

Henryk URZĘDNICZOK

## WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKÓW MODELU ODWROTNEGO OBSZAROWO-LINIOWEGO DLA PRZETWORNIKA DWUPARAMETROWEGO NIELINIOWEGO

**Streszczenie.** W artykule sformułowano warunki, jakie powinien spełniać przetwornik dwuparametrowy oraz określono, na czym polega zadanie odwrotne dla takiego przetwornika. Przedstawiono koncepcję modelu odwrotnego „obszarowo-liniowego” dla przetwornika dwuparametrowego nieliniowego. Omawiane jest zagadnienie odtwarzania wielkości mierzonych na podstawie tego modelu. Opisano metody wyznaczenia współczynników odwrotnego modelu obszarowo-liniowego. Zaproponowano modyfikację metody najmniejszych kwadratów prowadzącą do zmniejszenia błędów odtwarzania dla przetworników, których charakterystyki przetwarzania są powierzchniami nie posiadającymi punktu siodłowego.

## DETERMINATION OF INVERSE LINEAR MODEL PARAMETERS FOR NONLINEAR 2-D TRANSDUCER

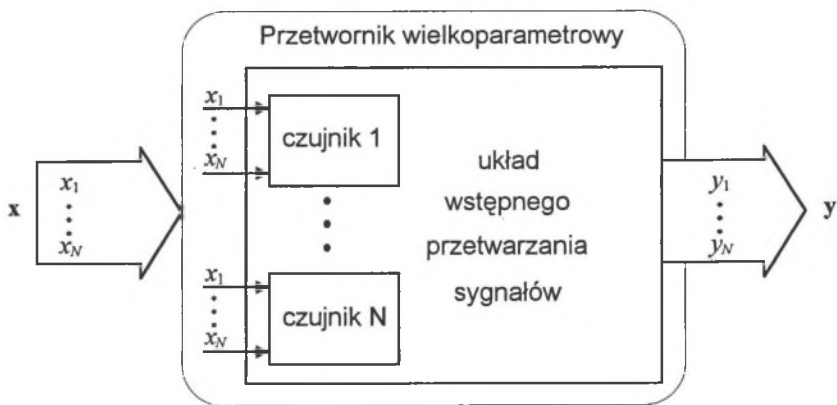
**Summary.** The conditions of a realisation of the two-dimensional (2D) measuring transducer are given in this paper. A conception of the inverted model linear in the sub-areas as the solution of inverse problem for such a type of transducer is proposed. Two methods of determination of the coefficients these models are described. Modification of the least-square method is proposed. This modification leads to minimisation of the errors of the input value reconstruction.

### 1. WPROWADZENIE

#### 1.1. Przetworniki dwuparametrowe

W złożonych systemach pomiarowych i systemach sterowania naturalna jest potrzeba jednoczesnego pomiaru szeregu wielkości fizycznych. Tradycyjnie wielkości te mierzy się w odrębnych torach pomiarowych zawierających czujniki poszczególnych wielkości oraz układy realizujące przetwarzanie sygnałów pomiarowych aż do uzyskania wyniku pomiaru.

Postęp w dziedzinie technologii czujników pomiarowych oraz układów wstępnego przetwarzania sygnałów umożliwia obecnie konstruowanie przetworników wieloparametrowych. Przetworniki takie wykazują szereg korzystnych właściwości, a najistotniejszą z nich wydaje się możliwość zmiany roli wielkości tradycyjnie traktowanych jako zakłócające (np. temperatura), które stają się wielkościami mierzonymi [1, 2, 3]. Wysiłek konstruktorów jest w tej sytuacji skupiony nie na eliminacji niepożądanego wpływu wielkości zakłócających, lecz na wykorzystaniu tego wpływu do pomiaru tychże wielkości (obok podstawowych wielkości mierzonych). Takie podejście stanowi podstawę definicji przetworników wieloparametrowych. Strukturę przetwornika wieloparametrowego przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Struktura przetwornika wieloparametrowego  
Fig. 1. Structure of a multidimensional transducer

W praktyce najczęściej mamy do czynienia z przetwornikami dwuparametrowymi. Cechy wyróżniające takie przetworniki można sformułować następująco:

- (I) Przetwornik pomiarowy dwuparametrowy odwzorowuje jednocześnie wartości dwu wielkości wejściowych na wartości dwu wielkości wyjściowych, przy czym każda z wielkości wyjściowych zależy od obu wielkości mierzonych.
- (II) Obie wielkości wejściowe traktowane są jako wielkości mierzone, co oznacza, że żadna z wielkości nie jest traktowana jako wielkość wpływająca, powodująca dodatkowe błędy, które należy korygować.
- (III) Podobnie jak dla przetworników jednoparametrowych, realizowane odwzorowanie musi być odwracalne, tj. wzajemnie jednoznaczne w dopuszczalnych przedziałach zmienności wielkości wejściowych, wyznaczających obszar przetwarzania.

Model matematyczny przetwornika dwuparametrowego stanowi układ równań przetwarzania, który w postaci wektorowej można zapisać jako:

$$\mathbf{y} = f(\mathbf{x}), \quad (1)$$

gdzie:

$\mathbf{x} = [x_1, x_2]^T$  i  $\mathbf{y} = [y_1, y_2]^T$  są odpowiednio wektorami wielkości mierzonych i wyjściowych, przy czym  $x_1 \in (x_{1min}, x_{1max})$  oraz  $x_2 \in (x_{2min}, x_{2max})$ .

W ujęciu mnogościowym przetwornik taki realizuje jednocześnie dwa następujące odwzorowania:

$$\{x_1 \times x_2\} \rightarrow \{y_1\} \quad \text{oraz} \quad \{x_1 \times x_2\} \rightarrow \{y_2\}. \quad (2)$$

Z powyższych zapisów wynika, że charakterystyki przetwarzania tego typu przetwornika dane są w postaci dwóch powierzchni w przestrzeniach trójwymiarowych  $(x_1, x_2, y_1)$  i  $(x_1, x_2, y_2)$ .

## 1.2. Odtwarzanie wielkości mierzonych dla przetworników dwuparametrowych

Odtwarzanie wartości wielkości wejściowych przetworników pomiarowych, określane jako zadanie odwrotne [4, 5], może zostać zrealizowane trzema sposobami:

- graficznie, przez wykorzystanie charakterystyk przetwarzania – metoda ta jest praktycznie przydatna jedynie dla przetworników jednoparametrowych,
- „algorytmicznie”, np. metodami iteracyjnymi lub przy wykorzystaniu sztucznych sieci neuronowych [5, 6],
- analitycznie, przez wykorzystanie matematycznych modeli przetworników.

Podstawą do analitycznego wyznaczenia estymatorów (ozn.  $\mathbf{x}^*$ ) wartości wielkości mierzonych jest model przetwornika (1) – odtwarzanie polega na zastosowaniu modelu odwrotnego w postaci:

$$\mathbf{x}^* = f^{-1}(\mathbf{y}), \quad (3)$$

do wyliczenia wartości wielkości mierzonych na podstawie znanych wartości wielkości wyjściowych. Istnienie modelu wynika z wymienionych wyżej cech określających przetworniki dwuparametrowe (cecha III). Tego typu postępowanie następcza trudności w przypadku, gdy model (1) przetwornika jest nieliniowy. Można wymienić dwie zasadnicze przyczyny takiego stanu rzeczy:

- a) wyznaczenie modelu nieliniowego w postaci (1) w oparciu o dane uzyskane w czasie wzorcowania wymaga stosowania skomplikowanych obliczeniowo metod regresji nieliniowej,
- b) dla uzyskania modelu odwrotnego (3) konieczne jest analityczne rozwiązanie układu równań nieliniowych, co nie zawsze jest możliwe.

Aby uniknąć pierwszej z tych trudności często stosuje się [7] przybliżanie modelu (1) przetwornika modelem liniowym o postaci:

$$\mathbf{y} = \mathbf{S} \mathbf{y} + \mathbf{y}_0, \quad (4)$$

gdzie:

$\mathbf{y}_0 = [y_{10} \ y_{20}]^T$  - wektor wartości przesunięcia wielkości wyjściowych,

$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix}$  - macierz czułości ( $s_{ij}$  - czułości ( $i=j$ ) i czułości wzajemne ( $i \neq j$ ),  $i, j = 1..2$ ).

