

Henryk URZĘDNICZOK

Instytut Metrologii i Automatyki Elektrotechnicznej

Politechnika Śląska

## UKŁADY PRZETWORNIKÓW POMIAROWYCH DWUPARAMETROWYCH

**Streszczenie.** Wrażliwość czujników pomiarowych wielkości nieelektrycznych na wielkości wpływające (poza podstawową wielkością mierzoną) tradycyjnie uważana jest za ich wadę. W artykule zaproponowano wykorzystanie tej wrażliwości do jednoczesnego pomiaru wielkości podstawowej i wielkości wpływających oraz przedstawiono ogólną strukturę tak rozumianego przetwornika wieloparametrowego. Omówiono również dwa rodzaje układów wstępnego przetwarzania parametrów czujników na pojedynczy sygnał wyjściowy, niosący informację pomiarową o dwóch wielkościach mierzonych.

## PRIMARY ELECTRIC CIRCUIT FOR TWO-DIMENSIONAL MEASURING TRANSDUCERS

**Summary.** Most sensors of non-electric quantities are sensitive to influence quantities and this is treated as a disadvantage. In this paper the use of the sensor sensitivity to the additional quantity for simultaneous measurement of the main as well as influence quantities is proposed. In such a way two quantities, the main one and the influence one, compose the measurand. The structure of two-parameter measuring transducer is presented and two kinds of a primary electric circuit are described. The main important advantage of these circuits is that they need only one signal to transfer the measuring information about two measured quantities.

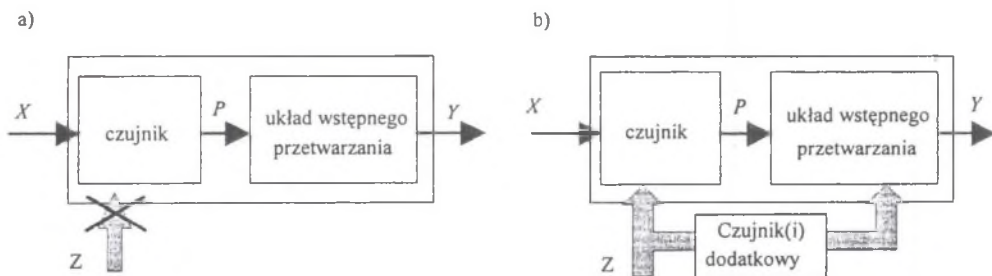
### 1. PRZETWORNIKI JEDNO- CZY DWUPARAMETROWE

Postęp w dziedzinie technologii czujników pomiarowych umożliwia obecnie konstruowanie czujników wrażliwych na bardzo wiele wielkości fizycznych, znaczną

miniaturyzację, niskie koszty. Przetworniki takie wykazują jednak często niekorzystną właściwość – silną wrażliwość na szereg wielkości wpływających (np. temperatura, wilgotność). Wysiłek konstruktorów jest w tej sytuacji skupiony na eliminacji niepożądanego wpływu wielkości wpływowych. Realizuje się to na dwa sposoby, zilustrowane na rys. 1:

- poprzez optymalizację konstrukcji czujników, tak aby zminimalizować wrażliwość na wielkości wpływające (rys. 1a),
- poprzez stosowanie odrębnych torów pomiarowych dla wielkości wpływowych i korekcję wyniku np. w układzie wstępnego przetwarzania (rys. 1b).

Takie podejście, wynikające z tradycyjnego traktowania czujnika i całego toru pomiarowego jako jednoparametrowego, w wielu przypadkach jest możliwe do zrealizowania i daje zadowalające rezultaty. Jednakże w przypadku niektórych rodzajów czujników i niektórych wielkości wpływających [1,2,3,4,5] metody powyższe są trudne lub wręcz niemożliwe do zrealizowania albo nie dają zadowalających rezultatów. Istotnym czynnikiem jest również koszt ich realizacji.



