



Politechnika
Wroclawska

Elementy elektroniki i elektrotechniki

Przetworniki ADC, DAC układy pomiarowe

Wojciech Tarnawski

wojciech.tarnawski@pwr.edu.pl

www.w-tarnawski.pl

2023



Układy pomiarowe

- Wstęp
- Optoizolacja wejść, I/O
- Pomiar napięcia – przetwornik ADC
- Zabezpieczenie wejścia
- Pomiar rezystancji
- Pomiar prądu
- Pomiar temperatury, wilgotności
- Pomiar cząstek stałych
- Pomiar jasności
- Pomiar odległości
- Pomiar przyśpieszenia, ciśnienia
- Podsumowanie



Zaprezentowane w dalszej części wykładu układy, propozycje są tylko wybranymi przykładami.

Istnieje wiele innych układów i możliwości pomiaru.

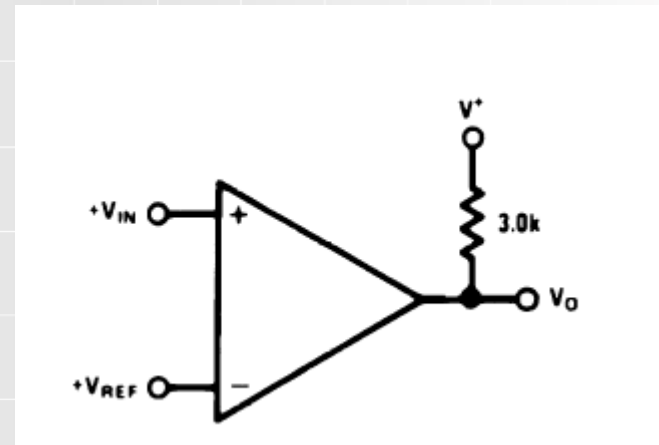
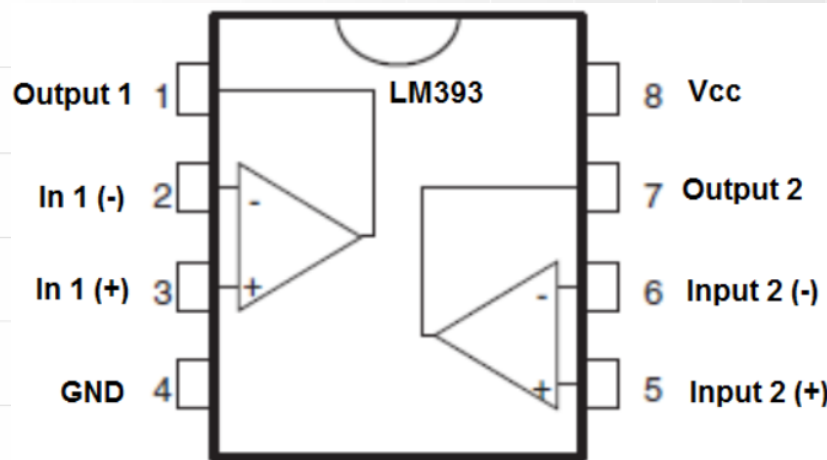
Układy pomiarowe – I/O

Pomiar dwóch stanów:

- stan wysoki
- stan niski

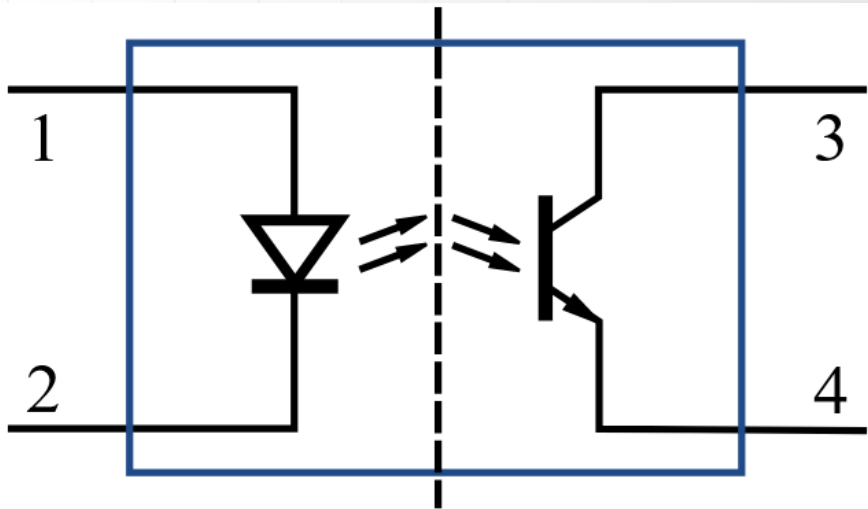
Pomiar przez dowolny pin
wejściowy mikrokontrolera

Komparator LM393



Układy pomiarowe – optoizolacja I/O

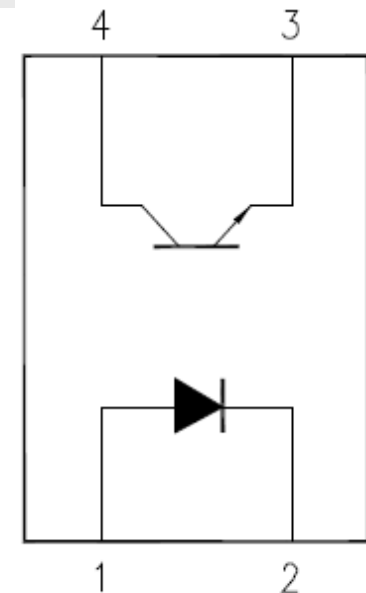
Transoptor



- Izolacja do 5000V
- Bariera fizyczna
- Możliwość translacji napięcia
- Duża szybkość działania
- Prosta implementacja
- Jeden kierunek

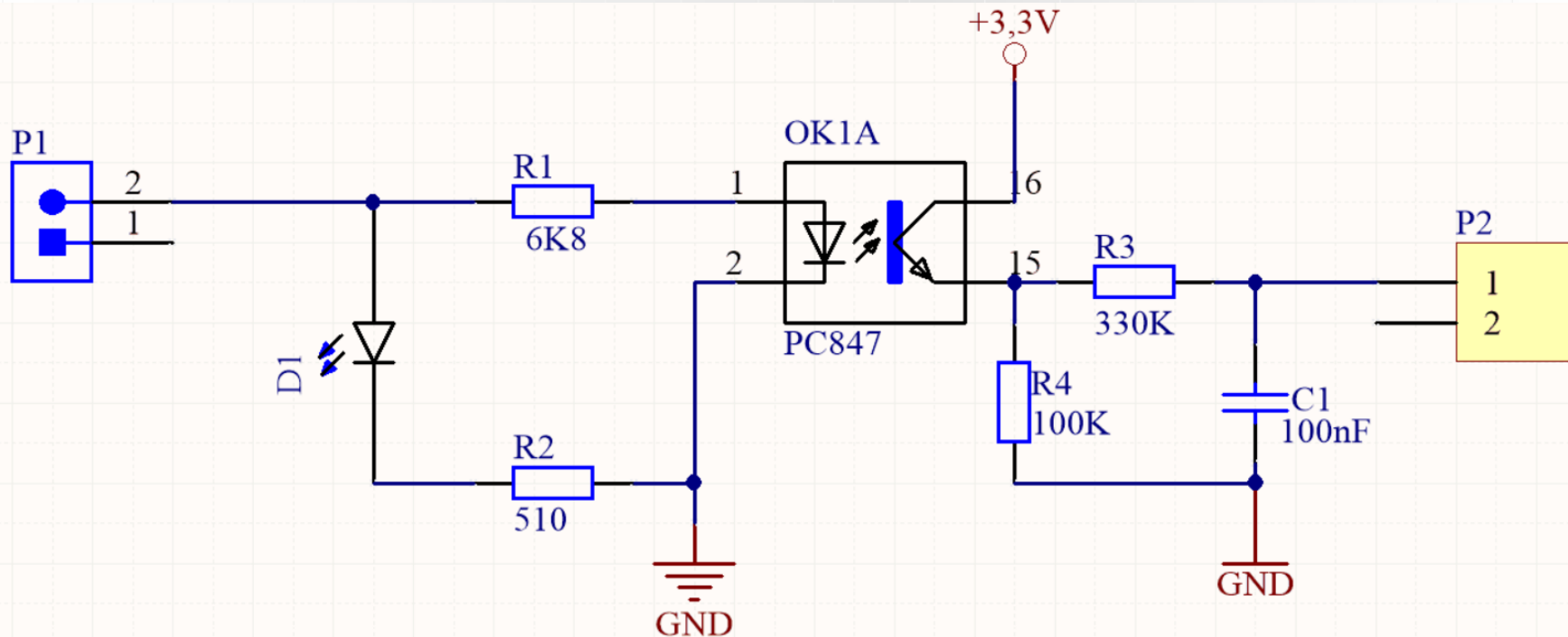


LTV817



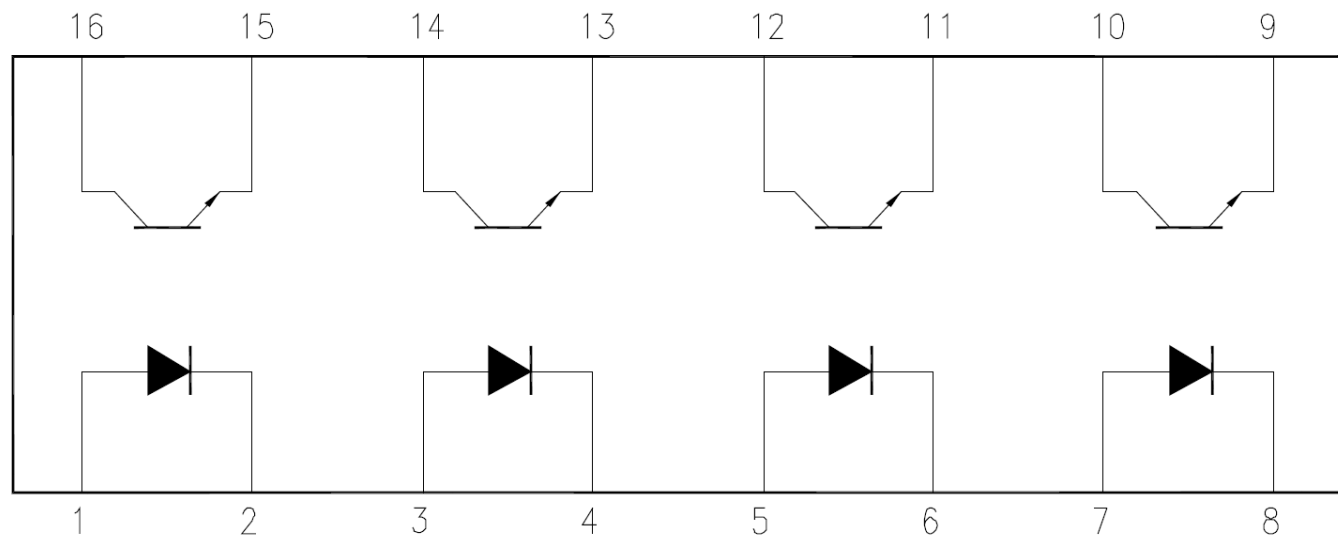
- | | |
|------------|--------------|
| 1. Anode | 3. Emitter |
| 2. Cathode | 4. Collector |

Układy pomiarowe – optoizolacja I/O



Układy pomiarowe – optoizolacja I/O

Transoptor - LTV847



1,3,5,7. Anode
2,4,6,8. Cathode

9,11,13,15. Emitter
10,12,14,16. Collector

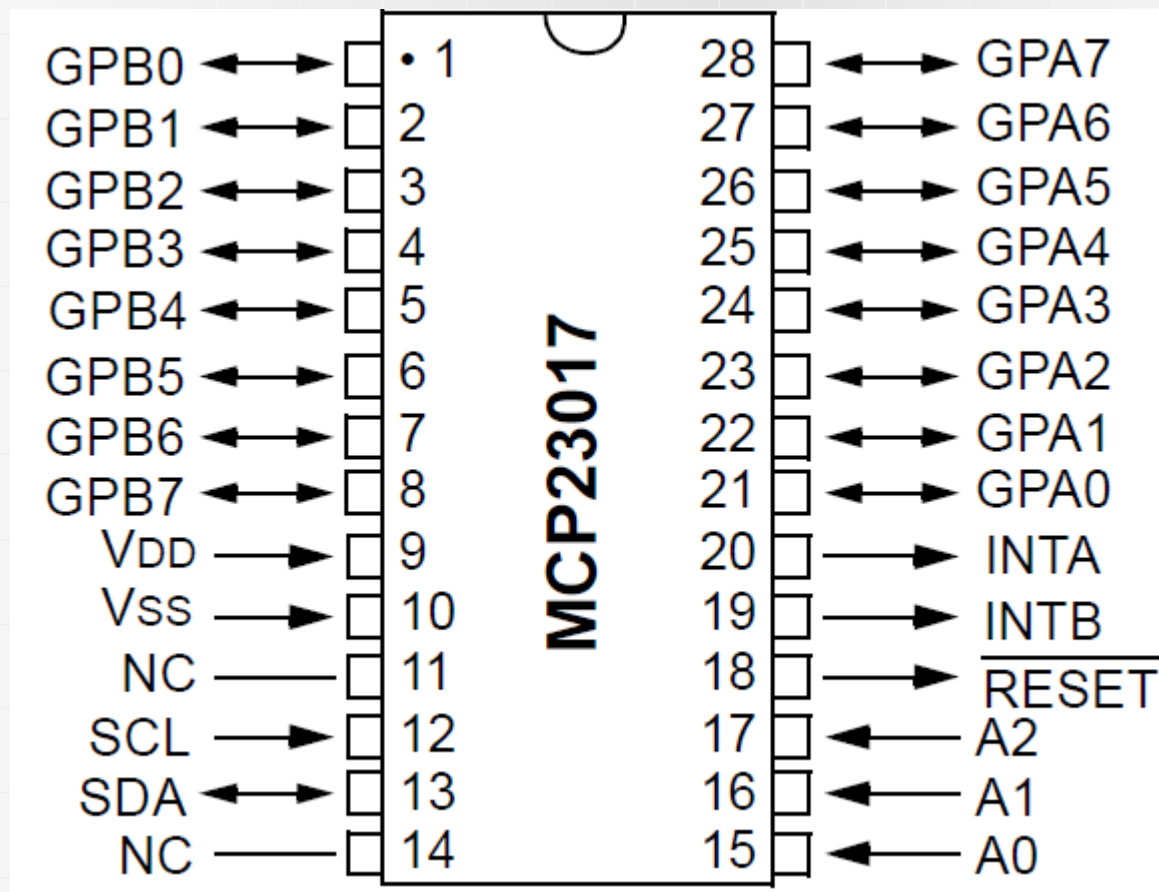
Układy pomiarowe – I/O

Jak za mało pinów?