Odtwarzanie realizowane jest wówczas na podstawie równania:

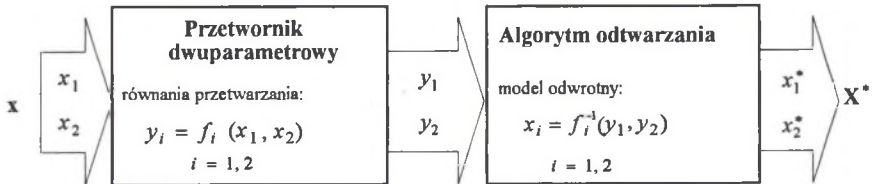
$$\mathbf{x}^* = \mathbf{S}^{-1}(\mathbf{y} - \mathbf{y}_0). \quad (5)$$

Błędy odtwarzania powstające przy takim postępowaniu są tym większe, im większa jest nieliniowość charakterystyk przetwarzania przetwornika. W większości przypadków stosowanie uproszczonego modelu liniowego (4) prowadzi do niedopuszczalnie dużych wartości błędów odtwarzania.

Wykorzystując odpowiednio dane uzyskane w trakcie wzorcowania można wyznaczyć bezpośrednio nieliniowy model odwrotny (3) przetwornika dwuparametrowego. Podstawę tej metody stanowi konstatacja, że algorytm odtwarzania widoczny w torze pomiarowym z przetwornikiem dwuparametrowym (rys.2) realizuje następujące odwzorowania<sup>1)</sup>:

$$\{y_1 \times y_2\} \rightarrow \{x_1^*\} \quad \text{oraz} \quad \{y_1 \times y_2\} \rightarrow \{x_2^*\}. \quad (6)$$

Traktując uzyskane w trakcie wzorcowania wartości wielkości wyjściowych  $\mathbf{y}$  jako zmienne niezależne, a zadane wartości zmiennych wejściowych  $\mathbf{x}$  jako zmienne zależne, można poszukiwać bezpośrednio modelu odwrotnego (3) – pozwala to uniknąć drugiej (b) z wymienionych wyżej trudności. Konieczność stosowania metod regresji nieliniowej pozostaje.



Rys.2. Tor pomiarowy z przetwornikiem dwuparametrowym  
Fig.2. Measuring chain with a two-dimensional transducer

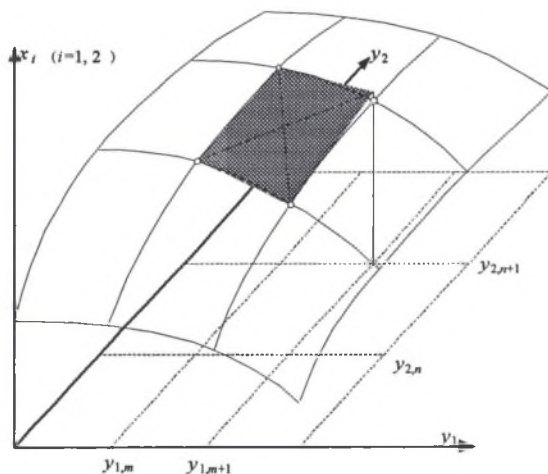
Dodatkowym czynnikiem zmniejszającym atrakcyjność odtwarzania opartego na nieliniowym modelu odwrotnym jest znaczna złożoność obliczeń, co jest szczególnie istotne w przypadku stosowania w torze pomiarowym systemów mikroprocesorowych o niewielkich mocach obliczeniowych.

W pracy [8] zaproponowano metodę odtwarzania wartości wielkości wejściowych dla przetwornika dwuparametrowego nieliniowego na podstawie tzw. modelu odwrotnego obszarowo-liniowego.

<sup>1)</sup> Odtwarzanie jest możliwe tylko wówczas, gdy odwzorowania (2) i (6) są wzajemnie jednoznaczne.