Rys. 1. Eliminacja wrażliwości czujnika na wielkości wpływające  $Z$  (a) i korekcja tego wpływu w dalszej części toru pomiarowego (b)

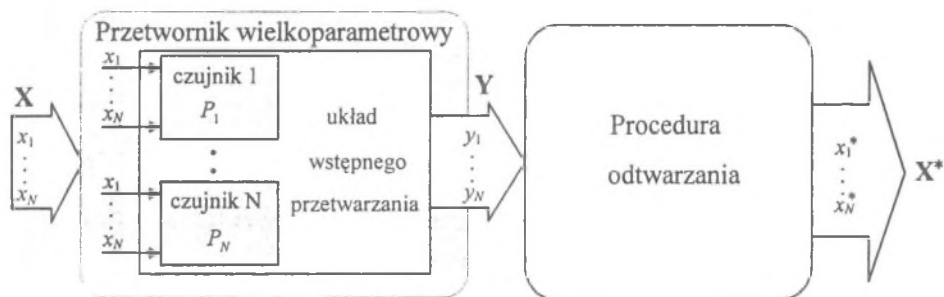
Fig. 1. Influence of additional quantities can be eliminated (a) or the result of measuring can be corrected (b)

W niniejszym artykule przedstawione jest podejście odmienne od przedstawionych wyżej, którego idea polega na **wykorzystaniu wrażliwości czujników pomiarowych na wielkości dodatkowe w celu ich pomiaru**. W ten sposób wykorzystanie czujników wrażliwych na kilka wielkości umożliwia budowanie **przetworników wieloparametrowych**. Czujniki wielkości nieelektrycznych charakteryzują się względnie dużą wrażliwością na jedną spośród wielkości wpływających (najczęściej jest nią temperatura, często wilgotność) bądź też są wrażliwe na wiele wielkości w porównywalnym stopniu. Tak jest na przykład w przypadku czujników stężenia gazów, kiedy to parametr wyjściowy czujnika zmienia się pod wpływem różnych gazów [1,2,4]. Ogólnie można stwierdzić, że czujniki stosowane w przetwornikach wieloparametrowych mogą, a nawet powinny, wykazywać porównywalne czułości na wszystkie wielkości mierzone. Znaczna dysproporcja czułości niekorzystnie

wpływa na dokładność przetwarzania, przy czym zależy od sposobu realizacji dalszej części toru pomiarowego.

## 2. TOR POMIAROWY PRZETWORNIKÓW WIELOPARAMETROWYCH

Techniczna realizacja przetwornika wieloparametrowego bazuje na wykorzystaniu kilku jednakowych bądź różnych czujników wrażliwych jednocześnie na kilka wielkości fizycznych traktowanych jako wielkości mierzone. Niezbędne jest zastosowanie odpowiednich układów wstępnego przetwarzania sygnałów lub parametrów wyjściowych czujnika. Ponieważ istotą pomiaru jest wyznaczenie wartości wielkości mierzonych, to kluczowe znaczenie ma implementacja efektywnych metod odtwarzania tych wielkości. Struktura toru pomiarowego przetwornika wieloparametrowego przedstawiona jest na rys. 2.



Rys. 2. Tor pomiarowy przetwornika wieloparametrowego  
 Fig. 2. Structure of the multidimensional measuring transducer

Jak wynika z przedstawionych uwag, czujniki które można stosować w przetwornikach wieloparametrowych nie realizują odwzorowania wzajemnie jednoznacznego. Parametr  $P$  czujnika może przyjmować takie same wartości przy różnych kombinacjach wartości wielkości mierzonych – realizowane jest odwzorowanie  $\{X_1 \times \dots \times X_N\} \rightarrow \{P\}$ . Ponieważ przetwornik pomiarowy musi zapewniać wzajemną jednoznaczność odwzorowania – tylko w takim przypadku możliwe jest odtworzenie wartości wielkości mierzonych  $X$  na podstawie wartości wielkości wyjściowych  $Y$ , to układ wstępnego przetwarzania powinien być skonstruowany tak, aby ten warunek spełnić. W tym celu konieczne jest wykorzystanie co najmniej  $N$  czujników wrażliwych na wielkości mierzone, przy czym przy odpowiedniej konstrukcji tego układu mogą to być czujniki identyczne.

Odtwarzanie wielkości mierzonych można realizować różnymi metodami:

- w oparciu o modele analityczne wielowymiarowe liniowe, obszarowo-liniowe lub nieliniowe [6,7],

- metodami iteracyjnymi,
- przy wykorzystaniu sztucznych sieci neuronowych lub logiki rozmytej [1,2,3,8,9,10].