Expander - MCP23017

I2C

16 kanałów I/O



Układy pomiarowe

Czym jest pomiar?

W metrologii pomiarem nazywa się proces poznawczy, w którym następuje odwzorowanie pewnych właściwości obiektu fizycznego (ciała, zjawiska) w dziedzinę liczb. Właściwość, którą można zmierzyć nazywa się wielkością fizyczną lub mierzalną.

Elementy procesu pomiarowego:

- ustalenie modelu fizycznego obiektu przez idealizację właściwości obiektu rzeczywistego (np. pominięcie pewnych czynników, oddziaływań, itp.),
- zbudowanie modelu matematycznego obiektu przez podanie związków (formuł matematycznych) ilościowych między właściwościami, które charakteryzują model fizyczny,
- ustalenie modelu metrologicznego obiektu przez przekształcenie modelu matematyczno-fizycznego w taki sposób, że opisują go tylko wielkości mierzalne,
- wybór metody pomiarowej i środków technicznych do przeprowadzenia pomiaru,
- wykonanie pomiaru(ów),
- analiza wyniku(ów) pomiaru i interpretacja (z uwzględnieniem analizy niepewności pomiarowej).

Układy pomiarowe

Jednostka miary i układ jednostek miar

Jednostką miary wielkości mierzalnej jest umownie przyjęta i wyznaczona z dostateczną dokładnością wartość tej wielkości.

Układ jednostek miar – zbiór jednostek miar wielkości mierzalnych

Metody pomiarowe

Metoda bezpośrednia – wartość wielkości otrzymuje się bezpośrednio w wyniku prostego pomiaru.

Metoda pośrednia – wartość wielkości otrzymuje się pośrednio z pomiarów bezpośrednich innych wielkości.

Układy pomiarowe

Pomiar = rzeczywista wielkość + błąd pomiarowy

Układy pomiarowe – ADC/DAC

Przetwornik ADC (Analog to Digital Converter), przetwornik analogowo –cyfrowy

układ służący do zamiany sygnału analogowego na sygnał cyfrowy. Proces ten polega na uproszczeniu sygnału analogowego do postaci skwantowanej (dyskretnej), czyli zastąpieniu wartości zmieniających się płynnie do wartości zmieniających się skokowo w odpowiedniej skali (dokładności) odwzorowania.

Przetwornik DAC (Digital to Analog Converter)

Układ elektroniczny przetwarzający sygnał cyfrowy na sygnał analogowy.

Działa odwrotnie do przetwornika ADC.

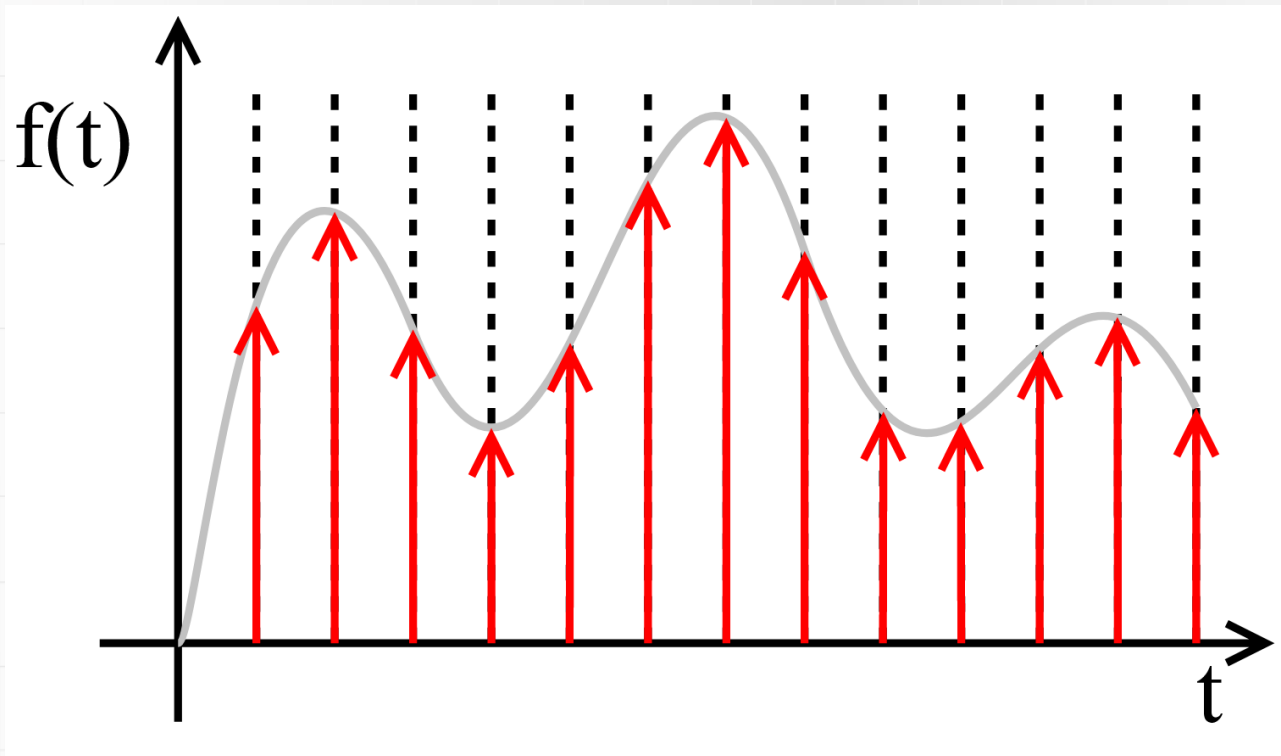
Układy pomiarowe – ADC

Najważniejsze parametry:

- rozdzielczość przetwornika-określa liczbę dyskretnych wartości jakie może on wytworzyć. Zwykle wyraża się ją w bitach.
- zakres pomiarowy
- częstotliwość próbkowania - analogowy sygnał jest ciągły w czasie, więc konieczne jest przetworzenie go na ciąg liczb. To, jak często sygnał jest sprawdzany i zamieniany na liczbę zależną od jego poziomu, określane jest mianem częstotliwości próbkowania

Układy pomiarowe – ADC

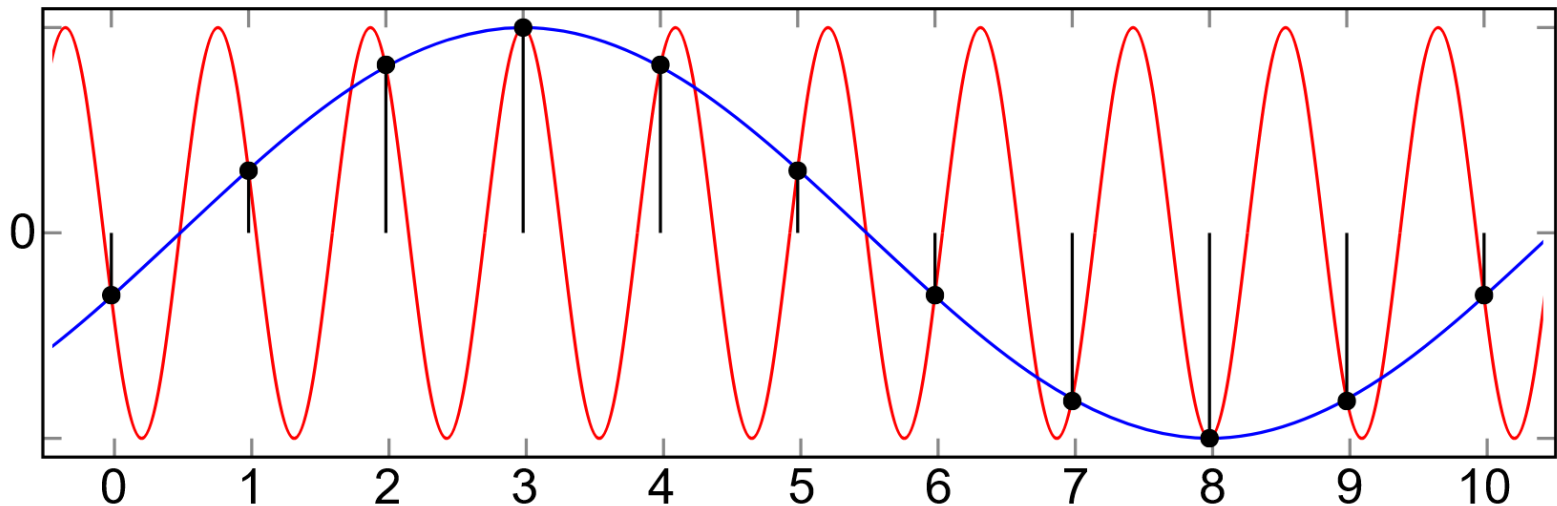
Próbkowanie sygnału, częstotliwość pomiaru



Układy pomiarowe – ADC

Próbkowanie sygnału, częstotliwość pomiaru

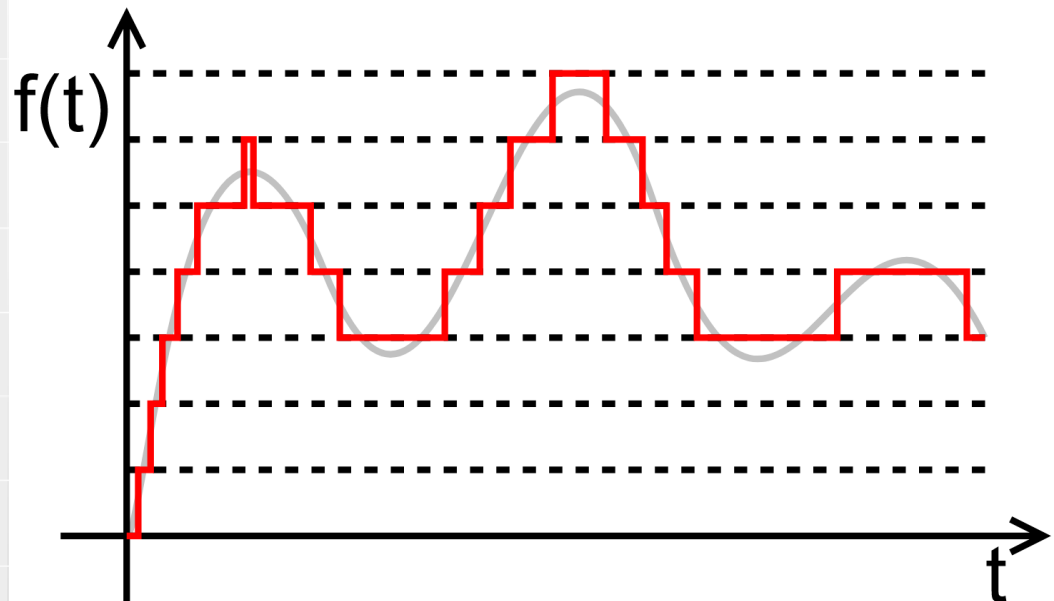
W celu ponownego przekształcenia sygnału spróbkowanego z postaci dyskretnej bez straty informacji z powrotem do postaci ciągłej, musi być spełniony warunek twierdzenia Kotelnikowa–Shannona o próbkowaniu. Mówi on, że częstotliwość próbkowania nie może być mniejsza niż podwojona szerokość pasma sygnału przed spróbkowaniem. Jeśli ten warunek nie jest spełniony, wówczas występuje zjawisko aliasingu. Aliasing - nieodwracalne zniekształcenie sygnału w procesie próbkowania wynikające z niespełnienia założeń twierdzenia o próbkowaniu.



Układy pomiarowe – ADC

Rozdzielczość przetwornika, zakres pomiarowy, kwantyzacja sygnału

Sygnał analogowy (np. napięcie, prąd) może przyjmować dowolne wartości, systemy cyfrowe natomiast są w stanie przetwarzać tylko sygnały reprezentowane słowami o skończonej liczbie bitów. Taka reprezentacja wymaga zatem skończonej liczby poziomów reprezentacji. W tym przypadku kwantyzacja to proces polegający na przypisaniu wartości analogowych do najbliższych poziomów reprezentacji, co wiąże się z nieuniknioną i nieodwracalną utratą informacji.



Układy pomiarowe – ADC

Rozdzielczość przetwornika:

- przetwornik 8 bitowy- $2^8 = 256$ wartości
- przetwornik 10 bitowy- $2^{10} = 1024$ wartości
- przetwornik 12 bitowy- $2^{12} = 4096$ wartości
- przetwornik 16 bitowy- $2^{16} = 65536$ wartości

Zakres pomiarowy:

- napięcie zasilania
- napięcie referencyjne/napięcie odniesienia wewnętrzne
- napięcie referencyjne/napięcie odniesienia zewnętrzne

Zadanie:

- przetwornik 8 bitowy, zakres pomiarowy 0-5V. Jaka jest dokładność?
- przetwornik 8 bitowy, zakres pomiarowy 0-3.3V. Jaka jest dokładność?
- przetwornik 8 bitowy, zakres pomiarowy 0-1V. Jaka jest dokładność?

