

# Pomiar siły nacisku

## Elastyczne czujniki FlexiForce

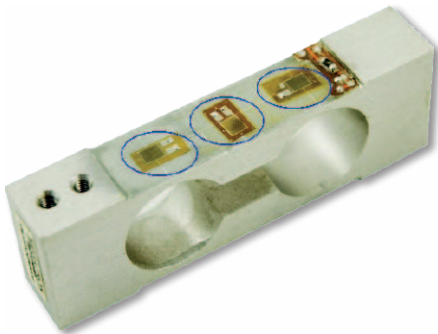


Do pomiaru siły powszechnie stosowane są czujniki tensometryczne.

Zasada ich działania opiera się na właściwości fizycznej metalowego drutu, polegającej na zmianie jego oporu elektrycznego wraz ze zmianą długości wskutek rozciągania. Ten drut jest naklejany na element odkształcający się pod wpływem działających sił, który spełnia także funkcję obudowy czujnika. W zależności od konstrukcji elementu nośnego (obudowy), czujnik może służyć do pomiaru małych sił o wartości pojedynczych niutonów, jak i ogromnych sił liczonych w dziesiątkach kiloniutonów.

Wadą czujników tensometrycznych są spore wymiary (fot. 1), wynikające z konieczności zastosowania solidnej konstrukcji nośnej czujnika, ulegającej odkształceniom pod wpływem przyłożonej siły. Większa siła wymaga zastosowania proporcjonalnie większej obudowy czujnika, co wyklucza ich zastosowania w przypadku pomiarów w trudno dostępnych miejscach lub w pomiarach siły na styku dwóch płaszczyzn.

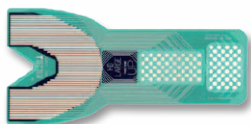
Na zupełnie innej zasadzie działają piezorezystancyjne, foliowe czujniki siły FlexiForce, produkowane przez firmę Tekscan. W zależności od przeznaczenia, są one dostępne w wykonaniach jedno- i wielopunktowych, które mogą przyjmować różne kształty i dowolną ilość punktów



Fot. 1. Czujnik z przyklejonymi tensometrami

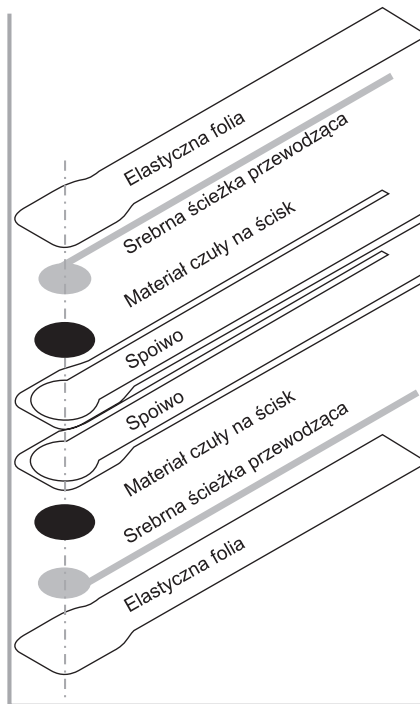


Fot. 2. Jednopunktowy czujnik FlexiForce

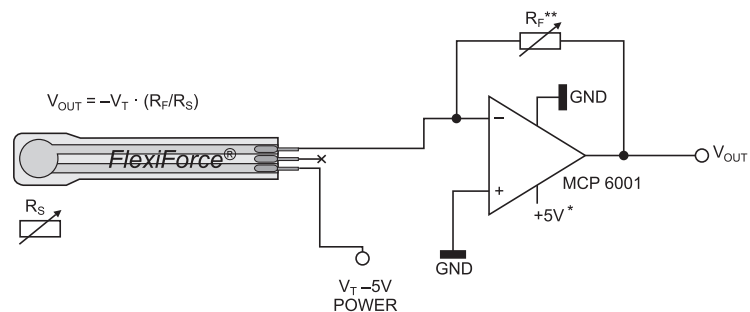


Fot. 3. Wielopunktowy czujnik w kształcie dopasowanym do ludzkiego uzębienia

pomiarowych. Przykłady takich czujników pokazano na fot. 2 i fot. 3. Więcej informacji na ich temat można znaleźć na stronie polskiego dystrybutora firmy WObit pod adresem internetowym [http://www.wobit.com.pl/produkty/czujniki\\_sily/czujniki\\_tekscan/tekscan.htm](http://www.wobit.com.pl/produkty/czujniki_sily/czujniki_tekscan/tekscan.htm)



