

## OCENA WSPÓŁPRACY TENSOMETRYCZNYCH PRZETWORNIKÓW SIŁY STOSOWANYCH W SYSTEMACH WAŻENIA

Piotr BASZUN, Henryk KRÓL

Wojskowa Akademia Techniczna Wydział Elektroniki Instytut Systemów Elektronicznych ul. Kaliskiego 2,  
00-908 Warszawa; fax: 022-683-91-25; e-mail: [pbaszun@wat.edu.pl](mailto:pbaszun@wat.edu.pl), [hkrol@wat.edu.pl](mailto:hkrol@wat.edu.pl)

### Streszczenie

W artykule przedstawiono niektóre zagadnienia związane z wyborem oraz analizą połączeń tensometrycznych przetworników siły wykorzystywanych w systemach pomiaru masy. Analiza dotyczy impedancyjnego równania macierzowego przetwornika (czwórnik), macierzy hybrydowych odwróconych oraz nieokreślonych admitancyjnych macierzy układów wielokońcówkowych. Podano przykładowe wyniki badań laboratoryjnych współpracy dwóch pełnomostkowych przetworników siły.

Słowa kluczowe: tensometryczny przetwornik siły, macierz admitancyjna, czwórnik.

### EVALUATION OF COOPERATION MULTIPLE STRAIN GANGE FORCE SENSORS IN LOAD MEASUREMENT SYSTEMS

#### Summary

There are presented some topics connected with choosing and analysis of different connections of the strain gauge force matrix. Those sensors are used in mass measurement systems. The analysis was concerned with matrix equation of the sensor (four-terminal network) reverse hybrid matrix and undetermined admittance matrix of multi-terminal networks. As an example results of laboratory experiments two full-bridge force sensors are presented.

Keywords: strain gauge sensor, admittance matrix, four-terminal network.

## 1. WSTĘP

Tensometryczne przetworniki siły są szeroko stosowane w nowoczesnych elektromechanicznych systemach ważenia, np. taśmociągowych lub pomostowych wagach samochodowych oraz kolejowych.

Powszechnie stosowane niezrównoważone mostki tensometryczne zasilane prądem stałym, umożliwiające proste i szybkie zerowanie układu oraz uzyskanie małego błędu nieliniowości mogą współpracować z udoskonalonymi wysoko-stabilnymi wzmacniaczami prądu stałego opartymi o technologię układów scalonych (bardzo dobra liniowość i stałość wzmocnienia). Dzięki właśnie temu jesteśmy świadkami szybkiego rozwoju konstrukcji tensometrycznej aparatury pomiarowej zasilanej prądem stałym (np. firmy SCHENK) wykorzystującej układy z tzw. pełną kompensacją mostków tensometrycznych.

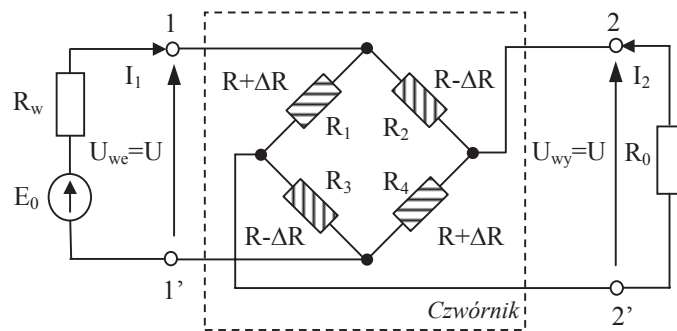
Rodzaje konstrukcji oraz podstawowe parametry metrologiczne i właściwości tensometrycznych przetworników siły podane są np. w [3, 4, 7 ÷ 9].

Jednym z podstawowych zadań przy pomiarze masy z wykorzystaniem tensometrycznych przetworników pomiarowych siły jest dobór

i stabilizacja układów zasilających oraz wybór rodzajów połączeń współpracujących ze sobą wyżej wymienionych przetworników. Artykuł dotyczy tylko niektórych z tym związanych zagadnień. Istotną jego część stanowi analiza możliwości współpracy pełnomostkowych przetworników tensometrycznych siły pod kątem wykorzystania ich w systemach pomiaru masy.

