

Bogusław KASPERCZYK

NUMERYCZNA ANALIZA WYBRANYCH WRAŻLIWOŚCI INDUKCYJNEGO PRZETWORNIKA GRUBOŚCI POWŁOKI

Streszczenie. Przedmiotem zainteresowania w pracy jest indukcyjny przetwornik grubości powłoki o symetrii osiowej, utworzony przez dwuuzwojeniową cewkę z otwartym obwodem magnetycznym. Wykorzystując procedury obliczeniowe programu ANSYS, przeanalizowano numerycznie wrażliwości przetwornika na wpływy wybranych parametrów charakteryzujących obiekt pomiarowy. Wyniki analiz numerycznych zostały zweryfikowane doświadczalnie.

NUMERICAL ANALYSIS OF SENSITIVENESS OF COATING THICKNESS INDUCTIVE TRANSDUCER

Summary. The paper deals with a coatings thickness inductive transducer of axial symmetry which consists of a two-winding coil with open magnetic circuit. Sensitiveness of transducer to influence of the chosen parameters, characterising the measured object, has been analysed numerically, using computation procedures of the ANSYS program. Results of numerical analysis has been verified in experiments.

1. Wprowadzenie

Pomiary grubości przewodzących powłok niemagnetycznych na przewodzących podłożach magnetycznych wykonuje się najczęściej przyrządami wyposażonymi w indukcyjne przetworniki grubości powłoki. Łatwość posługiwania się nimi oraz ich przystępna cena wpływają na powszechność stosowania.

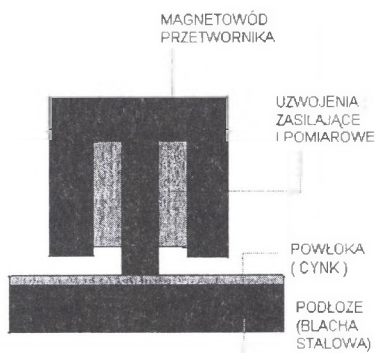
Dla powłok cynkowych o grubości kilku mikrometrów stwierdzone przedziały niepewności względnej wyników pomiaru grubości wynoszą do kilkunastu procent [1]. Pozostaje to w sprzeczności z deklarowaną przez producentów grubościomierzy [2] niepewnością do 3 %.

Określenie wrażliwości indukcyjnego przetwornika grubości powłoki na wpływy wybranych parametrów badanego układu i otoczenia umożliwi zinterpretowanie występujących sprzeczności. Częściowo zagadnienia te zostały poruszone w publikacji [3].

W pracy przedstawiono wyniki numerycznej analizy wrażliwości indukcyjnego przetwornika grubości powłoki na wpływy parametrów konstrukcyjnych i materiałowych układu grubościomierza z badanym obiektem. Do obliczeń wykorzystano oprogramowanie ANSYS.

2. Indukcyjny przetwornik grubości powłoki

Indukcyjny przetwornik grubości powłoki tworzy dwuuzwojeniowa cewka o symetrii osiowej z jednostronnie otwartym obwodem magnetycznym – rysunek 1. Uzwojenie zasilające – zasilane prądem przemiennym – i uzwojenie pomiarowe rozłożone są równomiernie wzdłuż walcowego trzpienia magnetowodu. Pierścieniowy ekran magnetyczny otacza od zewnątrz cewkę, łącząc się z jednej strony z trzpieniem. Wolny koniec trzpienia styka się z powierzchnią powłoki (np. cynkowej), która stanowi jedną ze szczelin w obwodzie magnetycznym. Druga szczelina występuje pomiędzy pierścieniowym ekranem a magnetycznym



Rys.1. Obraz przekroju modelu osiowo-symetrycznego indukcyjnego przetwornika grubości powłoki

Fig. 1. Cross-section of the model of a coating thickness inductive transducer of axial symmetry

podłożem (np. z blachy stalowej). W rzeczywistych konstrukcjach końcówka trzpienia stykająca się z powłoką może mieć kształt walca, stożka ściętego lub wycinka kuli.