Rys. 4. Budowa czujnika FlexiForce



Rys. 5. Przykład konwertera zalecany przez producenta

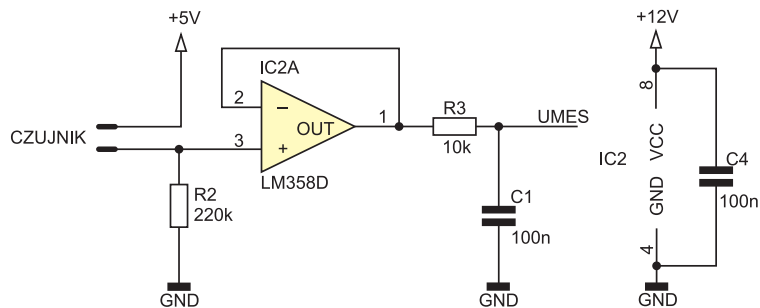
### Zasada działania czujników FlexiForce

Idea działania czujników FlexiForce polega na zmianie rezystancji materiału nadrukowanego na cienkim, poliestrowym podłożu pod wpływem zewnętrznego nacisku. Dzięki takiemu rozwiązaniu czujniki mają tylko 100  $\mu\text{m}$  grubości. Przewodność opisywanych czujników może być dostosowana tak, by zmieniać się od zera, dla zerowych sił zewnętrznych, do setek  $\mu\text{Siemensów}$  dla maksymalnych sił, które mogą być przyłożone. Schemat budowy czujnika FlexiForce pokazano na rys. 4.

**Linearyzacja sygnału wyjściowego.** Zastosowanie czujnika wymaga zbudowania odpowiedniego układu pomiarowego. Przykład takiego układu, zalecany przez producenta, pokazano na rys. 5, a praktyczną realizację podobnego układu na rys. 6. Napięcie uzyskane na wyjściu konwertera nie jest proporcjonalne do przyłożonej do czujnika siły, a to ze względu na nieliniowy charakter zmian rezystancji czujnika, co trzeba uwzględnić w jego aplikacji. Charakterystykę można wyznaczyć empirycznie, wykreślając ją na podstawie zmierzonych wartości np. przy pomocy arkusza kalkulacyjnego. Do tego celu należy wyznaczyć kilka punktów pomiarowych, obciążając czujnik znanymi wartościami siły (masy) i odczytać napięcie pojawiającego się na wyjściu układu pomiarowego. W tab. 1 pokazano kilka przykładowych zależności napięcia wyjściowego od przyłożonego do czujnika obciążenia.

Na rys. 7 pokazano wykres otrzymany w MS Excel. Dodanie linii trendu (funkcja wykładnicza) wyznaczyło przybliżoną funkcję linearyzującą napięcie z czujnika w stosunku do jego obciążenia. Otrzymana funkcja ma następującą postać:

$$y(x) = 0,05 \cdot e^{0,0024 \cdot x}$$

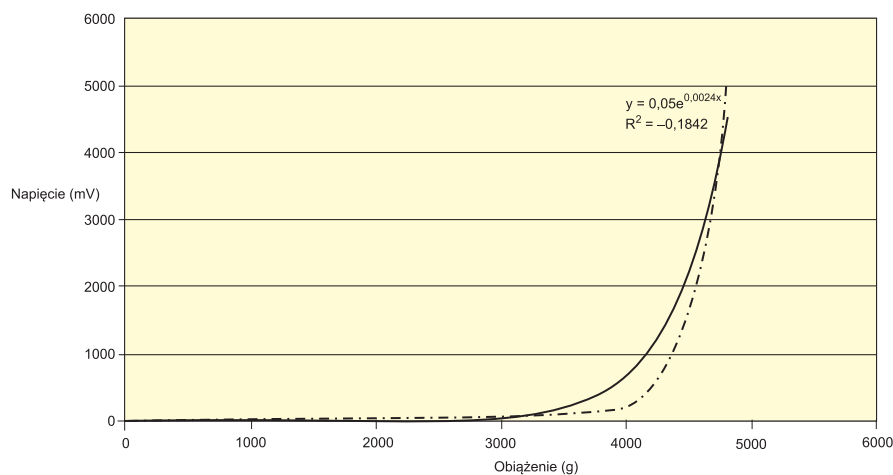


Rys. 6. Praktyczna realizacja prostego układu konwersji rezystancji na napięcie

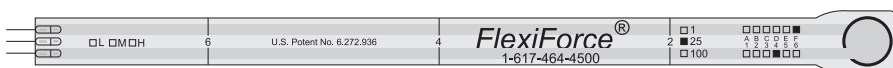
Tab. 1. Zależność napięcia wyjściowego od obciążenia czujnika

