

Lech BOROWIK, **Roman JANICZEK**, **Paweł PTAK**POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA, INSTYTUT TELEKOMUNIKACJI I KOMPATYBILNOŚCI ELEKTROMAGNETYCZNEJ,
Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa

Pomiary grubości powłok w diagnostyce powierzchni

Dr hab. inż. Lech BOROWIK

Profesor nadzwyczajny Wydz. Elektrycznego Pol. Częstochowskiej. W jego dorobku naukowym jest ponad 60 publikacji naukowych zamieszczonych w czasopiśmie krajowych i zagranicznych oraz prezentowanych na konferencjach naukowych, środowiskowych, krajowych i międzynarodowych. Wykonał około 250 opracowań i ekspertyz dla przemysłu. W kręgu jego zainteresowań są diagnostyka urządzeń elektrycznych oraz pomiary wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi i elektronicznymi.

e-mail: borowik@el.pcz.czest.pl

**Dr Paweł PTAK**

Adiunkt Wydz. Elektrycznego Pol. Częstochowskiej. Od 1997 roku pracuje w Zakładzie Metrologii na Politechnice Częstochowskiej. Jest autorem lub współautorem około 25 publikacji z zakresu Metrologii Elektrycznej. W kręgu jego zainteresowań są nietypowe źródła energii oraz pomiary grubości warstw wierzchnich metodami elektrycznymi.

e-mail: ptak@el.pcz.czest.pl



Streszczenie

W pracy przedstawiono zagadnienia, dotyczące pomiaru grubości warstw wierzchnich, przeprowadzane z wykorzystaniem przetworników indukcyjnych. Opisano badania, dotyczące przetwornika indukcyjnego transformatorowego. Na potrzeby pomiarów wykonano przetworniki pomiarowe, dla których przeprowadzono badania ich przydatności w diagnostyce wybranych warstw wierzchnich.

Słowa kluczowe: pomiary grubości powłok, przetworniki indukcyjne, diagnostyka stanu powierzchni.

Measurements of layer thickness for diagnostics of surface

Abstract

Questions relating to the measurement of a top layer thickness were introduced in the work. Measurements carried out with the use of inductive transducers are taken into account. Problems were illustrated by examples of possible applications in diagnostics of protective coatings in car and airplanes industry. In Chapters 2 and 3 there is shown the construction of typical inductive transducer (Fig. 1) and some sources of measuring errors. Model of transformer transducers (Fig. 2 and 3) and construction of applied measuring transducer (Fig. 4) were introduced in Chapters 4 and 5. Measuring transducers for which the investigations were conducted were made on needs of measurements. In Chapter 6 there are described results of investigations (Fig. 7 and 8), relating to the inductive transformer transducer. In conclusions the utility of transformer transducers for diagnostics of chosen top layers was defined.

Keywords: layer thickness, inductive transducer, diagnostics of condition of surface.

1. Wprowadzenie

Powłoka jest warstwą materiału, wytworzoną naturalnie lub nałożoną sztucznie na powierzchnię przedmiotu, wykonanego z innego materiału, w celu uzyskania określonych własności technicznych lub dekoracyjnych. Powłoki nakładane są dla ochrony czy ozdoby i powinny także spełniać określone wymagania, dotyczące ich wyglądu, jakości, grubości, wytrzymałości czy trwałości.

W diagnostyce stanu powłok istnieje szeroka gama urządzeń do sprawdzania prawidłowości założonych parametrów. Lista sprawdzanych parametrów może być bardzo długa, a pojedyncze parametry mogą być kontrolowane kilkoma sposobami w zależności od wyboru normy odniesienia.

Pomiary grubości warstw wierzchnich i powłok znajdują zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu: w przemyśle samochodowym, spożywczym, elektrotechnicznym i elektronicznym, lotniczym, metalowym, komputerowym, telekomunikacyjnym i w przemyśle tworzyw sztucznych.

