

DIAGNOSTYKA DOKŁADNOŚCI WSKAZAŃ MIKROPROCESOROWEGO WARSTWOMIERZA ELEKTROMAGNETYCZNEGO

Roman A. TABISZ

Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Metrologii i Systemów Diagnostycznych,
Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, tel.: 178651188
e-mail: rtabisz@prz.edu.pl

Streszczenie: Przedstawiono jeden z wariantów programu ćwiczenia laboratoryjnego, którego celem jest poznanie zasad diagnozowania dokładności wskazań mikroprocesorowego warstwomierza przeznaczonego do pomiaru grubości powłok niemagnetycznych naniesionych na podłoże magnetyczne. Prezentowany program ćwiczenia obejmuje takie zagadnienia jak: ustalenie warunków pomiaru, wykonanie pomiarów, wzorcowanie, wyznaczenie funkcji korekcyjnej oraz analizę otrzymanych wyników pomiarów i wzorcowań. W rezultacie wykonanych działań możliwe jest uzyskanie odpowiedzi na następujące pytania: Czy warstwomierz wskazuje z dokładnością zgodną z deklarowaną przez jego producenta? Czy można korzystać z funkcji przetwarzania, którą przygotował producent? Czy warto wyznaczyć funkcję korekcyjną? Zaprezentowano przykładowe wyniki pomiarów i wzorcowań uzyskane podczas realizacji poszczególnych etapów ćwiczenia oraz wnioski wyciągnięte na podstawie tych wyników.

Słowa kluczowe: warstwomierz elektromagnetyczny, ocena dokładności, ćwiczenie laboratoryjne.

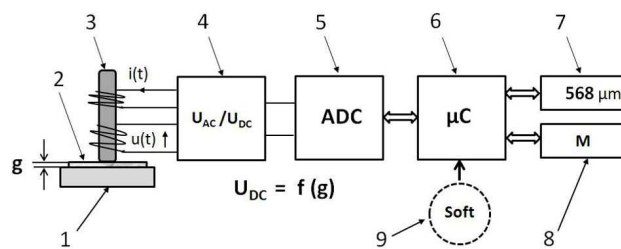
1. WPROWADZENIE

Do pomiarów grubości powłok niemagnetycznych na podłożach magnetycznych stosuje się między innymi warstwomierze elektromagnetyczne. Są to wygodne w użyciu przenośne przyrządy pomiarowe, których dokładność wskazań ma istotne znaczenie w wielu zastosowaniach przemysłowych, takich na przykład jak, pomiary grubości powłok lakierniczych naniesionych na karoserie samochodów lub na rurociągi, którymi transportowane są różnego rodzaju media. Specyfika pomiarów grubości warstw antykorozyjnych i zabezpieczających [1, 2], zasada działania [3, 4] oraz jakość wykonania warstwomierzy elektromagnetycznych powodują to, że na wyniki pomiarów grubości ma wpływ wiele czynników [3]. Dlatego też, poznanie zasad metrologicznego nadzorowania tego rodzaju przyrządów pomiarowych powinno być włączone w program kształcenia inżynierów na różnych kierunkach technicznych. Na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej zagadnienie to zostało włączone do programu studiów na kierunku Elektronika i Telekomunikacja. Różne warianty ćwiczenia laboratoryjnego pt: „Diagnostyka dokładności wskazań mikroprocesorowego grubościomierza”, znajdują się

w programie ćwiczeń laboratoryjnych z takich przedmiotów jak: Przemysłowe Systemy Pomiarowo-Diagnostyczne oraz Diagnostyka i Niezawodność. Przedmioty te prowadzone są przez Katedrę Metrologii i Systemów Diagnostycznych.

1.1. Warstwomierze elektromagnetyczne

Warstwomierze elektromagnetyczne są najczęściej jednozakresowymi urządzeniami pomiarowymi wykonanymi w postaci układu elektronicznego zawierającego takie moduły elementarne jak: sonda pomiarowa, przetwornik pomiarowy, moduł kondycjonujący oraz mikrokontroler z osadzonym oprogramowaniem. Oprogramowanie spełnia funkcję sterowania procesem mierzenia oraz funkcję rekonstrukcji wartości wielkości mierzonej i jej ekspozycji na polu odczytowym. Wiele rodzajów warstwomierzy wyposażonych jest w pamięć umożliwiającą zapis uzyskanych wyników pomiarów oraz w interfejs pozwalający na akwizycję tych wyników za pomocą komputera PC. Na rys.1. przedstawiono ogólny schemat blokowy mikroprocesorowego warstwomierza elektromagnetycznego.