## 2. ANALIZA MACIERZOWA PEŁNOMOSTKOWEGO TENSOMETRYCZNEGO PRZETWORNIKA SIŁY

Tensometryczny przetwornik siły może być przedstawiony w postaci pasywnego czwórnik – mostka prądu stałego (rys. 1), do zacisków wejściowych którego podłączone jest źródło zasilania w postaci siły elektromotorycznej  $E$  o rezystancji wewnętrznej  $R_w$ , a do zacisków wyjściowych obciążenie, którym jest rezystancja wyjściowa  $R_0$  przyrządu pomiarowego (wskaźnika równowagi).



Rys. 1. Mostek tensometryczny jako czwórnik pasywny

Analizując równanie macierzowe impedancyjne czwórnik oraz przyjmując oznaczenie na względną zmianę rezystancji tensometru

$$\rho = \frac{\Delta R}{R} \quad (2.1)$$

po wprowadzeniu zależności

$$k = \frac{R_0}{R} \quad (2.2)$$

wyrażenie na transmitancję napięciową mostka (względna wartość napięcia wyjściowego) przyjmuje postać:

$$K_U = \frac{U_2}{U_1} = \frac{k\rho}{k+1-\rho^2} \quad (2.3)$$

Równanie (2.3) jest podstawą do analizy problemu nieliniowości charakterystyki statycznej przetwornika  $\frac{U_2}{U_1}(\rho)$  przy  $k = \text{const}$  i  $U_1 = \text{const}$ .

W praktyce podstawowe znaczenie ma dla nas charakterystyka dla przypadku gdy  $\rho \in (0 \div 0,005)$ . Jest to typowy zakres roboczy tensometrycznego przetwornika siły. Dla analizowanego układu mostkowego parametr  $\rho$  można także wyrazić w funkcji wydłużenia jednostkowego  $\varepsilon$  powstającego w elemencie sprężystym przetwornika, gdyż:

$$\frac{\Delta R}{R} = \rho = k_t \varepsilon \quad (2.4)$$

gdzie:

$k_t$  – stała czułości odkształceniowej tensometru (dla tensometrów metalowych  $k_t \approx 2$ ),

$\varepsilon$  – wydłużenie jednostkowe ( $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ ),

$l$  – długość tensometru,

$\Delta l$  – przyrost długości tensometru.

W przypadku pomiaru większych odkształceń względnych np.  $\varepsilon > 1 \text{‰}$  lub istnienia wymagań szczególnej dokładności przetwarzania liniowego należy zawsze uwzględnić występującą nieliniowość mostka.

Błąd względny nieliniowości  $\delta_n^{\%}$  wyrażony w procentach dla danego rozstrojenia rezystancji ramion  $\rho$  można wyrazić zależnością

$$\delta_n^{\%} = \frac{K_U - K'_U}{K'_U} 100\% \quad (2.5)$$

gdzie:

$K_U$  – rzeczywista transmitancja napięciowa (2.3),

$K'_U$  – transmitancja napięciowa dla bardzo małych przyrostów rezystancji tensometrów ( $K'_U = \frac{\Delta R}{R}$ ).

Korzystając z zależności (2.3) można określić także czułość przetwornika, jako:

$$S_U = \frac{d\left(\frac{U_2}{U_1}\right)}{d\rho} \quad \text{przy } k = \text{const} \quad (2.6)$$

Wynosi ona:

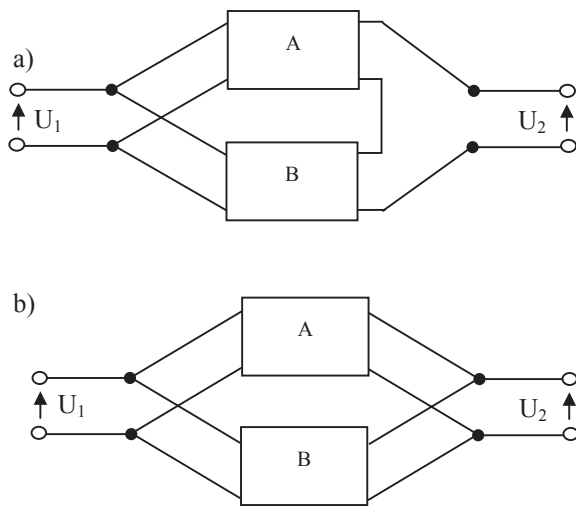
$$S_U = k \frac{k+1+\rho^2}{(k+1-\rho^2)^2} \quad (2.7)$$

Na przykład dla  $k = 0$ ,  $S_U = 0$ , a przy  $k = \infty$ ,  $S_U = 1$ .

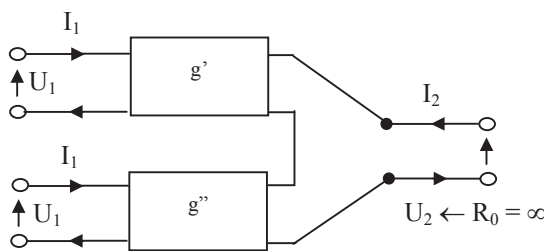
### 3. RODZAJE POŁĄCZEŃ UKŁADÓW POMIAROWYCH TENSOMETRYCZNYCH PRZETWORNIKÓW SIŁY

W zależności od sposobu połączenia między sobą przetworników wchodzących w skład jednego układu (systemu pomiarowego) rozróżnia się następujące rodzaje współpracy:

- połączenie przetworników równoległo-szeregowe (rys. 2a),
- połączenie przetworników równoległo-równoległe (rys. 2b),
- układ połączeń dwóch przetworników o niezależnym zasilaniu (rys. 3).



Rys. 2. Schematy połączeń dwóch współpracujących przetworników



Rys. 3. Układ połączeń dwóch przetworników o niezależnym zasilaniu

Przy połączeniu równoległo-równoległym napięcie wyjściowe zgodnie z metodą napięć międzywęzłowych ulega n-krotnemu zmniejszeniu (n – liczba przetworników) przy rezystancji obciążenia układu  $R_0 = \infty$ .

W przypadku połączenia równoległo-szeregowego przetworników, ich napięcia wyjściowe nie sumują się. Okazuje się, że na skutek niespełnienia warunku regularności [2] nie można stosować metod analizy macierzowej czwórników.

W konkretnym przypadku nie można sumować macierzy hybrydowej odwróconej obu mostków (rozpatrywanych w postaci czwórnikowej). W tym przypadku można stosować analizę układów wielokońcówkowych w oparciu o nieokreśloną macierz admitancyjną [2, 5, 6]. Warunek regularności spełniony będzie w przypadku niezależnego zasilania układów połączeń mostków (rys. 3).

### 3.1. ANALIZA UKŁADU POŁĄCZEŃ DWÓCH PRZETWORNIKÓW TENSOMETRYCZNYCH O NIEZALEŻNYM ZASILANIU NAPIĘCIOWYM

Po wyznaczeniu parametrów hybrydowych odwróconych czwórnika zastępczego

$$[g] = [g'] + [g''] \quad (3.1)$$

i uwzględnieniu zależności (2.2) ostateczne wyrażenie na transmitancję układu przyjmuje postać

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{1 + \frac{1}{k}(2 - \rho_1^2 - \rho_2^2)} \quad (3.2)$$