Sinusoidalne wymuszenie prądowe w uzwojeniu zasilającym powoduje przepływ w nim prądu przemiennego o stałej amplitudzie i stałej częstotliwości około 80 Hz. Wartość napięcia indukowanego w uzwojeniu pomiarowym jest bezpośrednio zależna od rozkładu indukcji magnetycznej wzdłuż trzpienia cewki pomiarowej. Napięcie U mierzone na zaciskach cewki pomiarowej jest funkcją wieloparametrową, której argumentem jest grubość powłoki.

Przedstawia je zależność (1).

$$U = F[d_b, (x, y, z, \mu_a, \mu_c, \rho_a, \rho_b, \rho_c, d_c, f, n, j)] \quad (1)$$

gdzie:

argument funkcji - d_b , - grubość powłoki;

parametry funkcji:

- x, y, z - współrzędne położenia przetwornika;
- μ_a, μ_c - względne przenikalności magnetyczne kolejno materiałów przetwornika i podłoża;
- ρ_a, ρ_b, ρ_c - rezystywności materiałów przetwornika, powłoki i podłoża;
- d_c - grubości podłoża;
- f - częstotliwość prądu wzbudzenia;
- n - liczba zwojów cewki pomiarowej;
- j - gęstość prądu wzbudzenia.

Napięcia U wyznacza się analizując rozkład pola magnetycznego w przetworniku.

3. Wrażliwość indukcyjnego przetwornika grubości powłoki

W pracy wrażliwość przetwornika będzie określała jego właściwość do reagowania na wpływy poszczególnych parametrów. Napięcie U posłuży do badania tej wrażliwości.

W dalszych rozważaniach pominięto analizę wrażliwości przetwornika na wpływy temperatury oraz wielkości mechanicznych (naprężeń i odkształceń przetwornika i obiektu pomiarowego). Przyjęto również założenia upraszczające - rozpatrywane materiały są jednorodne o stałych parametrach μ i ρ , a pole elektromagnetyczne jest harmoniczne.

Ustalenie matematycznych zależności pomiędzy napięciem U i wielkościami wpływowymi (parametrami) wymaga w pierwszej kolejności wyznaczenia rozkładu harmonicznego pola magnetycznego [4] w stanie ustalonym w przetworniku i badanym obiekcie, przy zadanym wzbudzeniu sinusoidalnym. Pole to obejmuje środowiska (materiały) niemagnetyczne (szczeлина powietrzna, powłoka, obszar rozproszenia pola) oraz środowiska magnetyczne (trzpień, osłona, podłoże). Określenie wymiarów przetwornika, obiektu badanego, podanie właściwości fizycznych tworzących je materiałów ($\mu_a, \mu_c, \rho_a, \rho_b, \rho_c$), zadanie warunków brzegowych (parametrów wymuszenia prądowego, wybranych wartości pola na granicach obszarów) są niezbędne do rozwiązania postawionego problemu.

Obraz przekroju indukcyjnego przetwornika grubości przedstawiony na rys.1 można uzyskać przecinając przetwornik dowolną płaszczyzną przechodząca przez jego oś symetrii. Wektor gęstości prądu J płynącego przez uzwojenie zasilające jest wtedy skierowany prostopadle do płaszczyzny przekroju uzwojeń, a jego zwrot jest przeciwny po obu stronach osi

symetrii. Ponieważ dla harmonicznego pola magnetycznego w środowisku nieruchomym obowiązuje zależność wielkości wektorowych

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad (2)$$

więc wektor natężenia pola magnetycznego \mathbf{H} posiada składowe wyłącznie w płaszczyźnie przekroju przetwornika. Rozkład pola magnetycznego w przetworniku można w takim wypadku analizować na płaszczyźnie jako dwuwymiarowy. Dodatkowo rozkłady pól po obu stronach osi symetrii różnią się jedynie zwrotem wektorów pola, więc analizę można przeprowadzić dla połowy przekroju modelu - rysunek 2.