Istnieją szczegółowe normy określające różne typy powłok. W trakcie procesów technologicznych szczegółowo określa się

grubości powłok i warstw wierzchnich oraz sposoby pomiaru i tolerancji rozmieszczenia punktów pomiarowych. Wybór różnorodnych urządzeń i metod pomiarowych uzależniony jest także od dostępu do powierzchni podlegających badaniu oraz właściwości badanych materiałów podłoża i powłoki.

Diagnostyka powierzchni to zadanie, za którym przy niewłaściwym podejściu mogą kryć się wprost olbrzymie straty ekonomiczne, zagrożenia dla środowiska oraz ludzi.

Typowa diagnostyka grubości powłok polega na wykonaniu szeregu czynności i odpowiednim zaplanowaniu specyficznego zadania badawczego. Można tu wyróżnić [9]:

- wybór metody lub kilku metod, które posłużą do wykonania badań,
- dobór aparatury do wybranej metody lub metod pomiarowych,
- wykonanie pomiarów i zarejestrowanie wyników,
- ocenę otrzymanych rezultatów pod względem dokładności i prawidłowości wykonania,
- porównanie otrzymanych wyników badań z założeniami norm i ustaleń dotyczących wymogów stawianym badanej powierzchni,
- określenie czynników wpływających na zmiany grubości badanej powłoki, odbiegające od zakładanych w procesie użytkowania elementu badanego,
- prognozowanie metod udoskonalenia powłoki lub warstwy wierzchniej oraz warunków ich eksploatacji w celu ograniczenia wpływu szkodliwych czynników zewnętrznych na ich parametry użytkowe i ochronne.

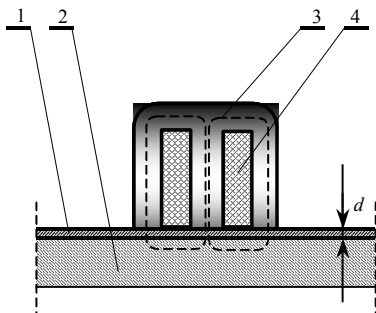
Obecnie coraz częściej zamiast pojedynczych metod badawczych dąży się do stworzenia całych systemów samodiagnostujących, wyposażonych w wiele różnorodnych czujników i wykorzystujących do badań szereg różnorodnych metod. Celem naszego rozwiązania jest propozycja systemu pomiarowego, który służyłby wizualizacji wyników pomiarów, ich rejestracji, porównania, w konsekwencji czego otrzymamy pełny obraz badanej powierzchni i jej charakterystycznych właściwości.

2. Przetworniki indukcyjne

Działanie przetworników indukcyjnych opiera się na zasadzie zmiany indukcyjności własnej lub wzajemnej pod wpływem wielkości nieelektrycznej. W zależności od sposobu realizacji zmiany reluktancji przetwornika można rozróżnić przetworniki dławikowe, solenoidalne, wiroprowodowe czy transformatorowe [3]. Te ostatnie są przedmiotem naszych badań.

Przetworniki transformatorowe, są wykorzystywane w przypadku badania powłok z materiałów nieferromagnetycznych na podłożach ferromagnetycznych. Przetwornik taki zbudowany jest z dwóch uzwojeń (rys.1) nawiniętych na wspólnym rdzeniu ferromagnetycznym, stanowiąc transformator prądowy o otwartym obwodzie magnetycznym. Jest on wzbudzany zmiennym polem o częstotliwości od kilkuset do kilkunastu tysięcy Hz, wytwarzanym przez prąd płynący w uzwojeniu pierwotnym zasilanym

z regulowanego i stabilizowanego generatora sinusoidalnego. Obwód magnetyczny przetwornika stanowi badana powłoka i podłoże. Powłoka stanowi „szczelinę” w obwodzie magnetycznym. Napięcie wyjściowe przetwornika indukcyjnego, zależy od: grubości powłoki, materiału podłoża, grubości podłoża obiektu, pola powierzchni, jej kształtu, na której przeprowadzany jest pomiar, chropowatości oraz od odległości od krawędzi płaszczyzny mierzzonej (efekt krawędzi).



