Bogusław KASPERCZYK, Józef KWICZALA Instytut Metrologii i Automatyki Elektrotechnicznej Politechnika Śląska

BŁĘDY W POMIARACH ELEKTROMAGNETYCZNYM PRZETWORNIKIEM GRUBOŚCI POWŁOKI

Streszczenie. Elektromagnetyczny przetwornik grubości powłoki o symetrii osiowej jest stosowany w pomiarach grubości powłok nieferromagnetycznych, przewodzących lub nieprzewodzących, pokrywających podłoża ferromagnetyczne. Niezgodność wartości grubości powłoki wskazywanej przez warstwomierz z jej rzeczywistą grubością może wynikać z różnic wartości wielkości wpływających w procesie wzorcowania i pomiaru. W artykule przedstawiono sposób obliczenia błędu pomiaru grubości, wykorzystujący odwrotną funkcję przetwarzania numerycznego modelu przetwornika. Zaproponowano sposób uwzględnienia tego błędu w analizie niepewności pomiaru warstwomierzem. Wyniki analiz numerycznych porównano z wynikami pomiarów, wykazując ich zbieżność.

ERRORS IN MEASUREMENTS WITH A COATINGS THICKNESS ELECTROMAGNETIC TRANSDUCER

Summary. The paper deals with a coating thickness electromagnetic transducer of axial symmetry. A measured object is a ferromagnetic base covered with conducting or non-conducting, non-ferromagnetic coating of small tkickness. Differences can appear between the coating thickness values real and reading. The method for numerical computing the error of coating thickness measurements using the transducer inverse function is presented in the paper. These is also suggested the way of including this error in the analysis of the uncertainty of measurements with the coating thickness transducer. The results of numerical computation are compared with these obtained from measurements. They are close to each other.

1. WSTĘP

Elektromagnetyczny przetwornik grubości powłoki o symetrii osiowej jest stosowany w pomiarach grubości przewodzących lub nieprzewodzących powłok nieferromagnetycznych, pokrywających ferromagnetyczne podłoża [1]. Składa się z dwuuzwojeniowej cewki o symetrii osiowej nawiniętej na ferromagnetycznym trzpieniu walcowym (rys. 1). Magnetowód z dwoma szczelinami tworzą: trzpień, osłona i ferromagnetyczne podłoże. Robocza końcówka trzpienia styka się z powierzchnią powłoki, która stanowi jedną ze szczelin w obwodzie magnetycznym. Druga szczelina, w skład której wchodzi warstwa powietrza i badana powłoka, występuje pomiędzy pierścieniową osłoną a ferromagnetycznym podłożem.



- Rys. 1. Szkic przekroju osiowosymetrycznego modelu elektromagnetycznego przetwornika grubości powłoki
- Fig. 1. Axial-symmetrical cross-section of the coating thickness electromagnetic transducer model

Zewnętrzne monoharmoniczne źródło prądowe wywołuje w uzwojeniu zasilającym przepływ prądu przemiennego o stałej amplitudzie *I* oraz stałej wartości częstotliwości *f* z zakresu (80÷90) Hz. Napięcie *U* indukowane w uzwojeniu pomiarowym i mierzone na jego zaciskach jest zależne od rozkładu indukcji magnetycznej w ferromagnetycznym trzpieniu i liczby zwojów uzwojenia pomiarowego. Jest ono funkcją wielu niezależnych zmiennych – mezurandu d_{pw} (grubości powłoki) i wielkości wpływających:

$$U = f_{\rm p} (d_{\rm pw}, d_{\rm pd}, r_{\rm k}, y_k, \mu_{\rm prz}, \mu_{\rm pd}, \gamma_{\rm prz}, \gamma_{\rm pd}, \gamma_{\rm pw}, f, I, z_{\rm z}, z_{\rm p}),$$
(1)

gdzie:

U i I – oznaczają odpowiednio wartość skuteczną napięcia i prądu, d_{pd} - oznacza grubość podłoża, r_{k} , y_k - rozmiary przekroju przetwornika oraz badanego obiektu, μ_{prz} , γ_{prz} , γ_{pw} , μ_{pd} , γ_{pd} - przenikalności magnetyczne względne i przewodności elektryczne materiałów konstrukcyjnych odpowiednio przetwornika, badanego obiektu (powłoki) i podłoża oraz z_z , z_p - liczby zwojów uzwojeń zasilającego i pomiarowego.