Rys.2. Fragment przekroju modelu indukcyjnego przetwornika grubości powłoki
Fig. 2. Fragment of the cross-section of a coating thickness inductive transducer

Analiza rozkładu pola magnetycznego wymaga posługiwania się potencjałem wektorowym \mathbf{A} , zdefiniowanym zależnością

$$\text{rot } \mathbf{A} = \mathbf{B} \quad (3)$$

W przypadku harmonicznego pola magnetycznego wewnątrz obszarów prądowych potencjał wektorowy \mathbf{A} wyznaczany jest z równania Poissona (4), a na zewnątrz obszarów z prądem z równania Laplace'a (5).

$$\Delta \mathbf{A} = \mu \mathbf{J} \quad (4)$$

$$\Delta \mathbf{A} = 0 \quad (5)$$

Jeżeli płaszczyznę przekroju przetwornika będą wyznaczały osie „x” i „y” prostokątnego układu współrzędnych, a kierunek przepływu prądu będzie wtedy zgodny z osią „z”, to wyznaczenie składowej wektora \mathbf{A}_z umożliwi obliczenie składowych B_x i B_y indukcji magnetycznej pola (6).

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y}, \quad (6)$$

$$B_y = -\frac{\partial A_z}{\partial x}$$

Dla trzpienia przetwornika położonego w osi „y” i znanej składowej indukcji magnetycznej B_y , napięcie U indukowane na zaciskach cewki pomiarowej określi zależność (7)

$$U = \sum_{i=1}^n \left(-\frac{\partial(B_{yi} S)}{\partial t} \right) \quad (7)$$

gdzie B_{yi} oznacza indukcję magnetyczną w płaszczyźnie i -tego zwoju cewki, a S jest polem przekroju trzpienia.

Wrażliwość przetwornika na wpływy parametrów (1) zależy więc od ich wpływu na indukcję magnetyczną B_{yi} . Zagadnienie to rozwiązano w pracy drogą numeryczną, wykorzystując program ANSYS.

4. Podstawowe właściwości programu ANSYS

Program ANSYS jest multifizycznym narzędziem do przeprowadzania analiz problemów zarówno prostych: liniowych, statycznych, jak i złożonych: przejściowych, dynamicznych - metodami elementów skończonych. Jest on przeznaczony także do rozwiązywania zagadnień elektromagnetycznych, w tym analizy zagadnień magnetycznych, harmonicznych, z uwzględnieniem wpływu prądów wirowych. Umożliwia przeprowadzanie obliczeń dla układów trójwymiarowych i dwuwymiarowych, do 100.000 węzłów sieci elementów skończonych w wybranym układzie współrzędnych [5].

Rozwiązanie postawionego problemu z wykorzystaniem programu ANSYS wymaga opracowania programu, opartego na jego własnych poleceniach. Program ten obejmuje następujące operacje:

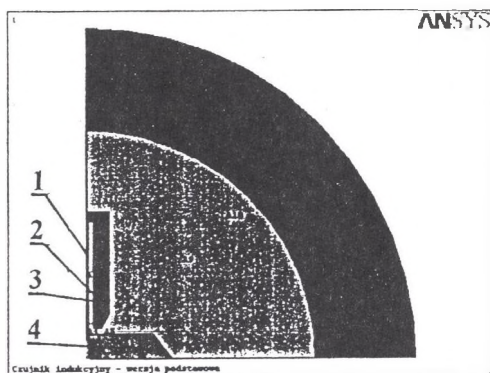
- zbudowanie modelu zagadnienia – zdefiniowanie rodzaju zjawiska, określenie geometrii modelu, ustalenie stałych fizycznych i materiałowych, utworzenie sieci elementów skończonych;
- zadanie wymuszeń – zadanie warunków brzegowych, zdefiniowanie źródeł, zidentyfikowanie typu analizy;
- uruchomienie podprogramu obliczeniowego;
- prezentacja wyników obliczeń.

Przedstawione w pracy wyniki analizy wrażliwości badanego przetwornika uzyskane drogą numeryczną obejmują obrazy rozkładów pól magnetycznych w przetworniku oraz względne zmiany napięcia U spowodowane oddziaływaniem poszczególnych parametrów wpływowych.