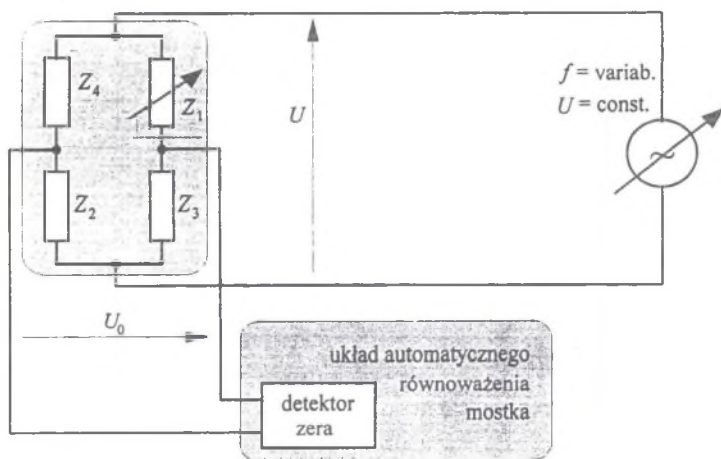
Wszystkie te metody wymagają zastosowania układów zdolnych do realizacji obliczeń lub algorytmów przetwarzania, a zatem układów programowalnych. Stąd wniosek, że przetworniki wieloparametrowe są przetwornikami programowalnymi (określanymi też jako „inteligentne”).

W dalszym ciągu opisane zostaną wybrane układy wstępnego przetwarzania charakteryzujące się tym, że informacja pomiarowa o dwóch wielkościach mierzonych przenoszona jest przy wykorzystaniu tylko jednego sygnału pomiarowego. Układy takie są dogodne do zastosowania w przetwornikach dwuparametrowych.

### 3. UKŁADY WSTĘPNEGO PRZETWARZANIA W PRZETWORNIKACH DWUPARAMETROWYCH

#### 3.1. Mostki równoważone częstotliwościowo

Schemat blokowy układu mostka zmiennoprądowego równoważonego przez zmianę częstotliwości napięcia zasilającego  $U$  pokazano na rys.3. Proces automatycznego równoważenia mostka zmierza do sprowadzenia napięcia  $U_0$  na wyjściu do zera lub do wartości minimalnej. O ile warunek ten jest spełniony, mostek jest w stanie równowagi. W takim stanie częstotliwość  $f$ , napięcia zasilającego jest proporcjonalna do wartości parametru czujnika.



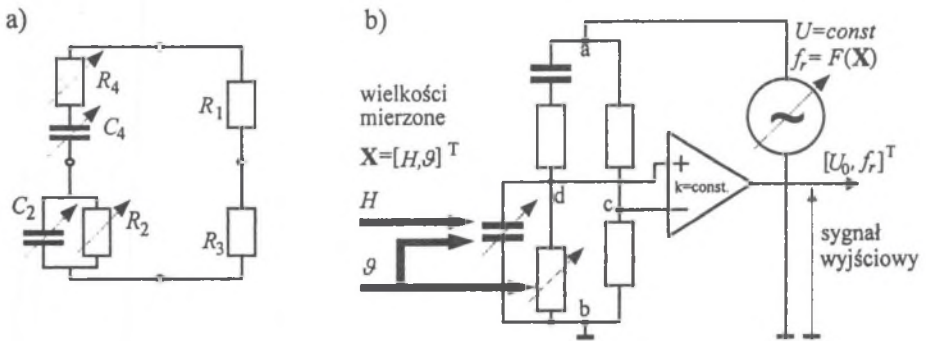
Rys. 3. Schemat blokowy przetwornika z mostkiem równoważonym częstotliwościowo  
Fig. 3. Block diagram of the transducer with frequency balanced bridge

