

Jerzy KOŁŁATAJ

Katedra Telekomunikacji i Aparatury Elektronicznej  
Politechnika Białostocka

Robert KOŁŁATAJ

AMEX Research Corporation Technologies  
Elektroniczne Techniki Kontrolno-Pomiarowe  
Białystok

## PRECYZYJNY KONDYCJONER DO TELEMETRYCZNYCH POMIARÓW TENSOMETRYCZNYCH

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono opis precyzyjnego kondycjonera do telemetrycznych badań naprężeń mechanicznych za pomocą techniki tensometrycznej. Konstrukcja kondycjonera umożliwia zdalną kalibrację tensometrów, zmianę zakresów pomiarowych, zerowanie, przesuwanie tła oraz zmianę parametrów filtrów cyfrowych kształtujących sygnał wyjściowy.

## PRECISION STRAIN GAGE CONDITIONER FOR TELEMETRIC MEASUREMENTS

**Summary.** The paper describes the programmable strain gage conditioner for the radio telemetry measurements of strain, forces, static and dynamic stresses. The digital, multichannel transmitter and receiver system allows data transmission from 16 and more bridge channels. The conditioner features user programmable digital filter, gain, and sample rate. Once programmed, these settings reside in the transmitter's non-volatile memory, which will retain data even if power is removed.

### 1. WSTĘP

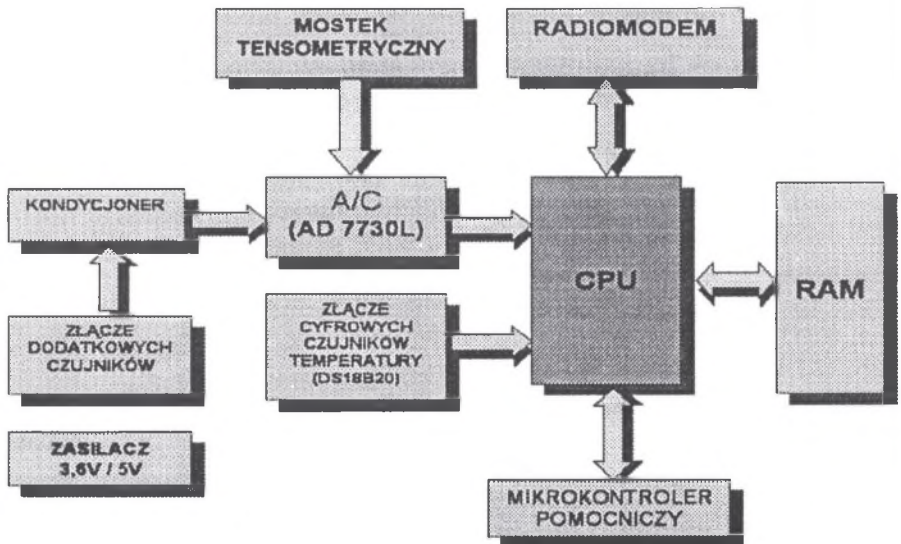
Stosowanie tensometrów metalicznych jest nadal dużym wyzwaniem w technice pomiarowej z powodu bardzo niewielkich zmian ich rezystancji (0,1% - 1,0% w stosunku do ich wartości nominalnej). Dokładne pomiary małych zmian rezystancji w warunkach przemysłowych są trudnym problemem przy konstruowaniu sprzętu pomiarowego, przeznaczonego do pomiaru stanu naprężeń w konstrukcjach mechanicznych, obiektach budowlanych itp. Znaczna ilość i rozproszenie punktów pomiarowych w dużych obiektach

stwarza dodatkowe trudności w akwizycji danych pomiarowych. Z tej przyczyny zdecydowano się na zastosowanie transmisji radiowej do przekazywania wyników pomiarów z poszczególnych kanałów pomiarowych. Wykonany kondycjoner umożliwia podłączenie 16 tensometrów. W planowanych aplikacjach liczba punktów pomiarowych może wynosić ponad 40.

