

## Zygmunt Lech WARSZA, Adam IDŹKOWSKI, Jarosław MAKAL

POLSKIE TOWARZYSTWO METROLOGICZNE  
POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA, WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY

# Zastosowanie mostka dwuprądowego do jednoczesnego pomiaru odkształcenia mechanicznego i temperatury

### Doc. dr inż. Zygmunt Lech WARSZA

Ukończył Miernictwo Elektryczne w Politechnice Warszawskiej 1959, doktorat 1967, docentura 1970 - za dorobek równoważny habilitacji. Zorganizował i prowadził: Wydział Transportu w Radomiu jako dziekan 1970-76, Ośrodek Aparatury IMGW 1978-81, Zakład Techniki Pomiarowej Instytutu Chemii Przemysłowej 1983-91, Doradca Ministra Edukacji 1992-94. Wykładał metrologię w Politechnice Radomskiej do 2002 r. Autor i współautor ok. 100 publikacji, 2 monografii, kilkunastu patentów i wielu prac badawczo-konstrukcyjnych. Specjalizacja w kilku dziedzinach pomiarowych. Prezes Polskiego Towarzystwa Metrologicznego.



e-mail: zlw@op.pl

### Dr inż. Jarosław MAKAL

Studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej ukończył w 1980 r. Tam też obronił pracę doktorską w 1988 r. Od 1980 roku pracuje na Wydziale Elektrycznym Politechniki Białostockiej. Prowadzi zajęcia z podstaw elektrotechniki oraz metrologii. Interesuje się zagadnieniami obliczania niepewności pomiarów oraz systemami ekspertowymi w zastosowaniach medycznych. Współautor i twórca kilkudziesięciu publikacji naukowych. Od 2003 roku członek Sekcji Podstawowych Problemów Metrologii Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN.



e-mail: jaromaka@pb.edu.pl

### Mgr inż. Adam IDŹKOWSKI

W 2001 roku ukończył studia na kierunku Elektronika i Telekomunikacja w Politechnice Białostockiej. W tym samym roku został asystentem w Katedrze Elektrotechniki i Metrologii. Interesuje się techniką sensorową i elektroniczną aparaturą medyczną. Jest autorem lub współautorem kilku opracowań naukowo-badawczych i 16 publikacji z tych dziedzin.



e-mail: adam\_i@we.pb.edu.pl

### Streszczenie

Opisano czterozaciskowy (4T) układ mostka rezystancyjnego zasilanego niekonwencjonalnie z dwóch źródeł prądowych i o dwu wyjściach z obu jego przekątnych, nazwany mostkiem dwuprądowym (2J). Podano napięcia wyjściowe nierównoważonego mostka jako funkcje rezystancji jego gałęzi lub ich przyrostów od równowagi mostka w wartościach względnych. Przedstawiono przykład realizacji dwuparametrowego (2D) przetwornika do równoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury wykorzystującego ten mostek i omówiono wybrane wyniki pomiarów eksperymentalnej jego weryfikacji.

**Słowa kluczowe:** pomiary dwuparametrowe, mostek pomiarowy, tensometria oporowa, pomiary naprężeń i temperatury.

## Application of double current bridge-circuit for simultaneous measurements of strain and temperature

### Abstract

A four-terminal (4T) bridge circuit unconventionally supplied by two current sources connected in parallel to opposite arms, named double current bridge (2J) is presented. It has two different outputs from both diagonals. The output voltages described as functions of arm resistances or their increments from bridge balance in relative units are given. Example of its application is proposed. Signals conditioning formulas of the two-parameter (2D) measurement - of strain and temperature are discussed in details. Some results of experimental verification of instrumentation circuit, designed for this bridge, are shortly presented.