W przyjętym liniowym, osiowosymetrycznym modelu numerycznym elektromagnetycznego przetwornika grubości powłoki [2], rozkład indukcji magnetycznej w trzpieniu przetwornika, niezbędny do wyznaczenia strumienia magnetycznego i napięcia *U*, można obliczyć numerycznie [3]. Wykorzystuje się w tym celu opracowane pliki obliczeniowe do programu ANSYS/Emag [4]. W modelu uwzględniono wszystkie wielkości wpływające wymienione w zależności (1). Opracowany model numeryczny jest więc narzędziem, umożliwiającym analizowanie właściwości metrologicznych przetwornika grubości powłoki.

2. PROCEDURA POMIARU GRUBOŚCI POWŁOKI PRZETWORNIKIEM GRUBOŚCI

Pomiar grubości powłoki wykonywany warstwomierzem z elektromagnetycznym przetwornikiem grubości powłoki jest dwuetapowy. W pierwszej kolejności wzorcuje się przyrząd na określonym podłożu dla znanych grubości powłok, a następnie mierzy nieznaną grubość powłoki.



Rys. 2. Schemat funkcjonalny warstwomierza z elektromagnetycznym przetwornikiem grubości powłoki Fig. 2. Blok diagram of thickness gauge with coating thickness electromagnetic transducer

W obydwu etapach wejściowy sygnał pomiarowy (d_{pw}) ulega w elektromagnetycznym przetworniku grubości przetworzeniu na napięcie *U*, a następnie odtworzeniu (d_{pw}^{0}) w układzie elektronicznym warstwomierza (rys. 2). Wzorcowanie umożliwia ustalenie i zapamiętanie w układzie wzorcująco-pamiętającym charakterystyki odtwarzania. Charakterystyka ta jest wrażliwa na wszystkie wielkości wpływające wymienione w zależności (1). Odtwarzanie wymaga więc zapisania odwrotnego modelu przetwornika. Celem odtwarzania jest uzyskanie równości wartości grubości powłoki wskazywanej (d_{mw}^{0}) i mierzonej (d_{pw}) .

3. BŁĄD WYZNACZANIA GRUBOŚCI POWŁOKI

W rzeczywistych pomiarach trudno zapewnić warunek równości wartości wszystkich wielkości wpływających w etapach wzorcowania i pomiaru. Wynikiem tego są różnice charakterystyk przetwarzania przetwornika w warunkach wzorcowania $f_{po}(d_{pw})$ i pomiaru $f_{p1}(d_{pw})$ (rys. 3).

Skutkuje to różnicą w wartościach grubości powłoki wskazywanej $\begin{pmatrix} d_{pw}^{0} \end{pmatrix}$ i mierzonej $\begin{pmatrix} d_{pw} \end{pmatrix}$, spowodowaną niezgodnością charakterystyki przetwarzania przetwornika w warunkach pomiaru i charakterystyki odtwarzania zapamiętanej przy wzorcowaniu:

$$d_{\rm pw} \neq f_{\rm p0}^{(-1)} [f_{\rm p1}(d_{\rm pw})] = d_{\rm pw}^{0} , \qquad (2)$$

gdzie:

- "0" w indeksie górnym wielkości d_{pw}^0 oznacza, że jest to wskazywana wartość grubości powłoki, uzyskana w procesie odtwarzania,
- "-1" w indeksie górnym funkcji symbolizuje funkcję odwrotną (odtwarzania),
- 0 i 1 w indeksie dolnym symbolu funkcji identyfikuje układ wartości wielkości wpływających w procesie wzorcowania "0" i pomiaru "1".



