

Damian GONCZ
Instytut Metrologii i Automatyki Elektrotechnicznej
Politechniki Śląskiej

MODEL MATEMATYCZNY TRÓJOSIOWEJ GŁOWICY POMIAROWEJ

Streszczenie. W pracy przedstawiono analizę matematyczną rzeczywistej, trójosiowej głowicy pomiarowej. Na podstawie zależności trygonometrycznych wyznaczono równanie przetwarzania, w którym uwzględniono wzajemne położenie rzeczywistych detektorów pomiarowych. Przeprowadzono analizę błędu składowego głowicy oraz przedstawiono wnioski wynikające z analizy.

A MATHEMATICAL MODEL OF THE THREE-AXIS MEASURING HEAD

Summary. The mathematical analysis of the non-ideal three-axis measuring head is presented in the paper. The block diagram and the algorithm concept for the measurement of the transducer with three-axis measuring head are shown. The component error caused by the non-perpendicular detectors of the head is analyzed.

1. WPROWADZENIE

W pewnych obszarach metrologii niezbędne jest wykonywanie pomiarów niektórych wielkości za pomocą sond mierzących wartość danej wielkości w trzech osiach układu współrzędnych prostokątnych. Sytuacja taka ma miejsce przy pomiarach wielkości kierunkowych, do których należą np. pole elektryczne, magnetyczne oraz inne wielkości fizyczne niekoniecznie elektryczne. W każdym przypadku do poprawnego wykonania pomiaru należy użyć trzech wzajemnie prostopadłych detektorów mierzonej wielkości. W tym celu wykonuje się zespolone trójosiowe głowice pomiarowe. Detektory wchodzące w skład głowicy mierzą trzy składowe badanej wielkości. Bardzo istotnym problemem w

budowie głowic trójosiowych jest precyzyjne wzajemne usytuowanie detektorów. W idealnym przypadku detektory powinny być wzajemnie prostopadłe, jednak w rzeczywistej głowicy pomiarowej mamy do czynienia z odstępstwem od tej sytuacji, co prowadzi nieraz do znacznych błędów pomiaru.

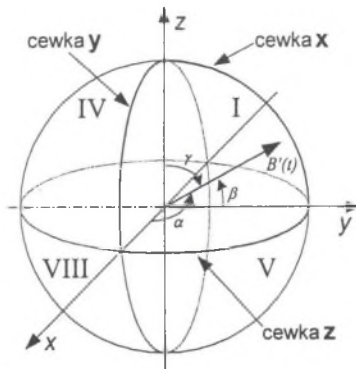
W pracy przedstawiono wpływ nieidealnego wzajemnego położenia czujników na wynik pomiaru. Analizę przeprowadzono dla trójosiowego czujnika indukcji magnetycznej.

2. MODEL MATEMATYCZNY GŁOWICY RZECZYWISTEJ

Rozpatrywana w pracy głowica pomiarowa składa się z trzech wzajemnie prostopadłych detektorów pola o oddzielnych wyprowadzeniach. W ogólnym przypadku mogą to być np. cewki indukcyjne lub hallotrony. Dla lepszego zobrazowania przestrzennego modelu głowicy przyjęto wstępnie, że czujnikami są cewki indukcyjne nawinięte na niemagnetycznym karkasie w kształcie kuli (rys. 1). W idealnym wykonaniu przetwornik oparty na tego typu głowicy nie posiada właściwości kierunkowych, ponieważ zawsze spełnione jest równanie wynikające z geometrii [1], [2], [3]:

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1, \quad (1)$$

gdzie: α , β , γ są kątami pomiędzy wektorem pochodnej indukcji $B'(t)$ a normalnymi płaszczyzn, w których położone są cewki x , y , z .



Rys. 1. Model przestrzenny głowicy pomiarowej
Fig. 1. A model of the three-axis measuring head

Jeżeli przebieg strumienia obejmującego powierzchnię cewki x jest funkcją czasu, a powierzchnia ta wynosi S , to dla liczby zwojów z wartość sem. wyindukowanej w cewce jest równa:

$$e_x(t) = -z S \frac{dB(t)}{dt} \cos a. \quad (2)$$

Po scałkowaniu otrzymuje się:

$$u_x(t) = -z S B(t) \cos a. \quad (3)$$

Podobne zależności otrzymuje się dla pozostałych cewek y i z .