W ogólnym przypadku do pełnego zrównoważenia mostka oprócz regulacji częstotliwości konieczna jest regulacja jeszcze parametru jednego z elementów mostka. W pracy [11] wykazano, że istnieją układy mostków, które można w pełni zrównoważyć stosując tylko regulację częstotliwości – konieczne jest jedynie jednorazowe dostrojenie proporcji odpowiednich elementów w poszczególnych gałęziach mostka. Taka właściwość znacznie upraszcza układ automatycznego równoważenia. Ponieważ częstotliwość równowagi zależy od parametrów elementów mostka, w tym od parametru czujnika, to omawiane układy mogą stanowić przetworniki jednoparametrowe typu „parametr/częstotliwość”. Analizując postać równań równowagi i wynikającą z nich wartość częstotliwości  $f_r$  zapewniającą stan równowagi oraz zależność napięcia wyjściowego  $U_o$  od parametrów elementów w gałęziach mostka można wykazać, że istnieją takie struktury mostków, które pozwalają budować przetworniki dwuparametrowe realizujące odwzorowanie

$$\{X_1 \times X_2\} \rightarrow \{U_o \times f_r\}. \tag{1}$$

Stwierdzenia te zilustrowane zostaną przykładem.

**Przykład.** Schemat układu mostka pokazano na rys. 4a.



Rys. 4. Struktura mostka czteroramiennego jako przetwornika dwuparametrowego (a) i przykład zastosowania w przetworniku wilgotności i temperatury (b)

Fig. 4. The bridge circuit as a two-dimensional transducer (a) and an example of its applying in temperature and humidity transducer (b)

Równania przetwarzania parametrów czujników na wielkości wyjściowe opisane są zależnościami:

$$f_r = \sqrt{\frac{1}{4\pi^2 C_2 C_4 R_2 R_4}}, \tag{2}$$

$$u_o = \left| \frac{U_o}{U} \right| = \left| \frac{R_3}{R_3 + R_1} \frac{j \cdot 2\pi f_r C_4 R_2}{j \cdot 2\pi f_r C_4 R_2 + (1 + j \cdot 2\pi f_r C_2 R_2)(1 + j \cdot 2\pi f_r C_4 R_4)} \right|, \tag{3}$$

W przypadku gdy czujnikami są dwa lub więcej spośród elementów  $R_2$ ,  $R_4$ ,  $C_2$ ,  $C_4$ , równania te opisują przetwornik dwuparametrowy. Oczywiście każdy z tych czujników może być jednocześnie wrażliwy na dwie wielkości mierzone lub też tylko na jedną z nich. Wzajemną jednoznaczność realizowanego odwzorowania można zapewnić dobierając odpowiednio parametry pozostałych elementów ( $R_1$  i  $R_3$ ).

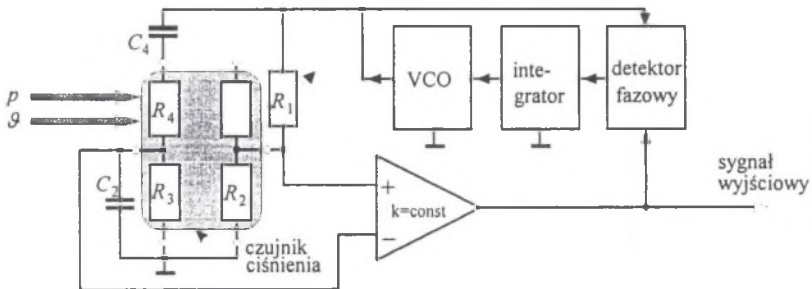
Ostateczną postać równań przetwarzania przetwornika uzyskuje się po uwzględnieniu równań przetwarzania czujników. Ponieważ jednak oba równania przetwarzania (2) i (3) są równaniami nieliniowymi, to nawet przy zastosowaniu liniowych czujników wypadkowe charakterystyki przetwornika są nieliniowe.

Jako przykład zastosowania opisanego układu mostkowego do budowy konkretnego układu przetwornika dwuparametrowego opisany zostanie przetwornik wilgotności i temperatury, w którym zastosowano pojemnościowy czujnik wilgotności  $H$  o silnej wrażliwości na temperaturę  $\vartheta$  oraz rezystancyjny półprzewodnikowy czujnik temperatury. Układ połączeń pokazano na rys. 4b. Zakładając liniowe równania przetwarzania czujników:

$$\begin{aligned} R_{\vartheta} &= R_0(1 + S_{R\vartheta}\vartheta), \\ C &= C_0(1 + S_H H + S_{C\vartheta}\vartheta), \end{aligned} \quad (4)$$

uzyskuje się przetwornik dwuparametrowy nieliniowy, przy czym błędy nieliniowości nie przekraczają  $\pm 1,13\%$  dla charakterystyki napięcia wyjściowego  $U_o(h, \vartheta t)$  i  $\pm 0,77\%$  dla charakterystyki częstotliwości  $f_o(h, \vartheta t)$ .