Układy pomiarowe – ADC

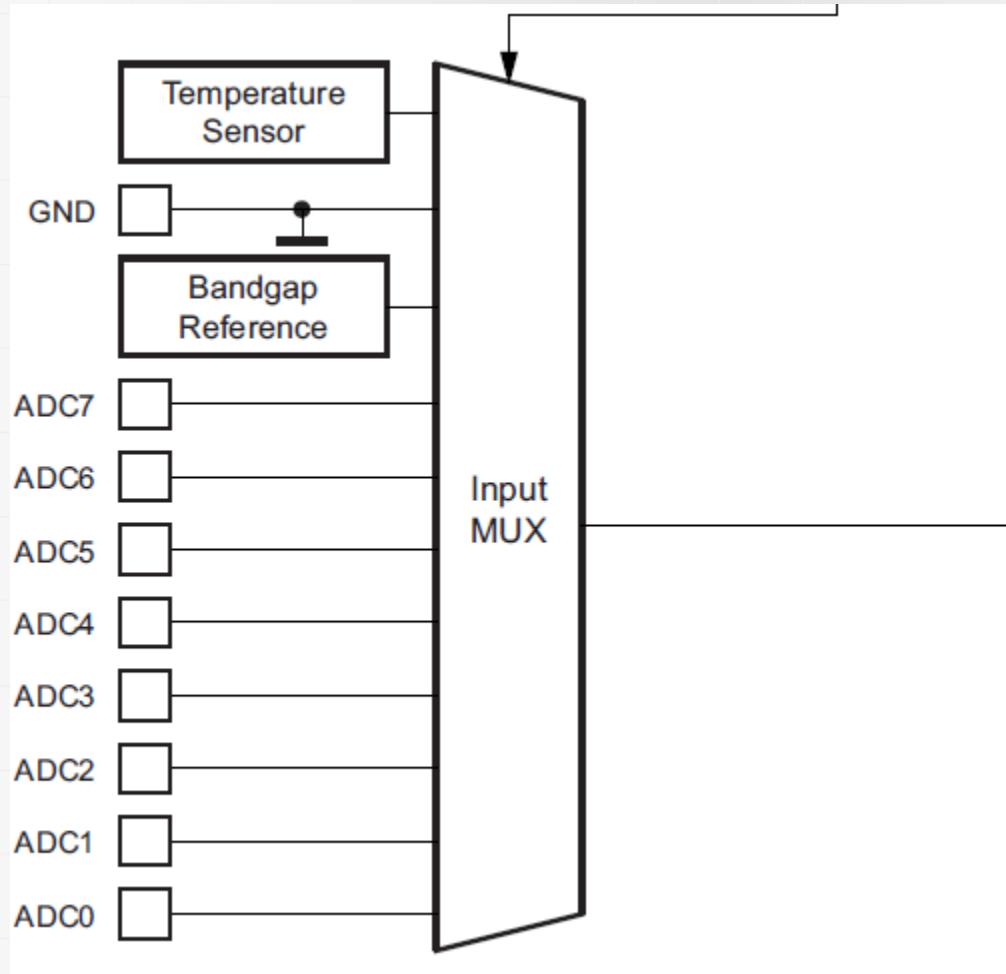
Pomiar = rzeczywista wielkość + błąd pomiarowy

Dokładność pomiaru:

- rozdzielczość przetwornika
 - zakres pomiarowy
 - stabilność napięcia referencyjnego
 - stabilność zasilania przetwornika
 - stabilność napięcia mierzonego
 - szумы i zakłócenia impulsowe
-
- nieliniowość przetwornika i jego charakterystyki

Układy pomiarowe – ADC

Multipleksowanie wejść analogowych – Atmega328P



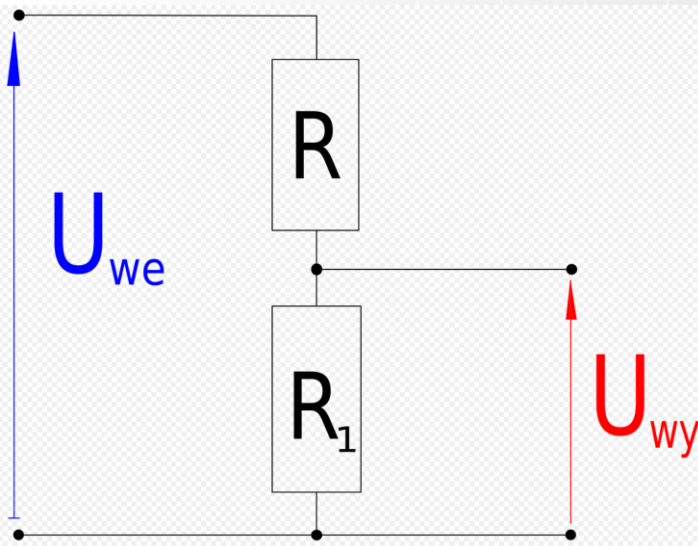
Układy pomiarowe – pomiar napięcia

Dopasować zakres napięcia

Nawet dla I/O

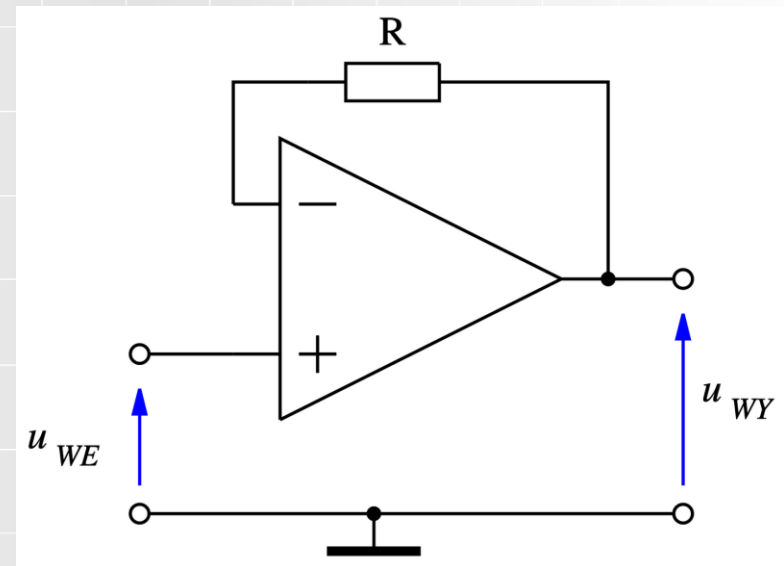
**Pomiar przez pin wejściowy mikrokontrolera
obsługujący przetwornik ADC**

Dzielnik napięcia:



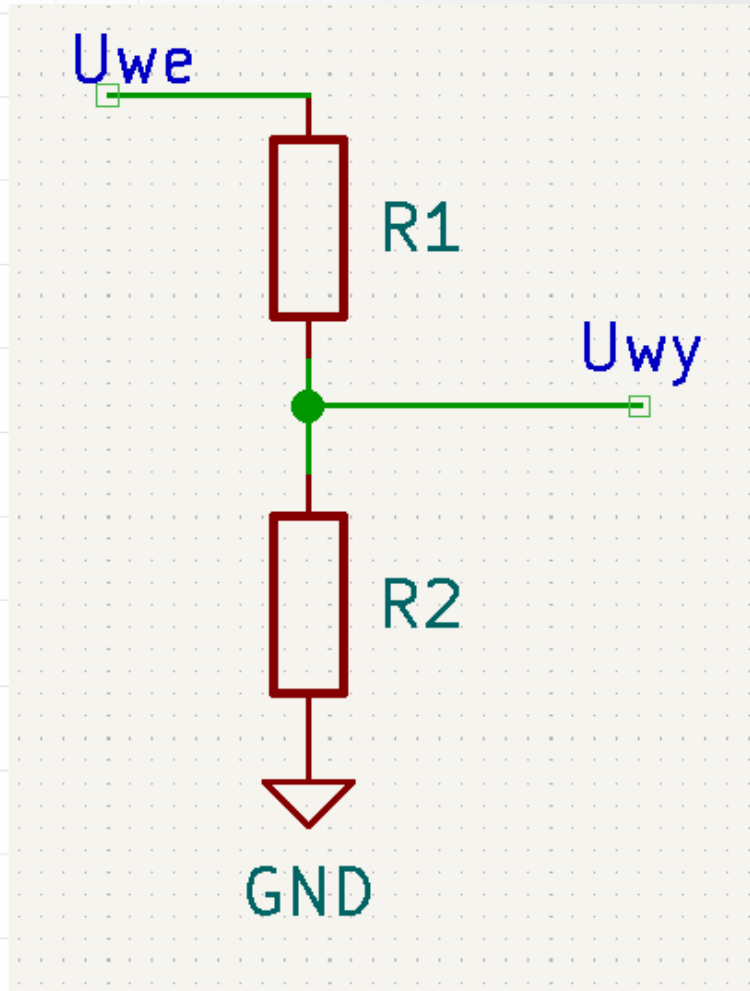
$$U_{wy} = \frac{U_{we}}{R + R_1} \cdot R_1$$

Wtórnik napięciowy:



$$U_{we} = U_{wy}$$

Układy pomiarowe – pomiar napięcia



$$U_{wy} = \frac{U_{we}}{R_1 + R_2} \cdot R_2$$

$$R_1 = 56k, R_2 = 10k, U_{we} = 12V$$

Ile wynosi napięcie wyjściowe?

Układy pomiarowe – pomiar napięcia

$$R_1 = 56k, R_2 = ?, U_{we} = 12V, U_{wy} = 3V$$

Szeregi wartości rezystorów:

Szeregi główne

E3	50%	10, 22, 47
E6	20%	10, 15, 22, 33, 47, 68
E12	10%	10, 12, 15, 18, 22, 27, 33, 39, 47, 56, 68, 82
E24	5%	10, 11, 12, 13, 15, 16, 18, 20, 22, 24, 27, 30, 33, 36, 39, 43, 47, 51, 56, 62, 68, 75, 82, 91

Układy pomiarowe – pomiar napięcia

$$R_1 = 56k, R_2 = ?, U_{we} = 12V, U_{wy} = 3V$$

$$R_2 = 18.67k \approx 18k \rightarrow 2.919 V$$

$$R_2 = 18.67k \approx 20k \rightarrow 3.158V$$

Szeregi wartości rezystorów:

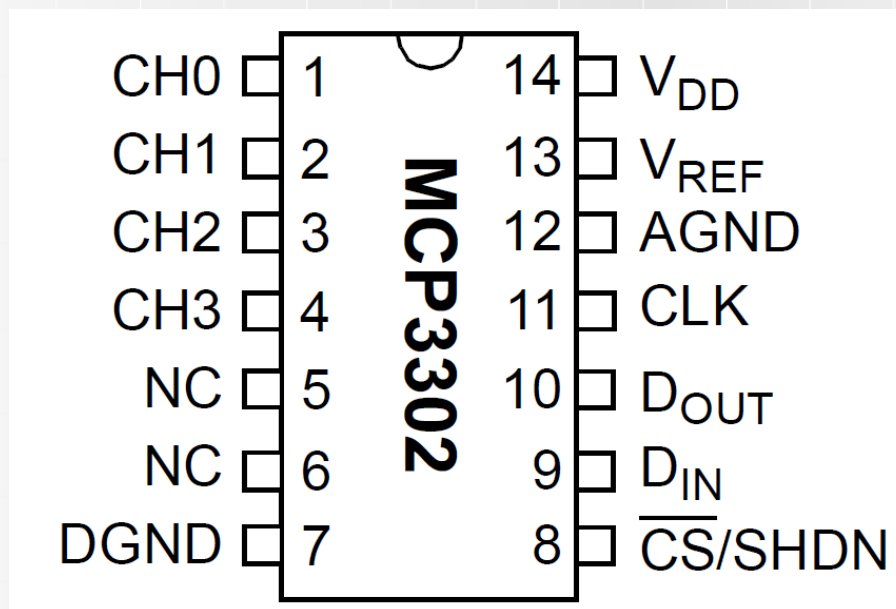
Szeregi główne

E3	50%	10, 22, 47
E6	20%	10, 15, 22, 33, 47, 68
E12	10%	10, 12, 15, 18, 22, 27, 33, 39, 47, 56, 68, 82
E24	5%	10, 11, 12, 13, 15, 16, 18, 20, 22, 24, 27, 30, 33, 36, 39, 43, 47, 51, 56, 62, 68, 75, 82, 91