5. Program analizy wybranych wrażliwości przetwornika

Do analizy wrażliwości przyjęto następujące założenia upraszczające:

- wymiary geometryczne modelu przetwornika odpowiadały wymiarom rzeczywistego obiektu – rysunek 3;
- stałe materiałowe w modelu odpowiadały materiałom stosowanym w przetworniku i próbce (powłoka cynkowa na stalowej blasze karoseryjnej);
- napięcie wg wzoru (7) wyznaczane było dla $n=11$ zwojów równomiernie rozłożonych wzdłuż trzpienia przetwornika - rysunek 4.

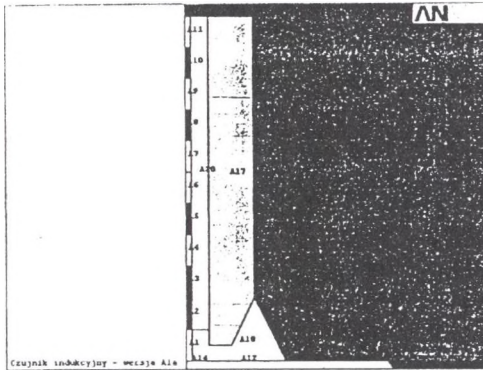


Rys.3. Obraz modelu geometrycznego przetwornika: 1 - trzpień, 2 - cewka, 3 - osłona magnetyczna, 4 - badana próbka

Fig. 3. Geometrical model of the transducer: 1 - mandrel, 2 - coil, 3 - magnetic screen, 4 - tested sample

Program analizy wrażliwości obejmował:

- wyznaczenie obrazów linii pola magnetycznego w przetworniku i szczelnie magnetycznej o grubości odpowiadającej mierzonej powłoce;
- wyznaczenie wrażliwości przetwornika na: przenikalność magnetyczną podłoża (blachy stalowej), przenikalność magnetyczną materiału przetwornika, rezystywność powłoki i grubość podłoża.

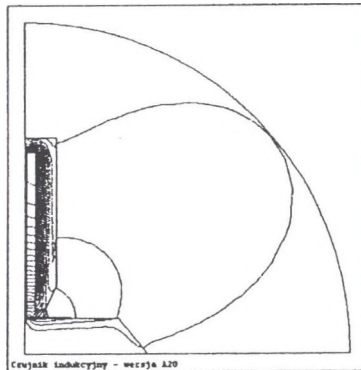


Rys. 4. Obraz rozmieszczenia umownych zwojów cewki wzdłuż trzpienia przetwornika
 Fig. 4. Distribution of the conventional turns of the coil along the transducer

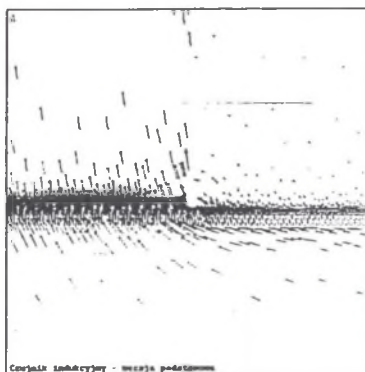
W celu weryfikacji wyników obliczeń numerycznych przeprowadzono doświadczalnie pomiary wpływu grubości powłoki na napięcie U indukowane w cewce fabrycznego przetwornika oraz w dodatkowym uzwojeniu umieszczonym na trzpieniu tego przetwornika, w pobliżu powłoki. Przetwornik zasilono przebiegiem harmonicznym o częstotliwości 82 Hz. Wyniki pomiarów porównano z obliczeniami uzyskanymi numerycznie.

6. Wyniki analizy wrażliwości przetwornika

Obrazy rozkładu pola magnetycznego w przetworniku przedstawiają kolejne rysunki 5 i 6.