Rys. 1. Ogólny schemat blokowy mikroprocesorowego warstwomierza elektromagnetycznego.
g- mierzona grubość warstwy

- 1- podłoże magnetyczne,
- 2- warstwa niemagnetyczna
- 3- sonda pomiarowa
- 4- przetwornik pomiarowy $U_{DC} = f(g)$
- 5- przetwornik analogowo-cyfrowy
- 6- mikrokontroler pomiarowy
- 7- pole odczytowe (wyświetlacz wyników)
- 8- pamięć danych
- 9- oprogramowanie

Zmiany indukcji magnetycznej w sondzie pomiarowej warstwomierza elektromagnetycznego powodowane zmianami grubości warstwy niemagnetycznej nałożonej na magnetyczne podłoże są nieliniowe [3, 4]. Funkcja (1) reprezentująca zależność napięcia stałego na wyjściu przetwornika pomiarowego jest w związku z tym nieliniowa.

$$U_{DC} = f(g) \quad (1)$$

Konieczna linearyzacja tej funkcji realizowana jest we współczesnych warstwomierzach za pomocą odpowiednich algorytmów wbudowanych w oprogramowanie osadzone w pamięci układu mikrokontrolera. Problem kreowania i linearyzacji funkcji przetwarzania komplikuje dodatkowo to, że jej rzeczywista postać zależy od wielu czynników. Jednym z tych czynników jest przenikalność magnetyczna podłoża, na którym naniesiona jest warstwa, której grubość ma być mierzona. Wartość tej przenikalności najczęściej różni się od wartości, którą miało podłoże wykorzystywane do wzorcowania podczas produkcji warstwomierza. Z tego powodu warstwomierze wyposażone są w dwie opcje. Pierwsza opcja to pomiary warstwomierzem wyposażonym w funkcję przetwarzania przygotowaną przez producenta. Druga opcja to pomiary warstwomierzem wyposażonym we własną funkcję przetwarzania, przygotowaną przed rozpoczęciem pomiarów.

1.2. Dokładność wskazań warstwomierza

Dokładność wskazań przyrządu pomiarowego definiowana jest, jako jego zdolność do wskazywania wartości bliskiej prawdziwej wartości wielkości mierzonej [5]. W praktyce można przyjąć, że wartością prawdziwą jest znana wartość referencyjna reprezentowana przez wzorzec lub materiał odniesienia. Różnica pomiędzy wartością wskazaną a wartością referencyjną jest błędem pomiaru powstałym w wyniku oddziaływań systematycznych i losowych. Można to zapisać w postaci:

$$x_{wsk} - x_{ref} = \Delta = \Delta_s + \varepsilon \quad (2)$$

gdzie:

- x_{wsk} - wartość wskazana
- x_{ref} - wartość odniesienia
- Δ - błąd pomiaru
- Δ_s - błąd systematyczny
- ε - błąd losowy

Producenci przyrządów pomiarowych deklarują w specyfikacjach technicznych to, że wyniki pomiarów uzyskane za pomocą wytworzonego przez nich przyrządu spełniają warunek

$$|\Delta_{max}| = |(x_{wsk} - x_{ref})_{max}| \leq |BMD| \quad (3)$$

Deklaracja ta podawana jest w specyfikacji technicznej przyrządu pomiarowego w postaci liczbowych wartości wskaźników a , b , lub a , c , d . Wartości liczbowe tych wskaźników pozwalają wyliczyć za pomocą odpowiednich wyrażeń matematycznych, wartości błędów maksymalnych dopuszczalnych (BMD), [ang.: (MPE) *Maximum Permissible Error*]. Jeżeli producent podaje wskaźniki a , c i d to wyrażenie za pomocą, którego można obliczyć BMD dla każdej wartości wskazanej na polu odczytowym ma następującą postać:

$$|BMD| = a \cdot \frac{|X_{wsk}|}{100} + c \cdot |d| \quad (4)$$

gdzie: a - krotność lub część 1% wartości wskazanej
 c - mnożnik (liczba całkowita)
 d - rozdzielność pola odczytowego

Łatwo zauważyć, że obliczona za pomocą wyrażenia (4) wartość BMD , będzie liniowo wzrastać wraz ze wzrostem wartości wskazywanych przez warstwomierz.