Rys. 3. Graficzna prezentacja układu dwóch charakterystyk przetwarzania modelu przetwornika Fig. 3. Diagram of configuration two conversion functions of the model of transducer

Przykładowo, rzadko udaje się wywzorcować warstwomierz na tym samym podłożu, na którym znajduje się badana powłoka. Jeżeli w takim przypadku podłoże w procesie wzorcowania różni się od podłoża badanego obiektu: grubością, przenikalnością magnetyczną lub przewodnością elektryczną, to powoduje to błąd pomiaru.

Niezależnie od rodzaju wielkości wpływającej, której wartości różnią się w warunkach wzorcowania i pomiaru, błąd ten można zapisać w postaci:

$$\Delta d_{\rm pw} = d_{\rm pw}^0 - d_{\rm pw} \,. \tag{3}$$

Do analizy oddziaływania wielkości wpływających na błąd pomiaru wykorzystano opracowany model numeryczny przetwornika [2]. Umożliwia on wyznaczenie dyskretnych postaci funkcji przetwarzania dla numerycznego modelu przetwornika, przy uwzględnieniu wybranych grubości powłok (d_{pwj}) i ustalonych wartości (x) wielkości wpływających. W uproszczonej formie funkcję tę można zapisać jako:

$$U_{jx} = f_{px}^{n} \left(d_{pwj} \right), \tag{4}$$

gdzie:

 U_{jx} – są wynikami obliczeń wartości skutecznej napięcia na zaciskach uzwojenia pomiarowego dla wybranych grubości powłok d_{pwj} , x – w indeksie dolnym symbolu funkcji identyfikuje układ wartości wielkości wpływających, natomiast "n" w indeksie górnym oznacza, że jest to funkcja o skończonej liczbie argumentów.

Ponieważ odtwarzanie wymaga zapisania odwrotnego matematycznego modelu przetwornika, więc wykorzystując obliczone wartości funkcji przetwarzania (4), można dyskretną postać funkcji odtwarzania przetwornika przedstawić w postaci:

$$d_{\rm pwj}^{0} = f_{\rm px}^{n(-1)}(U_{\rm jx}).$$
⁽⁵⁾

Ciągłym przybliżeniem funkcji (5) w postaci funkcji aproksymującej jest funkcja:

$$d_{\rm pw}^{0} = f_{\rm px}^{a(-1)}(U_{\rm x}).$$
(6)

obliczona numerycznie poprzez zastosowanie regresji nieliniowej. W pracy zaproponowano aproksymację dyskretnej postaci funkcji odtwarzania wielomianem ntego stopnia. Został on z wymaganą dokładnością wyliczony poleceniami programu MATHEMATICA [5]. Wyniki przykładowych obliczeń aproksymacji dyskretnej charakterystyki (dtwarzania w modelu przetwornika, dla wybranych grubości powłok (5, 10, 15, 30, 50, 100, 30, 600) µm i zadanych wartości wielkości wpływających, przedstawiono w postaci wykresu narysunku 4.



- Rys. 4. Dyskretna charakterystyka odtwarzania i jej ciągłe przybliżenie obliczone poprzez aproksymację
- Fig. 4. Diagram of discrete form of conversion function and computing its continuous approximation form

W pracy przyjęto, że błąd względny wyznaczenia grubości powłoki zdefiniowany w zależności (7)

$$\delta d_{\rm pwj} = \frac{f_{\rm p0}^{\rm a(-1)} \left[f_{\rm p1}^{\rm n} \left(d_{\rm pwj} \right) \right]}{d_{\rm pwj}} - 1, \tag{7}$$

posłuży do oceny oddziaływania wielkości wpływających na funkcję przetwarzania przetwornika w numerycznym modelu elektromagnetycznego przetwornika grubości powłoki. Interpretację graficzną obliczenia błędu przedstawiono na rysunku 5.