### 3.2. ANALIZA POŁĄCZEŃ UKŁADU RÓWNOLEGŁO-SZEREgowego Z WYKORZYSTANIEM MACIERZY ADMITANCYJNYCH NIEOKREŚLONYCH

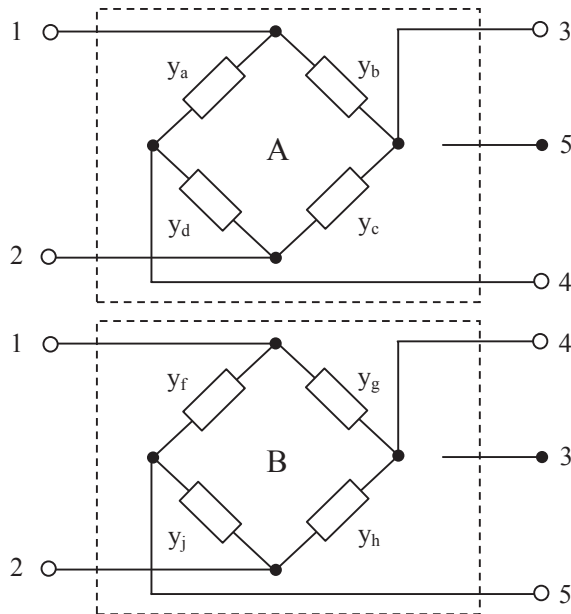
#### 3.2.1. Układ dwóch przetworników

Chcąc dokonać analizy wielobiegunnika powstałego przez połączenie przetworników A oraz B (rys. 4) z wykorzystaniem nieokreślonych macierzy admitancyjnych należy w pierwszym etapie dostosować rząd każdego z przetworników (4-ro biegunników) składowych tak, aby był on zgodny z rzędem wynikowego wielobiegunnika, powstałego z ich wzajemnego połączenia. Technicznie operacja ta jest przedstawiona na rys. 4, gdzie do każdego z czterech biegunników nastąpiło dołączenie dodatkowego „ślepego” zacisku (dla przetwornika A jest to zacisk 5 o prądzie  $I_5 = 0$ , dla przetwornika B jest to zacisk 3 o prądzie  $I_3 = 0$ ) tzn. zacisku galwanicznie izolowanego.

Na rys. 4 admitancje  $y_a \div y_j$  wynoszą:

$$\left. \begin{aligned} y_a = y_c &= \frac{1}{R + \Delta R_1} = \frac{Y}{1 + \rho_1}, \\ y_b = y_d &= \frac{Y}{1 - \rho_1}, \\ y_f = y_h &= \frac{Y}{1 + \rho_2}, \\ y_g = y_j &= \frac{Y}{1 - \rho_2} \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

gdzie  $Y = \frac{1}{R}$



Rys. 4. Mostki A i B po rozszerzeniu rzędu biegunów

Zasady badań wielobiegunników podane w [2] wykorzystano w [1] do analizy macierzy admitancyjnej nieokreślonej wielobiegunnika zastępczego. Efektem końcowym tego opracowania było uzyskanie zależności na transmitancję

$$\frac{U_{wy}}{U_{we}} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2 + \frac{1}{k}(2 - \rho_1^2 - \rho_2^2)} \quad (3.4)$$

Porównując wzory (3.4) i (3.2) przy  $R_0 = \infty$  i  $U_{we} = \text{const.}$  dla  $\rho_1 \neq 0$  i  $\rho_2 \neq 0$  potwierdzamy fakt dwukrotnego zmniejszenia napięcia wyjściowego przy jednym wspólnym źródle zasilania.