## 2. MODEL ODWROTNY OBSZAROWO-LINIOWY

Przez model odwrotny obszarowo-liniowy określa się zbiór modeli liniowych o postaci (5) utworzonych dla określonej liczby rozłącznych obszarów odwrotnych charakterystyk przetwarzania (6). Obszary te wyznaczone są przez sąsiednie punkty wzorcowania przetwornika. Obrazowo model taki można przedstawić jako zbiór fragmentów płaszczyzn przybliżających powierzchnie tworzące odwrotne charakterystyki przetwarzania. Ilustrację graficzną tego typu modelu przedstawia rys.3. Dla większej przejrzystości na rysunku tym poszczególne obszary zaznaczono na płaszczyźnie  $(y_1, y_2)$  w formie prostokątów, choć w rzeczywistości tak nie musi być, ponieważ ze względu na nieliniowość przetwornika i dowolne rozlokowanie punktów wzorcowania obszary te są czworobokami o nieregularnym kształcie. Najistotniejsze cechy takiego modelu to prostota obliczeń zarówno przy wzorcowaniu, jak i przy odtwarzaniu wartości mierzonych, charakterystyczna dla modeli liniowych oraz możliwość uzyskania dobrej dokładności odtwarzania.



Rys.3. Przybliżenie fragmentu odwrotnej charakterystyki przetwornika modelem liniowym  
Fig.3. The linear approximation of the part of the transducer inverted characteristic

Analitycznie model odwrotny można zapisać następująco:

$$\mathbf{x}_{m,n}^* = \mathbf{C}_{m,n} (\mathbf{y} - \mathbf{y}_{0,m,n}) + \mathbf{x}_{0,m,n}, \quad (7)$$

gdzie:

$\mathbf{y}$  jest wektorem wartości wielkości wyjściowych,

$\mathbf{x}^*$  jest wektorem estymat wielkości mierzonych wyznaczonych w oparciu o model obszarowo-liniowy,

$m=0, 1, \dots, M$ ;  $n=0, 1, \dots, N$  oznaczają numery punktów wzorcowania w kierunkach wielkości wyjściowych  $Y_1$  i  $Y_2$ , para liczb  $(m, n)$  określa tzw. punkt bazowy dla obszaru wyznaczonego przez punkty o indeksach  $(m, n)$ ,  $(m+1, n)$ ,  $(m, n+1)$  i  $(m+1, n+1)$ ,

$C_{m,n} = S_{m,n}^{-1} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix}_{m,n}$  jest macierzą stałych, tj. macierzą współczynników kierunko-

wych płaszczyzn dla obszaru o punkcie bazowym  $(m, n)$ ,

$x_0$  i  $y_0$  są wektorami wartości odniesienia, tj. wartościami odpowiednio wielkości wejściowych i wyjściowych w punktach bazowych dla tego obszaru (w punktach wzorcowania).

Model odwrotny obszarowo-liniowy przetwornika dwuparametrowego określony jest zatem przez zbiór trójek  $\{(\mathbf{C}, x_0, y_0)_{m,n}\}$  o liczności zależnej od ilości punktów wzorcowania. Odtwarzanie wartości wielkości wejściowych  $\mathbf{x}$  na podstawie uzyskanych na wyjściu wartości wielkości  $\mathbf{y}$  dokonywane jest w dwóch krokach:

- wyznaczenie obszaru, w którym te wartości się mieszczą i odczytanie z pamięci odpowiadających mu współczynników modelu  $(\mathbf{C}, x_0, y_0)$ ,
- obliczenie wartości wielkości wejściowych z zależności (7).

### 3. WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKÓW MODELU

#### 3.1. Metoda trzech punktów

Wyznaczenie poszczególnych macierzy czułości wymaga wyznaczenia współczynników kierunkowych płaszczyzn przybliżających powierzchnię stanowiącą fragment odwrotnej charakterystyki przetwarzania w danym obszarze. W najprostszym przypadku można tego dokonać prowadząc płaszczyzny przechodzące przez trzy spośród czterech punktów wzorcowania, stanowiące narożniki każdego z obszarów. Tego typu podejście zaproponowano w pracy [8]. Macierz stałych można w tym przypadku wyznaczyć następująco:

$$C_{m,n} = \begin{bmatrix} x_Q - x_P & x_R - x_P \\ y_Q - y_P & y_R - y_P \end{bmatrix}^{-1}, \quad (8)$$

gdzie:

P, Q, R oznaczają indeksy wybranych trzech spośród czterech punktów narożnych obszaru o punkcie bazowym wyznaczonym przez indeksy  $(m, n)$ .