Układy pomiarowe – pomiar napięcia

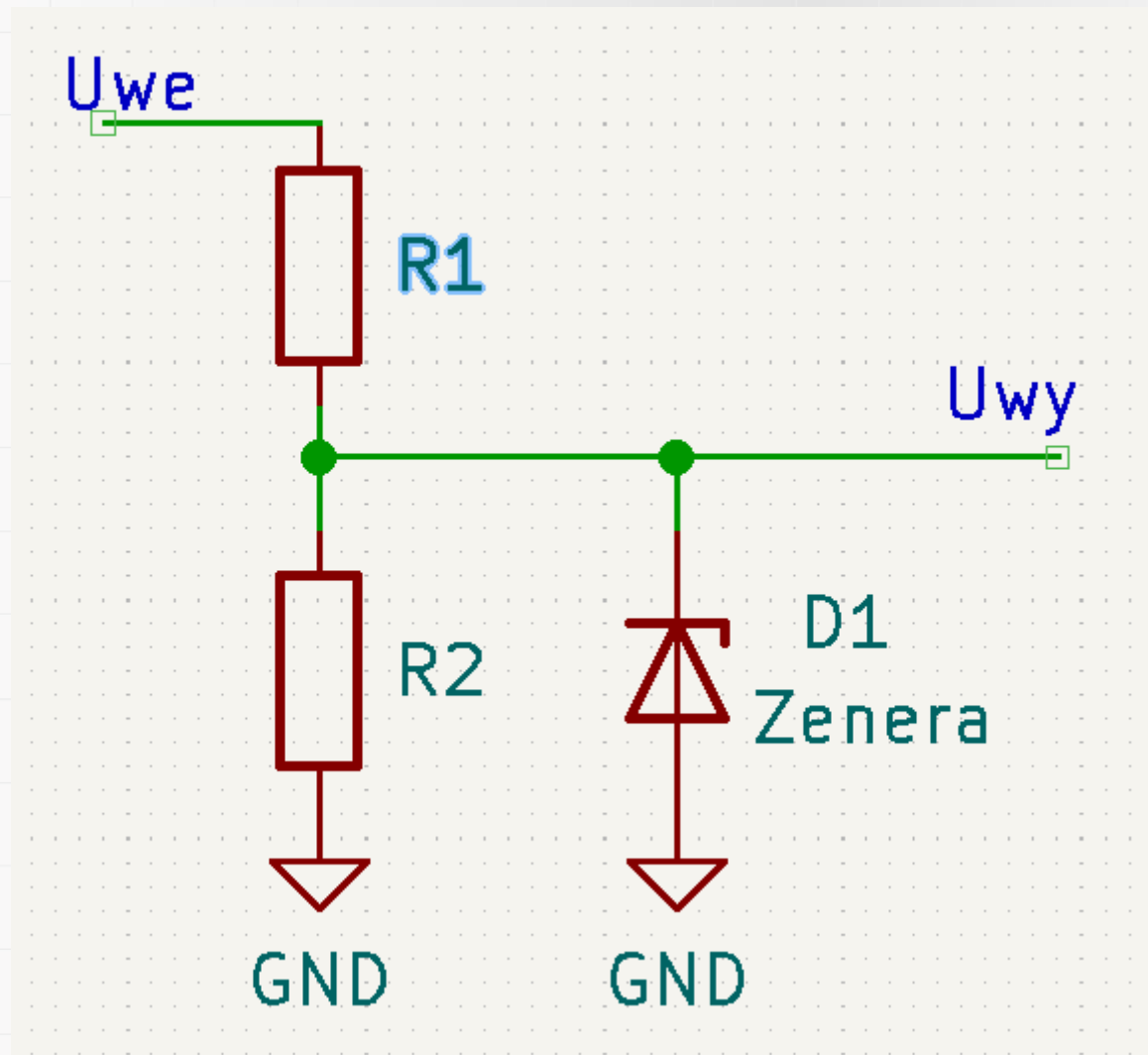
Zwiększenie ilości wejść analogowych:

- przełączanie wejść
- zastosowanie zewnętrznego przetwornika A/C:
 - MCP3302 – 4 wejścia
 - MCP3304 – 8 wejść



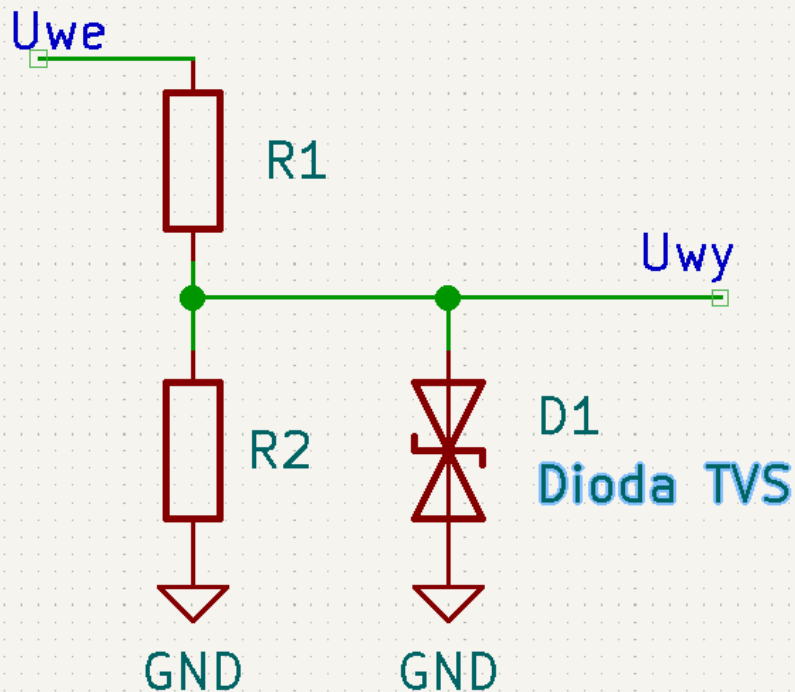
Pomiar napięcia – dzielnik napięciowy

Zabezpieczenie diodą Zenera

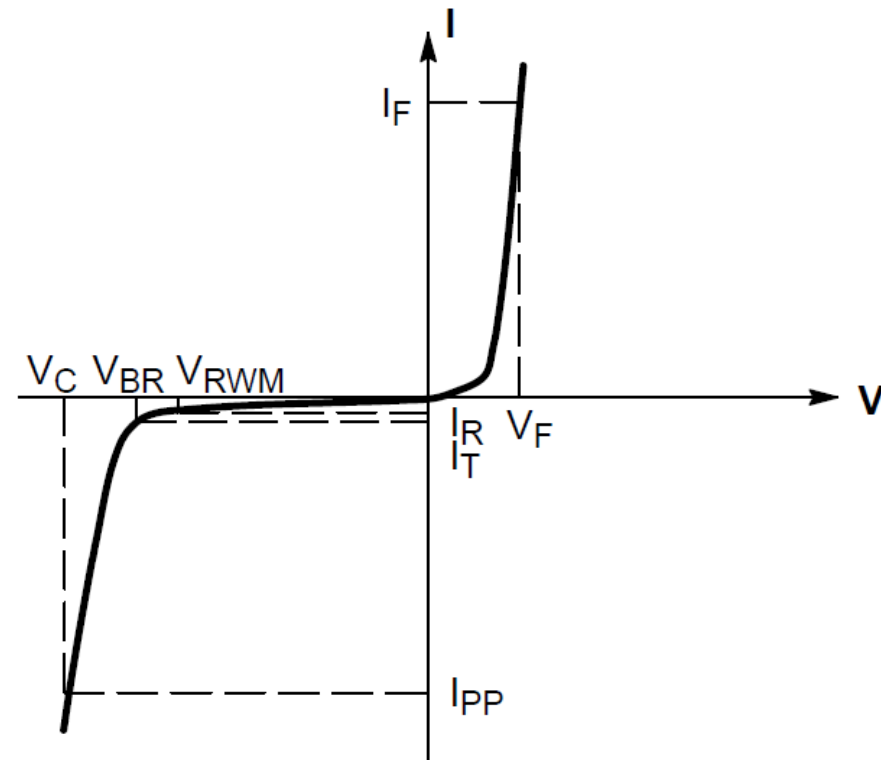


Pomiar napięcia – dzielnik napięciowy

Zabezpieczenie diodą TVS - Transient Voltage Suppressors



Napięcie V_{RWM}
 Napięcie V_{BR}
 Napięcie V_C

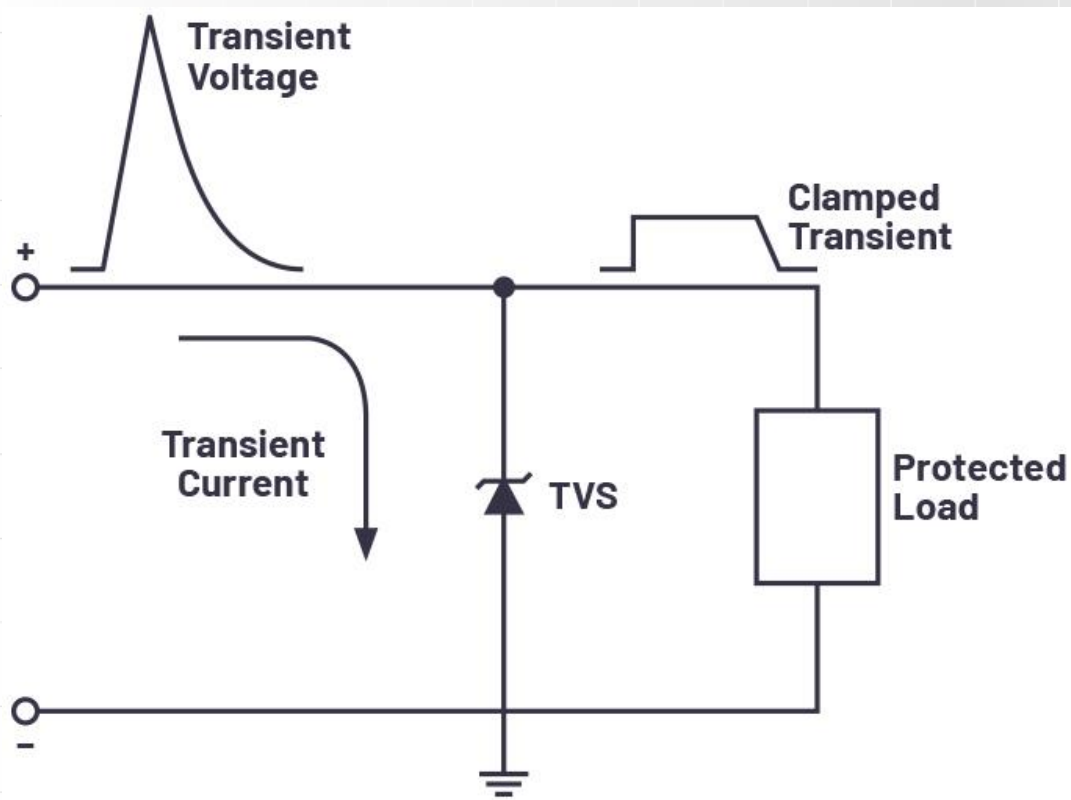


Uni-Directional TVS

Pomiar napięcia – dzielnik napięciowy

Dioda TVS - Transient Voltage Suppressors - transil

wyspecjalizowana dioda zabezpieczająca, chroniąca czułe elementy elektroniczne przed skutkami przepięć, stosowana często do tłumienia przepięć i impulsów o wysokim napięciu.



Czas reakcji:

Diody TVS: $\sim 1\text{ps}$ (10^{-12})

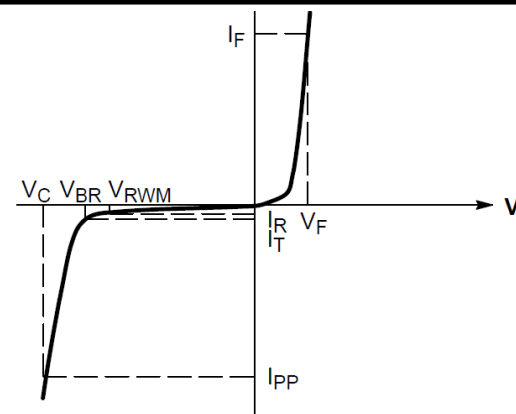
Dioda Zenera: $\sim 1\mu\text{s}$ (10^{-6})

Pomiar napięcia – dzielnik napięciowy

Zabezpieczenie dioda TVS - Transient Voltage Suppressors

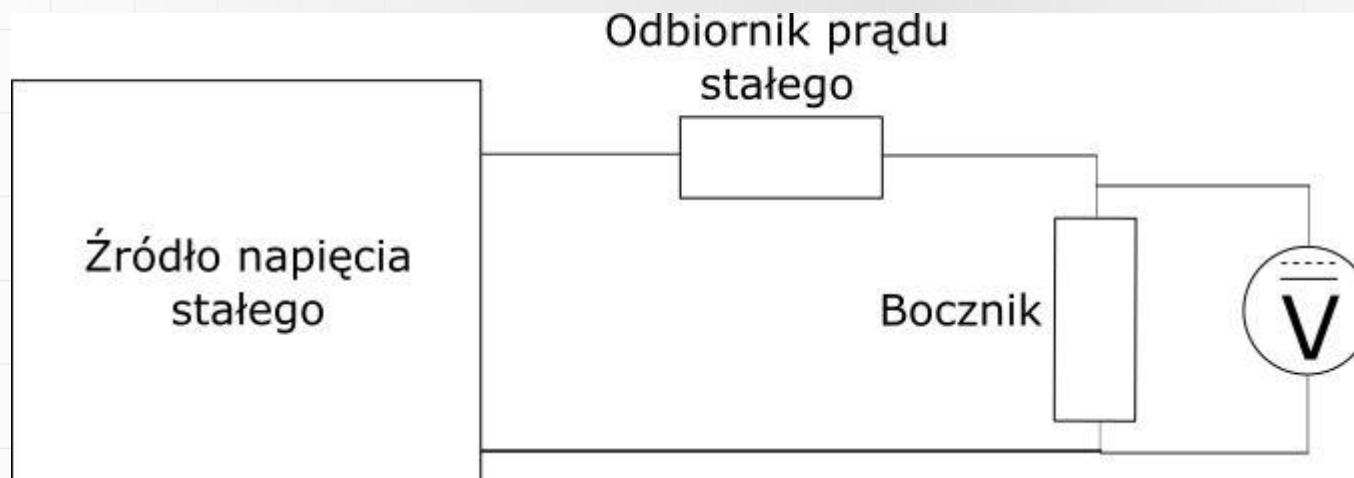
Device*	Device Marking	V_{RWM} (V)	I_R (μ A) @ V_{RWM}	V_{BR} (V) @ I_T (Note 2)	I_T	V_C (V) @ $I_{PP} = 5.0 A^\dagger$	V_C (V) @ Max I_{PP}^\dagger	I_{PP} (A) †	P_{pk} (W) †	C (pF)
		Max	Max	Min	mA	Typ	Max	Max	Max	Typ
ESD5Z2.5T1G/T5G	ZD	2.5	6.0	4.0	1.0	6.5	10.9	11.0	120	145
ESD5Z3.3T1G/T5G	ZE	3.3	0.05	5.0	1.0	8.4	14.1	11.2	158	105
ESD5Z5.0T1G/T5G	ZF	5.0	0.05	6.2	1.0	11.6	18.6	9.4	174	80
ESD5Z6.0T1G/T5G	ZG	6.0	0.01	6.8	1.0	12.4	20.5	8.8	181	70
ESD5Z7.0T1G/T5G	ZH	7.0	0.01	7.5	1.0	13.5	22.7	8.8	200	65
ESD5Z12T1G/T5G	ZM	12	0.01	14.1	1.0	17	25	9.6	240	55