## 2. BUDOWA I ZASADA DZIAŁANIA KONDYCJONERA

Schemat blokowy kondycjonera (stacji pomiarowej) przedstawiono na rysunku 1. W wykonanym prototypie kondycjonera zastosowano najnowsze układy scalone przeznaczone do współpracy z mostkami tensometrycznymi. Kondycjoner zawiera kompletny układ pomiarowy ze wzmacniaczem wejściowym, systemem kalibracji, filtrem cyfrowym i szeregowym interfejsem komunikacyjnym umożliwiającym współpracę z wbudowanym systemem mikroprocesorowym i modemem radiowym. Pomiar odbywa się z rozdzielczością 16 lub 24 bitów. Wszystkie czynności związane z pomiarem (kalibracja, równoważenie mostka, ustawianie wzmocnienia) odbywają się cyfrowo (drogą radiową), poprzez zapis odpowiednich współczynników do wewnętrznych rejestrów przetwornika A/C. Brak jakichkolwiek mechanicznych elementów regulacyjnych jest dużym atutem kondycjonera, szczególnie w pomiarach wielokanałowych, minimalizując trudności natury metrologicznej i organizacyjnej.

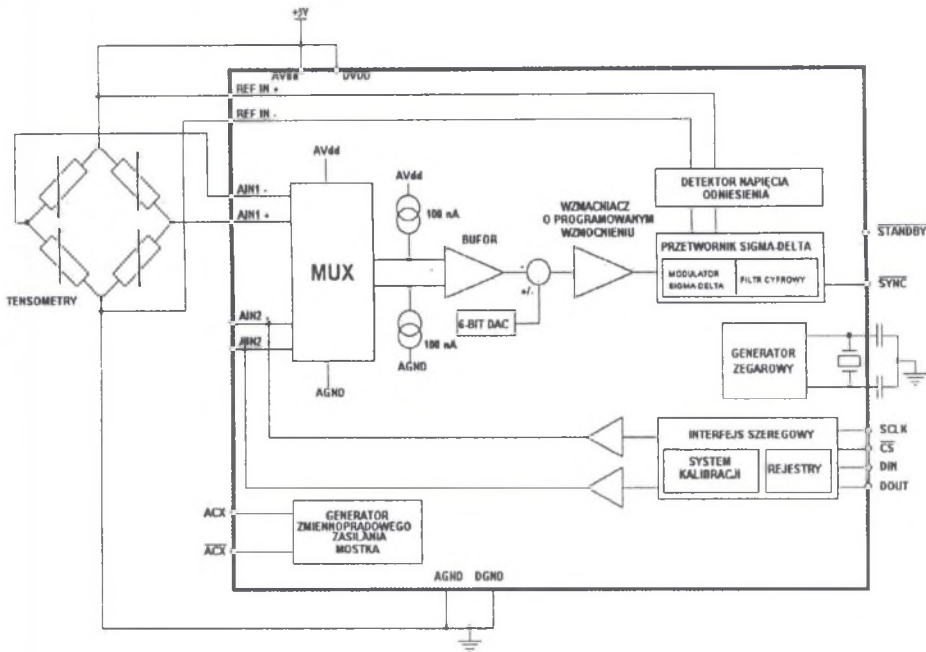
Radiomodem przystosowany jest do pracy bateryjnej z niskim poborem energii [4].



Rys.1. Schemat blokowy kondycjonera (stacji pomiarowej)  
Fig.1. Block diagram of strain gage conditioner

Część mikroprocesorowa zawiera mikrokontroler AT89LV51 firmy Atmel oraz mikrokontroler pomocniczy typu PIC16C84 firmy Microchip. Kontroler pomocniczy zastępuje kilka układów cyfrowych, dzięki czemu cały układ jest bardziej niezawodny, ponadto uprościło to projekt płytki drukowanej. Zrealizowano w nim programowo, między innymi zegar czasu rzeczywistego, funkcję przerzutnika monostabilnego, służącego do zerowania mikrokontrolera głównego w razie odebrania danych przez radiomodem. Jako pamięć RAM służącą do gromadzenia wyników pomiarów i zmiennych systemowych zastosowano układ 62256 (32 KB).

Głównym elementem części analogowej kondycjonera jest przetwornik A/C z przetwarzaniem typu Delta-Sigma typu AD7730L firmy Analog Devices [1]. Uproszczony schemat blokowy tego układu przystosowanego do pomiarów tensometrycznych przedstawiono na rys.2.