**Keywords:** measuring bridges, strain gauges, strain and temperature analysis.

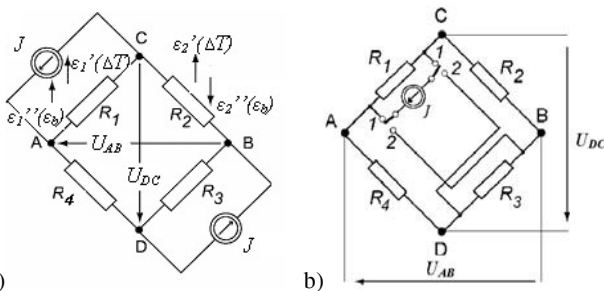
## 1. Wprowadzenie

Powszechnie stosowanie w torach pomiarowych szybkich i o dużej rozdzielczości przetworników analogowo-cyfrowych oraz innych układów cyfrowych powoduje, że dokładność pomiaru w dominującym stopniu zależy od analogowych bloków kondycjonowania wstępnego sygnałów. W tensometrycznych pomiarach ciśnienia, siły i momentu obrotowego zawierają one zestawy sensorów przeważnie włączone w strukturę mostka Wheatstone'a. Obserwuje się obecnie wzrost zapotrzebowania na nowe rozwiązania układowe do pomiaru kilku wielkości fizycznych jednocześnie (*ang. multidimensional measurements, w skrócie nD*). Przykładem mogą być pomiary przyrostów immitancji w układzie wielokońcówkowym, przy kilku wielkościach wpływających z wymaganą możliwie dużą dokładnością. Problem ten przedstawiono m. in. w monografii [1]. Stanowi on też barierę w zastosowaniu tomografii impedancyjnej wtedy, gdy metody badań małych przyrostów oparte na pomiarach wartości całej impedancji lub admittancji są niewystarczająco dokładne. Począwszy od 1998 roku pierwszy z autorów opisuje propozycje dwóch rodzajów niekonwencjonalnych rozwiązań obwodów wstępnego kondycjonowania dwu, lub więcej, sprzężonych ze sobą sygnałów [2-7]. Dla wszystkich rozwiązań obwodów pierwszego typu autor ten zaproponował nazwę: mostki dwuprądowe. Idea ich działania polega na niekonwencjonalnym, w stosunku do znanych mostków, sposobie zasilania. Dla czteroramiennych mostków realizuje się je przez dwa jednakowe źródła prądowe dołączone na stałe równolegle do przeciwnych ramion –  $2J$ , bądź poprzez przełączanie dwu niejednakowych źródeł prądowych –  $2x2J$  lub też tylko pojedynczego –  $2x1J$ . Natomiast drugim rodzajem układu jest obwód składający się z dwóch czteroramiennych mostków połączonych kaskadowo [1-4]. Wszystkie te układy są opisane m. in. w [1-7], a najszerzej w monografii [1]. W tej publikacji autorzy omawiają weryfikację eksperymentalną równoczesnego pomiaru dwuparametrowego (2D) odkształcenia i temperatury przy użyciu dwóch tensometrów w układzie  $2x1J$  z możliwością jednoczesnej cyfrowej kompensacji wpływu zmian temperatury na zero i czułość pomiarów odkształceń. Zaletą tego rozwiązania jest brak dodatkowego czujnika temperatury, jak to ma miejsce w przypadku wielu znanych aplikacji tensometrów, lub też brak dodatkowych rezystorów, czy też układów drabinkowych rezystor-termistor stosowanych np. do kompensacji

czujników piezorezystancyjnych ciśnienia typu X-ducer firmy Motorola [9].

## 2. Podstawy teoretyczne układu

Mostek, który zaproponował Warsza różni się od mostka Wheatstone'a innym sposobem zasilania, nietrudnym obecnie w praktycznej realizacji. Dwa jednakowe źródła prądowe  $J$  dołącza się równolegle do przeciwległych ramion mostka ( $R_1, R_3$ ) bez jego rozłączania – (rys. 1a). Układ ma dwa wyjścia napięciowe: A-B i D-C. Zgodnie z zasadą superpozycji może też być zasilany jednym prądem  $J$  przełączanym naprzemiennie – (rys.1b). Wówczas każde z jego napięć wyjściowych jest zapamiętywane i sumowane w dwóch kolejnych cyklach.



