

**Leszek DZICZKOWSKI\***  
**Andrzej BUCHACZ\*\***

## **BADANIE ELEMENTÓW CHROPOWATYCH METODĄ PRĄDÓW WIROWYCH**

*Jeśli istnieje zależność między niektórymi parametrami materiałów a ich przewodnością elektryczną, to można, w sposób nieniszczący metodą prądów wirowych, mierzyć konduktywność materiału i wnioskować o szukanych własnościach materiału, ciągłości jego struktury czy niektórych wymiarach geometrycznych. Poważną wadą metod wirowych jest wyraźny wpływ stanu powierzchni na wynik testu. Zaproponowano oryginalną metodę kompensacji chropowatości powierzchni badanych elementów na wynik pomiaru konduktywności. Prezentowaną metodę oparto na podwójnym procesie skalowania zestawu konduktometr – sonda pomiarowa. Porównano skuteczność proponowanej metody z metodą powszechnie stosowaną.*

**Słowa kluczowe:** badania nieniszczące, prądy wirowe, defektoskopia, konduktometria, chropowatość powierzchni

### **WSTĘP**

Istnieje zależność między mechanicznymi parametrami charakteryzującymi materiał, z którego wykonano elementy lub półprodukty, a jego parametrami elektrycznymi [1]. Jeżeli pomiar tych elektrycznych parametrów jest łatwy, szybki, a przy tym nieniszczący, to stosowanie metod pośrednich do wyznaczenia interesujących parametrów mechanicznych jest uzasadnione. W przypadku, gdy badany element wykonany jest z nieferromagnetycznego metalu, to metoda prądów wirowych jest w zasadzie jedyną umożliwiającą skuteczną penetrację warstw przypowierzchniowych.

Wokół cewki zasilanej prądem zmiennym istnieje zmienne pole magnetyczne. Jeżeli taką cewkę zbliżymy do przewodzącego materiału, to pole magnetyczne wokół

---

\* dr inż. Leszek DZICZKOWSKI - Instytut Elektroniki Politechniki Śląskiej

\*\* prof. dr hab. inż. Andrzej BUCHACZ – Instytut Automatykacji Procesów Technologicznych i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania Politechniki Śląskiej

cewki indukuje w tym materiale prądy wirowe. Zgodnie z regułą Lentza prądy wirowe wytworzą własne pole magnetyczne skierowane przeciwnie do pola wzbudzającego. W rezultacie w obrębie wzbudzającej cewki pole ulegnie zmniejszeniu, co spowoduje zmianę impedancji cewki. Wzrośnie jej rezystancja i równocześnie, w przypadku nieferromagnetyków, zmaleje indukcyjność. Zmiany składowych impedancji cewki zależą od konduktywności (przewodności właściwej) badanego materiału oraz wymiarów geometrycznych układu: badany element – cewka.

Z faktu, iż pole magnetyczne indukowanych prądów wirowych jest skierowane przeciwnie do pola wzbudzającego, wynika ważna właściwość prądów wirowych. Wtórne pole utrudnia penetrację pola wzbudzającego w głębsze warstwy badanego elementu tym skuteczniej, im materiał lepiej przewodzi oraz im częstotliwość zmian prądu wzbudzającego jest większa. Ostatecznie na zmianę składowych impedancji cewki wzbudzającej wpływają tylko parametry przypowierzchniowej warstwy materiału. Zatem metodą prądów wirowych można mierzyć konduktywność blisko powierzchni [2].

Wady materiału, szczególnie bliskie powierzchni, utrudniają przepływ prądów wirowych. Przyrząd pomiarowy interpretuje istnienie pęknięcia w materiale jako pozorny wzrost konduktywności i pozorny wzrost oddalenia cewki-sondy od badanej powierzchni. Metodami prądów wirowych można mierzyć zatem nie tylko konduktywność materiału, wymiary geometryczne, lecz także szukać wad w badanym elemencie [3]. Urządzenie mierzące konduktywność zwane jest konduktometrem, a wykrywające wady - defektoskopem.

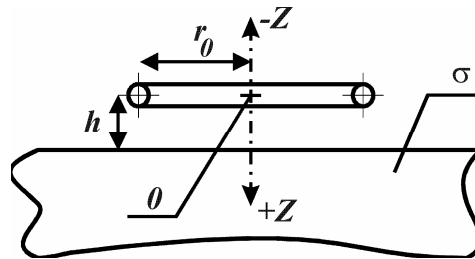
Pomiar konduktywności wykonywany jest między innymi podczas wyznaczania czystości metalu, sprawdzania ilości fosforu, segregacji złomu, kontroli procesów separacji, odlewania, szacowania wytrzymałości i twardości. Konduktometrem można także sprawdzać jednorodność materiału oraz określać zaawansowanie procesów cieplnych i zmęzeniowych. Metoda wiroprądowa jest szczególnie przydatna do kontroli elementów wykonywanych ze stopów aluminiowych metodą nagniatania, propagowaną w [4].