Napięcie V_{RWM}
Napięcie V_{BR}
Napięcie V_C



Uni-Directional TVS

Pomiar spadku napięcia na rezystorze pomiarowym (boczniku)



Zadanie:

- prąd płynący przez bocznik: 100A
- spadek napięcia na boczniku: 60mV
- jaka jest rezystancja bocznika?
- jaka moc wydzieli się na boczniku?

$$R=? \quad P=?$$

Układy pomiarowe – pomiar prądu DC

Pomiar spadku napięcia na rezystorze pomiarowym (boczniku)

Zadanie:

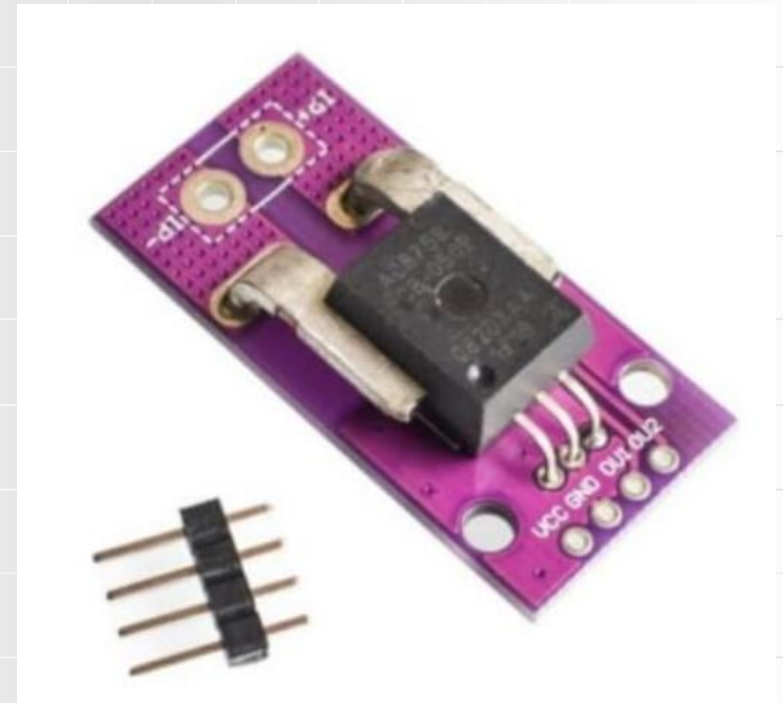
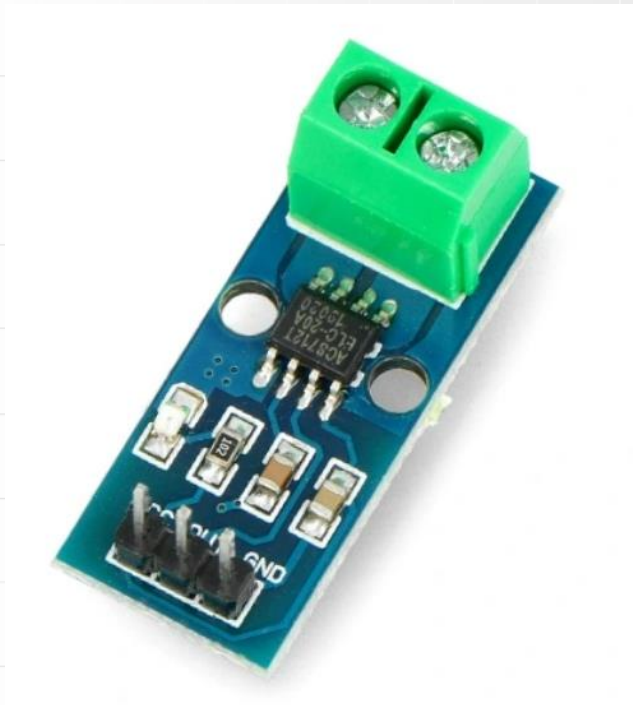
- napięcie zasilania 12V
- prąd płynący przez bocznik: 10A
- spadek napięcia na boczniku: 1V
- jaka jest rezystancja bocznika?
- jaka moc wydzieli się na boczniku?

$$R=? \quad P=?$$

Port USB 2.0 - 5V i 0,5A – 2,5W

Czujniki pomiaru prądu wykorzystujące efekt hala:

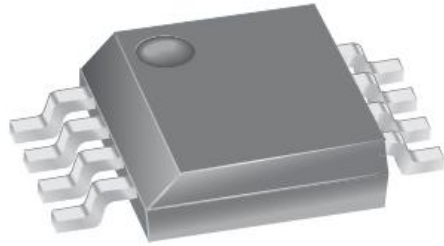
- ACS758 - czułość: 40 mV /A
- ACS712 – wersja 20A - czułość: 100 mV /A



Układy pomiarowe – pomiar prądu DC i AC

Czujniki pomiaru prądu – ACS712 – 20A

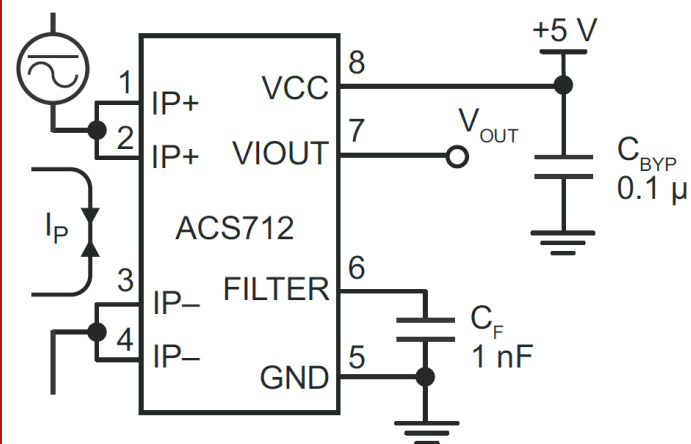
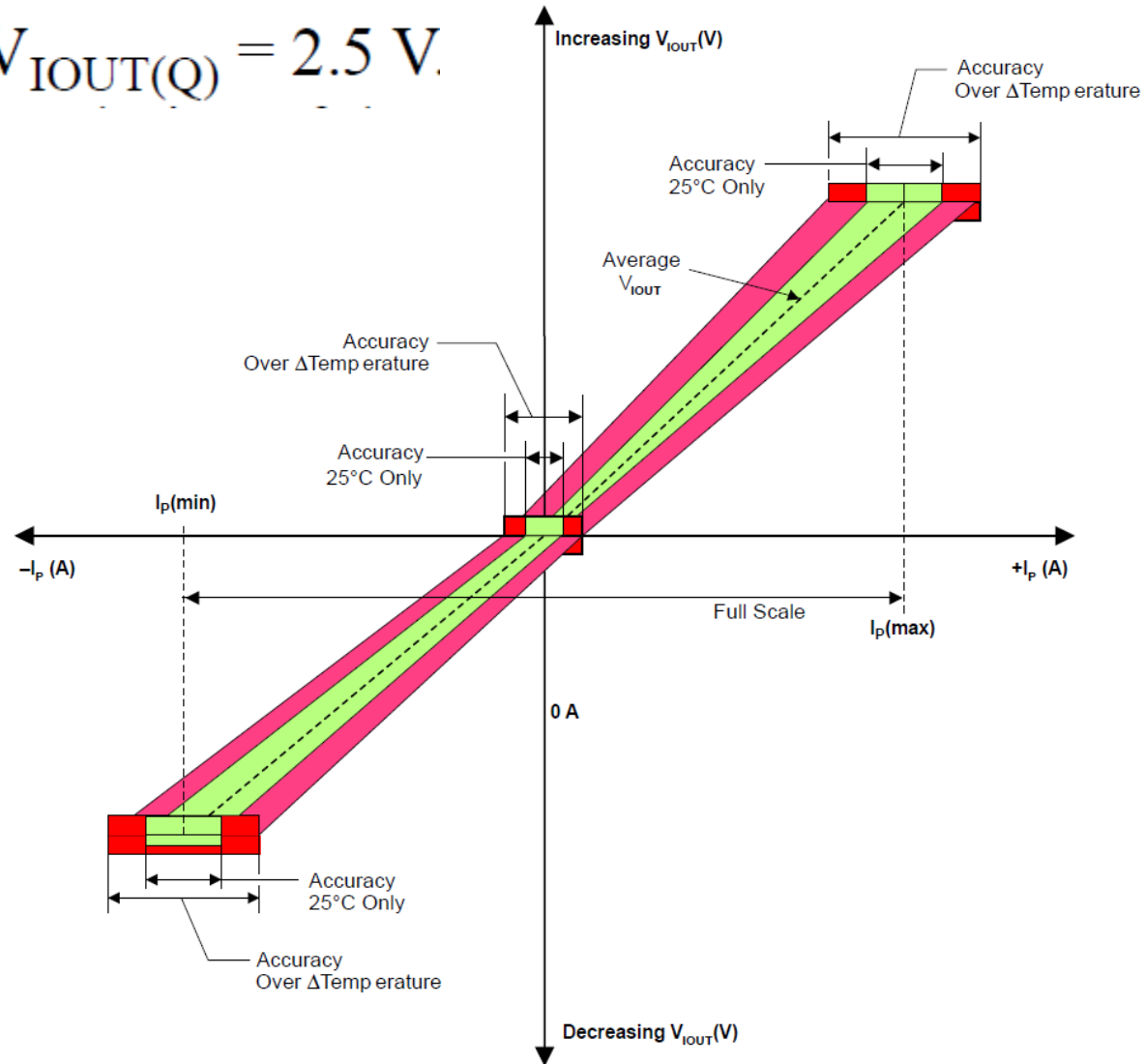
100mV/A



Output Voltage versus Sensed Current

Accuracy at 0 A and at Full-Scale Current

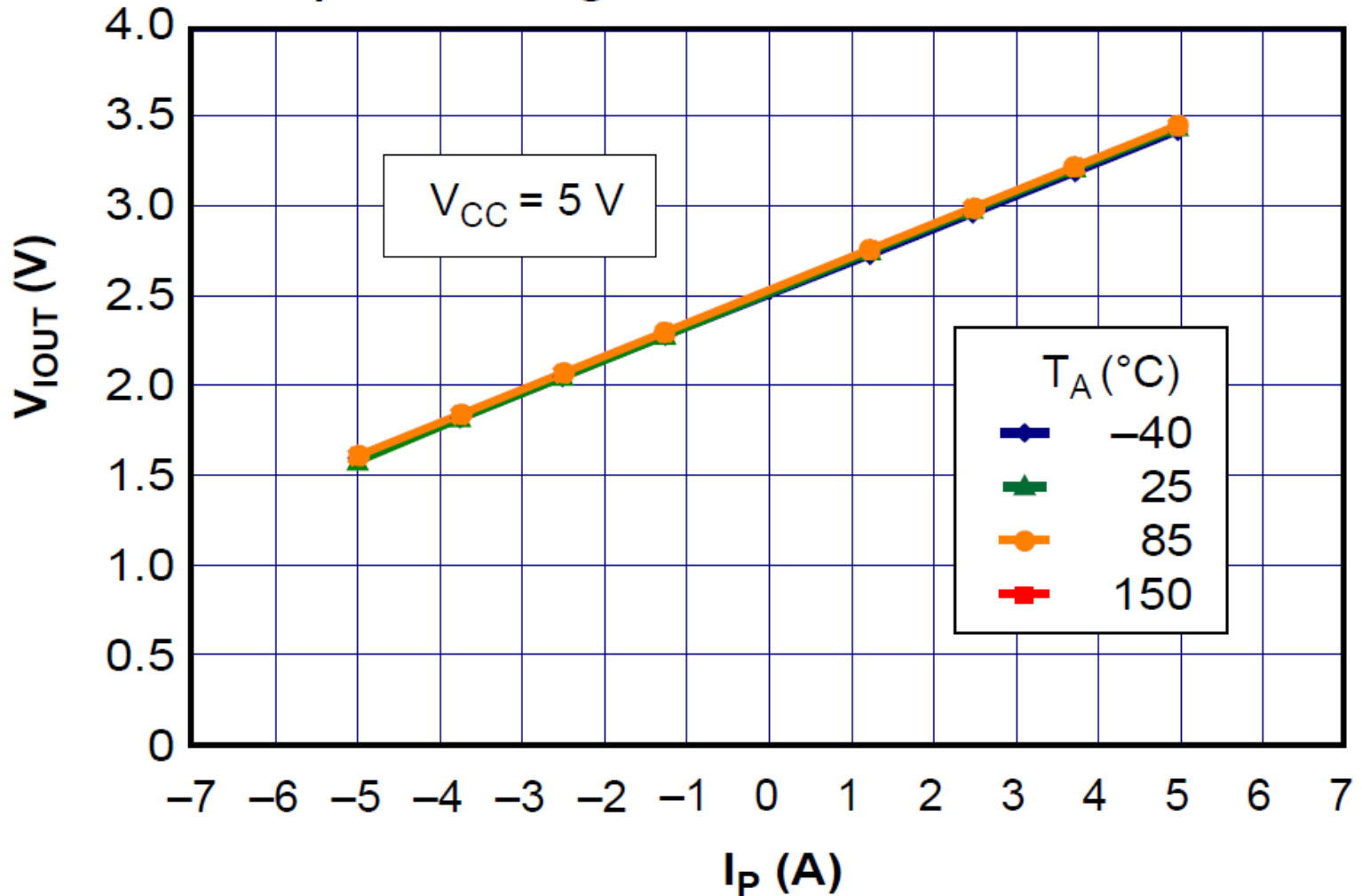
$$V_{IOUT(Q)} = 2.5 \text{ V.}$$



Czujniki pomiaru prądu – ACS712 – 20A

100mV/A

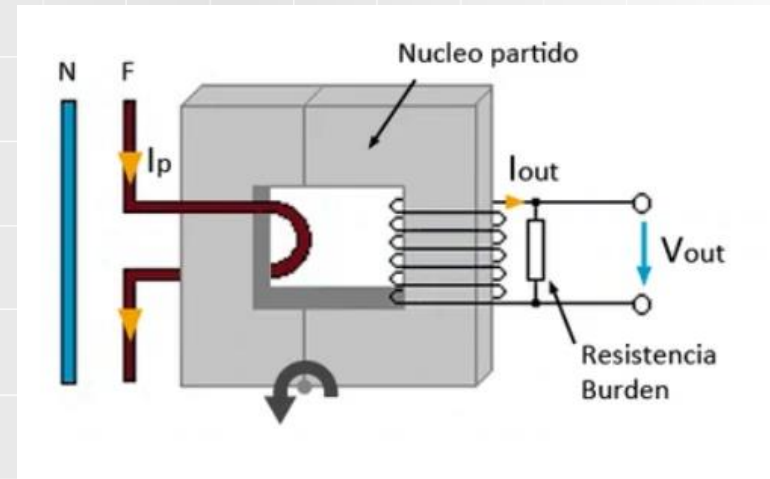
Output Voltage versus Sensed Current



Układy pomiarowe – pomiar prądu AC

Czujniki pomiaru prądu przemiennego w sposób nieinwazyjny - przekładnik prądowy:

- SCT-013-000 – zjawisko indukcji na pojedynczym przewodzie

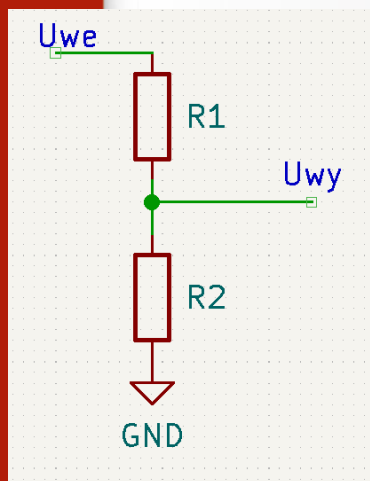


pomiar 0-100A - > wyjście 0-50mA

Układy pomiarowe – pomiar temperatury

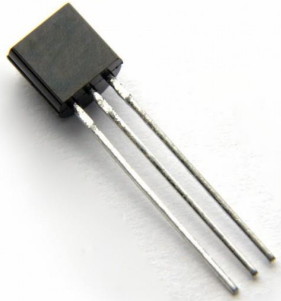
Termistor - rezystor półprzewodnikowy o rezystancji silnie zależnej od temperatury:

- NTC – o ujemnym współczynniku temperaturowym (ang. negative temperature coefficient) – wzrost temperatury powoduje zmniejszanie się rezystancji
- PTC – (pozystor) o dodatnim współczynniku temperaturowym (ang. positive temperature coefficient), wzrost temperatury powoduje wzrost rezystancji

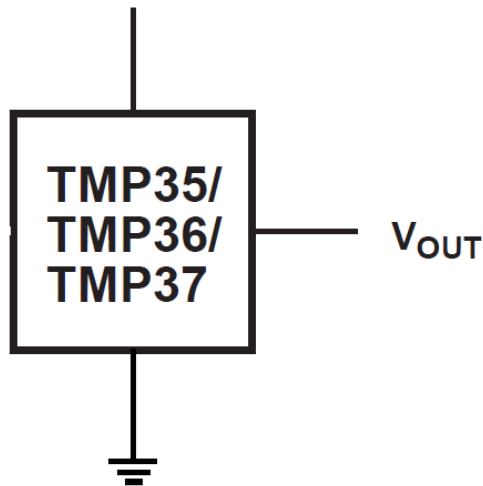


Analogowy czujnik temperatury

TMP36GT9Z - Czujnik temperatury TO92



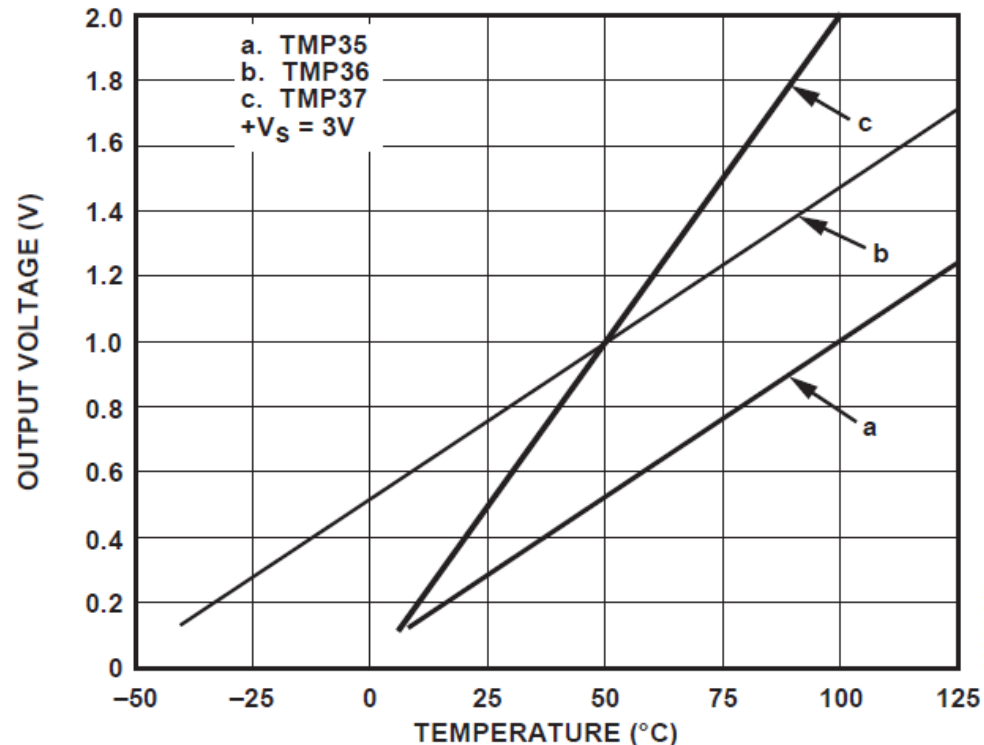
$+V_S$ (2.7V TO 5.5V)



Wyjście analogowe

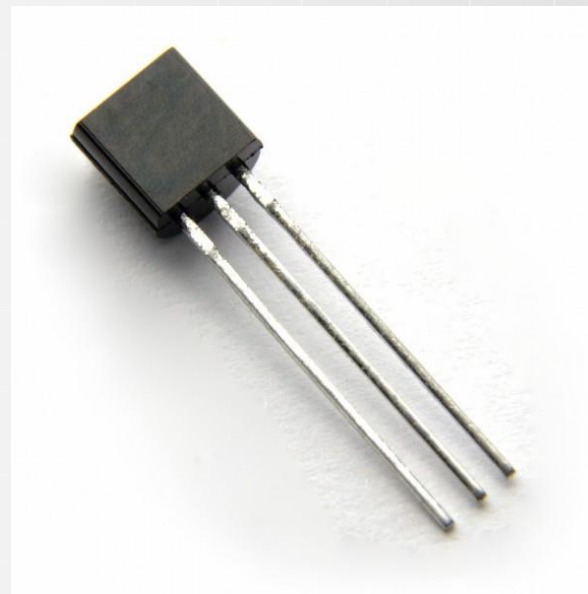
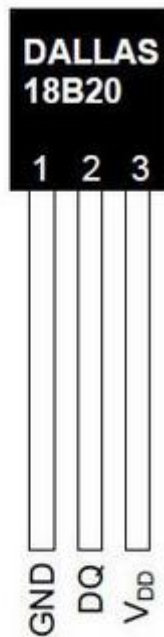
Dokładność: $\pm 0.5^\circ\text{C}$

Zakres: -40°C to $+125^\circ\text{C}$

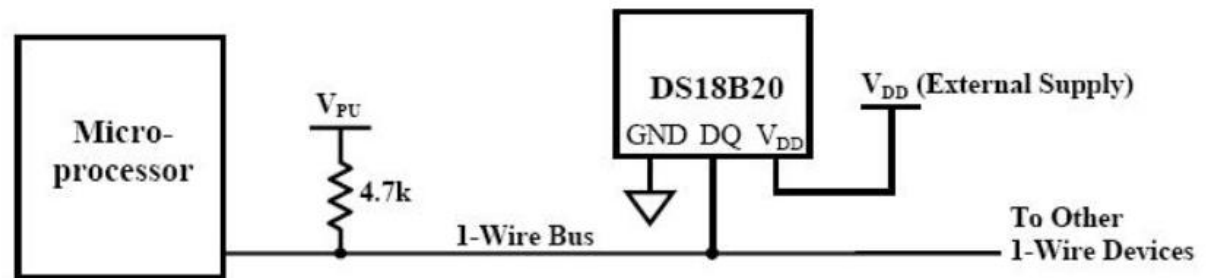


Cyfrowy czujnik temperatury

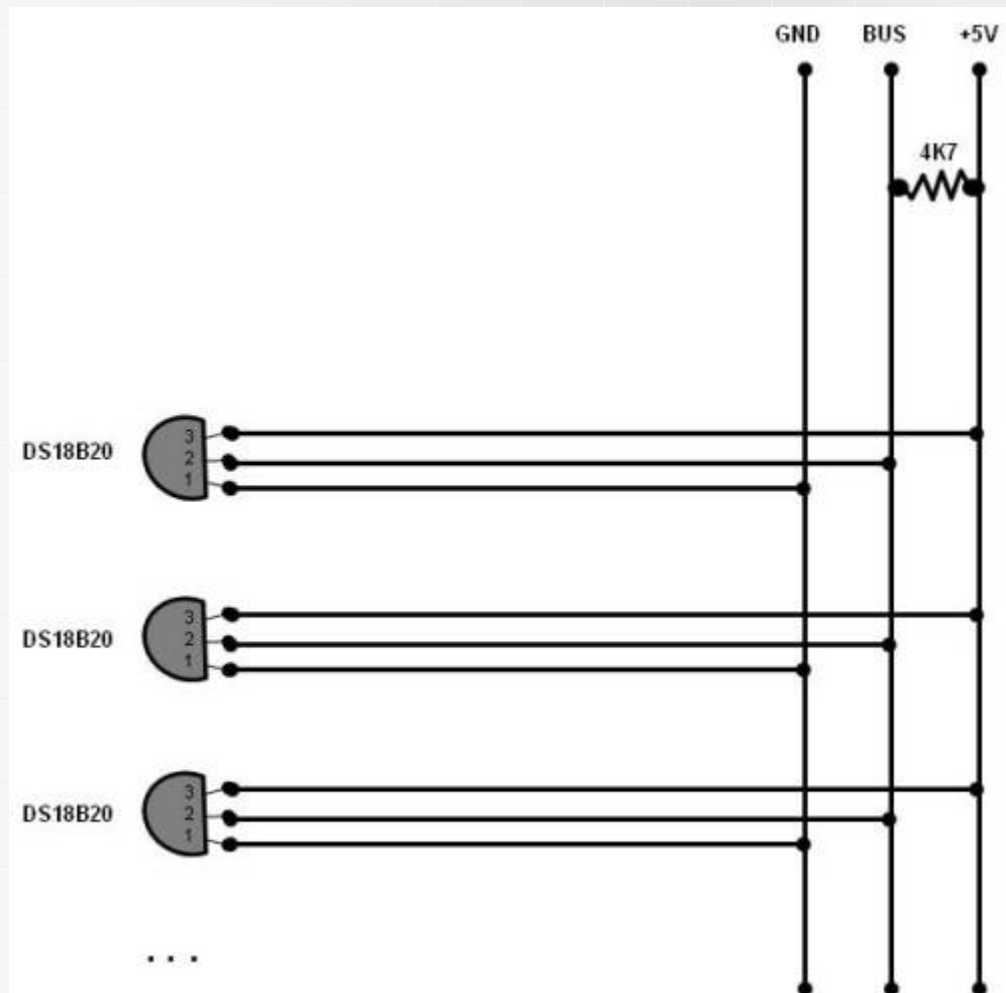
DS18B20 - Czujnik temperatury TO92



Komunikacja 1-Wire
Dokładność: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
Zakres: -10°C to $+85^{\circ}\text{C}$



Cyfrowy czujnik temperatury DS18B20 – wiele czujników



RD-623 WINSEN - Pirometr

Pomiar temperatury – podczerwień

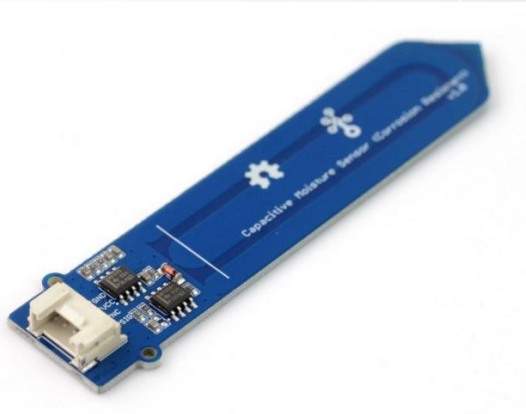
- pomiar bezkontaktowy
- duży zakres pomiarowy, wysokie temperatury
- termowizja



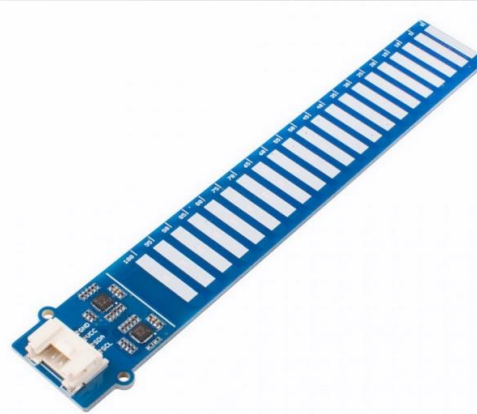
Układy pomiarowe – pomiar wilgotności gleby

Pojemnościowy

Wykrywanie pojemnościowe, zmiana wilgotności gleby powoduje zmianę mierzonej pojemności