Dla każdego z obszarów można wyznaczyć cztery różne płaszczyzny stanowiące liniowy model odwrotny w tym obszarze. Sprawdzenie, która z płaszczyzn zapewnia mniejsze błędy odtwarzania w poszczególnych obszarach, nie jest w dowolnym przypadku możliwe bez wzorcowania w dodatkowych punktach wewnątrz obszaru  $(m, n)$ .

Istniejąca nadmiarowość pozwala na postawienie tezy, że możliwe jest poprawienie dokładności odtwarzania poprzez wyznaczenie płaszczyzny optymalnej dla danego przedziału. Optymalność oznacza w tym przypadku uzyskanie najmniejszych błędów odtwarzania wartości wielkości mierzonych w oparciu o zaproponowany model odwrotny obszarowo-liniowy.

### 3.2. Metoda najmniejszych kwadratów

Optymalne wartości współczynników modelu liniowego dla dwuwymiarowej funkcji nieliniowej mogą być wyznaczone przez zastosowanie metody regresji liniowej dwuwymiarowej, np. opartej na metodzie najmniejszych kwadratów [7]. Postępowanie takie jest uzasadnione, jeżeli liczba punktów wzorcowania jest większa niż trzy. W tym przypadku liczba punktów wzorcowania dla każdego obszaru wynosi cztery, a zatem zastosowanie metody najmniejszych kwadratów do wyznaczania współczynników macierzy czułości  $C_{m,n}$  pozwala na lepsze dopasowanie płaszczyzny do każdego z obszarów. Macierze czułości dla poszczególnych obszarów można wyznaczyć z zależności:

$$C_{m,n} = (Y^T Y)^{-1} Y^T X, \quad (9)$$

przy czym  $X$  i  $Y$  oznaczają odpowiednio macierze utworzone z wartości wielkości wejściowych i wyjściowych w czterech punktach wzorcowania określających obszar o punkcie bazowym  $(m,n)$ . Sposób tworzenia tych macierzy jest następujący:

$$Y = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ (y_1)_{m+1,n} - (y_1)_{m,n} & (y_2)_{m+1,n} - (y_2)_{m,n} \\ (y_1)_{m,n+1} - (y_1)_{m,n} & (y_2)_{m,n+1} - (y_2)_{m,n} \\ (y_1)_{m+1,n+1} - (y_1)_{m,n} & (y_2)_{m+1,n+1} - (y_2)_{m,n} \end{bmatrix}, \quad (10a)$$

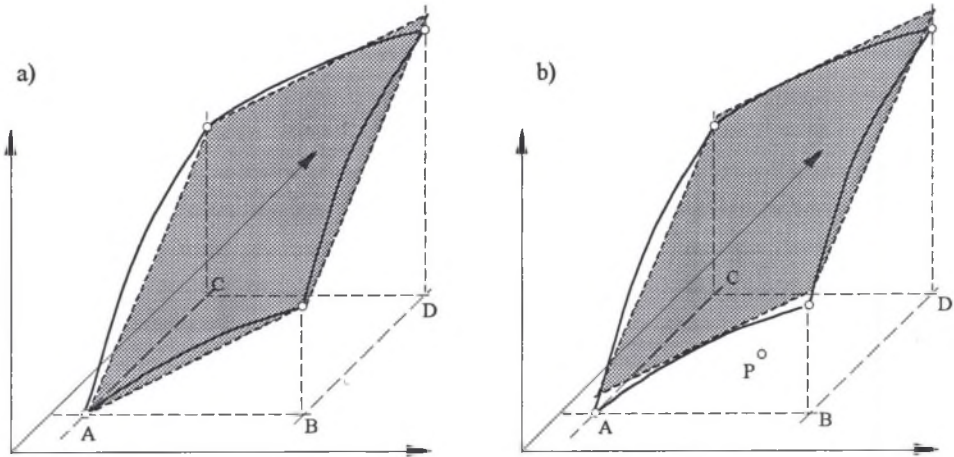
$$X = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ (x_1)_{m+1,n} - (x_1)_{m,n} & (x_2)_{m+1,n} - (x_2)_{m,n} \\ (x_1)_{m,n+1} - (x_1)_{m,n} & (x_2)_{m,n+1} - (x_2)_{m,n} \\ (x_1)_{m+1,n+1} - (x_1)_{m,n} & (x_2)_{m+1,n+1} - (x_2)_{m,n} \end{bmatrix}. \quad (10b)$$