W przemysłowych systemach zarządzania pomiarami przyjęto taką zasadę, że do pomiaru właściwości jakościowych wytwarzanych wyrobów oraz do kontroli procesów ich wytwarzania, mogą być zakwalifikowane tylko takie przyrządy pomiarowe, które spełniają nierówność (3). Dlatego jednym z ważnych działań w przemyśle jest weryfikacja deklaracji dokładności podanej przez producenta wyposażenia pomiarowego. W przypadku warstwomierzy elektromagnetycznych weryfikacja taka powinna być przeprowadzona dla obydwu możliwych opcji, w których może taki przyrząd pracować. Dla warstwomierza działającego z funkcją przetwarzania przygotowaną przez jego producenta i dla warstwomierza działającego z własną funkcją przetwarzania.

2. PROGRAM ĆWICZENIA LABORATORYJNEGO

Opisywany program ćwiczenia laboratoryjnego, składa się z następujących etapów:

- A - ustalenie warunków i obiektów diagnozowania
- B - pomiary powłok o nieznanach i znanych grubościach
 - B1 - z funkcją przetwarzania producenta
 - B2 - z własną funkcją przetwarzania
- C - wzorcowanie za pomocą powłok referencyjnych
- D - wyznaczenie funkcji korekcyjnej
- E - analiza uzyskanych wyników pomiarów i wzorcowań

Na rysunku 2 przedstawiony jest warstwomierz elektromagnetyczny A2002S, przygotowany do realizacji programu ćwiczenia laboratoryjnego.



Rys. 2. Widok warstwomierza oraz zestawów powłok mierzonych i referencyjnych przygotowanych do realizacji ćwiczenia

W etapie A ustalone są warunki pomiarów oraz obiekty które będą użyte do pomiarów i wzorcowania. Najważniejsze z nich to: temperatura w pomieszczeniu laboratorium, użyteczny zakres wartości które powinien wskazywać warstwomierz z dokładnością nie gorszą od dokładności deklarowanej przez jego producenta, powłoki

które będą mierzone oraz powłoki referencyjne. Należy ustalić także liczbę powtórzeń pomiarów wykonywanych dla każdej powłoki. W opisywanym wariancie ćwiczenia ustalono:

- mierzona będzie grubość powłok oznaczonych A, B, C,
- temperatura w pomieszczeniu laboratorium 23 (± 5) °C,
- użyteczny zakres wskazań 0-550 μm ,
- powłoki referencyjne o grubościach 99, 190 i 550 μm ,
- 10 powtórzeń pomiarów tej samej powłoki,
- wynik, jako średnia z 10 powtórzonych pomiarów,
- podane przez producenta wartości wskaźników deklarowanej dokładności warstwowierza:
 $a = 3\%$, $c = 1$, $d = 1 \mu\text{m}$.

W takich warunkach i dla tak wybranych obiektów wykonano pomiary i wzorcowania przewidziane dla kolejnych etapów ćwiczenia.

3. WYNIKI POMIARÓW I WZORCOWAŃ

W etapie B zrealizowano serię 10 powtarzanych pomiarów grubości dla każdej z mierzonych powłok A, B i C oraz dla powłoki referencyjnej reprezentującej grubość $g = 190 \mu\text{m}$. Na podstawie wyników pojedynczych pomiarów obliczono średnie wartości grubości. Pomiary te wykonano w sytuacji, gdy warstwowierz działał z funkcją przetwarzania przygotowaną przez producenta. Taką samą serię pomiarów wykonano także dla sytuacji w której warstwowierz działał z funkcją przetwarzania własną przygotowaną według procedury uwzględniającej trzy wartości referencyjne $g_{\text{ref-0}} = 0 \mu\text{m}$, $g_{\text{ref-2}} = 190 \mu\text{m}$, $g_{\text{ref-3}} = 550 \mu\text{m}$. W rezultacie uzyskano wyniki, które przedstawione są w tabeli 1.