Rys.5. Obraz rozkładu pola magnetycznego w modelu geometrycznym przetwornika
 Fig. 5. Distribution of the magnetic field in the transducer geometrical model



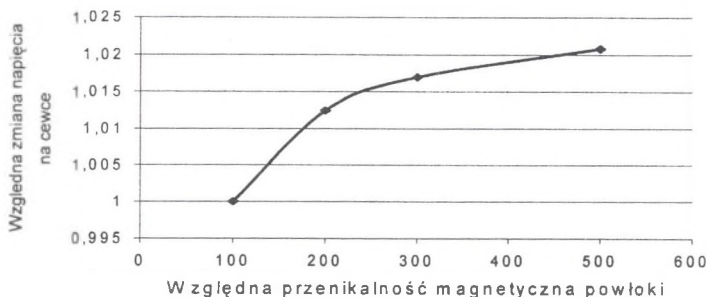
Rys.6. Obraz rozkładu wektorów indukcji magnetycznej w szczelinie reprezentującej powłokę

Fig. 6. Distribution of the magnetic flux density vector in the gap representing the coat

Kształt przebiegu linii pola magnetycznego w przetworniku (rys.5) jest zgodny z przewidywanym. Duża część strumienia magnetycznego zamyka się w obszarze uzwojeń cewki przetwornika, której grubość jest porównywalna ze szczeliną pomiędzy badaną próbką a osłoną magnetyczną (rys.3).

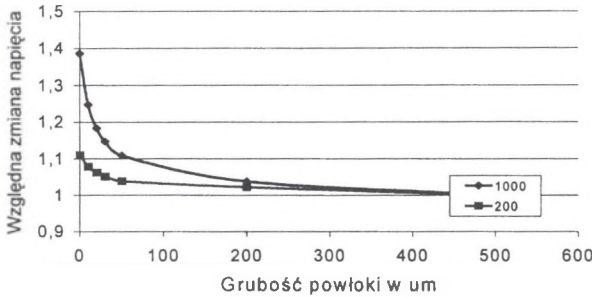
Wektory indukcji magnetycznej w szczelinie (powłoka niemagnetyczna) pomiędzy trzpieniem przetwornika i stalowym podłożem (blacha stalowa) zmieniają kierunek ze względu na znaczne różnice w wartościach przenikalności magnetycznej tych materiałów. Obliczona wartość indukcji magnetycznej w trzpieniu w pobliżu powłoki odpowiadała wartościom uzyskanym doświadczalnie.

Kolejne wykresy przedstawiają wyniki obliczeń wrażliwości przetwornika na wybrane parametry - właściwości materiałów próbki i przetwornika.

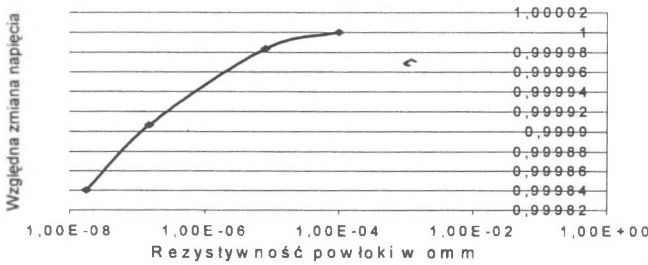


Rys.7. Obliczona względna zmiana napięcia U w zależności od względnej przenikalności magnetycznej podłoża

Fig. 7. Calculated relative change of the U voltage vs. relative magnetic permeability of the base



Rys.8. Obliczona względna zmiana napięcia U w zależności od grubości powłoki dla dwóch względnych przenikalności materiału przetwornika
 Fig. 8. Calculated relative change of the U voltage vs. the coating thickness for two relative magnetic permeabilities of the transducer material