Indukowane w cewkach sem. transformacji $e_x(t)$, $e_y(t)$ oraz $e_z(t)$ po scałkowaniu oraz odfiltrowaniu wyższych harmonicznnych są synchronicznie próbkowane, tzn. w jednej chwili czasowej pobierane są próbki z trzech torów pomiarowych. Wartość i -tej próbki napięciowej dla cewki x wynosi:

$$u_x(t_i) = -z S B(t_i) \cos a. \quad (4)$$

W ogólnym przypadku dla dowolnego typu detektorów pomiarowych wartość i -tej próbki indukcji B w torze x wynosi:

$$B_x(t_i) = k B(t_i) \cos a, \quad (5)$$

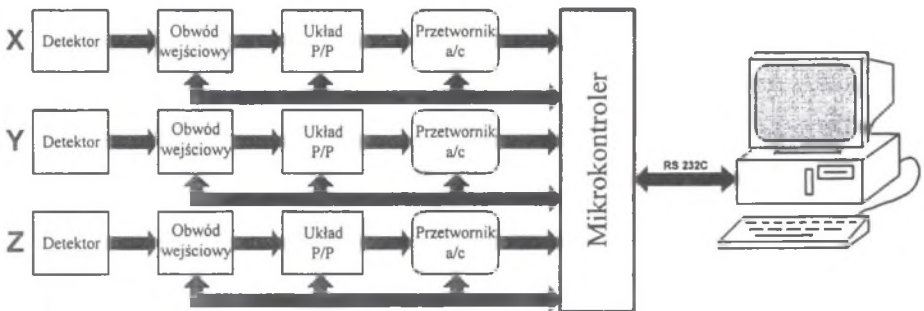
gdzie k jest parametrem konstrukcyjnym, charakterystycznym dla konkretnego typu detektora pola.

Istotnym etapem toru przetwarzania (rys. 2) jest złożenie pobranych w jednej chwili czasowej próbek. Przyjęto wyznaczenie wypadkowej próbki wyjściowej według zależności:

$$B_{wy}(t_i) = \sqrt{B_x^2(t_i) + B_y^2(t_i) + B_z^2(t_i)}. \quad (6)$$

Wstawiając wyrażenie (5) i podobne zależności dla detektorów y i z do wzoru (6) oraz uwzględniając wzór (1), otrzymuje się równanie przetwarzania przetwornika dla idealnej głowicy pomiarowej:

$$B_{wy}(t_i) = k B(t_i). \quad (7)$$

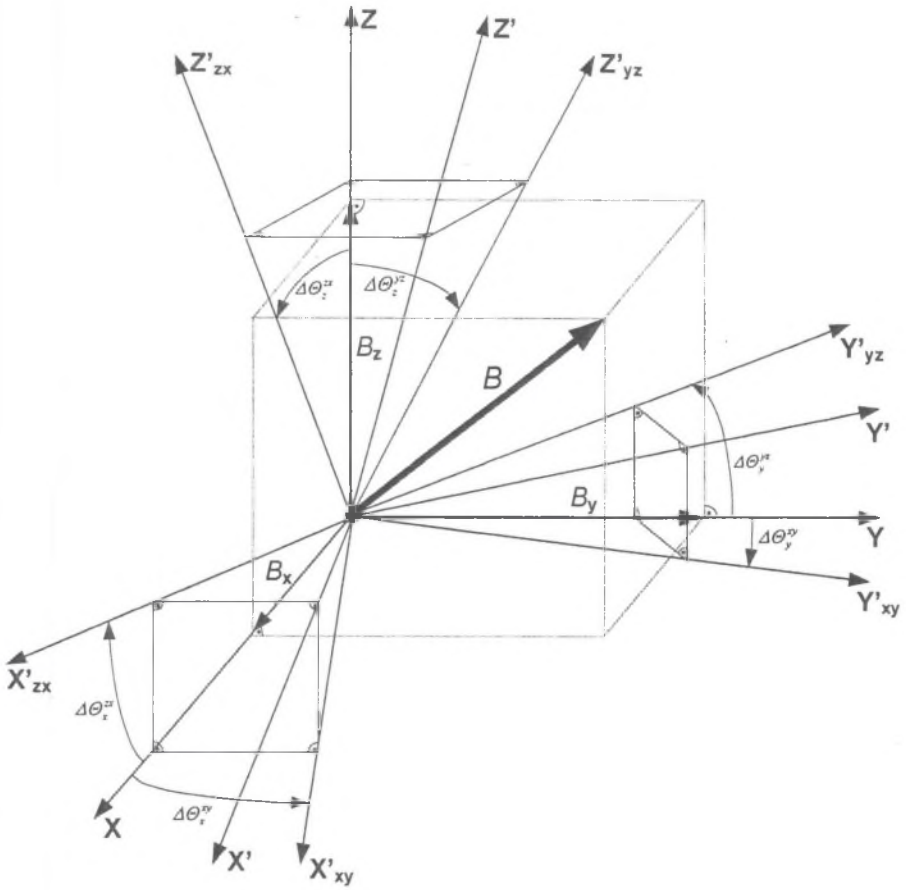


Rys. 2. Schemat blokowy czujnika z trójosiową głowicą pomiarową
Fig. 2. Block diagram of the detector with three-axis measuring head

Otrzymane w wyniku algorytmu przetwarzania równanie (7) po nadaniu znaku [2] odwzorowuje i -tą próbkę mierzonej indukcji B . Równanie to nie zawiera informacji na temat przestrzennego usytuowania głowicy pomiarowej, a więc świadczy o bezkierunkowym charakterze przetwornika.

Sytuacja ulega jednak zmianie, jeżeli założymy model głowicy rzeczywistej. W tym przypadku detektory pomiarowe nie są idealnie prostopadłe. Dla jasnego zobrazowania sytuacji przyjęto układ współrzędnych prostokątnych, którego osie oznaczono jako \mathbf{X} , \mathbf{Y} , \mathbf{Z} , a także układ ukośnokątny z oznaczeniami osi \mathbf{X}' , \mathbf{Y}' , \mathbf{Z}' , które są normalnymi płaszczyzn przetworników indukcji. W celach analizy założono, że układy mają wspólny początek osi współrzędnych. Należy zauważyć, że w przypadku układu ukośnokątnego płaszczyzny wyznaczone przez osie: \mathbf{X}' , \mathbf{Y}' , \mathbf{Z}' nie pokrywają się z płaszczyznami, w których położone są przetworniki i których normalnymi są właśnie te osie. Dla pełnego opisu rzeczywistej głowicy pomiarowej zdefiniowano kąty między rzutami osi układu ukośnokątnego na płaszczyzny \mathbf{XY} , \mathbf{YZ} i \mathbf{ZX} układu prostokątnego a odpowiednimi osiami \mathbf{X} , \mathbf{Y} , \mathbf{Z} układu prostokątnego. Wartości tych kątów definiują wzajemne położenie obydwu układów współrzędnych (rys. 3). Przyjęto następującą zasadę strzałkowania kątów: jeżeli patrząc w kierunku linii normalnej do płaszczyzny danego kąta zwrot tego kąta jest przeciwny do ruchu wskazówek zegara, to kąt jest ujemny; w przeciwnym przypadku jest dodatni. Zgodnie z tą zasadą zdefiniowane kąty: $\Delta\theta_x^{xy}$, $\Delta\theta_y^{yz}$, $\Delta\theta_z^{zx}$ są ujemne, a kąty: $\Delta\theta_x^{zx}$, $\Delta\theta_y^{xy}$, $\Delta\theta_z^{yz}$ są dodatnie. Analiza ma na celu wyznaczenie związku między składowymi wektora indukcji \mathbf{B} w układzie prostokątnym a składowymi tego wektora w układzie ukośnokątnym [4]. Składowe wektora \mathbf{B} na osiach układu ukośnokątnego wynoszą:

$$\begin{pmatrix} B_{x'} \\ B_{y'} \\ B_{z'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \pm \sqrt{\frac{\cos^2 \Delta\theta_x^{zx}}{1 + \cos^2 \Delta\theta_x^{zx} \cdot \operatorname{tg}^2 \Delta\theta_x^{xy}}} & \pm \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\cos^2 \Delta\theta_x^{xy}}{\sin^2 \Delta\theta_x^{yz} \cdot \cos^2 \Delta\theta_x^{zx}}}} & \pm \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\cos^2 \Delta\theta_x^{zx}}{\sin^2 \Delta\theta_x^{xy} \cdot \cos^2 \Delta\theta_x^{yz}}}} \\ \pm \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\cos^2 \Delta\theta_y^{xy}}{\sin^2 \Delta\theta_y^{yz} \cdot \cos^2 \Delta\theta_y^{zx}}}} & \pm \sqrt{\frac{\cos^2 \Delta\theta_y^{xy}}{1 + \cos^2 \Delta\theta_y^{xy} \cdot \operatorname{tg}^2 \Delta\theta_y^{yz}}} & \pm \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\cos^2 \Delta\theta_y^{yz}}{\sin^2 \Delta\theta_y^{xy} \cdot \cos^2 \Delta\theta_y^{zx}}}} \\ \pm \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{\cos^2 \Delta\theta_z^{zx}}{\sin^2 \Delta\theta_z^{xy} \cdot \cos^2 \Delta\theta_z^{yz}}}} & \pm \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\cos^2 \Delta\theta_z^{yz}}{\sin^2 \Delta\theta_z^{xy} \cdot \cos^2 \Delta\theta_z^{zx}}}} & \pm \sqrt{\frac{\cos^2 \Delta\theta_z^{yz}}{1 + \cos^2 \Delta\theta_z^{yz} \cdot \operatorname{tg}^2 \Delta\theta_z^{xy}}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} \quad (8)$$



Rys. 3. Wzajemne położenie układów współrzędnych
 Fig. 3. Mutual position of the coordinate systems

Znaki współczynników w zależności (8) oznaczono jako „ \pm ”. Dla konkretnej sytuacji ustala się je według następującej reguły: jeżeli składowa wektora indukcji B_x , B_y lub B_z daje na rozpatrywaną oś X^i rzut o zwrocie zgodnym ze zwrotem osi, to znak współczynnika związanego z rzutem danej składowej na oś jest dodatni; w przeciwnym razie znak ten jest ujemny. W tabelicy 1 zestawiono znaki, jakie należy przypisać poszczególnym składnikom macierzy współczynników w zależności od możliwych kombinacji kątów $\Delta\theta_k^{i,j}$, gdzie: $i, j, k = x \vee y \vee z$. W analizie przyjęto zasadę, że każda z osi układu ukośnokątnego X^i, Y^j, Z^k może znajdować się w jednym z ośmiu oktantów (rys. 1) układu prostokątnego. Ponadto założono, że wektor indukcji B znajduje się w I oktancie. Przyjęto następujące oznaczenia współczynników macierzy w równaniu (8):

$$\begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} \quad (9)$$

Tablica 1

Algorytm nadawania znaków współczynnikom macierzy w równaniu (9)

Oktant	a_{11}	a_{12}	a_{13}	$\Delta\Theta_x^{xy}$	$\Delta\Theta_x^{xz}$
I	+	+	+	$3/2\pi \div 2\pi$	$0 \div 1/2\pi$
II	-	+	+	$\pi \div 3/2\pi$	$1/2\pi \div \pi$
III	-	-	+	$1/2\pi \div \pi$	$1/2\pi \div \pi$
IV	+	-	+	$0 \div 1/2\pi$	$0 \div 1/2\pi$
V	+	+	-	$3/2\pi \div 2\pi$	$3/2\pi \div 2\pi$
VI	-	+	-	$\pi \div 3/2\pi$	$\pi \div 3/2\pi$
VII	-	-	-	$1/2\pi \div \pi$	$\pi \div 3/2\pi$
VIII	+	-	-	$0 \div 1/2\pi$	$3/2\pi \div 2\pi$
Oktant	a_{21}	a_{22}	a_{23}	$\Delta\Theta_y^{yz}$	$\Delta\Theta_y^{xz}$
I	+	+	+	$3/2\pi \div 2\pi$	$0 \div 1/2\pi$
II	-	+	+	$3/2\pi \div 2\pi$	$3/2\pi \div 2\pi$
III	-	-	+	$\pi \div 3/2\pi$	$\pi \div 3/2\pi$
IV	+	-	+	$\pi \div 3/2\pi$	$1/2\pi \div \pi$
V	+	+	-	$0 \div 1/2\pi$	$0 \div 1/2\pi$
VI	-	+	-	$0 \div 1/2\pi$	$3/2\pi \div 2\pi$
VII	-	-	-	$1/2\pi \div \pi$	$\pi \div 3/2\pi$
VIII	+	-	-	$1/2\pi \div \pi$	$1/2\pi \div \pi$
Oktant	a_{31}	a_{32}	a_{33}	$\Delta\Theta_z^{xz}$	$\Delta\Theta_z^{yz}$
I	+	+	+	$3/2\pi \div 2\pi$	$0 \div 1/2\pi$
II	-	+	+	$0 \div 1/2\pi$	$0 \div 1/2\pi$
III	-	-	+	$0 \div 1/2\pi$	$3/2\pi \div 2\pi$
IV	+	-	+	$3/2\pi \div 2\pi$	$3/2\pi \div 2\pi$
V	+	+	-	$\pi \div 3/2\pi$	$1/2\pi \div \pi$
VI	-	+	-	$1/2\pi \div \pi$	$1/2\pi \div \pi$
VII	-	-	-	$1/2\pi \div \pi$	$\pi \div 3/2\pi$
VIII	+	-	-	$\pi \div 3/2\pi$	$\pi \div 3/2\pi$

