

Pomiary grubości powłok z materiałów izolacyjnych

Streszczenie. W artykule przedstawiono zagadnienia, dotyczące pomiaru grubości warstw wierzchnich wykonanych z materiałów izolacyjnych, przeprowadzane za pomocą przetworników indukcyjnościowych. Przedstawiono badania, dotyczące przetwornika indukcyjnościowego elektromagnetycznego. Wykonano prototypowe przetworniki pomiarowe, dla których przeprowadzono badania grubości wybranych warstw wierzchnich wykonanych z materiałów izolacyjnych i naniesionych na podłożach ferromagnetycznych stalowych.

Abstract. The article presents issues related to the measurement of the thickness of surface layers made of insulating materials, carried out with the use of inductive transducers. The research on the electromagnetic inductive converter was presented. Prototype measuring transducers were made, for which tests of the thickness of selected surface layers made of insulating materials and deposited on ferromagnetic steel substrates were carried out. (*Thickness measurements of coatings made of insulation materials*).

Słowa kluczowe: pomiary grubości warstw wierzchnich, przetworniki indukcyjnościowe.
Keywords: measure of surface layers thickness, inductive transducers.

Wstęp

Powłoka jest to warstwa materiału na powierzchni przedmiotu, wykonanego z innego materiału, umieszczona w tym miejscu aby uzyskać określoną charakterystykę własności technicznych lub dekoracyjnych [1]. Grubość powłok ochronnych wynosi zazwyczaj od setnych części milimetra do kilku milimetrów. W celu pomiaru grubości powłok możemy wyróżnić metody niszczące i nieniszczące. Metody nieniszczące stosowane są tam gdzie nie ma możliwości przygotowania próbki dla badań niszczących a także wtedy, gdy nie jest możliwe uszkodzenie badanego elementu [2].

W diagnostyce stanu powłok istnieje różnorodność 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 ochronnych wykorzystywane są w wielu gałęziach przemysłu takich jak przemysł samochodowy, spożywczy, elektrotechniczny i elektroniczny, lotniczy, metalowy, komputerowy, telekomunikacyjny i przemysł tworzyw sztucznych [3].

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 [4]:

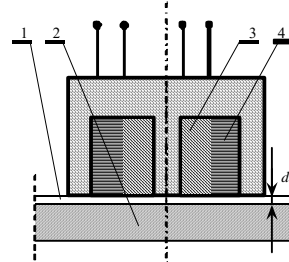
- wybór metody lub kilku metod które posłużą do wykonania badań,
- dobór aparatury do wybranej metody lub metod pomiarowych,
- wykonanie pomiarów i zarejestrowanie wyników,
- ocenę otrzymanych rezultatów pod względem dokładności i prawidłowości wykonania,
- porównanie otrzymanych wyników badań z założeniami 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.

W trakcie eksploatacji powierzchnia zewnętrzna konstrukcji i elementów urządzeń elektroenergetycznych podlega procesowi zużycia. Spowodowane jest to najczęściej działaniem czynników zewnętrznych – mechanicznych, cieplnych, chemicznych, elektrycznych czy elektrochemicznych. W warunkach rzeczywistych jest to wynikiem oddziaływania wielu czynników jednocześnie. Znalazienie dominującego oddziaływania pozwala zastosować odpowiednie zabezpieczenie.

Jedną z metod badań nieniszczących jest zastosowanie przetwornika indukcyjnościowego. Działanie takiego przetwornika polega na zmianie indukcyjności własnej lub wzajemnej pod działaniem wielkości nieelektrycznej. W takich przetwornikach możliwe jest wpływanie na zmianę indukcyjności przez regulację liczby zwojów lub zmianę reluktancji cewki przetwornika. Do badania powłok z materiałów nieprzewodzących można wykorzystać metodę elektromagnetyczną z wykorzystaniem przetworników transformatorowych. W metodzie tej istnieje możliwość badania powłok z materiałów nieferromagnetycznych na podłożach ferromagnetycznych [5].

Konstrukcja przetwornika transformatorowego opiera się na dwóch uzwojeniach znajdujących się na wspólnym rdzeniu ferromagnetycznym. Taka budowa przetwornika warunkuje powstanie transformatora prądowego o otwartym obwodzie magnetycznym. Konstrukcja przetwornika indukcyjnościowego typu transformatorowego przedstawiono na rysunku 1.