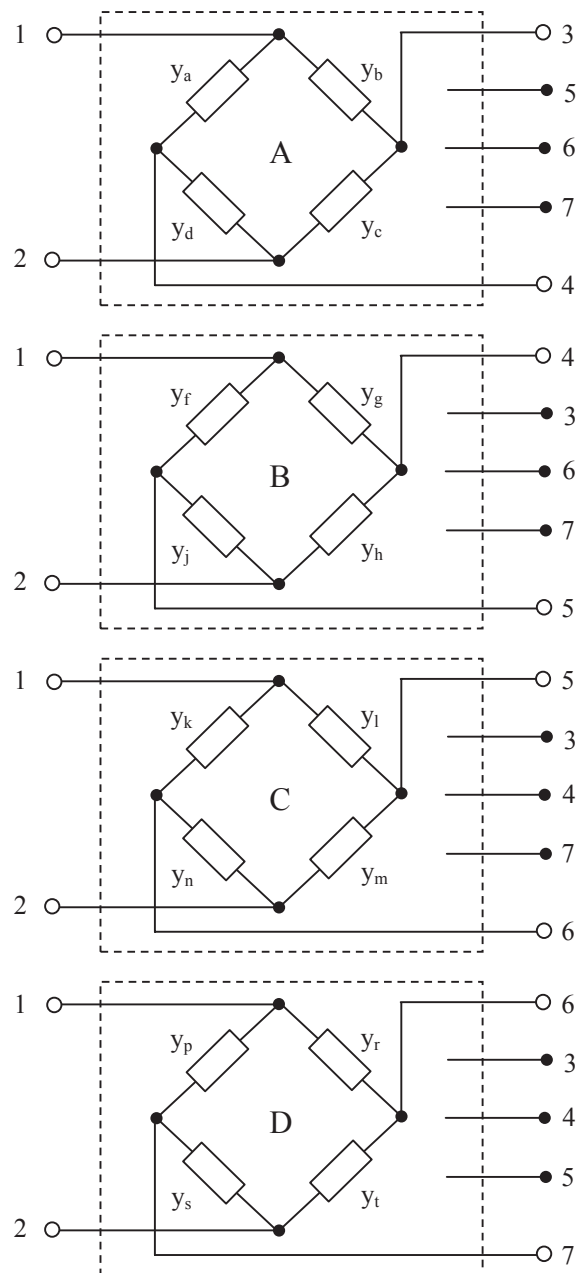
### 3.2.2. Układ czterech przetworników

Do analizy przyjęto cztery tensometryczne przetworniki siły pokazane na rysunku 5.

Przeprowadzono analizę macierzy admitancyjnej nieokreślonej wielobiegunnika zastępczego według zasad podanych w [2]. W jej wyniku uzyskano zależność na transmitancję napięciową w postaci

$$\frac{U_{wy}}{U_{we}} = \frac{\rho_1 + \rho_4}{2 + \frac{1}{k}(2 - \rho_1^2 - \rho_4^2)} \quad (3.5)$$

Wzory (3.4) i (3.5) są do siebie bardzo zbliżone, różnią się tylko odmiennymi indeksami przy drugiej uwzględnianej we wzorach wartości względnej zmiany rezystancji  $\rho$ .



Rys. 5. Mostki tensometryczne A, B, C, D

### 3.2.3. Układ trzech przetworników

Przy doborze 3 współpracujących czwórników uwzględniamy trzy pierwsze mostki z rys. 5. pamiętając, że w analizie nie bierzemy pod uwagę 7-ego „ślepego” zacisku. Postępując jak w p. 3.2.2. określono transmitancję napięciową wielobiegunnika zastępczego w postaci:

$$\frac{U_{wy}}{U_{we}} = \frac{\rho_1 + \rho_3}{2 + \frac{1}{k}(2 - \rho_1^2 - \rho_3^2)} \quad (3.6)$$

Przeprowadzona analiza dla trzech oraz czterech mostków tensometrycznych połączonych w układzie równoległo-szeregowym w oparciu o macierze admitancyjne nieokreślone (w analogiczny sposób jak dla dwóch mostków tensometrycznych) pozwala uogólnić równanie (3.4) dla  $n$  przetworników