Jeżeli wektor indukcji \mathbf{B} znajduje się w pozostałych oktantach układu prostokątnego, to jego składowym B_x , B_y , B_z należy nadać znaki zgodnie z tabl. 2.

Tablica 2

Algorytm nadawania znaków składowym wektora B w równaniu (8)

Oktant	B_x	B_y	B_z
I	+	+	+
II	-	+	+
III	-	-	+
IV	+	-	+
V	+	+	-
VI	-	+	-
VII	-	-	-
VIII	+	-	-

Zakładając, że wszystkie występujące w zależności (8) kąty $\Delta\Theta_k^{i,j} = 0$, otrzymuje się:

$$\begin{vmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{vmatrix} \quad (10)$$

Przy takim założeniu poszczególne elementy macierzy współczynników dążą w granicy do wartości 0 lub 1. Ten szczególny przypadek wartości elementów macierzy powoduje równość odpowiednich składowych wektora indukcyjności w obu układach współrzędnych:

$$\begin{aligned} B_x &\equiv B_x, \\ B_y &\equiv B_y, \\ B_z &\equiv B_z. \end{aligned} \quad (11)$$

Równość składowych dowodzi, że odpowiednie pary osi obydwu układów nachodzą na siebie powodując, że układ ukośnokątny jest równoważny prostokątnemu. Sytuacja ta zarazem stanowi jeden z dowodów na poprawność wyznaczenia zależności (8). Jest to przypadek idealnego wykonania głowicy, dla którego przetwornik opisany jest przez (7).

Ogólnie dla kątów $\Delta\Theta_k^{i,j} \neq 0$ równanie przetwarzania przetwornika posiada właściwości kierunkowe. Wstawiając zależność (5) i podobne wyrażenia dla torów y i z do (9) można zapisać:

$$\begin{aligned} B_x(t_i) &= kB(t_i)(a_{11} \cos a + a_{12} \cos \beta + a_{13} \cos \gamma), \\ B_y(t_i) &= kB(t_i)(a_{21} \cos a + a_{22} \cos \beta + a_{23} \cos \gamma), \\ B_z(t_i) &= kB(t_i)(a_{31} \cos a + a_{32} \cos \beta + a_{33} \cos \gamma). \end{aligned} \quad (12)$$

Znaki współczynników w równaniu (12) należy ustalić zgodnie z zasadą przyjętą w tabl. 1 dla konkretnej kombinacji kątów $\Delta\Theta_k^{i,j}$. Wstawiając $B_x(t_i)$, $B_y(t_i)$ i $B_z(t_i)$ do (6) i uwzględniając (1) otrzymuje się równanie przetwornika z rzeczywistą głowicą pomiarową:

$$B'_{wy}(t_i) = kB(t_i) \cdot \sqrt{\frac{\cos^2 a (a_{11}^2 + a_{21}^2 + a_{31}^2) + \cos^2 \beta (a_{12}^2 + a_{22}^2 + a_{32}^2) + (1 - \cos^2 a - \cos^2 \beta)(a_{13}^2 + a_{23}^2 + a_{33}^2) + 2 \cos a \cos \beta (a_{11}a_{12} + a_{21}a_{22} + a_{31}a_{32}) + 2 \cos a \sqrt{1 - \cos^2 a - \cos^2 \beta} (a_{11}a_{13} + a_{21}a_{23} + a_{31}a_{32}) + 2 \cos \beta \cdot \sqrt{1 - \cos^2 a - \cos^2 \beta} (a_{12}a_{13} + a_{22}a_{23} + a_{32}a_{33})}{k^2 B^2(t_i)}} \quad (13)$$

Wyrażenie (13) jest również prawdziwe dla innych przetworników trójosiowych, działających przy użyciu powyższego algorytmu przetwarzania i służących do pomiarów wielkości kierunkowych. W przypadku konkretnego detektora należy jedynie ustalić wartość stałej k .