Rys. 1. Budowa indukcyjnego przetwornika; 1 - warstwa wierzchnia, 2 - podłoże, 3 - droga strumienia magnetycznego, 4 - uzwojenie cewki

Fig. 1. Construction of inductive converter; 1 - top layer, 2 - substrate, 3 - path of magnetic flux, 4 - winding

Indukcyjność przetwornika oczywiście zmienia się wraz ze zmianą wymiarów szczeliny. Zmiana ta nie jest liniowa, lecz hiperboliczna.

3. Błędy pomiarowe przetworników indukcyjnych transformatorowych

Źródła błędów przetworników transformatorowych można podzielić na:

1. źródła sprzętowe tj. niestabilność zasilania, niedokładność przyrządu współpracującego z przetwornikiem, precyzja wykonania konstrukcji przetwornika, wielkość powierzchni „czynnej” przetwornika, częstotliwość zasilania, wielkość powierzchni,
2. źródła wnoszone przez badany obiekt oraz warunki otoczenia tj.: chropowatość powierzchni, jej kształt, efekt krawędzi, temperatura, wpływ obcych pól itp.

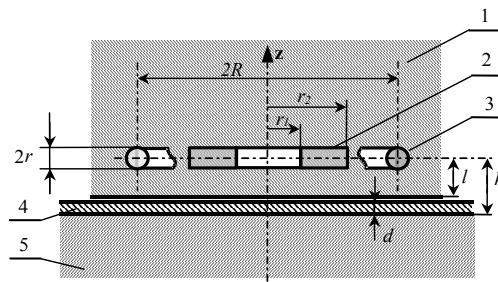
Źródła sprzętowe błędów można znacznie zniwelować. Zastosowanie wysokiej klasy generatora czy przyrządu o dużej dokładności jest bardzo skuteczne. Dużo trudniej jest z błędami wnoszonymi przez sam obiekt. To mierzony ma się dostosować do obiektu rzeczywistego i dać wiarygodny wynik badań i pomiarów. Wymagania technologiczne, wymagania norm produkcji narzucają taką a nie inną powierzchnię itd. Niemniej, dla konkretnego obiektu, można niwelować choćby w części i te źródła. Wpływ zmiany temperatury powierzchni mierzonej czy rezystancji uzwojeń przetwornika indukcyjnego można niwelować np. stosując układy różnicowe. Wpływ kształtu powierzchni, jej chropowatości eliminuje się częściowo poprzez miniaturyzację czujników.

4. Badania modelowe przetworników indukcyjnych transformatorowych

Model fizyczny badanego przetwornika indukcyjnego transformatorowego przedstawia rys. 2. W modelu tym przyjęto, że jedno z uzwojeń, zwykle to zasilane, jest analizowane jako toroidalny pojedynczy zwój zwarty [6].

Grubość warstwy wierzchniej określa się przy założeniu, że przetwornik umieszczony jest bezpośrednio na badanej powierzchni, a cewka pomiarowa znajduje się w odległości h od przestrzeni (warstwy) o innych właściwościach niż otaczająca przetwornik. Dlatego, na przykład dla warstw lakierniczych, nieprzewodzących i nieferromagnetycznych odległość h jest li-

czona do podłoża, jak zaznaczono na rysunku 2. Przy znanej odległości uzwojeń od powierzchni roboczej przetwornika pomiarowego l grubość mierzonej warstwy $d = h - l$.



Rys. 2. Model fizyczny analizowanego indukcyjnego przetwornika pomiarowego; 1 - przetwornik pomiarowy, 2 - uzwojenie wtórne, 3 - zwój zwarty, 4 - warstwa wierzchnia, 5 - półprzestrzeń (modelująca badane podłoże)

Fig. 2. Physical model of analyzed inductive transducer; 1 - measuring transducer, 2 - secondary winding, 3 - compact turn, 4 - top layer, 5 - halfspace (modelling substrate under test)

Wynikiem przyjętego modelu indukcyjnego przetwornika transformatorowego [10] dla układu jak na rysunku 2 są następujące zależności:

$$\operatorname{Re} Z_{2p} = \int_{\delta_1}^{\delta_2} \delta \operatorname{Re} Z_2 d\delta / \int_{\delta_1}^{\delta_2} \delta Z_1 d\delta \quad (1)$$

$$\operatorname{Im} Z_{2p} = \int_{\delta_1}^{\delta_2} \delta \operatorname{Im} Z_2 d\delta / \int_{\delta_1}^{\delta_2} \delta Z_1 d\delta \quad (2)$$

gdzie: $\delta_1 = r_1/R$, $\delta_2 = r_2/R$.