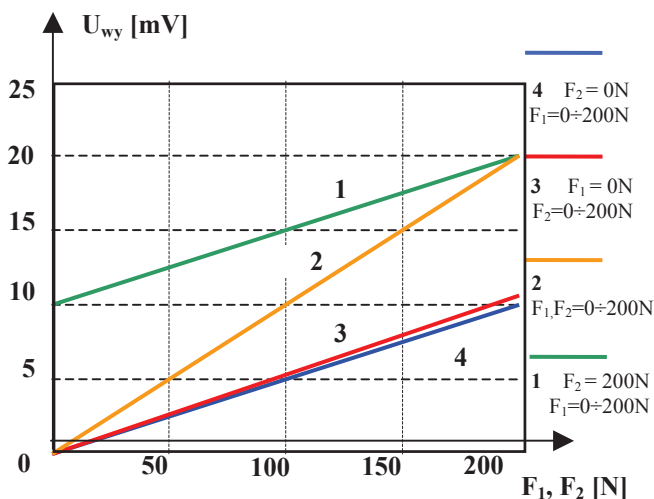
$$\frac{U_{wy}}{U_{we}} = \frac{\rho_1 + \rho_n}{2 + \frac{1}{k}(2 - \rho_1^2 - \rho_n^2)} \quad (3.7)$$

#### 4. BADANIA LABORATORYJNE WSPÓŁPRACY MOSTKÓW TENSOMERTRYCZNYCH

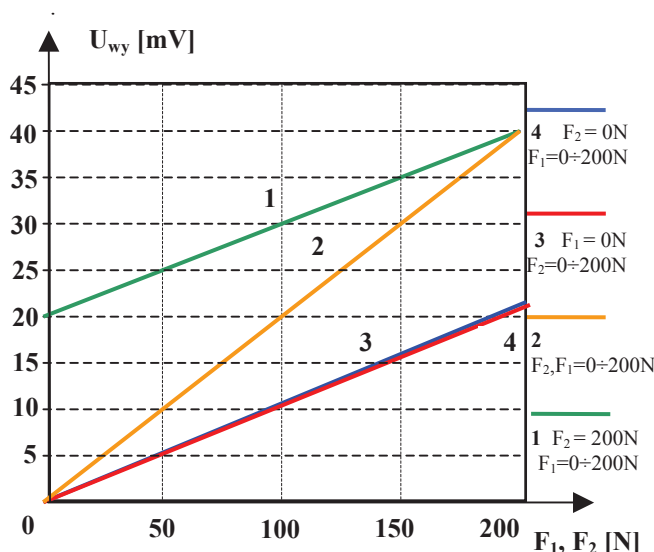
Dokonano badań laboratoryjnych współpracy dwóch pełnomostkowych przetworników tensometrycznych siły typu Z6A o zakresie nominalnym 200N, klasie 0,04% firmy Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, zasilanych napięciem  $U_z = 10V$ , o czułości napięciowej 2 mV/V.

Wykorzystano program napisany w języku programowania obiektowego Delphi służący do przystępnej wizualizacji wyników uzyskanych w trakcie współpracy przetworników pomiarowych, a otrzymanych w oparciu o zastosowanie wyprowadzonych wzorów (3.2) oraz (3.4).

Przykładowe wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 6. i 7.



Rys. 6. Charakterystyki  $U_{wy}(F_1; F_2)$  układu dwóch tensometrycznych przetworników siły przy zasilaniu napięciowym równoległym (jedno źródło) i wyjściu napięciowym szeregowym



Rys. 7. Charakterystyki  $U_{wy}(F_1; F_2)$  układu dwóch tensometrycznych przetworników siły przy niezależnym zasilaniu napięciowym (dwa niezależne źródła) i wyjściu napięciowym szeregowym

#### 5. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych rozważań teoretycznych oraz potwierdzających je badań laboratoryjnych można stwierdzić, że:

1. Analiza macierzowa pełnomostkowego przetwornika siły pozwoliła na określenie jego podstawowych parametrów (czułość, nieliniowość itp.) oraz ustalenie zakresu ich zmienności gwarantujących przykładową liniowość układu przy  $\rho \in (0 \div 0,005)$ .
2. W przypadku niezależnego zasilania układu dwóch współpracujących mostków i wyjściu szeregowym, warunek regularności połączenia [2] jest zachowany. Można stosować tu metodę analizy macierzowej czwórników i sumować macierze hybrydowe odwrócone obu ( $n$ ) przetworników (rozpatrywanych w postaci czwórnikowej). Potwierdzają to wyniki pomiarów przedstawione na rys. 7.
3. Przy współpracy dwóch (lub  $n$ ) mostków zasilanych ze wspólnego źródła napięciowego nie można stosować metod analizy czwórnikowej ze względu na niespełnienie warunku regularności. Zalecana jest wtedy analiza w postaci nieokreślonych admitancyjnych macierzy układów wielościankowych.
4. Równoległe zasilanie  $n$  przetworników tensometrycznych powoduje  $n$ -krotne zmniejszenie sygnału na zrównoległym wyjściu układu przy  $R_0 = \infty$ , w stosunku do sygnału jednego przetwornika (metoda napięć międzywęzłowych).