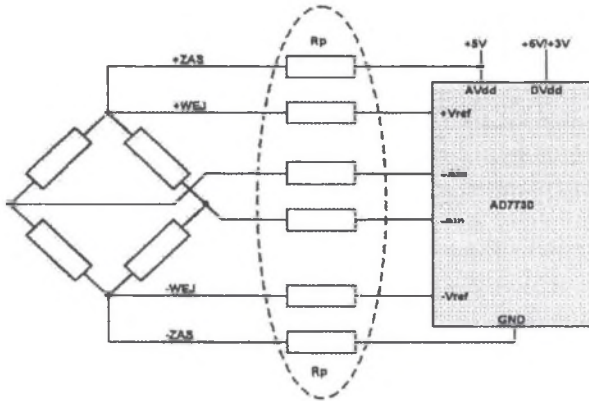


Rys.2. Uproszczony schemat blokowy części analogowej kondycjonera (AD7730L)

Fig.2. AD7730 block diagram of the bridge ADC

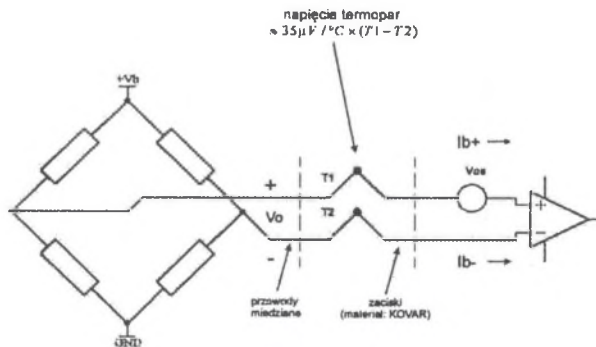
Układ 7730L zawiera kompletny układ pomiarowy ze wzmacniaczem wejściowym, system kalibracji, filtr cyfrowy i szeregowy interfejs komunikacyjny umożliwiający podłączenie przetwornika z dowolnym mikroprocesorem. Wszystkie czynności związane z pomiarem (kalibracja, równoważenie, ustawianie wzmacnienia, filtracja zakłóceń) odbywają się cyfrowo, poprzez zapis odpowiednich współczynników do wewnętrznych rejestrów przetwornika.

W przypadku mostków tensometrycznych znajdujących się w znacznej odległości od układu pomiarowego, w celu kompensacji rezystancji  $R_p$  przewodów doprowadzających zastosowano konfigurację przedstawioną na rys.3.



Rys.3. Mostek tensometryczny 6-przewodowy podłączony do układu pomiarowego  
Fig.3. The bridge strain gage circuit (6 wire method)

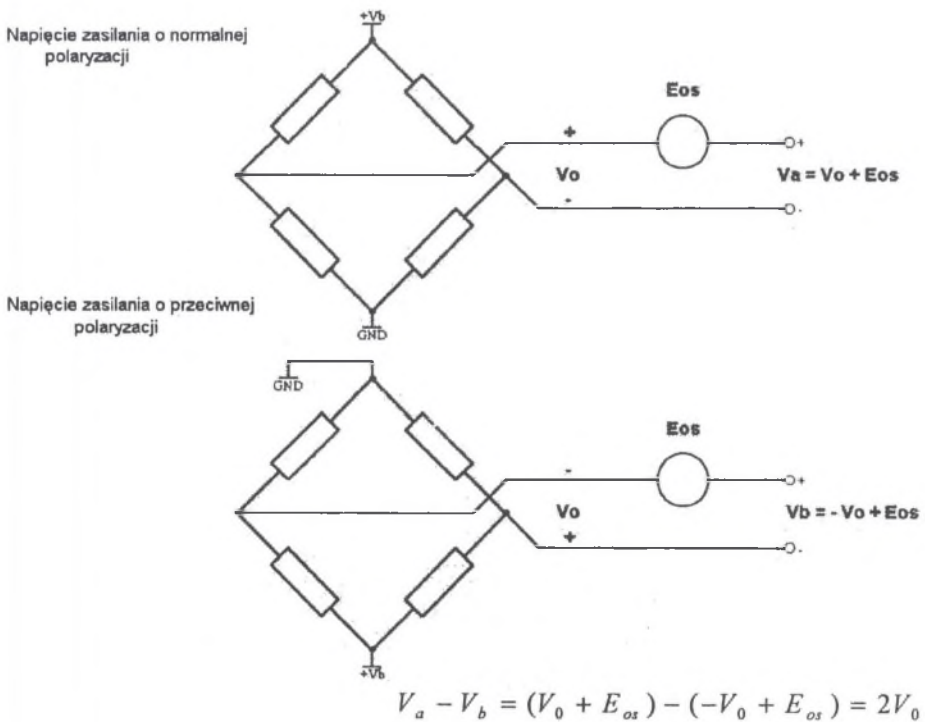
Napięcie z mostka pomiarowego (pomniejszone o spadki napięć na przewodach doprowadzających) podawane jest dwoma przewodami (+/- sense) na różnicowe wejście referencyjne w przetworniku A/C. Zmiana napięcia referencyjnego automatycznie kompensuje powstałe spadki napięć na przewodach oraz niestabilności napięcia zasilania mostka pomiarowego [2].