Rys. 1. Mostki dwuprądowe wg Warszy [2]: a) mostek 2J do pomiaru temperatury  $\Delta T$  i odkształcenia mechanicznego  $\epsilon_b$ , b) mostek typu 2x1J - z pojedynczym przełączanym źródłem

Fig. 1. Double current bridges proposed by Warsza [2]: a) 2J bridge for temperature  $\Delta T$  and bending strain  $\epsilon_b$  measurements, b) 2x1J bridge – of one switched source

$$U_{AB} = U_{AB1} + U_{AB2} \quad (1)$$

$$U_{DC} = U_{DC1} + U_{DC2} \quad (2)$$

Dodatkową zaletą tego sposobu zasilania układu jest kompensacja napięć termoelektrycznych (całkowita przy równych ich wartościach) i ich niezależnienie od kierunku prądu  $J$ . Napięcia wyjściowe obu mostków ( $U_{DC}$  i  $U_{AB}$ ) wynoszą:

$$U_{DC} = J \frac{R_1 R_2 - R_3 R_4}{\sum R_i} \equiv J t_{DC}(\epsilon_i) \quad (3)$$

$$U_{AB} = J \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{\sum R_i} \equiv J t_{AB}(\epsilon_i) \quad (4)$$

gdzie:  $\sum R_i = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$ ,  $t_{DC}$ ,  $t_{AB}$  – czułości napięciowo - prądowe wyjść układu jako dwóch sprzężonych czwórników, określane przy braku obciążenia dla obu wyjść DC i AB [4].

Warunki równowagi obu wyjść są różne i sprowadzają się do równości iloczynów rezystancji przyległych do zacisków każdego z nich. Formy wzorów (3) i (4) są podobne jak dla klasycznego mostka zasilanego prądowo [10], ale dotyczą innych rezystancji.

Rozpatrzmy mostek o tylko dwu zmieniających się rezystancjach, np.:  $R_1 = R_{10}(1 + \epsilon_1)$ ,  $R_2 = R_{20}(1 + \epsilon_2)$  oraz  $R_3 = R_{30}$ ,  $R_4 = mR_{40}$  (gdzie:  $R_{i0}$  – rezystancje początkowe,  $\epsilon_i$  – względne przyrosty rezystancji). Ponadto przyjmuje się, że moduły przyrostów  $|\epsilon_1|$ ,  $|\epsilon_2|$  są bardzo małe, tj.  $|\epsilon_1 \epsilon_2| \ll |\epsilon_1 + \epsilon_2|$  i  $|\epsilon_1 + m\epsilon_2| \ll 2(1+m)$  (dla przyrostów bezwzględnych zachodzi:  $|\Delta R_1 + \Delta R_2| \ll 2(R_{10} + R_{20})$ ). Oba wyjścia będą równocześnie w równowadze, gdy  $R_{10} = R_{30}$  i  $R_{20} = R_{40}$ , a w szczególnym przypadku - przy jednakowych rezystancjach. Dla pracy mostka jako układu nierównoważonego wzory (3) i (4) upraszczają się wówczas do postaci:

$$U_{DC} = T_0 (\epsilon_1 + \epsilon_2), \quad (5)$$

$$U_{AB} = T_0 (\epsilon_1 - \epsilon_2). \quad (6)$$

gdzie:  $T_0 = J \frac{mR_{10}}{2(1+m)}$  – czułość początkowa dla obu wyjść.

Pierwsze napięcie jest proporcjonalne do sumy, a drugie do różnicy przyrostów. Z (5) i (6) wynika, że oba przyrosty można wyrazić poprzez napięcia wyjściowe jako:

$$\epsilon_1 = \frac{m+1}{m} \frac{U_{DC} + U_{AB}}{JR_{10}}, \quad (7)$$

$$\epsilon_2 = \frac{m+1}{m} \frac{U_{DC} - U_{AB}}{JR_{10}}. \quad (8)$$

Dla obu ramiona mostka, w których są tensometry, można przyjąć, że przyrosty ich rezystancji zawierają po dwa jednakowe przyrosty w postaci:  $\epsilon_1 = \epsilon' + \epsilon''$  oraz  $\epsilon_2 = \epsilon' - \epsilon''$ . Pierwszy z nich jest skutkiem zmian temperatury i ma zawsze ten sam znak dla obu tensometrów (9). Drugi jest skutkiem działania na tensometry siły odkształcającej (10). Jeśli są one naklejone wzdłuż belki pomiarowej jak na rys. 3, to przyrosty rezystancji tensometrów mają różne znaki, gdyż jeden z tensometrów jest rozciągany, a drugi ściskany.

