0 5)`

Potencjometry w zestawie uruchomieniowym

- ▶ Zestaw uruchomieniowy zawiera dwa potencjometry obrotowe oznaczone POT2 i POT1, znajdujące się w prawym dolnym rogu płytki między przyciskami RESET a SW0.
- ▶ Napięcia na ich wyjściach można zmieniać w zakresie od 0 V do napięcia zasilania – zwykle 5 V.
- ▶ Wyjścia potencjometrów są podłączone odpowiednio do pinów ADJ0 i ADJ1 w grupie MISC.

Układ LM35

- ▶ Zestaw uruchomieniowy wyposażony jest w przetwornik temperatura-napięcie LM35.
- ▶ Może on być zasilany napięciem między 4 V a 30 V.
- ▶ Wytwarza na wyjściu napięcie równe $t \cdot 10 \text{ mV}$, gdzie t jest temperaturą w stopniach Celsjusza.
- ▶ Zakres mierzonych temperatur: -55°C do 150°C (w przypadku pomiaru temperatur ujemnych jest potrzebne symetryczne napięcie zasilania).
- ▶ Gwarantowana dokładność w temperaturze 25°C wynosi $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ lub $\pm 1^{\circ}\text{C}$ w zależności od grupy selekcji.
- ▶ Gwarantowana dokładność w pełnym zakresie temperatur wynosi odpowiednio $\pm 1^{\circ}\text{C}$ lub $\pm 2^{\circ}\text{C}$.
- ▶ Typowe dokładności są około dwa razy lepsze.
- ▶ Odnośnik do dokumentacji znajduje się na stronie przedmiotu.

Budujemy termometr cyfrowy

- ▶ Napięcie z wyjścia układu LM35 podajemy na wejście przetwornika analogowo-cyfrowego.
- ▶ Założmy, że chcemy mierzyć temperatury dodatnie do 150°C .
- ▶ Spodziewamy się zatem napięć V_{IN} spełniających zależność

$$0 \leq V_{IN} \leq 10 \text{ mV} \cdot 150 = 1,5 \text{ V}.$$

- ▶ Wygodnie jest wybrać wewnętrzne napięcie odniesienia o wartości 2,56 V – bity 7:6 rejestru ADMUX:

REFS1	REFS0	napięcie odniesienia
1	1	wewnętrzne 2,56 V

- ▶ Wówczas otrzymana w wyniku konwersji wartość będzie równa

$$\frac{V_{IN} \cdot 1024}{V_{REF}} = \frac{V_{IN} \cdot 1024}{2,56} = 400 \cdot V_{IN} = 400 \cdot 0,01 \cdot t = 4t.$$

Jak to wygląda na bitach?

- ▶ Niech $t = 102,5$, wtedy $4t = 410$.
- ▶ Jeśli $4t$ zapiszemy na 10 bitach w naturalnym kodzie binarnym

9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	1	1	0	0	1	1	0	1	0

- ▶ to część całkowita t znajdzie się w ośmiu najstarszych bitach, a dwa najmłodsze bity będą reprezentować część ułamkową t z dokładnością do $\frac{1}{4}$.
- ▶ Ze względu na dokładność LM35 ograniczymy się do podania temperatury z dokładnością do jednego stopnia.
- ▶ **Uwaga:** dokładność naszego termometru jest zdeterminowana tolerancją wewnętrznego źródła napięcia odniesienia wynoszącą ok. 10%.
- ▶ Aby w pełni wykorzystać dokładność oferowaną przez układ LM35, trzeba zastosować dokładne i stabilne zewnętrzne źródło napięcia odniesienia.

Błędy przetwarzania

- ▶ **Uwaga:** błędy związane z nieliniowością przetwarzania wynoszą typowo 1,5 LSB, a maksymalnie nawet 4 LSB, co oznacza, że najmłodsze dwa bity wyniku przetwarzania mogą być niepewne.
- ▶ Podsumowując, interesuje nas zatem jedynie 8 najstarszych bitów wyniku konwersji.
- ▶ Idealne dla nas jest wyrównanie do lewej! Odczytamy po prostu rejestr ADCH. Konfiguruje się to bitem ADLAR w rejestrze ADMUX:

ADLAR	rejestr ADCH								rejestr ADCL							
1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	-	-	-	-	-	-

- ▶ **Uwaga:** uzyskanie lepszej dokładności pomiaru wymaga:
 - ▶ zastosowania wyselekcjonowanego układu LM35,
 - ▶ zastosowania stabilnego, regulowanego źródła napięcia odniesienia,
 - ▶ wykonania kalibracji układu.

Schemat połączeń w zestawie

- ▶ Napięcie wyjściowe termometru LM35 jest wyprowadzone na pin TEM w grupie MISC.
- ▶ Napięcie to musimy podać na wejście przetwornika, czyli na jedną z nóg PA0, PA1, ..., PA7 mikrokontrolera.
- ▶ Jeśli zdecydujemy się na PA0 – łączymy kabelkiem pin TEM z pinem PA0.
- ▶ **UWAGA:** wyprowadzenie mikrokontrolera AREF nie może być z niczym połączone! Tam pojawi się napięcie odniesienia 2,56 V!