Korzystając z zależności (1) i (2) można określić impedancję cewki pomiarowej przetwornika transformatorowego.

Jeżeli analizuje się pomiary grubości warstw wierzchnich, w których występują dwie warstwy o różnych właściwościach lub jeżeli istotnie wpływa na przebieg pomiaru grubość podłoża, to zgodnie z [6] korzystniej jest wprowadzić do obliczeń współczynniki:

$$\zeta_1 = \frac{d}{R} \quad (3)$$

$$\zeta_2 = \frac{f}{R} \quad (4)$$

gdzie: d – grubość warstwy wierzchniej zewnętrznej, f – grubość warstwy znajdującej się pod warstwą wierzchnią.

Pokrywanie blach stalowych aluminium warstwą wierzchnią jest jednym ze sposobów zabezpieczania przed korozją w przemyśle samochodowym. Grubości tych warstw w praktyce wynoszą kilkadziesiąt mikrometrów.

Wprowadzając do obliczeń współczynnik:

$$\beta = R \sqrt{\omega \mu_0 \sigma} \quad (5)$$

gdzie: R – promień cewki,
 ω – pulsacja prądu,
 μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni,
 σ – przewodność,

charakteryzujący własności fizyczne stosowanego materiału warstwy wierzchniej, promień R czujnika (który z kolei uwzględnia uwarunkowania wnoszone przez obiekt chroniony), a także możliwości wykonawcze przetwornika oraz możliwości praktyczne posługiwania się nim dobrano zakres częstotliwości zasilania. Ten z kolei był uwarunkowany dodatkowo między innymi głębokością wnikań prądów wirowych opisaną wzorem:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot f \cdot \mu_0}} \quad (6)$$

gdzie: δ – głębokość wnikania prądów wirowych,
 ρ – rezystywność,
 f – częstotliwość pracy czujnika,
 μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni,

oraz relacją jej w stosunku do grubości warstwy wierzchniej. Wszystkie te obliczenia i praktyczne przesłanki pozwoliły na wykonanie szeregu prototypowych przetworników transformatorowych.

W badaniach modelowych przetworników często pomija się też problem czynników zakłócających pomiar, na przykład magnesowanie podłoża [7]. W pomiarach na obiektach rzeczywistych można stwierdzić, że błąd pomiaru rośnie wraz ze zmniejszaniem się grubości badanej powłoki. Opisują to liczne opracowania na przykład [1, 8].

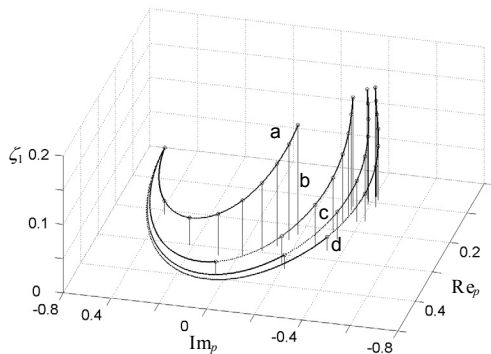
Analiza prowadzona z wykorzystaniem zależności (3) i (4) pozwala na przedstawienie przebiegu zmian impedancji przetwornika. Ilustruje to rysunek 3, na którym współrzędne Re_p i Im_p określają zależności [10]:

$$Re_p = \frac{Re Z_2}{\sqrt{2\pi R \omega \mu_0}} \quad (7)$$

$$Im_p = \frac{Im Z_2}{\sqrt{2\pi R \omega \mu_0}} \quad (8)$$

Przykładowe przebiegi przedstawione na rysunku 3 odnoszą się do dwuwarstwowej płaszczyzny, o warstwie wierzchniej nieferromagnetycznej (aluminiowej) i podłożu ferromagnetycznym.