Rys.4. Typowe źródła błędów termicznych powodowanych na wejściu układu  
Fig.4. Typical sources of offset voltage

W precyzyjnych kondycjonerach, które muszą zapewnić dokładność na poziomie 0,1% (przy napięciach na wyjściu mostka rzędu np. 20 mV) – całkowity offset nie może przekroczyć 20  $\mu$ V. Niezależnie od korzystnych parametrów części pomiarowej należy wspomnieć o innym niekorzystnym zjawisku występującym w technice pomiarów tensometrycznych. Jest nim powstawanie siły termoelektrycznej w miejscu połączenia tensometrów i przewodów łączących. Materiały, z których wykonany jest tensometr i przewody, są różne. Powstaje więc termoelement, który generuje dodatkowe napięcie na wejściu wzmacniacza, będące dodatkowym offsetem (rys.4) [3].

Jednym ze sposobów wyeliminowania tego offsetu jest zasilanie mostka pomiarowego z napięcia przemiennego (rys.5) [3].

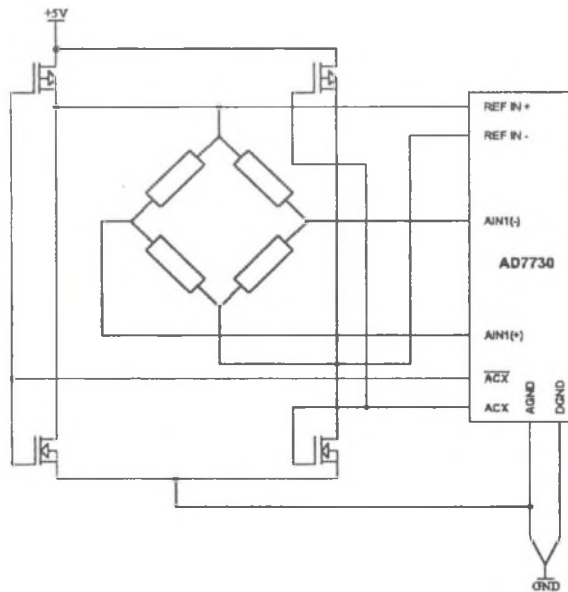


Rys.5. Metoda eliminacji termicznego offsetu poprzez zasilanie mostka napięciem zmiennym  
Fig.5. AC excitation minimizes offset errors

Pomiar napięcia wyjściowego z mostka odbywa się w dwóch etapach. W pierwszym etapie otrzymujemy napięcie  $U_A$ , które jest sumą właściwego napięcia wyjściowego  $U_0$  i siły termoelektrycznej  $E_{os}$ . Następnie odwracana jest polaryzacja napięcia zasilającego mostek. W tym drugim etapie dokonywany jest pomiar napięcia  $U_B$ . Odejmując od siebie wartości  $U_A$  i  $U_B$ , otrzymujemy podwojoną wartość napięcia  $U_0$  (czyli  $2U_0$ ). Wartość napięcia

termoelektrycznego zostaje więc wyeliminowana. Metoda ta wymaga stosowania bardzo wysokiej dokładności przetworników A/C oraz mikrokontrolera w celu wykonania niezbędnych obliczeń. Jeśli został wybrany pomiar ratiometryczny, przetwornik A/C musi uwzględnić zmianę polaryzacji napięcia odniesienia. Wymagania te spełnia wykonany kondycjoner.