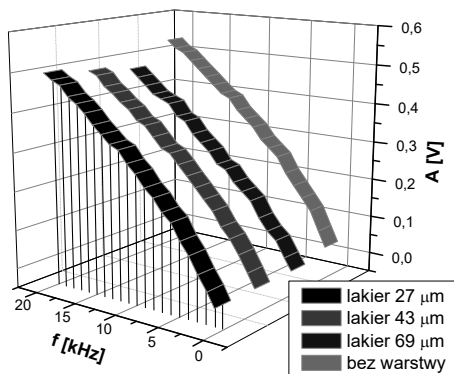


Rys.1. Przetwornik indukcyjnościowy do pomiaru grubości powłok; 1 - warstwa wierzchnia, 2 - podłoże, 3 - droga strumienia magnetycznego, 4 - uzwojenie cewki

Przetwornik ten jest zasilany zmiennym polem elektromagnetycznym o częstotliwości od kilkuset do kilkunastu tysięcy Hz. Pole to wytwarzane jest przez prąd płynący w uzwojeniu pierwotnym przetwornika transformatorowego. Otwarty obwód magnetyczny przetwornika elektromagnetycznego zamyka się poprzez badaną powłokę nieprzewodzącą oraz przez podłoże [6]. Wartość napięcia indukowanego w uzwojeniu wtórnym jest uzależniona od grubości powłoki.

Badanie grubości powłok z materiałów izolacyjnych

W celu wykonania badania powłok ochronnych nieprzewodzących wykonano kilka próbek na podłożu stalowym, na które naniesiono powłoki o różnej grubości z tworzywa sztucznego. Do pomiarów wykorzystano przetwornik elektromagnetyczny. Na rdzeniu ferromagnetycznym nawinięto dwa uzwojenia: jedno zasilające i drugie pomiarowe. Przetwornik zasilany jest sygnałem sinusoidalnym o zmiennej częstotliwości. Po umieszczeniu czujnika elektromagnetycznego na badanej warstwie w uzwojeniu pomiarowym indukuje się sygnał o zmiennej amplitudzie. Na rysunku 2 przedstawiono wyniki pomiarów różnej grubości powłok nieprzewodzących na podłożu ferromagnetycznym stalowym.



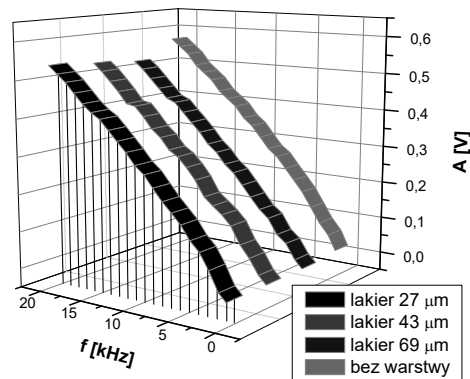
Rys. 2. Wyniki pomiarów powłok nieprzewodzących na podłożu stalowym dla czujnika 1

Wartość amplitudy sygnału pomiarowego uzależniona jest od grubości badanej warstwy wierzchniej. Do badania wykorzystano powłoki z tworzywa sztucznego o następującej grubości: 27 μm, 43 μm oraz 69 μm.

Wybrane warstwy wierzchnie badano za pomocą pokazanego wcześniej czujnika elektromagnetycznego. Czujnik ten zasilano sygnałem sinusoidalnym o częstotliwościach od 500 Hz do 20 kHz. Sygnał odpowiedzi czujnika pokazano jako amplitudę sygnału sinusoidalnego indukowanego w uzwojeniu pomiarowym. Czułość przetwornika jest największa dla początkowych częstotliwości i maleje wraz ze wzrostem częstotliwości sygnału zasilającego przetwornik. Można zauważyć, że wraz ze wzrostem grubości badanej warstwy izolacyjnej maleje wartość amplitudy sygnału odpowiedzi czujnika na sygnał wymuszający o tej samej częstotliwości. Największą amplitudę sygnału pomiarowego zanotowano dla czujnika umieszczonego bezpośrednio na podłożu pomiarowym, na którym nie umieszczono żadnej warstwy wierzchniej.

Pomiary grubości na obszarze objętym przetwornikiem pomiarowym ulegają uśrednieniu gdyż przetwornik ten nie wykonuje pomiarów punktowych. W przypadku powłok o nierównomiernie wartości grubości jest to zaletą ponieważ pozwala uniknąć wyników różniących się znacznie od siebie. W takim przypadku pomiar punktowej grubości może różnić się od wartości średniej na większej powierzchni

podlegającej badaniom. Na rysunku 3 pokazano wyniki pomiarów powłok z tworzywa sztucznego o takich samych grubościach ale przy zastosowaniu czujnika pomiarowego elektromagnetycznego o mniejszej średnicy.