Inny przykład wykorzystania mostka równoważonego częstotliwościowo z jednostrukturowym piezorezystancyjnym czujnikiem ciśnienia do realizacji przetwornika ciśnienia i temperatury, dokładniej opisany w pracy [5], pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Przetwornik ciśnienia i temperatury na napięcie i częstotliwość sygnału wyjściowego  
Fig. 5. Transducer of pressure and temperature into voltage and frequency

Automatyczne równoważenie mostka może być zrealizowane w formie odpowiedniego układu regulacji z pętlą sprzężenia zwrotnego np. w sposób pokazany na rys. 5 albo w formie systemu mikroprocesorowego lub układu programowalnego, realizującego algorytm



równoważenia. To ostatnie rozwiązanie jest atrakcyjne, jeżeli przetwornik realizuje jednocześnie procedurę odtwarzania wielkości mierzonych.

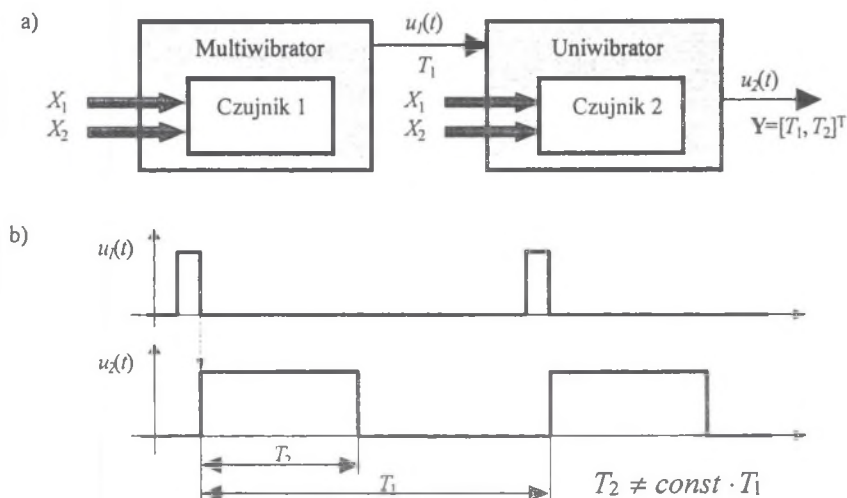
### 3.2. Układ z modulacją okresu i wypełnienia impulsów

Zaletą opisanych w poprzednim punkcie mostkowych układów wstępnego przetwarzania jest dobra stabilność w czasie i niezależność ich charakterystyk przetwarzania od wpływów zakłóceń (w tym temperatury). Wynika to z zastosowania w układzie pętli sprzężenia zwrotnego, obejmującego wszystkie elementy czynne (VCO, integrator, i wzmacniacz). Układy mostkowe wykazują jednak trzy wady istotne w praktycznych zastosowaniach:

- stosunkowo dużą złożoność układu,
- niedogodną do dalszego przetwarzania postać sygnału wyjściowego – kształt sinusoidalny o wartości napięcia zależnej od wielkości mierzonych, co powoduje konieczność stosowania przetworników A/C w dalszej części toru pomiarowego,
- niekorzystne właściwości dynamiczne ze względu na konieczność stosowania układu automatycznego równoważenia, który zwykle jest stosunkowo wolny.