Napięcie [V]	Obciążenie czujnika [g]
0,075	5
0,44	10
0,55	18
1,50	25
2,70	80
4,00	200
4,20	500
4,30	1000
4,62	2500
4,70	3500

10 MΩ i jest na tyle duża, że na wyjściu wzmacniacza operacyjnego napięcie jest zbliżone do zera. Ściśnięcie czujnika powoduje zmniejszenie jego rezystancji, przez co w punkcie A pojawia się napięcie zwiększające się wraz ze zmniejszaniem rezystancji czujnika. Przy minimalnej rezystancji czujnika równej około 4 kΩ napięcie w punkcie A wynosi 4,9 V. Rezystor R3 i kondensator C4 tworzą filtr dolnoprzepustowy eliminujący ewentualne zakłócenia. Zastosowany wzmacniacz operacyjny LM358 jest zasilany z wyższego napięcia ze względu na to, iż nie posiada on wyjścia typu RAIL-TO-RAIL



Rys. 7. Wykres zależności napięcia od obciążenia czujnika



Rys. 8. Wygląd czujnika FlexiForce FF100

### Budowa urządzenia pomiarowego

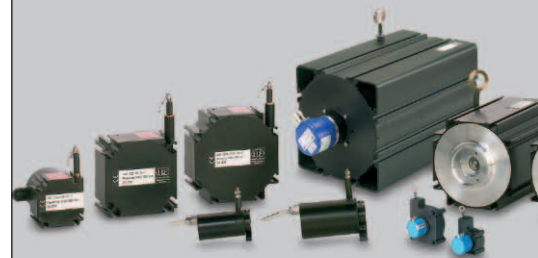
Jednopunktowy czujnik siły FF100 (rys. 8) jest najprostszym z oferty firmy Tekscan. Produkowany jest dla kilku zakresów siły (4,4 N, 110 N, 440 N). Ma dwa wyprowadzenia, na których nieliniowo zmienia się rezystancja w zakresie od kilku MΩ (dla nieobciążonego czujnika) do kilku kΩ (dla maksymalnie ściśniętego czujnika).

W pokazanym wcześniej na rys. 6 konwerterze rezystancja FF100 zamieniana jest na napięcie z zakresu 0...5 V. Rezystor R2 tworzy wraz z czujnikiem dzielnik, z którego napięcie podawane jest na wejście wzmacniacza operacyjnego IC2 pracującego w roli wtórника. Dla nieobciążonego czujnika rezystancja na jego zaciskach przekracza

(maksymalne napięcie na jego wyjściu to VCC-1,5 V).

Na rys. 9 pokazano praktyczną realizację konwertera z mikrokontrolerem. Do konwersji i linearyzacji sygnału wykorzystano popularny procesor ATmega8. Urządzenie ma trzy wyjścia: tranzystorowe (otwarty kolektor – OC), napięciowe 0...10 V oraz cyfrowe, szeregowe – RS485. Stopień zasilania zbudowano w oparciu o dwa liniowe stabilizatory napięcia 12 V i 5 V.

Napięcie pochodzące ze wzmacniacza UC2A podawane jest na wejście przetwornika A/C mikrokontrolera ATmega8, który pracuje z 10-bitową rozdzielczością. Daje to rozdzielczość ponad 1000 wartości pomiarowych, co w zupełności wystarcza w opisywanym zastosowaniu.



## Czujniki linkowe drogi WPS-MK



Zastosowania wymagające niskich cen, jak platformy o zmiennej wysokości, podnośniki samochodowe, łózka szpitalne, ambulatoryjne, stanowiska dentystyczne, stoły i wózki rehabilitacyjne są idealnym obszarem zastosowań dla tego czujnika drogi.



(061) 2912 225  
(061) 8350 620

wobit@wobit.com.pl  
www.wobit.com.pl

Drugi wzmacniacz operacyjny (IC4) służy do generowania napięcia 0...10 V. Zasilany jest on napięciem 12 V. Układ scalony IC4B wraz z elementami R10, C15 oraz R9, C16 służy do uśredniania sygnału PWM, a IC4A wraz z elementami R12 i R13 pracuje w roli wzmacniacza nieodwracającego o wzmacnieniu 2. Dzięki temu wartość sygnału PWM w zakresie 0...5 V jest zamieniany na napięcie wyjściowe 0...10 V.