Rys. 3. Wyniki pomiarów powłok nieprzewodzących na podłożu stalowym dla czujnika 2

Badania wykonano dla takich samych zakresów częstotliwości zasilania przetwornika elektromagnetycznego czyli dla częstotliwości od 500 Hz do 20 kHz. W związku ze zmniejszeniem średnicy czujnika pomiarowego uśrednianie pomiaru przebiega dla mniejszej powierzchni niż w pierwszym przypadku. Jak to wpływa na wyniki pomiarów? Przede wszystkim czułość przetwornika elektromagnetycznego jest podobna dla całego zakresu częstotliwości sinusoidalnego sygnału zasilającego i nie zależy już w takim stopniu od częstotliwości jak w przypadku pierwszego czujnika. Charakterystyki są w tym przypadku bardziej prostoliniowe. Wartości amplitudy sygnału pomiarowego dla poszczególnych grubości warstw wierzchnich przy tej samej częstotliwości sygnału wymuszającego różnią się w mniejszym stopniu niż w przypadku pierwszego czujnika o większej średnicy przetwornika. Podobnie za to jak dla pierwszego czujnika, amplituda sygnału pomiarowego czujnika umieszczonego bezpośrednio na podłożu pomiarowym, na którym nie umieszczono żadnej powłoki ochronnej, ma największą wartość w stosunku do wartości otrzymanych dla badanych powłok izolacyjnych.

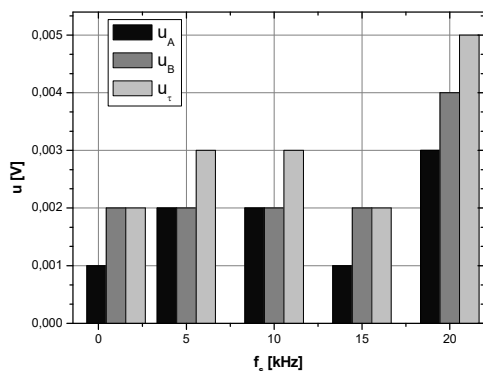
Czynniki wpływające na dokładność pomiarów

Na błędy pomiarowe przy zastosowaniu czujników transformatorowych ma wpływ szereg czynników, z których można wymienić np.: zmiana temperatury w trakcie pomiarów, nieliniowość charakterystyk, zmiany napięcia zasilającego przetwornik elektromagnetyczny oraz zmiany jego częstotliwości, zmiany kąta fazowego impedancji przetwornika i klasy dokładności przyrządu do pomiaru amplitudy sygnału wymuszenia i sygnału pomiarowego, nie czułości układu badawczego oraz zakłócenia polami elektromagnetycznymi. Część tych czynników można wyeliminować jeśli nie całkowicie to przynajmniej zminimalizować ich wpływ na badania. Część będzie można zniwelować poprzez zastosowanie metod statystycznych podczas wykonywania dużej liczby pomiarów a następnie poprzez ich obróbkę metodami matematycznymi. Przykładowo zmiany częstotliwości i napięcia zasilającego można zminimalizować poprzez zastosowanie generatora napięcia sinusoidalnego o odpowiedniej klasie dokładności. Zmiany temperatury najlepiej niwelować poprzez zastosowanie dwóch przetworników elektromagnetycznych w układzie

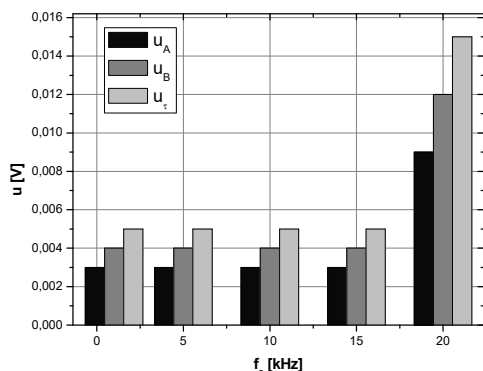
różnicowym co czasami może być problematyczne biorąc pod uwagę, że przetworniki wykonywane są prototypowo i istnieje trudność wykonania dwóch identycznych. Biorąc pod uwagę niepełną symetrię obwodów magnetycznych w układzie różnicowym powstają błędy wynikające ze zmiany kąta fazowego impedancji przetwornika indukcyjnościowego. Zastosowanie w przetworniku elektromagnetycznym szczeliny o małej długości można zwiększyć czułość ale jednocześnie szczelina obwodu magnetycznego nie może być zbyt mała, jeżeli w trakcie pomiarów znacznie się ona zmienia i jednocześnie przy dużych długościach szczeliny powstaje zbyt duży strumień rozproszenia magnetycznego co obniża nam dokładność całego pomiaru.