Procedura obliczania błędu względnego wyznaczania grubości powłoki wymaga wykonania kilku kolejnych obliczeń:

- dyskretnej postaci charakterystyki przetwarzania $f_{p0}^n(d_{pwj})$ przetwornika grubości powłoki, dla wartości wielkości wpływających uznanych za warunki odniesienia (charakterystyki przetwarzania w warunkach wzorcowania);
- odpowiadającej jej odwrotnej charakterystyki przetwarzania $f_{p0}^{a(-1)}(U_0)$ w postaci ciągłej (aproksymacja nieliniowa);



- Rys. 5. Graficzna prezentacja definicji błędu wyznaczenia grubości powłoki, powstałego w procesie kolejno przetwarzania i odtwarzania w modelu przetwornika grubości powłoki
- Fig. 5. Diagram of coating thickness error in coating thickness transducer model as result in tern of processing and reproduction
 - dyskretnej postaci charakterystyki przetwarzania $f_{px}^{n}(d_{pwj})$ przetwornika grubości powłoki dla takich wartości wielkości wpływających, wśród których co najmniej jedna różniła się od wartości uznanej za wartość odniesienia;
 - dyskretnych wartości błędów wyznaczenia grubości powłoki δd_{pwj}, wykorzystując zależność (7).

4. WYNIKI OBLICZEŃ BŁĘDÓW WYZNACZANIA GRUBOŚCI POWŁOKI I ICH WERYFIKACJA

Wybrane i przedstawione wyniki badań dotyczą oddziaływania wielkości wpływających, charakteryzujących obiekt badań.

Obliczenia oddziaływania różnych grubości podłoża (w warunkach wzorcowania i pomiaru) na błąd wyznaczania grubości powłoki w modelu przetwornika przeprowadzono dla następujących grubości podłoży: (0,5; 1,5; 2; 3; 5) mm. Podłoże o grubości 1 mm uznano za podłoże wzorcowe i przyporządkowano mu funkcję przetwarzania w warunkach wzorcowania. Pozostałe wartości wielkości wpływających były niezmienne. Ze względu na zagęszczenie punktów obliczeniowych w zakresie grubości powłoki (5 ÷100) µm przyjęto podziałkę półlogarytmiczną. Wyniki w postaci wykresu zestawiono na rysunku 6.

Wartości wielkości wpływających uwzględnione w modelu numerycznym odpowiadały właściwościom materiałów zastosowanych w konstrukcji elektromagnetycznego przetwornika grubości powłoki typu Ultrametr A91 i rzeczywistego obiektu badań. Zakresy wartości tych wielkości zawiera tabela 1. Charakterystyki magnesowania materiałów konstrukcyjnych przetwornika i podłoży ferromagnetycznych stosowanych w eksperymentach wyznaczono ferrometrycznym systemem pomiarowym [5].

Obszerne wyniki obliczeń oddziaływania różnych wielkości wpływających na błąd względny wyznaczenia grubości powłoki przedstawiono w publikacji [2].



- Rys. 6. Wykresy błędów względnych wyznaczenia grubości powłoki, obliczonych dla modelu przetwornika, spowodowanych różnymi grubościami podłoży w warunkach wzorcowania i pomiaru
- Fig. 6. Diagram of coating thickness relative errors in transducer model, as result of different substrate thicknesses in calibration and measurement have been taken into evaluation

Tabela 1

Wielkość wpływająca	Oznaczenie wielkości	Jedn.	Dopuszczalne wartości wielkości wpływającej
Grubość podłoża	h_1	mm	0,5÷5
Grubość powłoki	h ₂	μm	0÷600
Przenikalność magnetyczna względna materiału podłoża	$\mu_{ m rpd}$		1+60 000
Przenikalność magnetyczna względna materiału przetwornika	$\mu_{ m rcz}$		1÷60 000
Rezystywność materiału powłoki	$ ho_{\rm pw}$	Ω∙m	10 ⁻⁸ ÷∞
Rezystywność materiału podłoża	$ ho_{ m pd}$	Ω+m	$1,5 \cdot 10^{-7} \div 10^{8}$
Rezystywność materiału przetwornika	$ ho_{cz}$	Ω·m	$1,5 \cdot 10^{-7} \div 10^{8}$
Gęstość prądu zasilającego	J	mA/mm ²	$(1 \div 3) \cdot 10^2$
Częstotliwość prądu zasilającego	f	Hz	70÷90