$$\epsilon_1'(\Delta T) = \epsilon_2'(\Delta T) = \epsilon' \quad (9)$$

$$\epsilon_1''(\epsilon_b) = -\epsilon_2''(\epsilon_b) = \epsilon'' \quad (10)$$

Przyrosty rezystancji są liniowe dla obu mierzonych wielkości: temperatury i odkształcenia, tj.  $\epsilon'(\Delta T) = \alpha \Delta T$ ;  $\epsilon''(\epsilon_b) = k \epsilon_b$  (gdzie:  $\alpha_T$  – temperaturowy współczynnik rezystancji,  $\Delta T$  – zmiana temperatury,  $k$  – współczynnik czułości naprężeniowej,  $\epsilon_b$  – odkształcenie w wyniku prostego zginania belki pomiarowej). Po podstawieniu otrzymuje się:

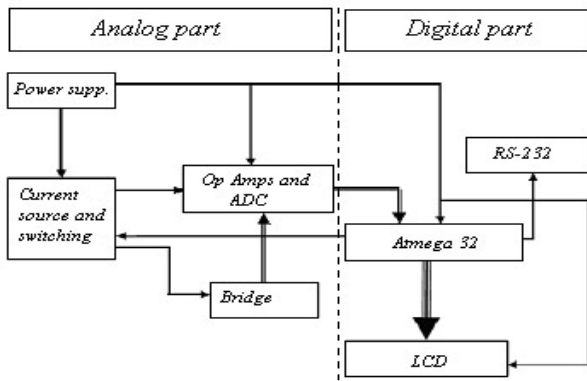
$$\alpha_T \Delta T = \frac{m+1}{m} \frac{U_{DC}}{JR_{10}} \quad (11)$$

$$k \epsilon_b = \frac{m+1}{m} \frac{U_{AB}}{JR_{10}} \quad (12)$$

Każda z mierzonych wielkości jest więc proporcjonalna do jednego z napięć wyjściowych. Obwody posiadające taką zaletę nie były opisywane w literaturze dotyczącej mostków prądu stałego [11,12]. Sygnał wyjścia DC dla temperatury (*ang. thermal output*) zależy od sumy dwóch zjawisk zachodzących w tensometrze i obiekcie badanym wskutek zmian temperatury, tj. zmiany rezystancji siatki tensometru i naprężenia wskutek różnicy rozszerzalności cieplnych bazy tensometru i badanego materiału. W opisywanej tu aplikacji rezystancje w temperaturze 23°C są sobie równe, tj.  $R_{10} = R_{20} = R_{30} = R_{40}$ , a więc  $m=1$  i  $T_0 = 0.25 J R_{10}$ .

## 3. Realizacja modelu przetwornika

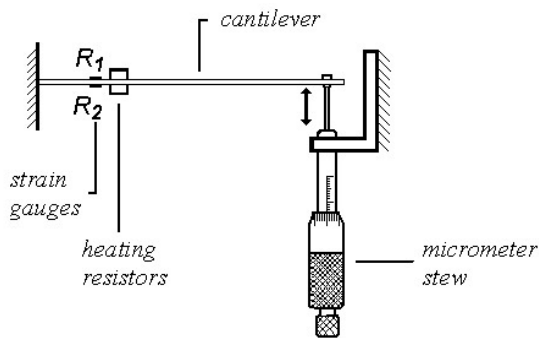
Rozważania teoretyczne sprawdzono eksperymentalnie w Politechnice Białostockiej. Na rys. 2. przedstawiono schemat blokowy zrealizowanego układu przetwornika. Źródło prądowe wykonano z użyciem znanego, powszechnie stosowanego układu LM317, zaś samo przełączanie źródła - za pomocą czterech tranzystorów MOSFET (STP20NE06L), które charakteryzują się niewielką rezystancją klucza  $R_{ON} = 0,06 \Omega$  przy jego załączeniu. Tranzystory pracują parami i w tym samym przedziale czasowym dwa z nich są włączone, a dwa wyłączone. Ich stanami pracy sterują porty mikrokontrolera Atmega 32.