Sposób dołączenia mostka tensometrycznego z zasilaniem zmiennoprądowym przedstawiono na rys.6.



Rys. 6. Mostek tensometryczny z zasilaniem zmiennoprądowym  
Fig. 6. AC bridge drive circuit

Przy takiej konfiguracji wymagane jest zastosowanie czterech dodatkowych tranzystorów MOSFET. Rezystancja kanału każdego tranzystora powinna być jak najmniejsza (rzędu kilkudziesięciu m $\Omega$ ).

### 3. TRYBY PRACY I KALIBRACJA KONDYCJONERA

Przetwarzanie A/C może odbywać się w dwóch trybach: praca statyczna i praca z przetwarzaniem (*chopping mode*). System kalibracji kondycjonera (regulacja czułości, zerowanie napięcia niezrównoważenia) w pełni zastępuje dotychczas stosowane rozwiązania w mostkowych układach pomiarowych. Możliwe są dwa rodzaje kalibracji: kalibracja



napięcia niezrównoważenia, nazywana niekiedy usuwaniem napięcia offsetu lub kalibracją zera (*zero-scale calibration*) i kalibracją pełnej skali (*full-scale calibration*). W typowych układach mostkowych napięcie niezrównoważenia mostka może być w granicach od ułamków mV do kilkudziesięciu mV. Wykonanie kalibracji zera polega na podaniu na wejście przetwornika napięcia niezrównoważenia (przy braku odkształcenia tensometrów w mostku) i wpisaniu do przetwornika komendy „*zero-scale calibration*”. Napięcie to jest wówczas mierzone i jego wartość jest zapisywana w 24-bitowym rejestrze „*zero-scale calibration register*”. Zmierzona wartość napięcia offsetu jest później odejmowana od każdego wyniku pomiaru. Napięcie niezrównoważenia nie może przyjmować dowolnie dużych wartości. Przetwornik ma ściśle określone ograniczenia dotyczące maksymalnych wartości napięć offsetu, jakie można podać na jego wejścia.

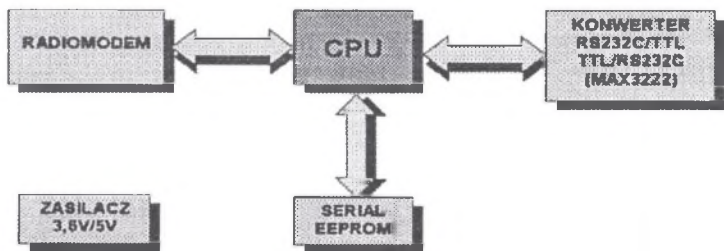
W przypadku gdy wartość napięcia offsetu wykracza poza dopuszczalne wartości, pomocny jest dodatkowy przetwornik C/A umożliwiający dodawanie lub odejmowanie od mierzonego napięcia tzw. tary, czyli dodatkowego napięcia stałego. Przebieg kalibracji przebiega wówczas w dwóch etapach. Na początku mierzona jest wartość napięcia offsetu i przetwornik C/A ustawia przybliżoną wartość napięcia o przeciwnym znaku. Powoduje to zgrubne zminimalizowanie napięcia niezrównoważenia. Następnie wydawana jest komenda „*zero-scale calibration*”. Po jej wykonaniu napięcie offsetu jest wyeliminowane.

Kalibracja pełnej skali przebiega podobnie jak poprzednio, z tą różnicą, że na wejście przetwornika należy podać maksymalne napięcie, uzyskiwane na wyjściu mostka tensometrycznego (czyli należy poddać mostek pełnemu, możliwemu do uzyskania odkształceniu). Napięcie to jest również mierzone, a następnie obliczany jest współczynnik wzmocnienia i zapisywany w 24-bitowym rejestrze „*full scale calibration register*”. Wyniki pomiarów są następnie mnożone przez obliczony współczynnik. Mnożenie odbywa się po uprzednim odjęciu zmierzonej wcześniej w procesie kalibracji zera wartości napięcia niezrównoważenia zapamiętanej w rejestrze „*zero-scale calibration register*”. Współczynnik wzmocnienia jest obliczany w taki sposób, aby po pomnożeniu go przez wartość zmierzonego maksymalnego napięcia z mostka tensometrycznego wskazanie przetwornika było równe ustawionemu zakresowi. Reasumując, kalibracja pełnej skali ma na celu umożliwienie wykorzystania pełnej rozdzielczości przetwornika (16 lub 24 bity) do istniejącego zakresu zmian napięcia z mostka tensometrycznego. Rejestry offsetu i współczynnika wzmocnienia mogą być odczytywane i dowolnie modyfikowane przez użytkownika, chociaż ich zawartość jest ustalana automatycznie w procesie kalibracji za pomocą wbudowanego w kondycjonerze układu mikroprocesorowego.