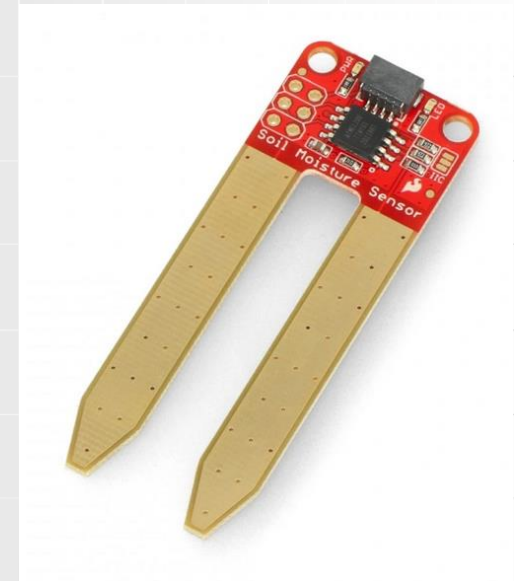


Poziom wody pojemnościowy



Rezystancyjny

Im więcej wody znajduje się w glebie, tym lepsza będzie przewodność między sondami, co skutkuje mniejszym oporem



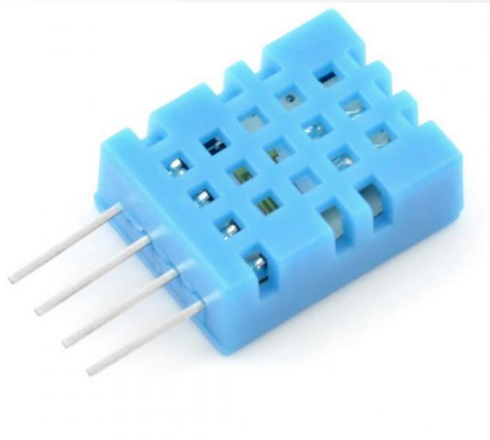
Układy pomiarowe – pomiar wilgotności

DTH11:

Temperatura: od - 20 °C do +60 °C

Dokładność: 2 °C

Wilgotność: od 5 % do 95 % RH

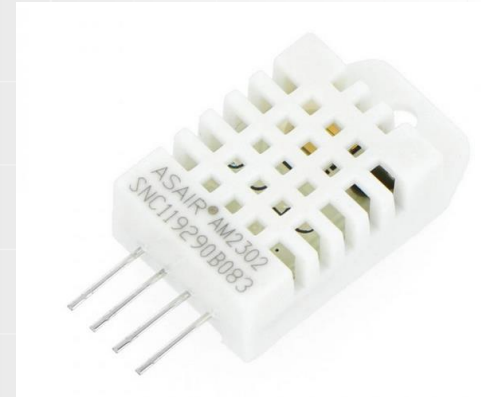


DTH22:

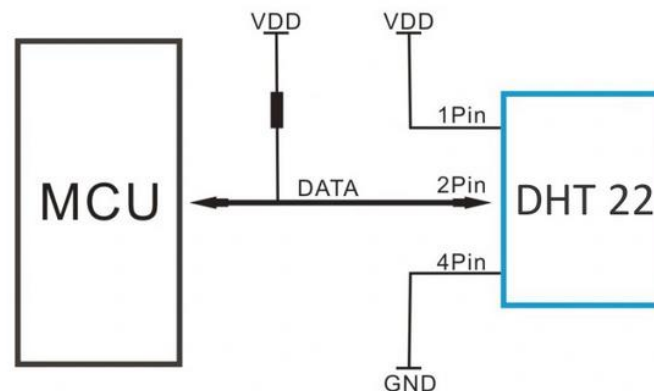
Temperatura: od - 40 °C do +80 °C

Dokładność: 0.5 °C

Wilgotność: od 0 % do 100 % RH

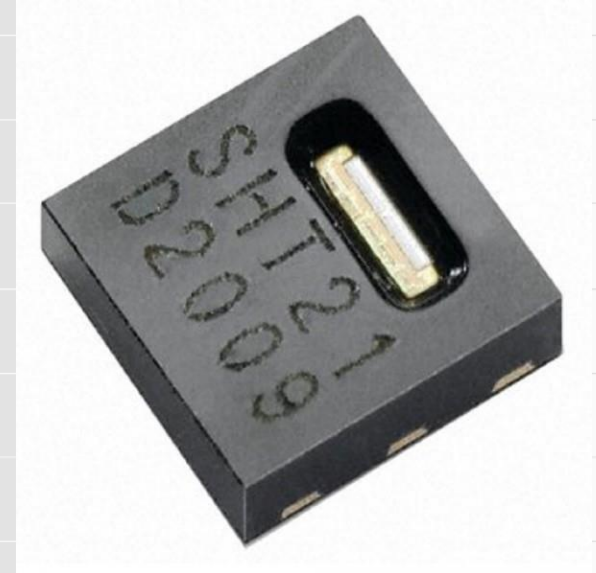


*RH - Wilgotność względna wyrażana w procentach. Jest to stosunek rzeczywistej wilgoci w powietrzu do maksymalnej jej ilości, którą może utrzymać powietrze w danej temperaturze.



SHT21 czujnik wilgotności i temperatury

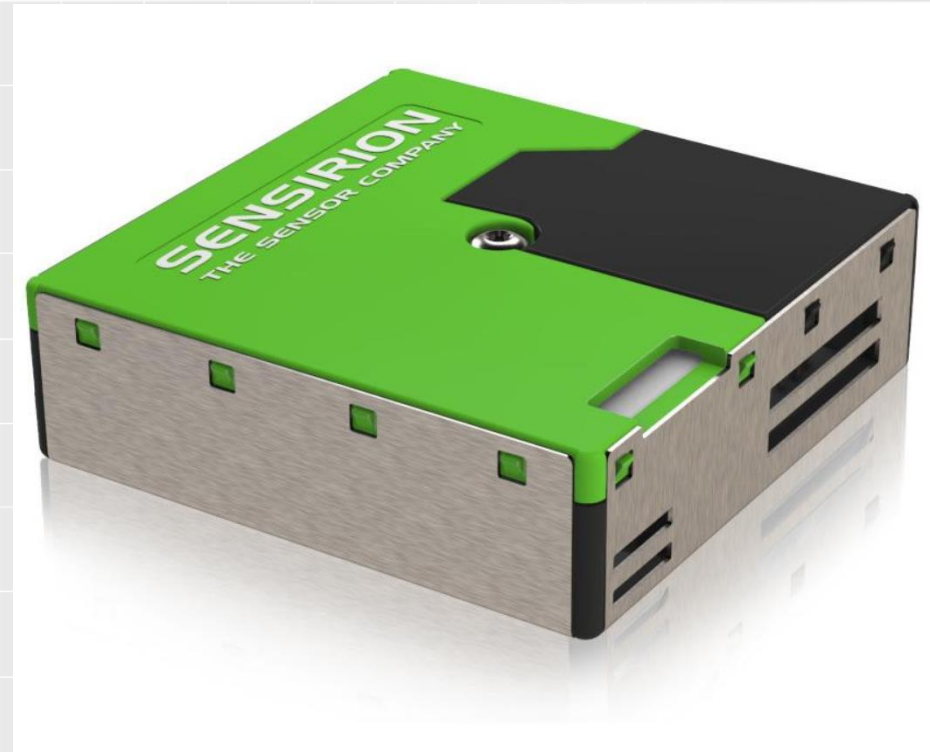
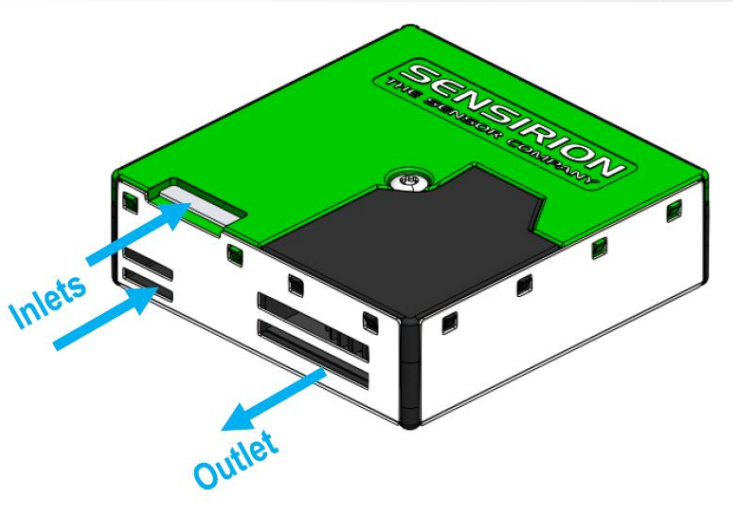
- Temperatura: od - 40 °C do +125 °C
- Dokładność: 0.3 °C
- Wilgotność: od 0 % do 100 % RH
- Interfejs: I2C
- Rozmiar: 3x3mm



Układy pomiarowe – cząsteczek stałych

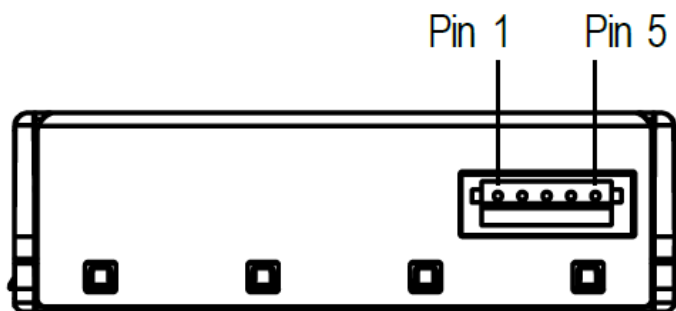
SPS30 czujnik pomiaru cząstek stałych PM1.0, PM2.5, PM4, PM10

- Temperatura pracy: od - 10 °C do +60 °C
- Interfejs: UART/I2C



Układy pomiarowe – cząsteczek stałych

SPS30 czujnik pomiaru cząstek stałych PM1.0, PM2.5, PM4, PM10

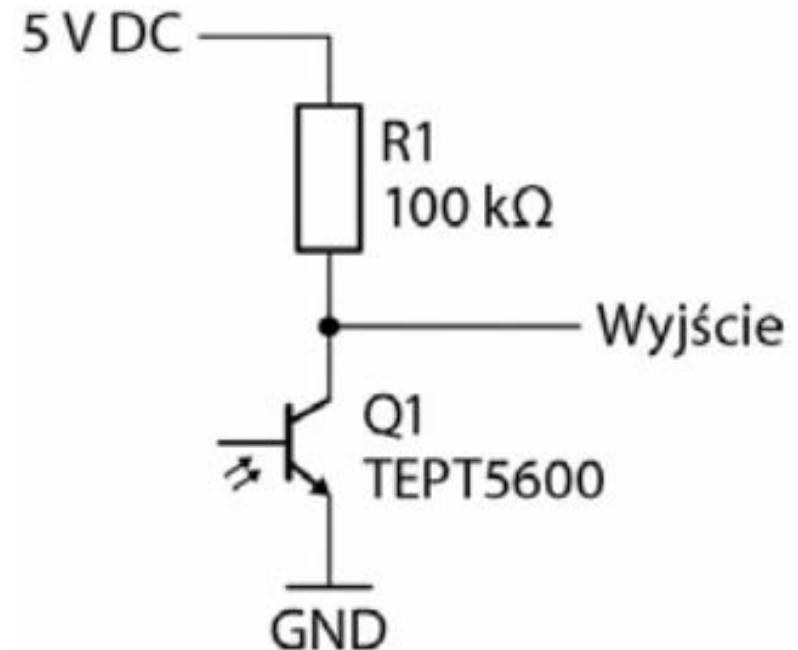


Pin	Name	Description	Comments
1	VDD	Supply voltage	5V ± 10%
2	RX	UART: Receiving pin for communication	TTL 5V and LVTTTL 3.3V compatible
	SDA	I ² C: Serial data input / output	
3	TX	UART: Transmitting pin for communication	TTL 5V and LVTTTL 3.3V compatible
	SCL	I ² C: Serial clock input	
4	SEL	Interface select	Leave floating to select UART
			Pull to GND to select I ² C
5	GND	Ground	Housing on GND

Układy pomiarowe – pomiar jasności

Fotorezystor, fototranzystor:

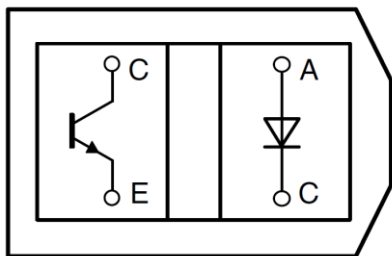
- pomiar światła
- wykrywanie dzień/noc
- bariera optyczna



Układy pomiarowe – pomiar jasności

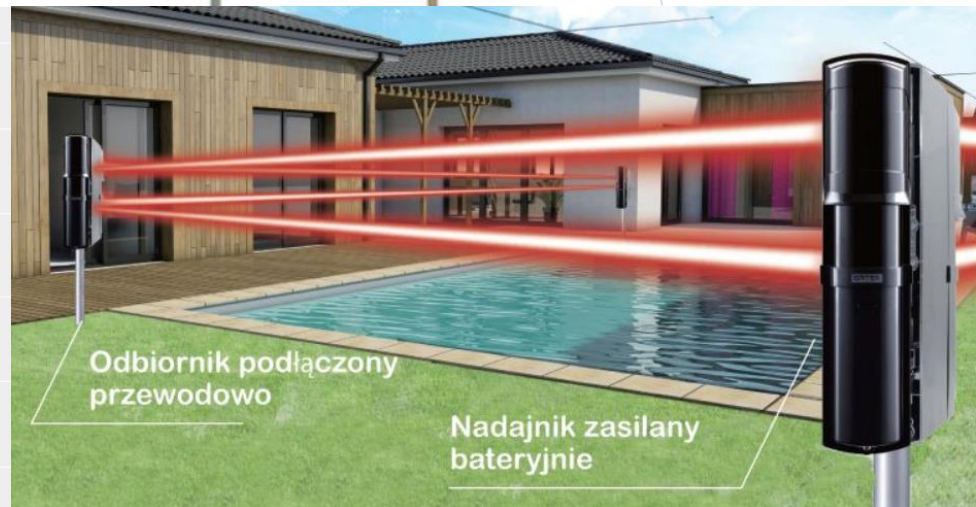
TCRT5000 Czujnik odbiciowy

- wykrywanie linii
- wykrywanie przedmiotów
- pomiar odległości



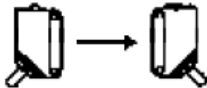
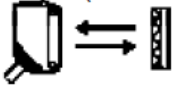
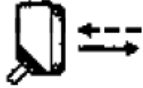
TCST2103 Transoptor szczelinowy