Wad tych pozbawione są układy zbudowane na bazie multiwibratorów i uniwibratorów o ogólnej strukturze pokazanej na rys. 6. Układy takie realizują odwzorowanie wielkości mierzonych na czas trwania impulsu i okres impulsowego sygnału wyjściowego:

$$\{X_1 \times X_2\} \rightarrow \{T_1 \times T_2\}. \tag{5}$$

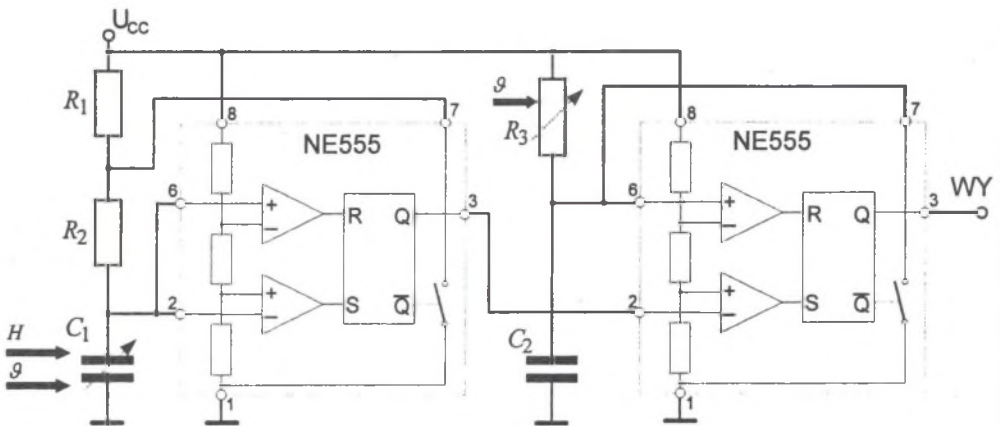


Rys. 6. Struktura układu (a) i przebiegi sygnałów (b) przetwornika dwuparametrowego z modulacją częstotliwości i wypełnienia

Fig. 6. The structure (a) and waveform of signals (b) of two-dimensional transducer with pulse width modulation and frequency modulation

Przykład realizacji praktycznej przetwornika wilgotności i temperatury z wykorzystaniem typowego układu scalonego NE555 pokazano na rys. 7. W układzie tym zastosowano pojemnościowy czujnik wilgotności wrażliwy na temperaturę oraz rezystancyjny czujnik temperatury. W układzie tym czujnikiem może być każdy z elementów  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ , przy czym, o ile charakterystyki przetwarzania czujników są liniowe, to teoretyczne charakterystyki przetwarzania dla powyższego układu również są liniowe i mają postać:

$$T_1 = \ln(2) \left[ (R_1 + 2R_2) C_1 \right], \quad T_1 = \ln(3) (R_3 C_2). \quad (6)$$



Rys. 7. Przetwornik wilgotności i temperatury z układem multiwibratora i uniwibratora  
Fig. 7. The transducer of humidity and temperature based on multivibrator and univibrator

#### 4. PODSUMOWANIE

Wrażliwość czujników pomiarowych na dodatkowe wielkości, tradycyjnie uważana za ich wadę, może być wykorzystana do pomiaru tychże wielkości. Realizacja tak rozumianych przetworników wieloparametrowych wymaga zastosowania odpowiednich układów przetwarzania parametrów czujników na sygnały dogodne do dalszego przetwarzania w torach pomiarowych. W przypadku przetworników dwuparametrowych możliwe jest zastosowanie układów mostków zmiennoprądowych równoważonych częstotliwościowo oraz układów generatorów impulsowych.

Do zalet takich układów należy zaliczyć:

- fakt, że informacja pomiarowa o dwóch wielkościach mierzonych przenoszona jest przez jeden sygnał,
- prostota realizacji układu i możliwość wykorzystania typowych czujników parametrycznych zarówno rezystancyjnych, jak i pojemnościowych,



- teoretyczna liniowość w przypadku układów z generatorami impulsowymi lub możliwe do uzyskania małe błędy nieliniowości w przypadku układów mostkowych, co pozwala na zastosowanie prostych metod odtwarzania wielkości mierzonych.