Ocena niepewności pomiaru bezpośredniego

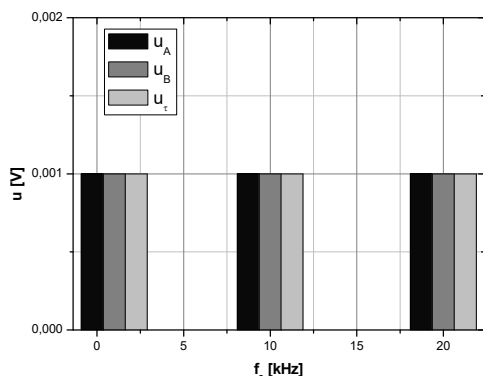
Pomiary przeprowadzono dla powłoki nieprzewodzącej na podłożu stalowym, przy kilku wartościach częstotliwości sygnału pomiarowego od 1 kHz do 20 kHz. Dla każdej częstotliwości wykonano serię 35 pomiarów dla rozkładu normalnego i serię 10 pomiarów dla rozkładu t -Studenta [7]. Ocenę niepewności przedstawiono na rys. od 4 do 7.



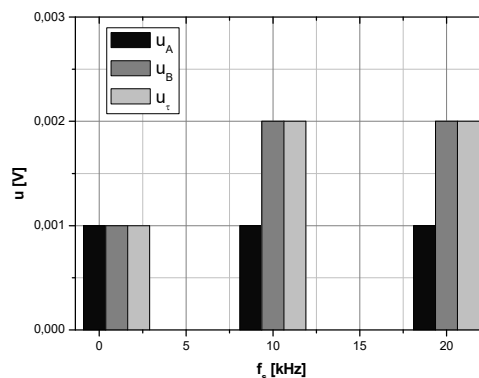
Rys.4. Niepewności pomiaru czujnika „1” dla rozkładu normalnego



Rys.5. Niepewności pomiaru czujnika „1” dla rozkładu t -Studenta



Rys.6. Niepewności pomiaru czujnika „2” dla rozkładu normalnego

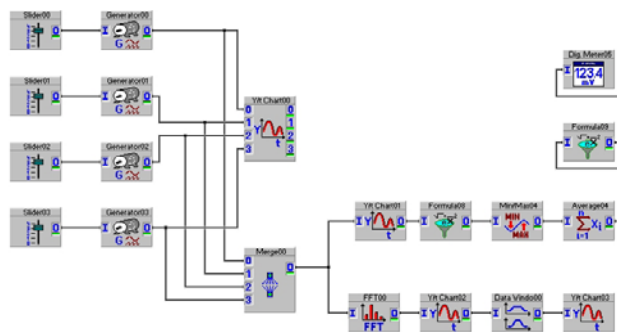


Rys.7. Niepewności pomiaru czujnika „2” dla rozkładu t -Studenta

Czujnik „2” posiada stabilne właściwości dla szerokiego zakresu częstotliwości. Czujnik „1” posiada zalety czujnika „2” w szerokim zakresie częstotliwości sygnału zasilającego przy mniejszej dokładności lecz ma znacznie większy rozrzut wyników pomiarowych.

Komputerowy system pomiarowy

Dla zaproponowanego pomiaru za pomocą czujnika indukcyjnościowego zaprojektowano układ pomiarowy, wykorzystujący program DasyLab. Schemat ideowy przedstawiono na rysunku 8. Występuje tutaj pojedynczy tor pomiarowy i służy on do wykonania właściwych pomiarów badanej powierzchni.