Przy projektowaniu kondycjonera duży nacisk kładziono na maksymalne zmniejszenie prądu pobieranego z baterii zasilającej. Szczególnie znaczenie ma prąd pobierany w czasie, gdy cała stacja znajduje się w trybie uśpienia (nie są wykonywane żadne pomiary). Po włączeniu zasilania stacja automatycznie przechodzi w stan uśpienia (*standby*). Radiomodem pracuje w trybie pracy przerywanej z czasem włączenia 4 ms i czasem wyłączenia 1,45 s.

#### 4. FILTRACJA CYFROWA

Kondycjoner zawiera również bardzo efektywny, dwustopniowy, dolnoprzepustowy filtr cyfrowy o właściwościach praktycznie nieosiągalnych w klasycznych filtrach analogowych. Pozwala on, między innymi, na bardzo skuteczną eliminację różnego rodzaju zakłóceń, chociażby w postaci tętnień dostających się przez przewody łączące mostek tensometryczny z wejściem kondycjonera. Ustawienia filtra można zmieniać przez odpowiednie zaprogramowanie (także drogą radiową) filtru „*filter register*”. Na ustawienia te składają się 3-decybelowa częstotliwość odcięcia, tryb pracy szybkiej (*fast step mode*), włączenie filtra jednostopniowego lub dwustopniowego oraz tryb pracy wzmacniacza pomiarowego z przetwarzaniem. Od ustawień filtra zależy czas przetwarzania A/C, który zawiera się w przedziale od ok. 1 ms do kilkudziesięciu ms. Zwiększenie tłumienia powoduje wydłużenie czasu przetwarzania. W trybie szybkim czas przetwarzania jest kilkakrotnie mniejszy, jednak filtracja jest wówczas mniej efektywna. Częstotliwość odświeżania wyniku pomiaru (*update rate*), czyli częstotliwość zapisywania wyniku pomiaru do rejestru wyniku pomiaru jest zależna od ustawień filtra (głównie od ustawionej częstotliwości odcięcia), ale jej wartość nie oznacza częstotliwości próbkowania sygnału wejściowego. Częstotliwość próbkowania może być obliczona na podstawie znajomości czasu ustalania się odpowiedzi filtra. Czas ten jest równy sumie trwania 25 cykli odświeżania danej do rejestru wyniku pomiaru w trybie zwykłym i ok. 5 cykli w trybie szybkim. Po wyzerowaniu układu kondycjonera filtr jest ustawiany jako dwustopniowy z 3-decybelową częstotliwością równą 7,8 Hz i częstotliwości odświeżania wyniku równej 200 Hz. Oznacza to, że prawidłowy wynik pomiaru może być odczytywany co  $(1/200 \text{ Hz}) \times 25 = 125 \text{ ms}$  w trybie normalnym i  $(1/200 \text{ Hz}) \times 5 = 25 \text{ ms}$  w trybie szybkim. Wybór częstotliwości odcięcia musi być ustalany na podstawie wymaganej częstotliwości wykonywania pomiarów.



Rys.7. Schemat blokowy stacji głównej  
Fig.7. Main station diagram



## 5. STACJA GŁÓWNA

Zadaniem stacji głównej (rys.7) jest komunikacja z kondycjonerem. Uzyskane w drodze transmisji radiowej dane przekazywane są poprzez interfejs RS232 do komputera. Stworzono specjalny program do prezentacji i wizualizacji otrzymanych wyników [3].

## 6. BADANIA EKSPLOATACYJNE WYKONANEGO KONDYCJONERA

Właściwości metrologiczne kondycjonera pozwalają na bardzo dokładne pomiary odkształceń mechanicznych, nawet przy małej czułości mostka tensometrycznego. Minimalne czułości dotychczasowych rozwiązań mostków tensometrycznych wynoszą 5-10 mV/V. W zaproponowanym układzie kondycjonera minimalna czułość mostków może być poniżej 1 mV/V. Pozwala to na znaczne zwiększenie zakresu zastosowań zaproponowanego rozwiązania.