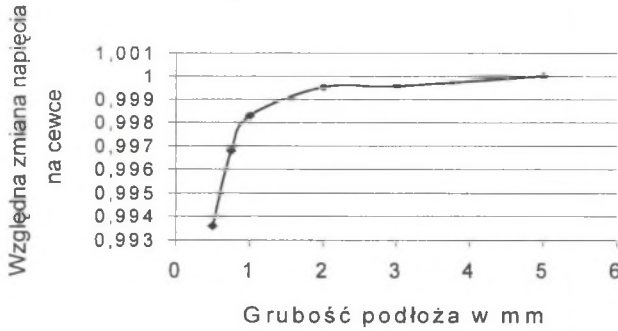


Rys.9. Obliczona względna zmiana napięcia U w zależności od rezystywności powłoki
 Fig. 9. Calculated relative change of the U voltage vs. the coating resistivity

Analizę wrażliwości przetwornika na wpływ względnej przenikalności magnetycznej μ_p podłoża (rys.7) przeprowadzono dla wartości przenikalności w zakresie 100 – 500, charakterystycznych dla blach stalowych. Wyznaczona względna zmiana napięcia U przekracza w wymienionym zakresie 2%, co oznacza konieczność uwzględniania rodzaju blachy przy wzorcowaniu rzeczywistego przyrządu przed pomiarem.

Rysunek 8 pokazuje z kolei wrażliwość przetwornika na zmiany względnej przenikalności magnetycznej materiału przetwornika. Obliczona numerycznie maksymalna zmiana napięcia U wynosi ok. 30% (w zakresie powłok o małych grubościach), co oznacza konieczność kontrolowania warunków termicznych pomiarów. Dla pewnej grupy materiałów magnetycznych względna przenikalność magnetyczna jest bowiem silnie zależna od temperatury.

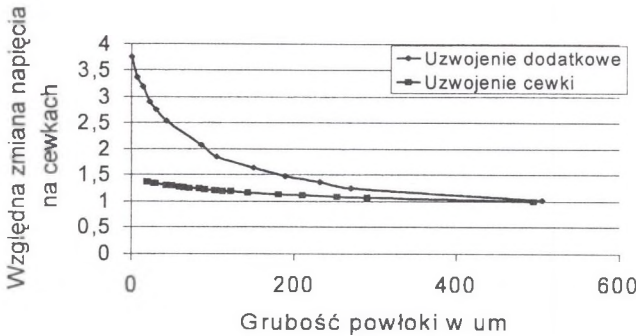
Wyniki analizy pokazanej na rysunku 9 dowodzą, że w cienkiej powłoce wpływ prądów wirowych (o częstotliwości 82 Hz) na napięcie U jest w dużym zakresie rezystywności materiałów powłok w zasadzie do pominięcia.



Rys.10. Obliczona względna zmiana napięcia U w zależności od grubości podłoża
Fig. 10. Calculated relative change of the U voltage vs. the base thickness

Przedstawione na rysunku 10 wyniki obliczeń wpływu grubości podłoża na napięcie U pokazują, że do grubości 1,5 mm jej wpływ powinien być uwzględniany w trakcie wzorcowania przyrządu. Dla większych wartości grubości jest on do pominięcia.

Wyniki weryfikacji doświadczalnej opracowanego modelu przetwornika i zastosowanego do obliczeń programu przedstawiają rysunki 11 i 12. Względne zmiany napięcia w badanych

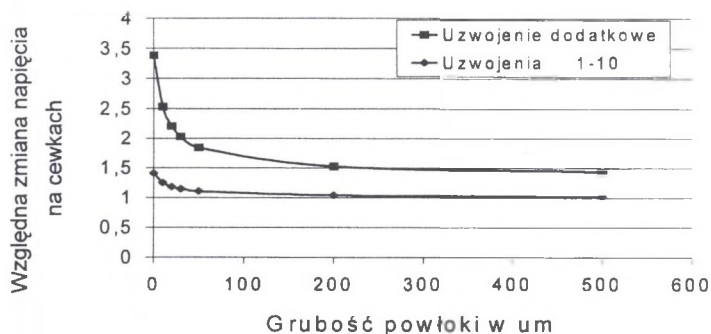


Rys.11. Zmierzona względna zmiana napięcia U na cewkach w zależności od grubości powłoki