Tranzystor Q2 pracuje w roli klucza, pozwalającego na załączenie obciążenia do 0,5 A np. w przypadku przekroczenia ustalonego progu pomiarowego.

Układ IC3 służy do konwersji sygnału UART mikrokontrolera na standard RS485.

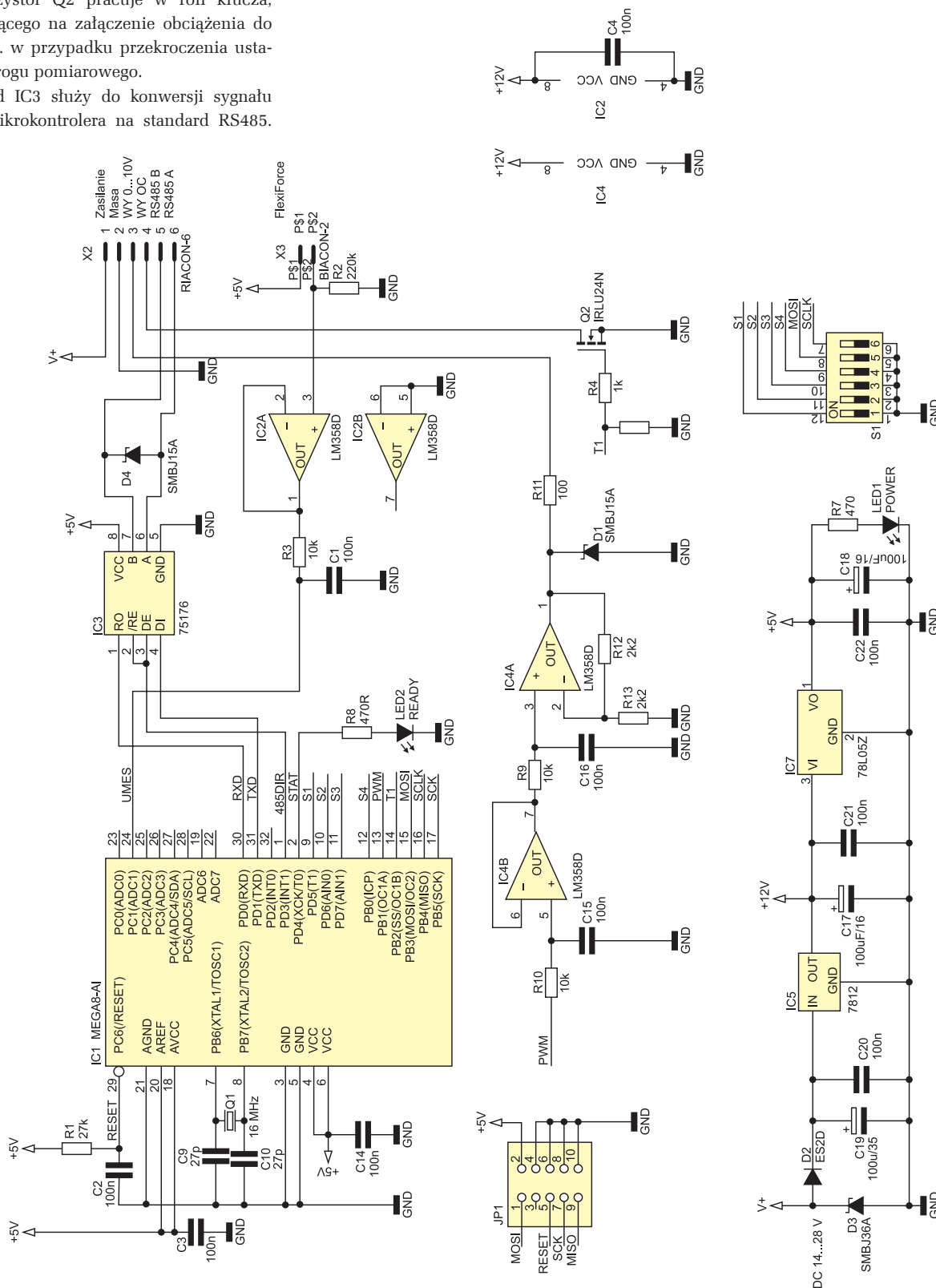
W urządzeniu zaimplementowano protokół MODBUS-RTU, dlatego dodatkowy 6-pozycyjny przełącznik S1 służy do wyboru adresu urządzenia SLAVE. Dzięki temu na jednej linii można połączyć do 64 urządzeń (rys. 10).