Zakresy wartości wielkości wpływających, uwzględnione w analizach numerycznych

Przedstawioną koncepcję badania oddziaływania wielkości wpływających na model elektromagnetycznego przetwornika grubości, poprzez obliczanie błędu względnego wyznaczenia grubości powłoki zweryfikowano, wykonując pomiary i odpowiadające im obliczenia. Przykładowe wyniki przedstawiono na rysunku 7. Dla warunków wzorcowania i pomiaru wykonano obliczenia i pomiary wpływu różnych grubości podłoży na błąd wyznaczenia grubości powłoki. Grubość podłoża równą 0,92 mm uznano za grubość odpowiadającą warunkom wzorcowania.



- Rys. 7. Wykresy porównania błędów względnych grubości powłoki w pomiarach przetwornikiem typu A-91 i obliczonych dla odpowiadającego mu modelu (linia przerywana), spowodowanych odmiennymi grubościami podłoży w warunkach wzorcowania i pomiaru
- Fig. 7. Comparative diagram of coating thickness relative error in real type A 91 transducer and its model, as result of different substrat thicknesses in calibration and measurement have been taken into evaluation

W pomiarach wykorzystano wzorce grubości powłoki wykonane z tworzyw sztucznych.

5. BŁĄD WYZNACZANIA GRUBOŚCI POWŁOKI JAKO ELEMENT ANALIZY DOKŁADNOŚCI POMIARÓW

Pełna procedura pomiaru grubości powłoki obejmuje wzorcowanie przyrządu zgodnie z instrukcją obsługi oraz pomiary w wybranych punktach obiektu badań.. Można wskazać trzy istotne czynniki, wpływające na niepewność złożoną wyniku pomiaru grubości powłoki:

- rozrzut poszczególnych wyników pomiarów w serii, wynikający z różnych grubości powłoki w miejscach przyłożenia końcówki przetwornika, mających charakter przypadkowy i niezależny;
- dokładności warstwomierza i wzorców;
- niezgodność wartości wielkości wpływających w warunkach wzorcowania i pomiaru.

Jeżeli materiały wzorca i obiektu badań różnią się, a ich właściwości fizyczne są dokładnie znane, wtedy obliczone błędy wyznaczenia grubości powłoki δd_{pw} należy uznać za

błędy systematyczne i uwzględnić jako poprawki w wyniku pomiaru (średniej z serii wyników). Najczęściej jednak właściwości fizyczne wzorca i obiektu badań są znane z niepewnościami pomiarów ich wyznaczenia lub są określone w specyfikacji technicznej w formie tolerancji. Przykładowo, grubości blach stalowych, z których wykonane są podłoża wzorca i obiekt badań, mogą różnić się w zakresie tolerancji określonej przez producenta. W takich przypadkach należy, zgodnie z procedurą opisaną w p.3, obliczyć błąd wyznaczenia grubości powłoki δd_{pw} , spowodowany łącznym oddziaływaniem różnic wartości wielkości

wpływających, charakteryzujących wzorzec i obiekt badań (np.: $\mu(H)$, d_{pd} ,). Opracowane przez autora oprogramowanie obliczeniowe umożliwia przy obliczaniu błędu uwzględnienie równocześnie kilku wielkości wpływających. Przyjmując w obliczeniach maksymalnie dopuszczalne różnice wartości wielkości wpływającej, otrzymamy błąd, który uznajemy za błąd graniczny Δ_m

$$\Delta_{\rm m} = \pm \delta d_{\rm pw} \cdot \overline{d}_{pw}^{o} \,. \tag{8}$$

Technologia produkcji blach stalowych umożliwia przyjęcie założenia, że dla niewielkich obiektów badań błąd wynikający z różnic właściwości materiałów ma rozkład jednostajny. Oznacza to, że z jednakowym prawdopodobieństwem przyjmuje wartości z przedziału błędu granicznego Δ_m . Niepewność standardową zapisujemy wtedy:

$$u_{\rm m} = \frac{\left|\Delta_{\rm m}\right|}{\sqrt{3}},\tag{9}$$

lub w postaci niepewności standardowej względnej:

$$u_{\rm m,rel} = \frac{\left|\Delta_{\rm m}\right|}{\sqrt{3d_{\rm pw}}}.$$
(10)