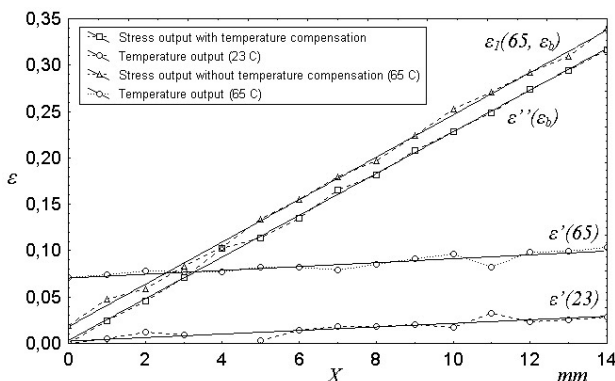
Rys. 2. Schemat blokowy systemu pomiarowego opartego na idei mostka dwuprądowego do jednoczesnego pomiaru odkształcenia (siły gnącej) i temperatury  
Fig. 2. Block diagram of the transducer system of double current bridge for simultaneous measurements of strain and temperature

Napięcia  $U_{AB}$  i  $U_{DC}$  podlegają wzmocnieniu (AD620AN), a sygnały podaje się na 24-bitowy przetwornik A/C typu sigma-delta (AD7718). Wartości cyfrowe napięć są przetwarzane przez mikrokontroler, który dokonuje wszelkich niezbędnych obliczeń.

Przy pomocy opisanego układu (rys. 3) wykonano pomiary odkształceń belki zginanej za pomocą śruby mikrometrycznej (przy różnych wartościach temperatury). Użyto tensometrów foliowych TF-3/120 firmy Tenmex.



Rys. 3. Tensometry przyklejone do belki pomiarowej  
Fig. 3. Strain gauges glued to cantilever beam



Rys. 4. Względne przyrosty rezystancji  $\varepsilon$  w funkcji strzałki ugięcia belki  $X$  (linie proste są funkcjami otrzymanymi metodą najmniejszych kwadratów)  
Fig. 4. Relative resistance increments  $\varepsilon$  in the function of the beam deflection  $X$  (the straight lines are obtained by linear least-squares fit)

Wyniki otrzymane dla temperatur 23°C i 65°C przedstawiono na rys. 4. Podano na nim względne przyrosty rezystancji tensometrów  $\varepsilon$  w funkcji strzałki ugięcia belki  $X$ :  $\varepsilon'(23)$ ,  $\varepsilon'(65)$  – temperaturowy przyrost rezystancji dla temperatur 23°C i 65°C,  $\varepsilon_1(65, \varepsilon_b)$  – przyrost rezystancji spowodowany odkształceniem tensometrów w temperaturze 65°C oraz  $\varepsilon''(\varepsilon_b)$  – przyrost rezystancji od odkształcenia tensometrów po kompensacji wpływu zmian temperatury.

## 4. Analiza błędów

Korzystając z metody najmniejszych kwadratów znaleziono postaci funkcji liniowych opisujących otrzymane charakterystyki.

$$\varepsilon'(23) = 0.0021 X \quad (13)$$

$$\varepsilon'(65) = 0.0022 X + 0.0710 \quad (14)$$

$$\varepsilon_1(65, \varepsilon_b) = 0.0228 X + 0.0196 \quad (15)$$

$$\varepsilon''(\varepsilon_b) = 0.0226 X \quad (16)$$

Maksymalny błąd aproksymacji wynosi 1.15%.

Sprawdzono również powtarzalność pomiarów, a wyniki wartości średnich przyrostów rezystancji i odchylenia standardowe podaje tabela 1.