## Oprogramowanie

Program dla mikrokontrolera został napisany w języku C i skompilowany za pomocą kompilatora WinAVR.

Przetwornik A/C próbkuje sygnał z częstotliwością około 16 kHz. Wartość zmierzona uzyskiwana jest jako średnia z 64 kolejnych próbek. Funkcja linearyzująca ma postać:

```
unsigned int
FF100Linearize(unsigned int
  AdcVal)
{
  unsigned int CalcVal;
```



Rys. 9. Schemat konwertera z mikrokontrolerem

Tab. 2. Format ramki w trybie RTU

Znacznik początku	Adres	Funkcja	Dane	CRC	Znacznik końca
T <sub>1-2-3-4</sub>	8 bitów	8 bitów	N x 8 bitów	16 bitów	T <sub>1-2-3-4</sub>

```
float V;
V = (5000*(float)AdcVal)/1024;
// przeliczenie ADC na mV
CalcVal = (unsigned int)
(0.1*pow(2.718, (0.0024*V)))/5;
// linearyzacja pomiaru
if(CalcVal>1023) //
ograniczenie do 10bitów
CalcVal = 1023;
return CalcVal;
}
```

Tak obliczona wartość wpływa na stan rejestru sterującego wypełnieniem przebiegu PWM. Dzięki temu wyjściowe napięcie 0...10 V jest proporcjonalne do pełnego zakresu pomiarowego czujnika. Część kodu odpowiedzialna za konwersję z przetwornika ADC oraz sterowanie wyjścia PWM czy wyjściem tranzystorowym jest na tyle prosta, że nie wymaga szczegółowego omówienia.

**Komunikacja w protokole MODBUS.** W urządzeniu zaimplementowano protokół MODBUS, który dzięki swojej prostocie jest wciąż stosowany jako jeden ze standardów komunikacyjnych w urządzeniach automatyki. MODBUS został opracowany przez firmę Modicon i stał się standardem przyjętym przez większość znanych producentów sterowników przemysłowych dla wymiany informacji pomiędzy urządzeniami systemów pomiarowo-kontrolnych. O jego popularności i upowszechnieniu zdecydowały takie cechy, jak:

- prosta reguła dostępu do łącza oparta na zasadzie „master-slave”,
- zabezpieczenie przesyłanych komunikatów przed błędami,
- potwierdzanie wykonania rozkazów zdalnych i sygnalizacja błędów,

- skuteczne mechanizmy zabezpieczające przed zawieszeniem systemu,
- wykorzystanie asynchronicznej transmisji znakowej zgodnej z RS-232.

MODBUS może pracować w trybie znakowym ASCII oraz bajtowym RTU. Ten drugi jest popularniejszy i został zaimplementowany w opisywanym urządzeniu.

W trybie RTU wiadomości rozpoczynają się i kończą odstępem czasowym (T<sub>1-2-3-4</sub>) trwającym minimum 3,5×czas\_trwania\_pojedynczego\_znaku. Cała ramka musi zostać przesłana w postaci ciągłej, tzn. czas (T<sub>1-2</sub>) pomiędzy kolejnymi znakami tworzącymi ramkę nie może być większy od 1,5×czas\_trwania\_pojedynczego\_znaku. Jeżeli odstęp ten przekroczy podaną wartość, to urządzenie odbierające uzna ramkę za kompletną i przystąpi do jej interpretacji. Niezgodna liczba bajtów w ramce spowoduje, że ramka zostanie odrzucona. Podobnie, jeżeli owa wiadomość pojawi się na magistrali przed upływem koniecznej przerwy (3,5×długość znaku), to urządzenie odbierające potraktuje ją jako kontynuację poprzedniej wiadomości. To doprowadzi do błędu sumy kontrolnej, ponieważ urządzenie odbierające będzie obliczać CRC dwóch wiadomości i porównywać go z CRC drugiej.

Należy dodać, że powyżej prędkości transmisji 19200 bps przyjmuje się wartości stałe: T<sub>1-2</sub> 750 μs, oraz T<sub>1-2-3-4</sub> 1,750 μs.