Tabela.1. Obliczone średnie wartości grubości dla powłok A, B, C oraz powłoki referencyjnej $g_{\text{ref-2}} = 190 \mu\text{m}$

| powłoki | A | B | C | $g_{\text{ref-2}} 190 \mu\text{m}$ | Funkcja przetwarz. |
|---------------------|-------|-------|-------|------------------------------------|--------------------|
| $g_{1-\text{śred}}$ | 123,9 | 250,4 | 554,7 | 265,2 | producenta |
| $g_{2-\text{śred}}$ | 82,1 | 179,4 | 378,4 | 187,9 | własna |

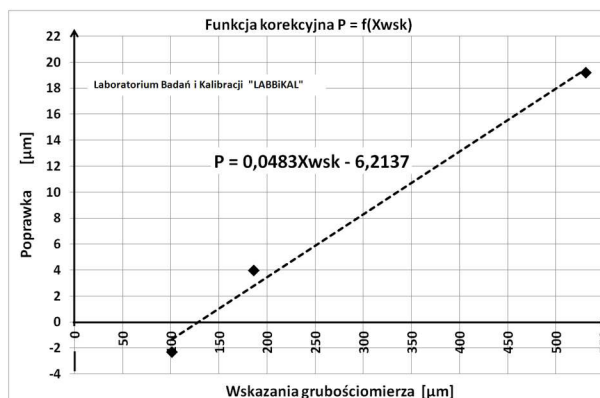
Korzystając z wyrażenia (4) obliczono wartość BMD dla wskazania 265,2 μm będącego wynikiem pomiarów powłoki referencyjnej $g_{\text{ref-2}} = 190 \mu\text{m}$, w sytuacji, gdy warstwowierz mierzył z funkcją przetwarzania producenta. Wartość ta wyniosła $BMD_1 = 9$, natomiast błąd pomiaru $\Delta = 265,2 - 190 = 75,2 \mu\text{m}$. Wynika stąd wniosek że nie można korzystać z funkcji przetwarzania przygotowanej przez producenta warstwowierza ponieważ błąd pomiaru jest dużo większy od wartości błędu maksymalnego dopuszczalnego. Te same obliczenia dla tej samej powłoki referencyjnej dla wskazania 187,9 μm uzyskanego w sytuacji gdy warstwowierz mierzył z własną funkcją przetwarzania, pozwoliły ustalić, że $BMD_2 = 6,6 \mu\text{m}$ a błąd pomiaru $\Delta = -2,1 \mu\text{m}$. Ponieważ błąd ten jest mniejszy od błędu maksymalnego dopuszczalnego i to 3 razy, można przyjąć że pomiary powinny być wykonywane w sytuacji gdy warstwowierz mierzy z własną funkcją przetwarzania. Po takim ustaleniu wykonano etap C ćwiczenia, czyli wzorcowanie (kalibrację) warstwowierza za pomocą powłok referencyjnych $g_{\text{ref-1}} = 99 \mu\text{m}$, $g_{\text{ref-2}} = 190 \mu\text{m}$, $g_{\text{ref-3}} = 550 \mu\text{m}$. Uzyskane wyniki wzorcowania w postaci wartości średnich obliczonych na podstawie 10 powtórzonych pomiarów przedstawione zostały w tabeli 2.

W ramach kolejnego etapu D, wykreślono funkcję korekcyjną korzystając z wyników przedstawionych w tabeli 2. Matematyczny model tej funkcji określono za

pomocą oprogramowania MS Excel 2007 korzystając z procedury pokaz linii trendu dla modelu liniowego. Wykres wyznaczonej funkcji korekcyjnej oraz jej matematyczna postać przedstawione są na rysunku 3.