Tab. 1. Powtarzalność pomiarów  
Tab. 1. Repeatability of measurements

	$T=23^\circ\text{C}$ , $X=0$ mm		$T=23^\circ\text{C}$ , $X=10$ mm	
	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$
średnia	0.0195	0.0042	0.0196	0.0085
odch. std.	0.24%	0.57%	0.50%	0.48%

Zależności (17) i (18) przedstawiają obie mierzone wielkości w funkcji napięć  $U_{AB}$  i  $U_{DC}$ , prądu źródła  $J$  i parametrów tensometrów, tj. rezystancji nominalnej  $R_{10}$ , temperaturowego współczynnika  $\alpha_T$  rezystancji materiału tensometru, nominalnego współczynnika czułości tensometrów na naprężenie  $k_0 = k/(1 + \alpha_K \Delta T)$  oraz jej temperaturowego współczynnika  $\alpha_K$ .

$$\Delta T = \frac{(1+m)U_{DC}}{m J R_{10} \alpha_T} \quad (17)$$

$$\varepsilon_b = \frac{(1+m)U_{AB} \alpha_T}{m J R_{10} k_0 \alpha_T + (1+m)U_{DC} \alpha_K} \quad (18)$$

Błędy graniczne pomiaru odkształcenia i temperatury oszacowano metodą różniczeki zupełnej i przedstawiono w postaci równań (19) i (20). Zawierają one:

- tolerancję rezystancji nominalnej  $\delta_{R10}$ ,
- tolerancję  $\delta_{k_0}$  nominalnej czułości tensometru,
- błąd względny temperaturowego jej współczynnika  $\delta_{\alpha_K}$  (błąd bezwzględny odniesiony do wartości nominalnej),
- tolerancję prądu źródła  $\delta_J$ ,
- błędy względne pomiaru napięć  $\delta_{U_{AB}}$  i  $\delta_{U_{DC}}$  (błędy bezwzględne odniesione do wartości bieżących tych napięć),

$$|\Delta \varepsilon_b| = \frac{(1+m) \alpha_T U_{AB}}{d} \left[ \frac{|\delta_{U_{AB}}| + \frac{(1+m) \alpha_K U_{DC} (|\delta_{U_{DC}}| + |\delta_{\alpha_K}|)}{d}}{m J R_{10} k_0 \alpha_T (|\delta_{k_0}| + |\delta_J| + |\delta_{R10}|)} + \frac{|\delta_{U_{DC}}|}{d} \right] \quad (19)$$

$$|\Delta \Delta T| = \frac{1+m}{m J R_{10} \alpha_T} (|\delta_{U_{DC}}| U_{DC} + |\delta_J| + |\delta_{R10}|) \quad (20)$$

gdzie:  $d = m J R_{10} k_0 \alpha_T + (1+m) U_{DC} \alpha_K$ .

Z wzoru (20) wynika, że graniczny błąd pomiaru wartości zmiany temperatury zależy od dokładności przetwarzania napięcia  $U_{DC}$ , prądu zasilającego  $J$  i nominalnej rezystancji  $R_{10}$ . Natomiast błąd graniczny pomiaru wartości odkształcenia gnącego zależy od dokładności obu napięć, prądu  $J$ , rezystancji nominalnej  $R_{10}$  i dodatkowo od parametrów, które określają dokładność nominalnego współczynnika czułości  $k_0$  i jego termicznej zależności  $\alpha_K$ .



Przy pomiarach przemysłowych może zachodzić konieczność wymiany tensometrów. W takiej sytuacji powinny one mieć te same parametry znamionowe, a jeśli są one inne, to należy je uwzględnić w nastawach cyfrowych aparatury.

W opisie dokładności pomiaru należy posłużyć się analizą błędów przeprowadzoną dla równań pomiarów (3) i (4). Aby przedstawić wpływ zmiany parametrów na wartości odczytów określono graniczne błędy obu czułości mostka wg [3, 6].

$$|\Delta t_{DC}| = \frac{R_{10}}{2(1+\varepsilon'')} [\sum |\delta_{i0}| + \left[ (\varepsilon')^2 + \varepsilon' - (\varepsilon'')^2 \right] (|\delta_{10}| + |\delta_{20}| + |\delta_{\varepsilon 1}| + |\delta_{\varepsilon 2}|) + \varepsilon' (|\delta_{10}| + |\delta_{20}|) + \varepsilon'' (|\delta_{\varepsilon 1}| - |\delta_{\varepsilon 2}|)] \quad (21)$$