W praktyce wartości wielkości wejściowych i wyjściowych uzyskane w trakcie wzorcowania obarczone są błędami o charakterze losowym. Uzyskane na ich podstawie estymatory współczynników macierzy czułości  $C$  są zatem zmiennymi losowymi i są estymatorami obciążonymi. Analiza zagadnień związanych z tym faktem wykracza jednak poza ramy niniejszego opracowania.

### 3.3. Zmodyfikowana metoda najmniejszych kwadratów

Wadą każdej z powyższych metod wyznaczania współczynników modelu odwrotnego jest to, że w przypadku charakterystyk nie posiadających punktu siodłowego błędy odtwarzania są zawsze minimalne w pobliżu punktów wzorcowania, a maksymalne dla punktów w okolicach środka obszaru wzorcowania. Przyczynę takiego stanu ilustruje rys.4a. Błędy wewnątrz obszaru wzorcowania mają stały znak zależny od krzywizny charakterystyki. Bezwzględną wartość błędów maksymalnych w każdym z obszarów można zmniejszyć wyznaczając płaszczyznę w sposób pokazany na rys.4b. Aby to było możliwe, konieczne jest dodat-

kowe wzorcowanie przetwornika w punkcie środkowym obszaru (ozn. P na rys.4b). Liczba punktów wzorcowania wzrasta w takim przypadku o  $mn$ .



Rys.4. Ilustracja sposobu zmniejszania błędów odtwarzania  
Fig.4. Illustration of the method of error minimisation

Drugą wadą powyższych metod jest to, że prowadzą one do wyznaczenia parametrów płaszczyzny przechodzącej zawsze przez punkt bazowy (ozn. A na rys.4) – wynika to z postaci macierzy (10), a to nie zapewnia minimalizacji błędów odtwarzania. Zaproponowana niżej modyfikacja sposobu obliczeń pozwala na uniknięcie obu tych wad. Dopuszczając przesunięcie płaszczyzny przybliżającej charakterystykę przetwornika na podstawie zależności (5) dla obszaru o punkcie bazowym a można zapisać:

$$y_i = [1 \quad x_1 - x_{1,A} \quad x_2 - x_{2,A}] S_i + y_{1,A}, \quad (11)$$

gdzie:

$S_i = [s_{i0} \quad s_{i1} \quad s_{i2}]^T$ ,  $s_{i1}$  i  $s_{i2}$  są czułościami przetwornika dla  $i$ -tej wielkości wyjściowej, a  $s_{i0}$  oznacza dodatkowe przesunięcie płaszczyzny w punkcie A. Analogicznie dla pozostałych punktów. Stosując następnie metodę najmniejszych kwadratów można wyznaczyć macierze  $S_i$ :

$$S_i = (\mathbf{x}^T \mathbf{x})^{-1} \mathbf{x}^T \mathbf{y}_i = \begin{bmatrix} s_{i,0} \\ s_{i,1} \\ s_{i,2} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

przy czym wektory  $\mathbf{x}$  i  $\mathbf{y}_i$  tworzy się na podstawie punktów wzorcowania w danym obszarze (z uwzględnieniem punktu środkowego P) w sposób następujący:



$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & x_{1,B} - x_{1,A} & x_{1,C} - x_{1,A} & x_{1,D} - x_{1,A} & x_{1,P} - x_{1,A} \\ 0 & x_{2,B} - x_{2,A} & x_{2,C} - x_{2,A} & x_{2,D} - x_{2,A} & x_{2,P} - x_{2,A} \end{bmatrix}^T, \quad (13a)$$

$$\mathbf{y}_i = [0 \quad y_{i,B} - y_{i,A} \quad y_{i,C} - y_{i,A} \quad y_{i,D} - y_{i,A} \quad y_{i,P} - y_{i,A}]^T. \quad (13b)$$

Równanie (11) można zapisać w postaci

$$y_i - y_{1,A} - s_{i0} = (x_1 - x_{1,A})s_{i1} + (x_2 - x_{2,A})s_{i2}, \quad (14)$$

co dla obu wielkości wyjściowych można zapisać w postaci macierzowej jako

$$\mathbf{y} - \mathbf{y}_A - \mathbf{S}_{0A} = \mathbf{S}_A (\mathbf{x} - \mathbf{x}_A), \quad (15)$$

Macierz  $\mathbf{S}_A$  jest macierzą czułości przetwornika (zdefiniowaną zał. (4)), a  $\mathbf{S}_0$  jest macierzą przesunięcia. Obie macierze odnoszą się do obszaru o dowolnym punkcie bazowym A – tj. punktu wskazywanego przez indeksy  $m$  i  $n$ . Dla tego obszaru na podstawie (16) można wyznaczyć model odwrotny w postaci analogicznej do (7):

$$\mathbf{x}_{m,n}^* = \mathbf{S}_{m,n}^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{y}_{0,m,n} - \mathbf{S}_0) + \mathbf{x}_{0,m,n} = \mathbf{C}_{m,n} (\mathbf{y} - \mathbf{y}_{0,m,n} - \mathbf{S}_0) + \mathbf{x}_{0,m,n}, \quad (16)$$

przy czym  $\mathbf{C}_{m,n} = \mathbf{S}_{m,n}^{-1} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix}_{m,n}^{-1}$  jest macierzą czułości,  $\mathbf{S}_{0,m,n} = \begin{bmatrix} s_{1,0} \\ s_{2,0} \end{bmatrix}_{m,n}$  jest wektorem przesunięcia, a  $\mathbf{x}_{0,m,n}$  i  $\mathbf{y}_{0,m,n}$  są wektorami wartości odniesienia dla obszaru  $(m,n)$ .

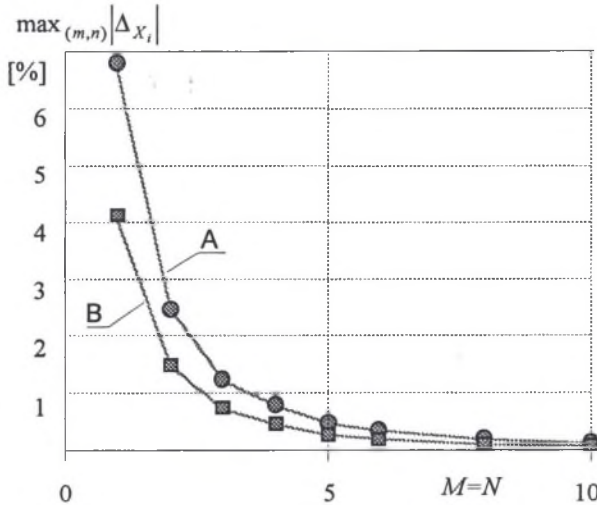
Zbiór parametrów  $\{(\mathbf{C}, \mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0)_{m,n}\}$  tworzy poszukiwany model odwrotny obszarowo-liniowy.

#### 4. PODSUMOWANIE

W pracy [8] przedstawiono zależność maksymalnych wartości błędów dla przykładowego przetwornika należącego do tej grupy, od ilości punktów wzorcowania. Zależność ta pokazana jest na rys.5, linia A. Wyniki uzyskane dla tego samego przetwornika przy wykorzystaniu modelu (16) dla założonej takiej samej ilości obszarów, na które dzieli się charakterystyki przetwarzania, obrazuje linia B.