Rys.8. Schemat układu pomiarowego wielo-częstotliwościowego z pojedynczym tor pomiarowym

W układzie tym cztery zamodelowane sygnały zostały połączone w jeden wypadkowy sygnał pomiarowy. Na podstawie jego wartości system oblicza maksymalną amplitudę z przyjętą wcześniej liczbą okresów sygnału. Po wyznaczeniu tych danych system oblicza wartość grubości powłoki nieprzewodzącej. W zbudowanym wariancie systemu pomiarowo-diagnostycznego istnieje możliwość regulacji amplitudy każdego składowego sygnału pomiarowego MBS, jak również zastosowanie innych częstotliwości niż te wybrane na podstawie wcześniejszych pomiarów [8]. Szczególnie istotna jest możliwość regulacji amplitudy, gdyż suma częstotliwości bez możliwości ingerencji w wartość amplitudy, może powodować wyjście układu poza zakres liniowy działania, co może być źródłem dodatkowych błędów. W celu zwiększenia dokładności obliczenia wartości maksymalnej sygnałów pomiarowych wykonano na podstawie dużej liczby okresów poszczególnych sygnałów, a następnie wyniki uśredniano. Wyeliminowano w ten sposób wpływ stanu przejściowego w układzie czujnik – powierzchnia kontrolowana [9].

Wnioski i uwagi

1. Wraz ze zwiększaniem się częstotliwości sygnału pomiarowego różnica pomiędzy amplitudami sygnałów pomiarowych dla różnych grubości warstw wierzchnich izolacyjnych wzrasta.
2. W celu ograniczenia wpływu zmiany indukcyjności przetwornika elektromagnetycznego sygnał pomiarowy nie przekraczał 20 kHz.
3. Czułość przetwornika indukcyjnego maleje przy wzroście częstotliwości sinusoidalnego sygnału wymuszającego dla pierwszego czujnika pomiarowego o większej średnicy. Dla drugiego czujnika pomiarowego o mniejszej średnicy ta zależność ma mniejsze znaczenie.
4. Wartość amplitudy sygnału pomiarowego maleje wraz ze wzrostem grubości badanej warstwy wierzchniej z materiałów izolacyjnych. Zależność ta jest bardziej widoczna w przypadku czujnika o większej średnicy.
5. Przedstawioną metodę pomiarową można zastosować do pomiarów warstw wierzchnich z materiałów izolacyjnych o niewielkiej grubości w stosunku od grubości podłoża z materiałów ferromagnetycznych. Częstotliwość zastosowanego w tym przypadku wymuszającego sygnału sinusoidalnego zawiera się w przedziale od 500 Hz do 20 kHz.

Autorzy: dr Paweł Ptak, Politechnika Częstochowska, Katedra Automatyki, Elektrotechniki i Optoelektroniki, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: pawel.ptak@pcz.pl; dr Tomasz Prauzner, Akademia im. Jana Długosza w Częstochowie, Katedra Pedagogiki, Al. Armii Krajowej 13/15, 42-218 Częstochowa, E-mail: matompra@poczta.onet.pl; dr hab. Henryk Noga, Profesor UP, Katedra Edukacji Technicznej i Informatycznej, Uniwersytet Pedagogiczny w Krakowie, E-mail: henryk.noga@up.krakow.pl; dr inż. Piotr Migo, Katedra Edukacji Technicznej i Informatycznej, Uniwersytet Pedagogiczny w Krakowie, E-mail: piotrmigo@gmail.com; Agnieszka Gajewska, Instytut Nauk Technicznych, Uniwersytet Pedagogiczny w Krakowie; Jakub Gajda, Uniwersytet Pedagogiczny w Krakowie,

LITERATURA

- [1] Lewińska-Romicka A., Pomiary grubości powłok, Biuro Gamma, Warszawa, (2001)
- [2] Głowacka M., Inżynieria powierzchni. Powłoki i warstwy wierzchnie – wybrane zagadnienia, Skrypt Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, (2007)
- [3] Kula P., Inżynieria warstwy wierzchniej, Wyd. Politechniki Łódzkiej, Łódź, (2000)
- [4] Sozańska M., Powłoki cynkowe, *Inżynieria Materiałowa*, 3, (2005)
- [5] May P., Morton D., Zhou E., The design of a ferrite-cored probe. *Sensors and Actuators*, (2007), A 136, 221-228
- [6] Hull J. B., John V. B., Non-destructive testing. Macmillan Education. London, (1988)
- [7] Kalus-Jęcek B., Kuśmierk Z., Wzorce wielkości elektrycznych i ocena niepewności pomiaru. Wydawnictwa Politechniki Łódzkiej, Łódź, (2000)
- [8] Swisulski, D., Systemy pomiarowe, Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, (2004)
- [9] Winiecki W., Graficzne zintegrowane środowiska programowe, Warszawa: Wydawnictwo Mikom, (2001)