$$|\Delta t_{AB}| = \frac{R_{10}}{2(1+\varepsilon'')} [\sum |\delta_{i0}| + \varepsilon' (\sum |\delta_{i0}| + |\delta_{\varepsilon 1}| + |\delta_{\varepsilon 2}|) + \varepsilon'' (|\delta_{AB0}| + |\delta_{\varepsilon 1}| - |\delta_{\varepsilon 2}|)] \quad (22)$$

gdzie:  $\delta_{i0}$  – błąd maksymalny rezystancji nominalnych  $R_{i0}$  ( $i=1,2,3,4$ );  $\delta_{\varepsilon 1}$ ,  $\delta_{\varepsilon 2}$  – błąd maksymalny przyrostów rezystancji  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ;  $\delta_{AB0} = \delta_{10} + \delta_{40} - \delta_{20} - \delta_{30}$  – błąd zera wyjścia AB mostka.

Błędy pomiarowe są funkcjami przyrostów rezystancji tensometrów  $\varepsilon'$  i  $\varepsilon''$ . Składnik  $\delta_{AB0}$  w (22) można eliminować przez automatyczne zerowanie mostka przed każdym pomiarem.

## 5. Wnioski i podsumowanie

Wykonanie eksperymentalnego modelu mostka pomiarowego potwierdziło, że pomysł zasilania dwuprądowego układów czterozaciskowych (4T) może być interesującym i wartościowym uzupełnieniem dobrze znanych technik kondycjonowania sygnałów analogowych. W tej aplikacji mostek dwuprądowy może stanowić alternatywę dla znanych układów ze względu na:

- dwa oddzielne sygnały wyjściowe: odkształcenia i temperatury,
- pomiar temperatury czujnika z wykorzystaniem właściwości termicznych samych tylko tensometrów [4, 5],
- możliwość cyfrowej kompensacji wpływu zmian temperatury na wynik pomiaru odkształcenia bez konieczności użycia dodatkowych czujników (RTD, termistor, drabinka termistor-rezystor [8, 9]),
- obiecującą, uzyskaną wstępnie powtarzalność pomiarów (0.5%), zależną od jakości elementów całego układu.

Ten sposób pomiaru 2D można zastosować też z tensometrami półprzewodnikowymi - elementami o większej czułości na odkształcenia i większej wrażliwości na zmiany temperatury. Przykładem są tu piezorezystywne czujniki ciśnienia X-ducer firmy Motorola, które są zbudowane z krzemowych piezorezystorów, uzyskiwanych drogą implantacji jonowej i osadzanych na krawędzi cienkiej membrany [9]. Ponieważ piezorezystor jest jej integralną częścią to nie występują żadne dodatkowe wpływy temperatury wskutek różniących się współczynników rozszerzalności termicznej membrany i piezorezystora.

Parametry odkształcanego elementu zależą jednak od temperatury pracy, dlatego realizowana jest układowa (*ang. on-chip*), wewnętrzna kompensacja. W tym celu w większości czujników, np. *MPXM2053*, stosuje się drabinki rezystancji dla temperatur od 0 do 85°C. Dla szerszego zakresu (-40 - 125°C), np. w czujniku *MPX4100A*, używa się bardziej rozbudowanych układów. W takim układzie scalonym oprócz wzmacniaczy umieszcza się też obwody kompensujące wpływy zmian temperatury i dostarczające napięcia odniesienia służącego do kompensacji oczekiwanej zależności temperaturowej sygnału czujnika. Dodatni współczynnik temperaturowy sygnału czujnika kompensuje się ujemnym współczynnikiem temperaturowym termistora. We wspomnianej serii czujników ciśnienia kompensację wpływu zmian temperatury realizuje się za pomocą

termistorów i rezystorów nacinanych laserowo, co oczywiście wpływa na wyższy koszt wytworzenia sensorów. Z tego względu sposób opisany przez autorów wydaje się być ciekawą alternatywą.