Ze wzrostem ilości punktów wzorcowania błędy odtwarzania maleją, jednakże rośnie ilość obszarów, na które dzielona jest charakterystyka przetwornika. To sprawia, że rośnie także ilość współczynników, które muszą być zapamiętane w systemie realizującym algorytm odtwarzania, a ponadto wydłuża czas realizacji tego algorytmu. Zastosowanie zaproponowanego sposobu wyznaczania współczynników odwrotnego modelu obszarowo-liniowego po-

zwała na zmniejszenie maksymalnych błędów odtwarzania o jedną trzecią, przy niezmienniczej liczbie obszarów.



Rys.5. Zależność błędów odtwarzania opartego na modelu obszarowo-liniowym od liczby punktów wzorcowania

Fig.5. Errors of inversion versus the number of calibration points for the model linear in sub areas

## LITERATURA

1. Urzędniczek H.: A New Two-Dimensional Transducer for Sensors Sensitive to Influence Quantity. Proceedings of XVI IMEKO World Congress, vol. V, ss. 187-190, Wiena 2000.
2. Zakrzewski J.: Combined Magnetoelastic Transducer for Torque and force Measurement. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, vol. 46, no. 4, ss. 807-810, aug. 1997.
3. Gawor M., Ligęza P., Rysz J.: Pomiar prędkości i temperatury w szybkozmiennych przepływach nieizotermicznych. Mat. Konferencji Podstawowe Problemy Metrologii, Prace Komisji Metrologii oddz. PAN w Katowicach, ss. 429-440, Gliwice-Ustroń 2001.
4. Morawski R. Z.: Modelowanie matematyczne a pomiar. Metrologia i Systemy pomiarowe, t. II, z. 1, ss. 25-35, 1995.
5. Morawski R. Z.: Zadania odwrotne w metrologii. Mat. konferencji Podstawowe Problemy Metrologii, Gliwice-Ustroń, 1998, ss. 37-49.
6. Urzędniczek H.: Zastosowanie sieci neuronowej do rozwiązania zadania odwrotnego dla przetwornika dwuparametrowego nieliniowego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej ser. Elektryka, z. 169, ss. 107-121, Gliwice 2000.
7. Piotrowski J., Kostyrko K.: Wzorcowanie aparatury pomiarowej. PWN, Warszawa 2000.

8. Urzędniczok H.: Odtwarzanie wielkości wejściowych przetworników dwuparametrowych nieliniowych w oparciu o model obszarowo-liniowy. Materiały XI sympozjum Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych, AGH, Krynica 2001.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Janusz GAJDA

Wpłynęło do Redakcji dnia 22 lipca 2002 r.

### Abstract.

Traditionally, in measuring systems different quantities are converted in separate measuring chains. On the other hand parametric sensors are sensitive not only to the quantity to be measured - it is not possible to avoid cross-sensitivities involved by the impact of other quantities. A conception of using of the cross-sensitivities is proposed in [1] - two quantities (or more at all): the main one and the influence one compose the measurand. The idea of such a multidimensional transducer is explained in Fig. 1 and its mathematical model as the set of nonlinear equation is given by (1) the following properties of that transducer are distinctive:

- (I) two input quantities  $x_1$  and  $x_2$  are converted into two output quantities  $y_1$  and  $y_2$  simultaneously,
- (II) both of the input quantities are measured, neither of them is treated as an influence quantity,
- (III) the reconstruction of the measured quantities  $x_1$  and  $x_2$  (inversion of the realized conversion) is possible.

In order to obtain the estimated values  $x_1^*$  and  $x_2^*$  of the measured quantities the inversion algorithm should be realized in a measuring chain (Fig. 2) and therefore the inverted model is necessary. Such a model may have a form of nonlinear equation set (3). The main problem in this case results from the nonlinearity - the procedure of estimating the nonlinear model coefficients and calculations of the measured values  $x^*$  are complicated.

In this paper, instead of the transducer nonlinear model the using of a set of linear models is proposed. This model is composed by the set of triple  $\{(C, x_0, y_0)_{m,n}\}$ . The whole conversion characteristics are divided into several areas pointed by indexes  $(m, n)$  and the suitable linear models are determined, as it is shown in Fig. 3. Three methods of determination of the linear model coefficients are described (point 3.1 to 3.3).