Fig. 11. Measured relative change of the U voltage of the coils vs. the coating thickness

zakresie grubości powłok różnią się nieznacznie w wynikach pomiarów i obliczeń, zarówno dla napięcia odnoszącego się do uzwojenia cewki, jak i uzwojenia dodatkowego. Różnice w kształtach odpowiadających sobie krzywych wynikają z przyjętych założeń upraszczających oraz braku możliwości uwzględnienia w obliczeniach względnej przenikalności magnetycznej jednakowej dla materiału przetwornika modelowego i fabrycznego. W pomiarach rzeczywistych zastosowano obiekt badany (powłoka na podłożu stalowym) o znanych stałych materiałowych i wymiarach. Te same parametry wykorzystano w obliczeniach. Rysunek 8 pokazuje, jak duży wpływ na przebieg krzywej wrażliwości ma względna przenikalność magnetyczna materiału czujnika.

Stwierdzono również dobrą zgodność bezwzględnych wartości napięć na uzwojeniach cewek w pomiarach i obliczeniach dla najmniejszych wartości grubości powłok.



Rys.12. Obliczona względna zmiana napięcia U na cewkach w zależności od grubości powłoki

7. Wnioski

Przedstawione wyniki numerycznej analizy wybranych wrażliwości modelu indukcyjnego przetwornika grubości na parametry wpływowe pozwalają wyciągnąć kilka praktycznych wniosków. Model przetwornika wykazuje w pomiarach grubości właściwości na tyle porównywalne z rzeczywistym przetwornikiem, że wyniki analiz numerycznych pozwalają wnioskować o wpływie nieznanych właściwości obiektów badań na wynik pomiaru. Można więc planować takie procedury przeprowadzania pomiarów, które zminimalizują niepożądane skutki oddziaływania właściwości obiektów badań i środowiska na wynik pomiaru. Jako przykład może posłużyć konieczność wzorcowania przetwornika w pomiarach próbek o niewielkich grubościach, czy konieczność kontrolowania warunków środowiskowych przeprowadzenia pomiarów.

Literatura

1. Godoń M.: Praca dyplomowa inżynierska. Instytut Metrologii i Automatyki Elektrotechnicznej Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997.
2. Coating thickness testing, Katalog firmy ElektroPhysik USA. Arlington Heights, 1996.
3. Kasperczyk B.: Badania powierzchni wybranych powłok cynkowych. Zeszyty Problematyczne. „Badania nieniszczące”. Polskie Towarzystwo Badań Nieniszczących, Warszawa 1997. Materiały 26 Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących, Szczyrk, wrzesień 1997.
4. Baron B.: Komputerowa analiza harmonicznego pola elektromagnetycznego we współrzędnych walcowych, Skrypt Pol,Śl nr 1673, 1993.
5. ANSYS Analysis Guides, SAS IP, Inc© 1997.

Recenzent: Prof. dr hab. Zygmunt Kleszczewski

Abstract

The paper deals with a coatings thickness inductive transducer of axial symmetry which consists of a two-winding coil with open magnetic circuit. The transducer is used in non-destructive tests. A measured object which is a steel substrate covered with electrically conductive or non-conductive, non-ferrous coating of small thickness 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 multiparameter function of the coating thickness. Those parameters are: the substrate thickness, the transducer geometric dimensions and their physical properties.

In the paper the physical model of coating thickness inductive transducer, corresponding to manufactured devices has been presented. The numerical model has been worked out basing on the physical model. To analyse the electromagnetic field distribution in the system: coating thickness inductive transducer – the measured object, the ANSYS program for analysis of field harmonic electromagnetic problems has been used. The transducer axial symmetry has enabled to construct a two-dimensional model.

Sensitiveness of coating thickness inductive transducer to influence of the chosen parameters, characterising the measured object, has been analysed numerically using computation procedures of the ANSYS program.

The transducer sensitiveness to:

- the coating thickness and the substrate thickness;
- the magnetic relative permeability of the substrate material and the transducer material;
- the resistivity of the coating.

has been investigated at invariable other parameters.

The results of numerical analysis, presented in the paper has been compared with the results of the chosen experiments to verify them.