Przykładowo na rysunku 3 szczególnie znaczną zmianę impedancji transformatorowego przetwornika uzyskano dla współczynnika $\beta = 5$. Wyniki tych modelowych obliczeń uwzględnia się przy projektowaniu konstrukcji czujników indukcyjnych.

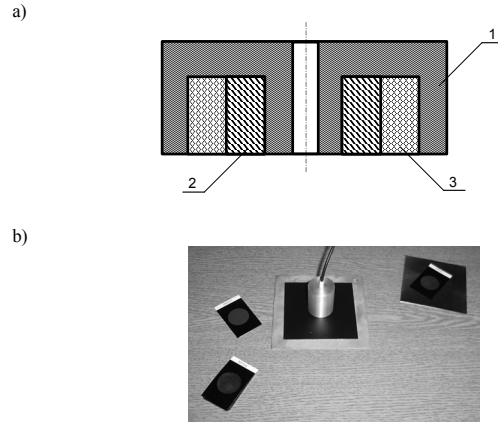


Rys. 3. Przebiegi zmian impedancji (przy współczynnikach przeliczeniowych dla podłoża ferromagnetycznego); $\zeta_2 = 0,1$; a) dla $\beta = 5$, b) dla $\beta = 10$, c) dla $\beta = 15$, d) dla $\beta = 20$)

Fig. 3. Changes of impedance curves (at coefficients counted for ferromagnetic substrate); $\zeta_2 = 0,1$; a) for $\beta = 5$, b) for $\beta = 10$, c) for $\beta = 15$, d) for $\beta = 20$

5. Budowa przetwornika pomiarowego

Przetwornik pomiarowy zbudowano z rdzenia ferromagnetycznego kubkowego F2001, na którym nawinięto dwa uzwojenia z drutu miedzianego. Wewnętrzne uzwojenie o 100 zwojach, nawinięte drutem o grubości 0,1 mm, tworzy cewkę zasilającą, a zewnętrzne o 150 zwojach nawinięte drutem o grubości 0,2 mm to cewka odbiorcza przetwornika (rys. 4).

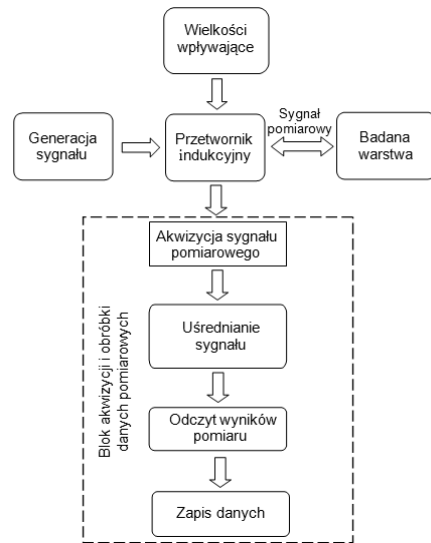


Rys. 4. Przetwornik indukcyjny transformatorowy; a) schemat ideowy (1 – rdzeń ferromagnetyczny, 2 – uzwojenie cewki zasilającej, 3 – uzwojenie cewki odbiorczej), b) wygląd zewnętrzny

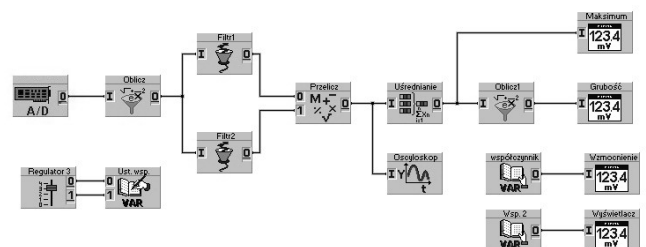
Fig. 4. Transformer inductive converter; a) general scheme (1 – ferromagnetic core, 2 – winding of feeding coil, 3 – winding of receiving coil), b) external view