5. W przypadku połączeń równoległo-szeregowym dwóch przetworników, stwierdzamy fakt zmniejszenia dwukrotnego napięcia wyjściowego w stosunku do przypadku niezależnego zasilania obu przetworników – wzór (3.4) i rys. 6. (przy  $R_0 = \infty$  i  $U_{we} = \text{const}$ ,  $\rho_1 \neq 0$  i  $\rho_2 \neq 0$ ).
6. Niezależnie od liczby współpracujących ze sobą, zasilanych ze wspólnego źródła napięciowego w układzie równoległo-szeregowym pełnomostkowych tensometrycznych przetworników siły wyjściowy sygnał z tego układu, będzie zależał jedynie od zmian  $\rho$  dwóch przyległych, skrajnie od siebie oddalonych, mostków. Uzasadnia to przeprowadzona powyżej (pkt. 3.2.) analiza teoretyczna, która na podstawie wyprowadzonych tam zależności analitycznych dla układu dwóch, trzech i czterech mostków oraz niektórych weryfikujących je badań laboratoryjnych (pkt. 4.) pozwala przeprowadzone rozważania uogólnić na układ współpracujących ze sobą n przetworników (3.7). Z tego powodu układy składające się z trzech i większej równoległo-szeregowo połączonych pełnomostkowych przetworników zasilanych ze wspólnego źródła napięciowego, z praktycznego punktu widzenia nie kwalifikują się do pomiaru masy.

## LITERATURA

- [1] Baszun P., Senatorski M.: *The analysis of the metrological features of the measuring bridge systems of tensometr transducers*. 4th International Congress and Exhibition, Delhi, Nov. 21 ÷ 23, 1990.
- [2] Mitra S. K.: *Analysis and synthesis of linear active networks*. 1969 by Wiley & Sons, Inc., New York.
- [3] Chwaleba A., Czajewski J.: *Przetworniki pomiarowe i defektoskopowe*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1998.
- [4] Szumielewicz B. i in.: *Pomiary elektroniczne w technice*. WNT, Warszawa 1982.
- [5] Osowski J., Szabatin J.: *Podstawy teorii obwodów. T. III*. WNT, Warszawa 2006.
- [6] Osowski S., Siwek K., Śmiałek M.: *Teoria obwodów*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006.
- [7] Firma CompArt Automation. *Przetworniki siły do wag elektronicznych pracujące na zasadzie mostka tensometrycznego. Dostępne w wielu wykonaniach przeznaczone do różnego rodzaju wag (szalkowe, platformowe, wiszące, samochodowe itd.)*.
- [8] Warsza L. Z.: *Immitancyjne układy czterobiegunowe w pomiarach wieloparametrowych*. PIAiP, Warszawa 2004.
- [9] Zakrzewski J.: *Czujniki i przetworniki pomiarowe*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2004.



Dr inż. **Piotr BASZUN** jest wieloletnim nauczycielem akademickim Instytutu Systemów Elektronicznych WAT. Bierze aktywny udział w pracach badawczych Zakładu. Jest autorem lub współautorem kilkudziesięciu artykułów i referatów w czasopiśmie oraz na konferencjach krajowych i zagranicznych.



Dr inż. **Henryk KRÓL** jest absolwentem Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej oraz Akademii Obrony Narodowej. Jego zainteresowania zawodowe koncentrują się wokół metod oceny systemów, a obecnie w szczególności systemów informacyjno-pomiarowych.