6. PODSUMOWANIE

Zastosowany model numeryczny elektromagnetycznego przetwornika grubości powłoki w układzie z badanym obiektem jest przydatnym narzędziem do badania oddziaływania wybranych wielkości wpływających na charakterystykę przetwarzania tego przetwornika. Skutkiem tego oddziaływania może być niezgodność wartości grubości powłoki wskazywanej przez warstwomierz z elektromagnetycznym przetwornikiem grubości i przez niego mierzonej. Jest ona spowodowana różnicami wartości wielkości wpływających w warunkach wzorcowania i pomiaru. Za miarę tej niezgodności uznano błąd wyznaczenia grubości powłoki δd_{pw} . Zaproponowano procedurę obliczenia tego błędu. Jej realizacja wymaga wcześniejszego

ustalenia charakterystyk przetwarzania i odtwarzania przetwornika. Dyskretną postać charakterystyki przetwarzania uzyskano na drodze obliczeń numerycznych, stosując opracowane pliki wsadowe do programu ANSYS. Niezbędną w procedurze obliczeniowej ciągłą charakterystykę odtwarzania wyznaczono aproksymując wielomianem jej znaną dyskretną postać.

W artykule przedstawiono sposób uwzględnienia w analizie niepewności pomiaru grubości powłok, błędu wyznaczenia grubości powłoki δd_{pw} , spowodowanego oddziaływaniem wielkości wpływających. Zaproponowano, aby w określonych warunkach błąd ten uznać za błąd graniczny.

Koncepcję badania oddziaływania wielkości wpływających na model elektromagnetycznego przetwornika grubości, poprzez obliczanie błędu względnego wyznaczenia grubości powłoki, zweryfikowano wykonując pomiary i odpowiadające im obliczenia. Przykładowe wyniki przedstawiono na rysunku 7.

Literatura

- 1. Instruments for coating thickness measurement and material testing. Katalog firmy Helmut Fischer, Sindelfingenn 2002.
- 2. Kasperczyk B.: Pomiar grubości wybranych powłok. Rozprawa doktorska, Gliwice 2004.
- 3. Bolkowski S. i inni: Komputerowe metody analizy pola elektromagnetycznego. WNT, Warszawa 1993.
- 4. ANSYS Analysis Guides. First Edition. SAS IP, Inc.©.
- 5. Drwal G., i inni: *MATEMATICA dla każdego*. Wydaw. Pracowni Komputerowej Jacka Skalmierskiego, Gliwice 1996.
- 6. Kwiczala J., Kasperczyk B.: *Ferrometryczny system pomiarowy*. Materiały Międzynarodowej Konferencji "Metrologia wspomagana komputerowo". Waplewo 2003.

Recenzent: Dr hab. inż. Adam Kowalczyk, prof. Politechniki Rzeszowskiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 7 grudnia 2004

Abstract

The paper deals with a coating thickness electromagnetic transducer of axial symmetry with two coil windings. The transducer is used in nondestructive tests. A measured object is a ferromagnetic base covered with conducting or non-conducting, non-ferromagnetic coating of small thickness. A measured object is situated in the magnetic circuit gap. One of the coil windings is supplied from the constant frequency current source. The voltage induced in the other winding (a measuring one) is a multiparameter function of the coating thickness. The numerical model of the transducer is used for computing discrete and continuous forms of conversion functions of this transducer. The transducer is sensitive to different influencing quantities. It can result in differences between the coating thickness values ? real and reading The method for computing the error of coating thickness measurements using the transducer inverse function is presented in the paper. These is also suggested the way of including this error in the analysis of the uncertainty of measurements with the coating thickness transducer. The results of numerical computation are compared with these obtained from measurements. They are close to each other.