- bariera optyczna
- enkoder optyczny



Bariera podczerwieni

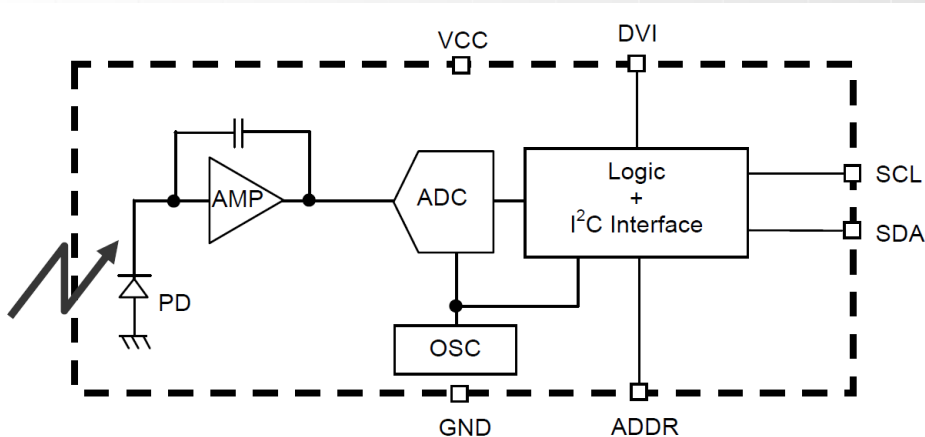


Sensing method	Light source	Appearance	Connection method	Sensing distance
Through-beam	IR		Pre-wired	15 m
			Connector	
Polarized retroreflective	RED	(See Note 1.) 	Pre-wired	100 mm to 4 m 100 mm to 3 m (See Note 2.)
			Connector	
Diffuse reflective	IR		Pre-wired	5 to 100 mm (wide view)
			Connector	
			Pre-wired	1 m
			Connector	

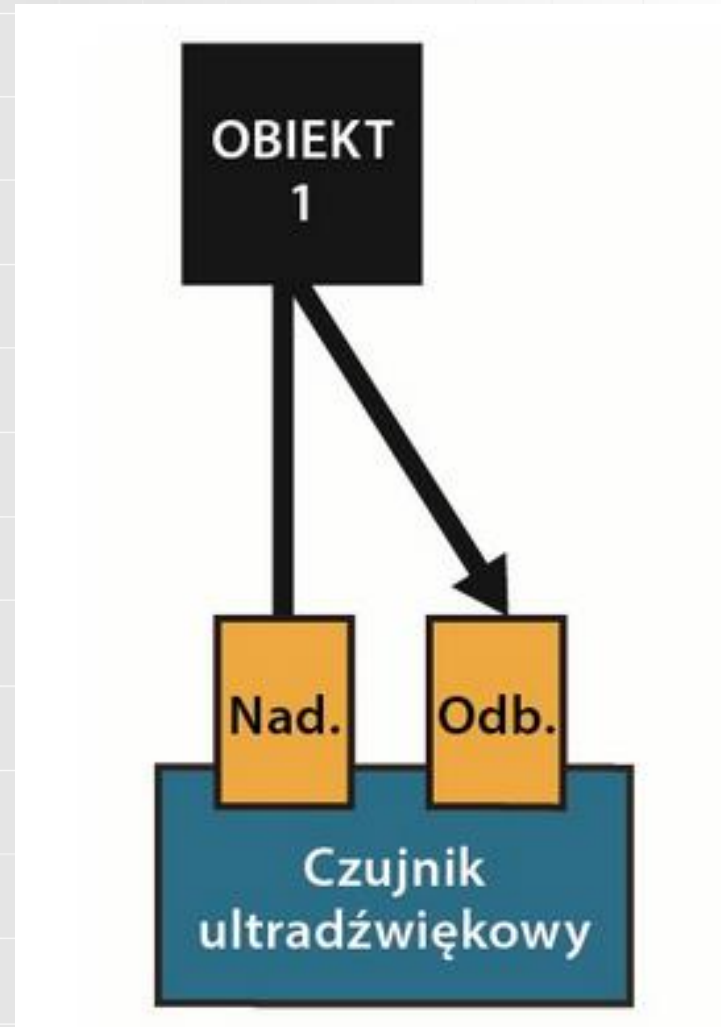
Układy pomiarowe – pomiar jasności

BH1750 - luxometr, luksomierz:

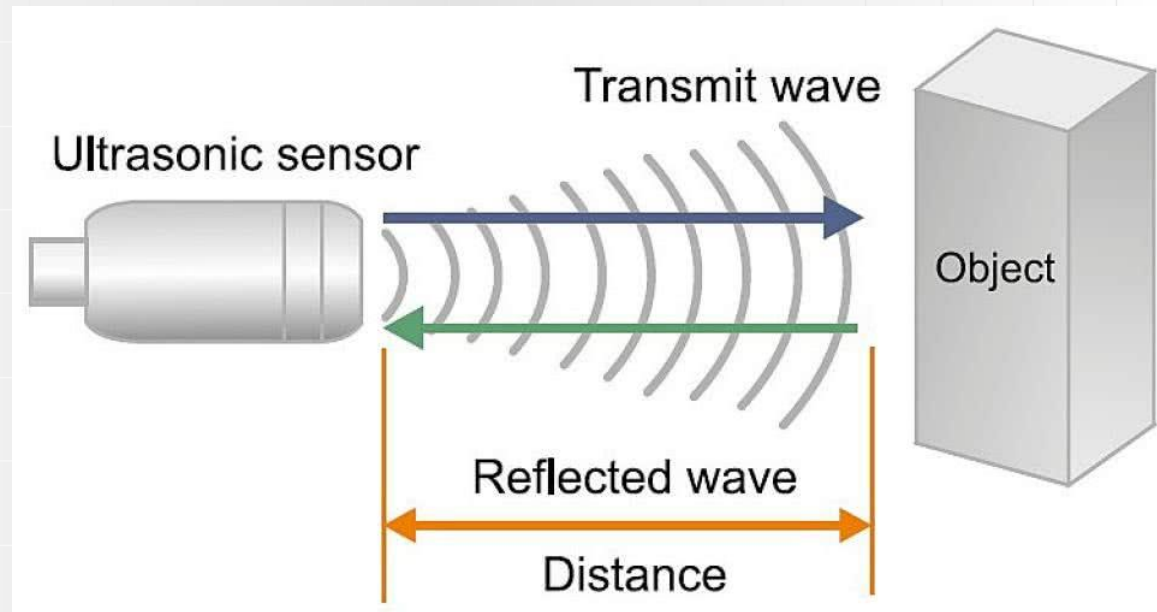
- Pomiar: 1 - 65535 lx
- Interfejs: I2C



Czujniki ultradźwiękowe



Czujniki ultradźwiękowe



$$\text{odległość} = \frac{v * t}{2}$$

v – prędkość dźwięku $340 \left[\frac{m}{s} \right]$

t – czas [s]

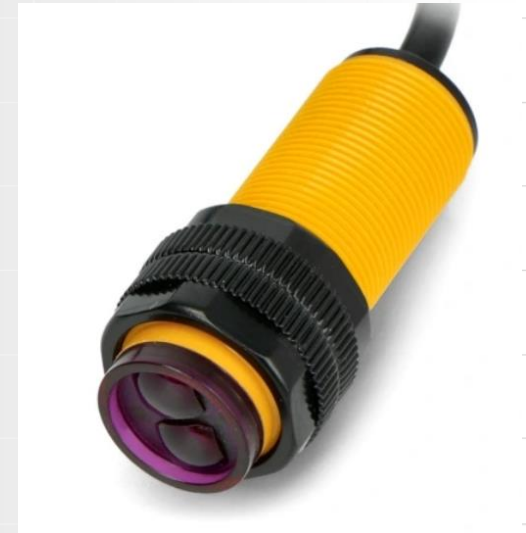
Zadanie:

$t=1\text{ms}$

odległość=?

Czujniki podczerwieni

- Sharp GP2Y0A02
- VL6180X
- E18-D80NK 5-80cm



Czujniki laserowe:

- duży zasięg pomiaru
- duża dokładność



Lidar – skanery laserowe



Czujniki indukcyjne, pojemnościowe

- małe odległości
- sygnał 1/0



Czujniki magnetyczne, kontraktron

- małe odległości
- sygnał 1/0
- systemy alarmowe

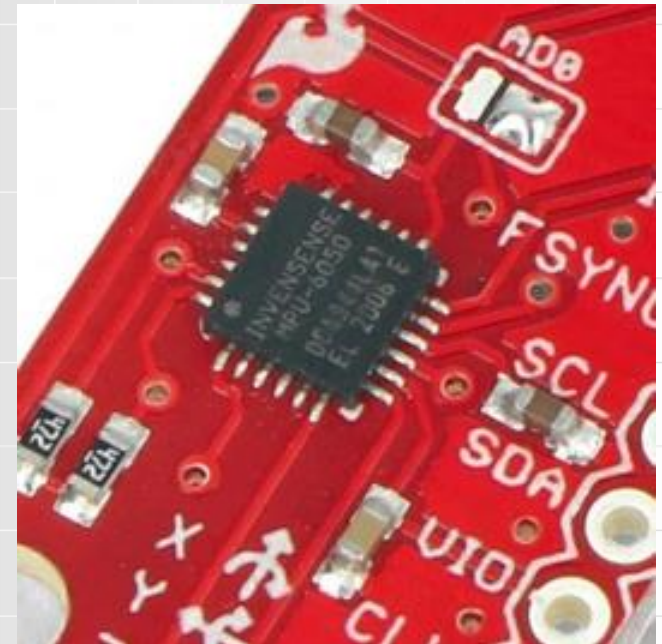


Układy pomiarowe – pomiar przyśpieszenia

Czujniki MEMS - Układy MEMS to połączenie mikroczujników, mikroprzetworników, mikroelektroniki i mikromechaniki, a wszystko to funkcjonujące w ramach jednej krzemowej struktury.

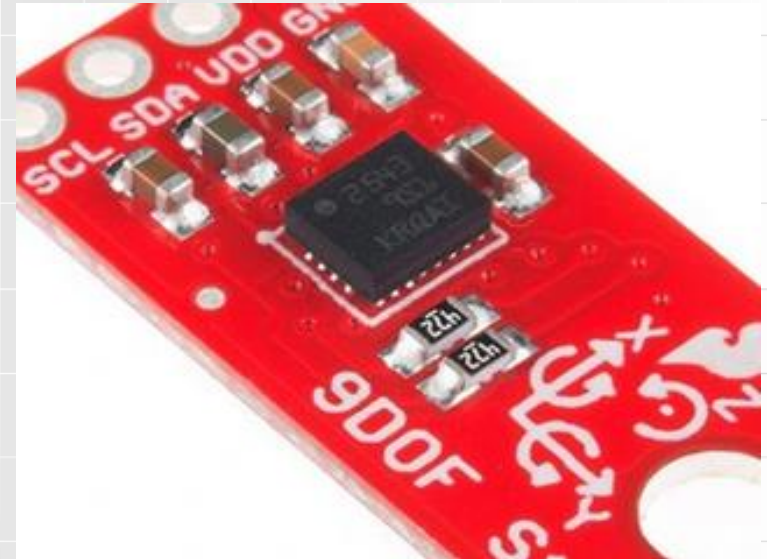
MPU6050:

- pomiar przyśpieszenia w 3 osiach
- pomiar prędkości obrotowej w 3 osiach
- pomiar temperatury



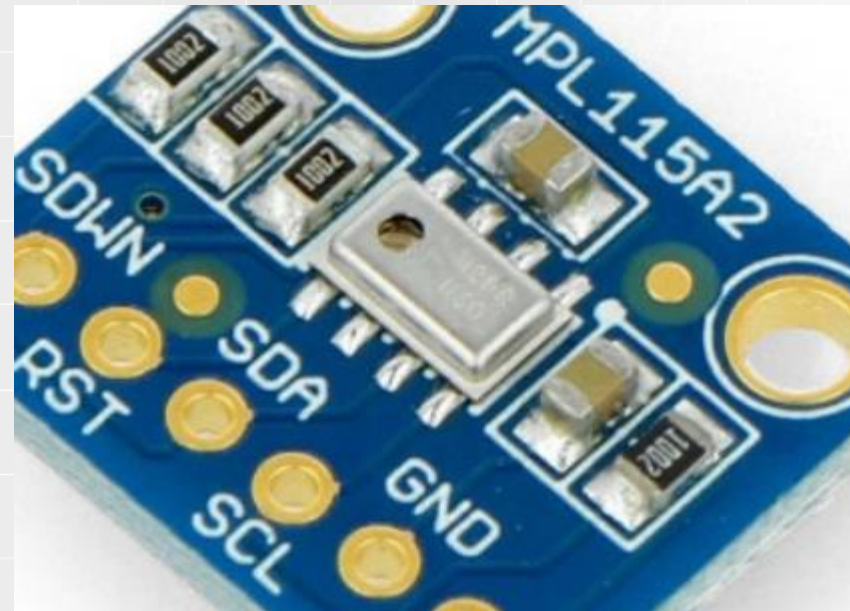
LSM9DS1 :

- pomiar przyśpieszenia w 3 osiach
- pomiar prędkości obrotowej w 3 osiach
- pomiar pola magnetycznego w 3 osiach
- pomiar temperatury



MPL115A2 :

- pomiar ciśnienia / wysokości
- pomiar temperatury







Kolokwium