Po sprawdzeniu poprawności komunikacji radiowej przeprowadzono badania metrologiczne kondycjonera tensometrycznego. Do testowych badań tensometrycznych wykorzystano belkę stalową o grubości 5 mm, szerokości 44,5 mm i długości 53 cm. Układ pomiarowy pracował w konfiguracji półmostkowej (tensometry o rezystancji 120  $\Omega$  z zasilaniem stałonapięciowym 3,3 V). Po wykonaniu kalibracji zera prowadzono badania statyczne i dynamiczne.

Ważniejsze uzyskane parametry techniczne kondycjonera są następujące:

Komunikacja z kondycjonerem:	radiowa (433,92 MHz)
Zasilanie kondycjonera:	3,6 V (bateria litowa)
Rozdzielczość:	16 lub 24 bity
Dryft zera:	5 nV/°C
Czasowy dryft zera:	15 nV/1000 h
Nieliniowość:	18 ppm zakresu napięcia wejściowego
CMMR:	min. 120 dB
Częstotliwość rejestrowanych sygnałów:	0 – 25 Hz

## 7. PODSUMOWANIE

Opracowany i wykonany kondycjoner do pomiarów tensometrycznych spełnia przyjęte założenia techniczne, co zostało potwierdzone w próbach eksploatacyjnych. W trakcie prób znaleziono niewielkie błędy (głównie programowe), które zostały usunięte. W wersji komercyjnej kondycjonera przewidywane jest wprowadzenie pewnych zmian i udoskonalień. Dotyczą one np. zastosowania dodatkowych układów przeciwzakłóceńowych oraz dodatkowego zasilania zewnętrznego. Prototyp transceivera pozwala na długotrwałą, nierzerwaną pracę w okresie do 12 miesięcy.

## LITERATURA

1. *AD7730L Data Sheet*. Analog Devices, <http://www.analog.com>.
2. Kester W.: *Bridge circuits*. Practical Design Techniques for Sensor Signal Conditioning, Analog Devices Inc., 1999.
3. Kołtątaj R.: System zdalnej akwizycji danych z rozproszonych czujników pomiarowych. Praca magisterska, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, Białystok 2000.
4. *Low Power UHF Data Transceiver Module*. Radiometrix Ltd, BiM-UHF Data Sheet, Issue 3, September 1998.

Recenzent: Dr hab. inż. Michał Lisowski  
prof. Politechniki Wrocławskiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 grudnia 2000 r.

**Abstract**

Bidirectional wireless mechanical stress measurement may be carried out by a radio transceiver which operates with strain gauge measurement circuit. The most popular electrical elements used in strain, force measurements include the resistance strain gage. The block circuit diagram of a precision conditioner is presented in Fig.1. The measurement module is a complete system based upon the latest circuit AD7730L by Analog Devices. Its block diagram is presented in Fig.2. The circuit was specially designed for operation with low level signals in strain gauge circuits. Bridges still offer an attractive method for measuring small resistance changes accurately. A very powerful ratiometric technique which includes Kelvin sensing to minimize errors due to wiring resistance and also eliminates the need for an accurate excitation voltage is shown in Fig.3. Fig.4 presents some typical sources of offset errors that are inevitable in a system. AC bridge excitation as shown in Fig.5 can effectively remove offset voltages in series with the bridge output. P-Channel and N-Channel MOSFETs can be configured as an AC bridge driver as shown in Fig.6.

Fig.7 presents the main station diagram. This main station can communicate with the computer via RS232C interface.

Due to the fact that the measurements are performed over the radio, the conditioner has to be equipped with a number of functions, which are quite troublesome in traditional stress measurements with use of strain gauge technology (zeroing, scaling, calibration, digital filtration etc.). In case of multichannel measurements, frequent implementation of these functions (separately for each channel) causes substantial difficulties of metrological and organizational nature. All these functions are performed in the described conditioner by the microprocessor system.

The constructed prototype of a conditioner, after its initial testing, allows the measurement of mechanical stress using strain gage technology. Inherent intelligence features provides more credible results, which are required in field conditions.