Wyróżnia się dwie składowe błędy temperaturowego. Pierwszą jest błąd zera, wynikający ze zmiany sygnału wyjściowego wraz z temperaturą przy zerowym ciśnieniu wejściowym. Drugą jest błąd nieczułości, którego źródłem jest zmienność rezystancji mostka wraz z temperaturą oraz zależność stałej czułości piezorezystorów od temperatury [10,11]. Kompensacja obu tych błędów sprowadza się do wyzerowania napięcia niezrównoważenia mostka, przy zerowym ciśnieniu, w określonej temperaturze odniesienia (np. 25°C), przez odpowiedni dobór rezystancji w każdej gałęzi mostka. Najczęściej stosuje się rezystancje szeregowe i równoległe. Sposób ich doboru polega na ustawieniu zera mostka w dwóch temperaturach. Wtedy przy założeniu liniowości układu i liniowej zależności błędu zera od temperatury kompensacja będzie zapewniona też dla innych temperatur. W skompensowanych czujnikach serii MPX stosuje się sieć cienkowarstwowych rezystorów nacinanych laserem. Ich zaletami są także: precyzyjna kalibracja offsetu czujnika i dobra liniowość napięcia wyjściowego (1% zakresu).

Innym zastosowaniem układów 2J może być pomiar dwóch składowych naprężeń przy badaniach wytrzymałościowych materiałów i konstrukcji oraz do badań pasków bimetalowych. System taki mógłby służyć do analizy naprężeń i temperatury próbek metali bez konieczności użycia dużego termostatu. Można by zrealizować bezpośrednie ogrzewanie testowanego elementu tylko w pobliżu punktu pomiaru lub nawet, gdy jest to możliwe, przepuszczając odpowiednio duży prąd przez badany element metalowy lub jego fragment.

Autorzy pragną podziękować Pawłowi Świątochowskiemu i Pawłowi Wincenciakowi, studentom Wydziału Elektrycznego Politechniki Białostockiej, którzy uczestniczyli w wykonywaniu tej pracy w ramach projektu S/WE/3/03.

## 6. Literatura

- [1] Warsza Z. L.: *Immitancyjne układy czterobiegunowe (4T) w pomiarach wieloparametrowych*. Monografia PIAP, Warszawa 2004.
- [2] Warsza Z. L.: *Bridges Supplied by Two Current Sources—New Tool for Impedance Measurements and Signal Conditioning*. Proc. of IMEKO -TC 7 Symposium, Kraków 2002, str. 231-236.
- [3] Warsza Z.L.: *Pomiary impedancji układami mostkowymi o zasilaniu dwuprądowym*. Pomiary Automatyka Robotyka, 5/2001, str. 17-21.
- [4] Warsza Z. L.: *Two Parameter (2D) Measurements in Four Terminal (4T) Impedance Bridges as the New Tool for Signal Conditioning part 1 and 2*. Proc. of the 14th International Symposium on New Technologies in Measurement and Instrumentation and 10th Workshop of IMEKO TC-4, Gdynia/Jurata 2005, str. 31-42.
- [5] Warsza Z. L.: *Two Parameter (2D) Measurements in Double – current Supply Four-terminal Resistance Circuits*. Metrology and Measurement Systems vol. XIII, 1/2006, str. 49-65.
- [6] Warsza Z. L.: *Miary dokładności rezystancyjnych mostków dwuprądowych*. Prace Komisji Metrologii Oddz. PAN w Katowicach, seria Konferencje nr 8, Mat. Konf. PPM'05, Ustroń 2005, str. 69-76.
- [7] Warsza Z. L.: *Backgrounds of two variable (2D) measurements of resistance increments by bridge cascade circuit*. Proc. of SPIE (vol. 6347, ed. by Romaniuk R. S., Wilga Symposium, Poland 2006.
- [8] O'Grady A.: *ADC enables temperature-compensate weight-scale measurements*. EDN Magazine, 2001, str. 126-127.
- [9] Swartz C., Derrington C., Gragg J.: *Temperature Compensation Methods For the Motorola X-ducer Pressure Sensor Element*. Motorola Semiconductor application note.
- [10] Sydenham P.H., Thorn R. (eds): *Handbook of Measuring System Design*. John Wiley & Sons, Chapter 126: Electrical Bridge Circuits – Basic Information by Z. L. Warsza, New York 2005, str. 867–877.
- [11] Dyer S.A. (ed.): *Survey of Instrumentation and Measurement*. Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, Section: Bridge Instruments by J. Nicolas, New York 2001, str. 309–326.