## LITERATURA

1. Trzcionka S.: Identyfikacja składu mieszanin gazowych wielokomponentowych. ZN Politechniki Śląskiej, s. Elektryka, z. 181, Gliwice 2002.
2. Brudzewski K.: Rozpoznawanie sygnałów z matryc czujników z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych. Problemy Eksploatacji (kwartalnik), nr 1.96, Radom 1996, s. 63-69.
3. Zakrzewski J.: Combined Magnetoelastic Transducer for Torque and force Measurement. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, vol. 46, no. 4, p. 807-810, aug. 1997.
4. Fetisov V. S.: Computer-based Measurement of Component Contents in Water-Oil\_gas Mixture by Means of Multifunctional Transducers. Proc. of IMEKO TC-4 Symposium on Development in Digital Measuring Instrumentation, pp. 259-264, Naples, Italy, 17-18 sept. 1998.
5. Urzędniczek H.: A New Two-Dimensional Transducer for Sensors Sensitive to Influence Quantity. Proceedings of XVI IMEKO World Congress, vol. V, p. 187-190, Wiena 2000.
6. Piotrowski J., Kostyrko K.: Wzorcowanie aparatury pomiarowej. PWN, Warszawa 2000.
7. Urzędniczek H.: Odtwarzanie wartości wielkości mierzonych dla przetwornika dwuparametrowego nieliniowego. ZN Politechniki Śląskiej, s. Elektryka, z. 165, s. 29-38, Gliwice 1999.
8. Majcher A., Ruta R.: Wykorzystanie logiki rozmytej w inteligentnym sensorze z akustyczną falą powierzchniową. Problemy Eksploatacji (kwartalnik), nr 1.96, Radom 1996, s. 55-62.
9. Kluk P., Misiurski G., Morawski R.: Total least squares versus RBF neural networks in static calibration of transducers. Procc. of IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Ottawa, May 19-21, 1997, p. 424-427.
10. Urzedniczek H.: Application of Neural Network to Solution of the Inverse Problem for 2-D Non-linear Converter. Research Papers of Silesian Technical University, 'Elektryka', no. 169/2000, p. 107-121 Gliwice, Poland.
11. Urzędniczek H.: Mostki równoważone częstotliwościowo jako przetworniki pomiarowe z wyjściem częstotliwościowym. ZN Politechniki Śląskiej, s. Elektryka, z. 162, Gliwice 1998, s. 47-61.

Recenzent: Dr hab. inż. Edward Layer, prof. Politechniki Krakowskiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 1 grudnia 2001

## Abstract

Parametric sensors, in most cases, are sensitive not only to the quantity being measured. It is not possible to avoid the impact of other quantities on the results of measurement. Designers put a lot of effort into eliminating or minimizing their influence. Different methods are applied: proper construction (technology), using a suitable primary signal conditioning circuit (e.g. differential, self-compensation) – Fig.1a or correction of the results. In some methods an additional sensor sensing the influence quantity is required – Fig.1b.

In this paper the other idea is proposed: instead of correction the use of the sensor sensitivity to the additional quantity for simultaneous measurement of the both of them. This way two quantities, the main and the influence one, compose the measurand.

By the use of two or more sensors of the same type and the circuits proposed below, a two-dimensional (2-D) measuring transducer with only one output signal can be designed. The block diagram of a measuring chain with such a 2-D transducer is shown in Fig.2. The proposed circuits of a 2-D transducer belong to the class of frequency output transducers.

First of them is realized as a frequency balanced bridge of the structure shown in Figs. 3 and 5. It converts (Equ. 1) the values of the measured quantities into two parameters of harmonic output signal: the RMS value  $U_o$  and the balance frequency  $f_r$ . In many structures of Wheatstone bridge the  $R$ ,  $C$ ,  $L$  elements could be used as sensors. An example of a humidity and temperature transducer with a humidity capacitance sensor and a thermoresistor is shown in Fig.4b and (2) and (3) are the system of its transfer equations. The second transducer is composed of a multivibrator and a univibrator connected as shown in fig. 6. An example of practical realization of such transducer is shown in Fig.7 and (6) gives the system of its transfer equations.

The above two examples show that it is possible to utilize the sensitivity of the sensors to both the main measured quantity and the influence quantity. By this way it is possible to realize simple 2-D transducers with only one output signal.

Such types of transducers have some good properties: comparatively high level of ann output signal, high sensitivities to both measured quantities. The processing of the output signal to digital form of output quantities is very simple – a rectifier and A/D converter for “ $U_o$ -code” conversion and only simple counter to “ $f_r$ -code”, “ $T_1$ -code” and “ $T_2$ -code” conversions are necessary.