3. BŁĄD SKŁADOWY TRÓJOSIOWEJ GŁOWICY POMIAROWEJ

Na podstawie równań przetwarzania przetwornika z rzeczywistą głowicą pomiarową (13) oraz z głowicą idealną (7) można wyznaczyć zależność na błąd składowy przetwornika, spowodowany brakiem ortogonalności detektorów w głowicy:

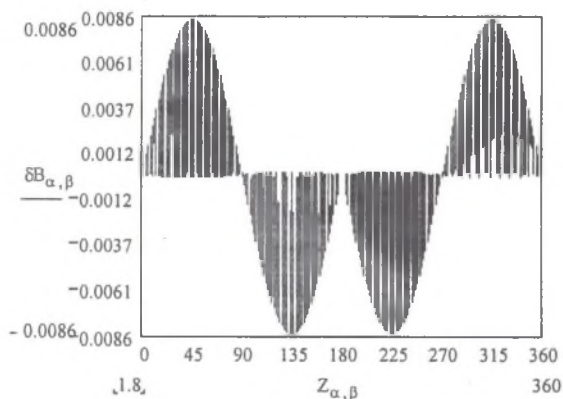
$$\delta B(t_i) = \frac{B'_{wy}(t_i) - B_{wy}(t_i)}{B_{wy}(t_i)}, \quad (14)$$

czyli:

$$\delta B(t_i) = \sqrt{\frac{\cos^2 a (a_{11}^2 + a_{21}^2 + a_{31}^2) + \cos^2 \beta (a_{12}^2 + a_{22}^2 + a_{32}^2) + (1 - \cos^2 a - \cos^2 \beta)(a_{13}^2 + a_{23}^2 + a_{33}^2) + 2 \cos a \cos \beta (a_{11}a_{12} + a_{21}a_{22} + a_{31}a_{32}) + 2 \cos a \sqrt{1 - \cos^2 a - \cos^2 \beta} (a_{11}a_{13} + a_{21}a_{23} + a_{31}a_{32}) + 2 \cos \beta \sqrt{1 - \cos^2 a - \cos^2 \beta} (a_{12}a_{13} + a_{22}a_{23} + a_{32}a_{33})}{k^2 B^2(t_i)}} - 1. \quad (15)$$

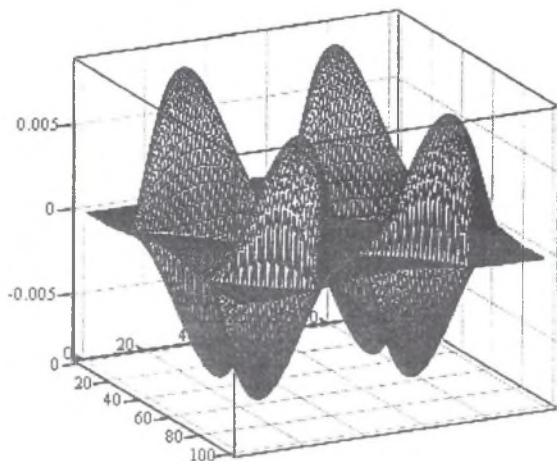
W celu oszacowania wartości błędu przyjęto przedział zmian kątów $\Delta\Theta_k^{i,j} = \pm(0 \div 3)$. Przyjęty przedział kątów wybrano arbitralnie zakładając, że w praktyce głowica zostanie wykonana znacznie dokładniej. W wyniku obliczeń przeprowadzonych za pomocą programu MATHCAD określono maksymalny błąd $\delta B(t_i)$, jaki jest możliwy dla kombinacji kątów $\Delta\Theta_k^{i,j}$ znajdujących się w przyjętym przedziale.