Całość została umieszczona w obudowie aluminiowej w taki sposób, by przetwornik pomiarowy tworzył nad badaną warstwą stałą szczelinę powietrzną wynoszącą około 0,5 mm. Obecność tej szczeliny uwarunkowana jest chropowatością zarówno podłoża jak i warstwy wierzchniej. Do badania przetwornika zastosowano stanowisko pomiarowe, wykorzystujące komputer PC z kartą pomiarową PCI 9118 w środowisku programowym DasyLab.

Schemat blokowy systemu pomiarowego do pomiarów grubości warstw wierzchnich przedstawiono na rys. 5. Zaprojektowano układ pomiarowy, którego schemat blokowy przedstawia rys. 6.



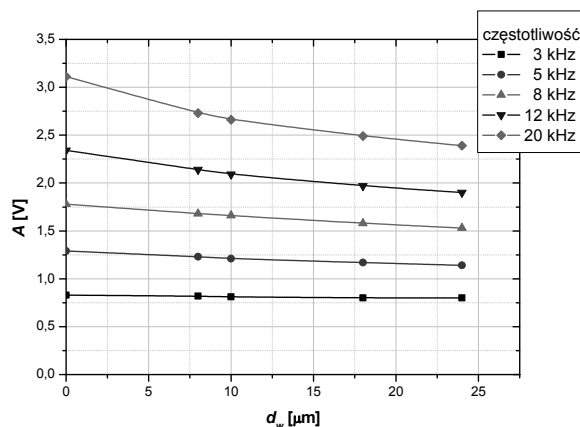
Rys. 5. Schemat blokowy systemu pomiarowego
 Fig. 5. Block diagram of measuring system



Rys. 6. Schemat blokowy układu pomiarowego w programie DasyLab
 Fig. 6. Block diagram of measuring configuration in DasyLab program

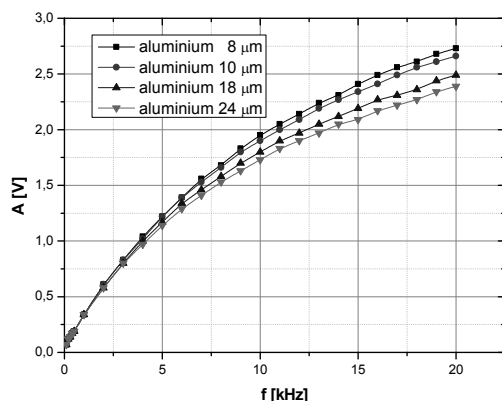
6. Badania przetwornika indukcyjnego transformatorowego

Pomiary sprawdzające grubości warstw wierzchnich wykonano dla podłoża o znanej grubości i różnych warstwach wierzchnich. Badania były prowadzone dla podłoży ferromagnetycznych, przetwornik był zasilany sygnałami sinusoidalnymi o różnych częstotliwościach. Wyniki pomiarów w przedziale częstotliwości warunkującym uzyskanie wystarczającej czułości przedstawiono na rysunkach 7 i 8.



Rys. 7. Amplitudy sygnałów wyjściowych dla określonych grubości warstw aluminiowych stosowanych w przemyśle samochodowym na podłożu ferromagnetycznym, dla $U_{zas} = 5V$

Fig. 7. Amplitude of output signals for specific thicknesses of aluminium layers applied in the car industry on ferromagnetic substrate, for $U_{supp} = 5V$



Rys. 8. Amplituda sygnału pomiarowego dla różnych grubości warstw wierzchnich aluminiowych na podłożu ferromagnetycznym, dla $U_{zas} = 5V$

Fig. 8. Amplitude of measuring signal for different thicknesses of aluminium top layers on ferromagnetic substrate, for $U_{supp} = 5V$

Czułość przetwornika wzrasta wraz ze zwiększeniem częstotliwości sygnału pomiarowego i ma zadowalającą wartość dla około 10 kHz do 20 kHz.