Tabela.2. Uzyskane wyniki wzorcowania warstwowierza działającego z własną funkcją przetwarzania

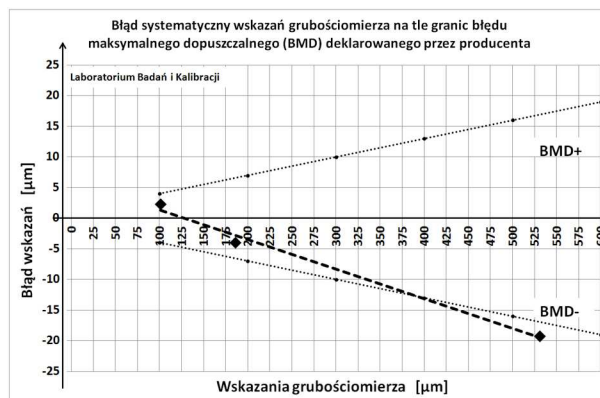
| Powłoki referen. | 99 μm | 190 μm | 550 μm | Funkcja przetwarzania |
|---------------------|------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| $g_{2-\text{śred}}$ | 101,3 | 186 | 530,80 | własna |
| Δ | 2,3 | -4,0 | -19,2 | własna |
| P | -2,3 | 4,0 | 19,20 | własna |



Rys. 3. Wykres wyznaczonej funkcji korekcyjnej $P = f(X_{\text{wsk}})$

Drugim rezultatem wzorcowania warstwowierza było ustalenie tego, czy wskazuje on z dokładnością nie gorszą od dokładności deklarowanej przez jego producenta. Producent deklaracji dokładności wskaźników warstwowierza podał w postaci współczynników: $a = 3\%$, $c = 1$, $d = 1 \mu\text{m}$. Dla średnich wartości wskaźników podanych tabeli 2 odnoszących się do mierzonych powłok referencyjnych 99, 190 i 550 μm , oraz dla podanych przez producenta wartości wskaźników a , c i d , zostały obliczone, za pomocą wyrażenia (4), błędy maksymalne dopuszczalne (BMD). Na rysunku 4. przedstawiono wykres błędów wskazań Δ na tle wykresu błędów BMD .

Z przedstawionych wykresów wynika, że w warunkach w których była diagnozowana dokładność wskaźników warstwowierza, dokładność jego wskaźników jest nie gorsza od dokładności deklarowanej przez producenta w zakresie wskazań zawartych w przedziale od 100-400 μm .



Rys. 4. Wykresy błędów wskazań Δ oraz błędów BMD obrazującego dokładność wskaźników deklarowaną przez producenta badanego warstwowierza

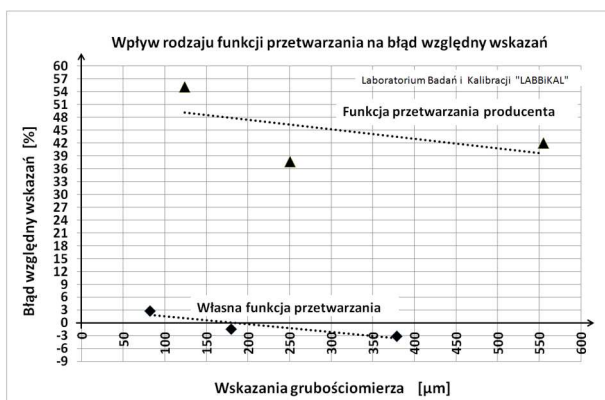
Ostatnim etapem-E, opisywanego programu ćwiczenia była analiza uzyskanych wyników pomiarów i wzorcowań. Celem tej analizy było ustalenie wartości względnego błędu pomiarów. W tym celu korzystając z wyznaczonej funkcji korekcyjnej przeprowadzono korektę wyników pomiarów uzyskanych dla powłok A, B i C w sytuacji, gdy warstwomierz mierzył z własną funkcją przetwarzania. Wyniki tej korekty przedstawione zostały w tabeli 3.

Tabela.3. Wyniki korekcy wskazań warstwomierza

| Powłoki | A μm | B μm | C μm | Funkcja przetwarzania |
|---------------|---------|---------|---------|-----------------------|
| $g_{2-śred}$ | 82,1 | 179,4 | 378,4 | własna |
| P^* | -2,2 | 2,4 | 12,1 | własna |
| $g_{2-popr.}$ | 79,9 | 181,8 | 390,5 | własna |

P^* - poprawka wyznaczona za pomocą funkcji korekcyjnej

Poprawione wartości wskazań warstwomierza ($g_{2-popr.}$), uznane zostały za najlepsze jakie można uzyskać dla powłok A, B, C w warunkach w których ćwiczenie było przeprowadzone.