**Struktura ramki.** Pierwszym polem informacyjnym ramki jest Adres (1 bajt) urządzenia. Kolejne stałe pola ramki to Funkcja (1 bajt), Dane (N×1 bajt) oraz suma kontrolna CRC (2 bajty). Urządzenie SLAVE sprawdza czy przesłany adres jest jego adresem własnym. Jeżeli tak, to kontynuuje interpretację

pozostałych pól wchodzących w skład ramki. Należy dodać, że adres o wartości 0 jest adresem rozgłoszeniowym i może być interpretowany przez wszystkie urządzenia na magistrali MODBUS.

W opisywanym urządzeniu przyjęto prędkość transmisji 57600 bps, a maksymalny czas odstępu między kolejnymi bajtami w ramce został ustawiony na 750 μs.

Poniższy kod pokazuje sposób realizacji funkcji „timeout” dla przychodzących do urządzenia bajtów.

```
#define TIMER0_PRESK 256
#define TCNT0_RELOAD (unsigned char) (256 - ((F_CPU/TIMER0_PRESK)*UART_TIMEOUT)/1000000UL)
#define UART_TIMEOUT 750 // 750 us
```

```
void UartTimeoutInit(void)
{
    TCCR0|=(1<<CS02); //preskaler 256
    TIMSK|=(1<<TOIE0); //włączenie przerwania od timera 0
}
```

```
// Przerwanie od przepełnienia timer0 do liczenia timeouta dla UARTa
SIGNAL(SIG_OVERFLOW0)
{
```

```
    rcv_cnt = 0;
    if(RxCnt) RxRdy = 1;
    TCCR0=0;
}
```

```
//Przerwanie od odebranego znaku
SIGNAL(SIG_UART_RECV)
{
```

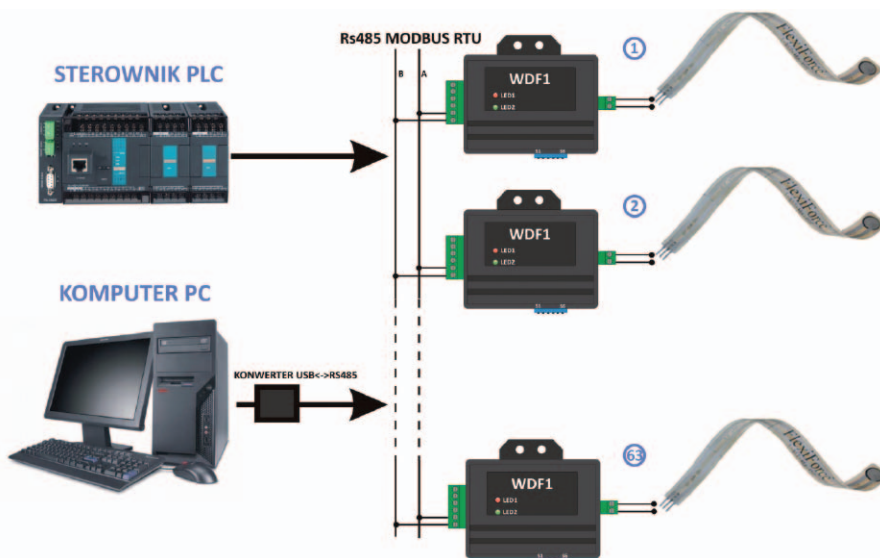
```
    RxBuf[RxCnt++] = UDR;
    if(RxCnt >= RX_BUFSIZE) // zabezpieczenie bufora przed przepełnieniem
    {
        RxCnt = RX_BUFSIZE - 1;
    }
```

```
    TCNT0 = TCNT0_RELOAD; // przeładowanie timera 0
    TCCR0|=(1<<CS02); // włączenie timera 0
}
```

Odebrane przez UART dane są zapisywane do bufora RxBuf. Jeśli kolejny bajt nie zostanie odebrany w czasie krótszym niż 750 μs, nastąpi przerwanie od przepełnienia Timera0 i ustawiona zostanie flaga RxRdy sygnalizująca gotowość ramki do interpretacji.

Więcej informacji na temat opisywanego urządzenia jak i gotowy układ można znaleźć na stronie internetowej [www.wobit.com.pl](http://www.wobit.com.pl).

Adam Sarzyński  
adam@wobit.com.pl



Rys. 10. Połączenie kilku czujników do jednej magistrali RS485