Zwiększanie częstotliwości zasilania przetwornika do wartości ponad 20 kHz powoduje, że przetwornik staje się dla przyjętego zakresu grubości warstwy wierzchniej bardziej nieliniowy i wzrasta jego podatność na zakłócenia zewnętrzne. Przy większych częstotliwościach zasilających także głębokość wnikania pola magnetycznego przetwornika jest zbyt mała w stosunku do grubości warstwy wierzchniej, co powoduje zwiększenie niedokładności pomiaru, a w skrajnym przypadku może ten pomiar całkiem uniemożliwić.

Głównym źródłem niepewności pomiarowych są czynniki nie związane z elektrycznym torem pomiarowym. Szacowana dokładność pomiaru grubości warstw wynosi około 3% dla warstw o grubości około 20 μm . Wraz ze zmniejszaniem się grubości wzrasta w istotny sposób względny błąd pomiaru.

7. Wnioski i uwagi

- Badany przetwornik indukcyjny może być zastosowany do pomiarów warstw o niewielkiej grubości w stosunku do grubości podłoża przy częstotliwości sygnału pomiarowego od 10 do 20 kHz;
- Ze względu na to, że głębokość wnikania sygnału pomiarowego do badanej warstwy na podłożu ferromagnetycznym maleje wraz ze wzrostem częstotliwości, należy dostosować częstotliwość i amplitudę sygnału do każdej powierzchni indywidualnie, aby dokładność pomiaru była jak największa;
- System pomiarowy może być wykorzystany do obserwacji procesów roboczych i diagnozowania ich parametrów w sposób ciągły;
- Badanie jakości wyrobów może posłużyć jako wyznacznik w diagnostyce stanu maszyn produkcyjnych, ich sprawności i stanu technicznego;
- Badanie magnetycznych procesów resztkowych można wykorzystać do stworzenia modeli symptomowych dla badań diagnostycznych;
- System pomiarowy może posłużyć do budowy ekonomicznego i łatwego w rozbudowie systemu diagnostycznego;
- Zastosowanie odpowiedniego oprogramowania opartego na sztucznej inteligencji umożliwi zbudowanie systemu samodiagnostującego, który będzie dostosowywał się do zmieniających się wymogów pomiarowych i użytkowych.

8. Literatura

- [1] Lewińska-Romicka A.: Pomiary grubości powłok, Biuro Gamma, Warszawa 2001.
- [2] Bronkiewicz A., Ptak P.: Wybrane aspekty metrologiczne metod pomiaru grubości warstw wierzchnich na podłożach ferromagnetycznych. Materiały V Krajowej Konferencji PES-5 Postępy w Elektrotechnice Stosowanej, Zakopane-Kościelisko 20-24 czerwca 2005, 283-290
- [3] Łapiński M.: Pomiary elektryczne i elektroniczne wielkości nieelektrycznych. WNT, Warszawa 1974.
- [4] Janiczek R.: Elektryczne miernictwo przemysłowe, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2006.
- [5] Sękowski S., Biestek T.: Metody badań powłok metalowych, WNT, Warszawa 1973.
- [6] Djakin V.V., Sandowskij V. A.: Teorija i rascet nakladnych vichretokowych preobrazovatelej, Nauka, Moskva 1981.
- [7] Bronkiewicz A., Janiczek R.: Pomiary grubości nieferromagnetycznych warstw wierzchnich na podłożu ferromagnetycznym poprzez magnesowanie podłoża. Przegląd Elektrotechniczny, 80 (2004) n.2, 165-168.
- [8] Bronkiewicz A., Janiczek R., Ptak P.: Pomiary grubości cienkich warstw. Metody i systemy komputerowe w automatyce i elektrotechnice. Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2005, 29-32.
- [9] Żółtowski B.: Podstawy diagnostyki maszyn. Bydgoszcz 1996.
- [10] Janiczek R., Ptak P.: Przetworniki indukcyjnościowe w pomiarach grubości warstw wierzchnich. Przegląd Elektrotechniczny nr 1, 2007.