Rys. 5. Błędy względne wskazań warstwomierza mierzącego z funkcją przetwarzania producenta i własną

Na rysunku 5 przedstawione są wyniki analizy dokładności wskazań warstwomierza w obydwu sytuacjach. W sytuacji gdy warstwomierz mierzył z funkcją przetwarzania przygotowaną przez producenta błąd względny jego wskazań w badanym przedziale 100–550 μm wynosił od 36–54 % . Takiej niedokładności nie można zaakceptować. W sytuacji gdy warstwomierz mierzył z funkcją przetwarzania własną, błąd względny jego wskazań w tym samym przedziale wartości był na poziomie ok. +/-3%. Dla tego rodzaju warstwomierzy

elektromagnetycznych taką niedokładność można już zaakceptować [1, 2].

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Uzyskane podczas realizacji ćwiczenia wyniki pomiarów i wzorcowań pozwalają wyciągnąć następujące wnioski:

a/ dla powłok naniesionych na podłoże użyte w ćwiczeniu nie można używać warstwomierza działającego z funkcją przetwarzania przygotowaną przez jego producenta, ponieważ błąd względny wskazań w takiej sytuacji będzie wynosił od 36-54%,

b/ warstwomierz działający z funkcją własną wskazuje z dokładnością nie gorszą od deklarowanej przez jego producenta w zakresie wskazań od 100 – 400 μm,

c/ korzyści wynikające z zastosowania wyznaczonej funkcji korekcyjnej można będzie ocenić dopiero po porównaniu wartości poprawionych $g_{2-popr.}$ zamieszczonych w tabeli.3. z wartościami grubości powłok A, B, C wyznaczonymi inną metodą. Na przykład metodą profilometryczną [7].

Opracowując program ćwiczenia przyjęto podejście „tradycyjno niepewnościowe” [6], preferowane przez autora jako rezultat długoletniego doświadczenia w dziedzinie metrologii przemysłowej. Podejście to nie jest sprzeczne z zaleceniami międzynarodowego słownika metrologicznego [5].

5. BIBLIOGRAFIA

1. PN-EN ISO 2178:1998 Powłoki niemagnetyczne na podłożu magnetycznym-pomiar grubości powłok -Metoda magnetyczna.
2. PN-EN ISO 2808:2008 Farby i lakiery – Oznaczanie grubości powłok.
3. Działlik A.: Warstwomierze. Pomiar grubości powłok. Elektronizacja Nr 4/1991, s. 17-20.
4. Janiczek R., Ptak P.: Przetworniki indukcyjnościowe w pomiarach grubości warstw wierzchnich. Przegląd Elektrotechniczny, r. 83 Nr 1/2007, s. 86-90.
5. PKN-ISO/IEC Guide 99:2010 Międzynarodowy słownik metrologii. Pojęcia podstawowe i ogólne oraz terminy z nimi związane (VIM). PKN Warszawa 2010.
6. Tabisz R.A.: Validation of industrial measurement processes. Transverse Disciplines in Metrology. ISTE Wiley 2009, s.792-801.
7. PN-EN ISO 4518:2001 Powłoki metalowe. Pomiar grubości powłok. Metoda profilometryczna.

ACCURACY DIAGNOSTIC OF THE ELECTROMAGNETIC AND MICROPROCESSOR THICKNESS GAUGE

The paper presents a variant of the exercise laboratory whose purpose is to know the principles of accuracy diagnosis of the microprocessor and electromagnetic thickness gauge, designed to measure the thickness of non-magnetic coatings deposited on magnetic substrates. The presented exercise program covers such topics as: to determine the conditions of measurement, performance measurement, calibration, identification of corrective functions and an analysis of the results of measurements and calibrations. As a result of the activities carried out, it is possible to answer the following questions: If thickness gauge indicates with accuracy which was declared by the manufacturer? Can I use a conversion function which prepared the manufacturer? Is the correction function is useful? Examples of the results of measurements and calibrations obtained during the various stages of the exercise and the conclusions drawn from these results are presented.

Keywords: electromagnetic thickness gauges, accuracy evaluation, laboratory exercise.