Przykładowy wykres zmian błędu w funkcji kątów α i β zmieniających się w przedziale od 0° do 360° przedstawiają rys. 4 i rys. 5. Dla tego przypadku ustalono następujące wartości kątów $\Delta\Theta_k^{i,j}$: $\Delta\Theta_x^{xy} = 1^\circ$, $\Delta\Theta_x^{xz} = 1^\circ$, $\Delta\Theta_y^{yz} = 1^\circ$, $\Delta\Theta_y^{xy} = 1^\circ$, $\Delta\Theta_z^{xz} = 1^\circ$, $\Delta\Theta_z^{yz} = 1^\circ$.



Rys. 4. Zależność błędu $\delta B(t_i)$ od zmian kątów α i β w przedziale $0^\circ \div 360^\circ$
 Fig. 4. Error $\delta B(t_i)$ vs. angles α and β within range from 0° to 360°

Na rys. 4 widoczne są wyraźnie pewne nieciągłości, które wynikają z niedozwolonych kombinacji kątów α i β . Wartości maksymalna i minimalna błędów dla tego przypadku wynoszą: $\delta B_{\max}(t_i) = 8,37 \times 10^{-3}$, $\delta B_{\min}(t_i) = -8,44 \times 10^{-3}$.



Rys. 5. Zależność błędów $\delta B(t_i)$ od zmian kątów α i β w przedziale $0^\circ \div 360^\circ$
 Fig. 5. Error $\delta B(t_i)$ vs. angles α and β within range from 0° to 360°

Możliwość wystąpienia maksymalnego błędów, który wynosi $\delta B_{\max}(t_i) = \pm 0,088$, jest prawdopodobna dla kątów: $\Delta \theta_x^{xy} = \mp 3^\circ$, $\Delta \theta_x^{zx} = \pm 3^\circ$, $\Delta \theta_y^{yz} = \mp 3^\circ$, $\Delta \theta_y^{xy} = \pm 3^\circ$, $\Delta \theta_z^{zx} = \mp 3^\circ$, $\Delta \theta_z^{yz} = \pm 3^\circ$.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przedstawiona w pracy analiza rzeczywistego modelu głowicy trójosiowej dotyczy jedynie nieidealnego, wzajemnego usytuowania przetworników pomiarowych. Dla konkretnej sytuacji należy również uwzględnić wpływ rzeczywistych wymiarów detektora na wynik pomiaru. Z przeprowadzonych rozważań wynika, że wyznaczony błąd składowy jest znaczący w analizie błędu toru pomiarowego i na etapie obecnych wiadomości można stwierdzić, że będzie on wносił największą składową. Wykorzystany do analizy przedział zmian kątów $\Delta\Theta_k^{i,j}$ został wybrany z dużym zapasem, ponieważ obecne technologie umożliwiają wykonanie głowicy trójosiowej na znacznie wyższym poziomie dokładności.

LITERATURA

1. Gonscz D.: Badania czujnika indukcji magnetycznej o bezkierunkowej charakterystyce. Mat. konf. „Podstawowe Problemy Metrologii”, Pol. Śląska, Gliwice-Ustroń, 2001, str. 441+452.
2. Skubis T., Gonscz D.: Bezkierunkowy przetwornik indukcji pola magnetycznego. Mat. konf. „Krajowe Sympozjum nt. Pomiarów Magnetycznych 2000”, Pol. Świętokrzyska, Kielce, 2000, str. 324+333.
3. Skubis T., Gonscz D.: Undirected response transducer of magnetic field induction. Proceeding of SPIE, USA, 2001, str. 99+105.
4. Karaśkiewicz E.: Zarys teorii wektorów i tensorów. PWN, Warszawa 1971.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Adam Żuchowski

Wpłynęło do Redakcji dnia 1 grudnia 2001

Abstract

The paper deals with the three-axis transducer for magnetic induction measurement. The measuring head of the transducer is built of three mutually perpendicular coils, separately led (Fig. 1). Ideal construction of the measuring head eliminates directional dependency of the transducer (1). The block diagram and the algorithm concept for the measurement of the transducer with three-axis measuring head are shown (Fig. 2). Instantaneous values of electromotive forces of coils are synchronically sampled and converted according to the algorithm. The mathematical analysis of the non-ideal three-axis measuring head is presented (§2). For the analysis two coordinate system is used (Fig. 3). Mutual relation of the coordinate systems is presented (8). The process equation of the transducer with the non-ideal three-axis measuring head is shown (13). The component error caused by the non-perpendicular detectors of the head is analyzed (§2). The overall transducer error is determined for non-ideal construction of measuring head.