Między defektoskopami i konduktometrami istnieje poważna różnica. Konduktometr powinien mierzyć konduktywność materiału, z którego wykonano element. Wynik powinien być niezależny od innych czynników nieistotnych, lecz również wpływających na zmiany składowych impedancji cewki. Oprócz uwarunkowań geometrycznych takich, jak wzajemne ułożenie sondy i badanego elementu, które na ogół można zniwelować konstrukcją mechaniczną sondy czy całego automatycznego stanowiska pomiarowego, istnieje bardzo uciążliwy dla konstruktora urządzeń i operatora, wykonującego pomiary, wpływ stanu powierzchni badanego elementu na wynik pomiaru. Przyrząd pomiarowy skalowany jest za pomocą wzorców. Na ogół powierzchnie tych wzorców są polerowane. Jeżeli powierzchnie badanych elementów są też gładkie, to uzyskanie dokładnych wyników pomiarów nie jest aż tak kłopotliwe. Często zachodzi jednak potrzeba pomiaru parametrów materiału elementów takich, jakimi są one w danej chwili. Aby to badanie było faktycznie nieniszczące, szlifowanie powierzchni przed pomiarem nie jest akceptowane. Należy zatem tak konstruować konduktometrię, by w miarę skutecznie eliminować wpływ stanu powierzchni na wynik pomiaru konduktywności. W defektoskopie nieistotna jest bezwzględna wartość

konduktywności materiału, z którego wykonano badany element. Ważne jest natomiast wykrycie wszelkich nieciągłości materiału, czyli zauważone powinno być każde pęknięcie czy chropowatość powierzchni badanego elementu. Takie urządzenie powinno mierzyć pozorne zmiany konduktywności w odróżnieniu od konduktometru, który na owe pozorne zmiany powinien być nieczuły. Wpływ nierówności powierzchniowych, wklęsłości i wybrzuszeń, chropowatości, drobnych nieczystości uniemożliwiających jednoznaczne przytknięcie sondy do badanej powierzchni na wynik pomiaru konduktywności jest, według autorów, główną przyczyną ograniczającą zastosowanie metody prądów wirowych. Dlatego należy poszukiwać nowych i bardziej skutecznych metod wyznaczania konduktywności materiału elementów o chropowatych i nierównych powierzchniach.

## 1. MODEL WPLYWU PRZEWODZĄCEGO OŚRODKA NA IMPEDANCJĘ CEWKI STYKOWEJ

Rozważania ograniczono tylko do sondy będącej pojedynczą cewką stykową, to znaczy taką, którą można przybliżyć lub nawet przytknąć do w miarę płaskiej powierzchni badanego elementu. Analityczne obliczenia wpływu prądów wirowych na zmianę impedancji cewki, uwzględniające jej konstrukcję mechaniczną, są dość skomplikowane. Otrzymane wzory w ogólnym przypadku są mało przejrzyste, trudne w analizie i przez to mniej przydatne. Dlatego wygodnie jest posłużyć się pewnymi uproszczeniami [5]. Założono, że cewka stykowa posiada  $n$  zwojów skupionych w okręgu o promieniu  $r_0$  umieszczonym w odległości  $h$  równoległe do gładkiej powierzchni elementu wykonanego z materiału przewodzącego o konduktywności  $\sigma$  i względnej przenikalności magnetycznej  $\mu_r=1$ . Wymiary elementu są na tyle duże, że jego krawędzie nie przeszkadzają w przepływie indukowanych prądów wirowych.



Rys. 1. Cewka stykowa umieszczona nad grubą przewodzącą płytą

Źródło: Opracowanie własne

W celu uproszczenia przyjęto, że elementem tym jest półprzeźreń. Na rysunku 1. przedstawiono schematycznie układ cewki umieszczonej nad tą przewodzącą półprzeźrezią. Wprowadzono oznaczenia:

$$\alpha = \frac{2h}{r_0} \quad (1)$$

$$\beta = r_0 \sqrt{\omega \mu_0 \sigma} \quad (2)$$

Uogólniony parametr  $\alpha$  jest unormowaną względem promienia cewki odległością modelowej cewki stykowej od powierzchni badanego elementu. Bezwymiarowy parametr  $\beta$  zależy od konduktywności badanego materiału i częstości kołowej

$\omega$  (pulsacji) prądów wirowych. Po zbliżeniu sondy, na odległość  $h$ , do powierzchni niemagnetycznej płyty z materiału o konduktywności  $\sigma$  zmiana zespolonej impedancji cewki wyniesie [5]:

$$\Delta Z = j\omega\pi r_0 \mu_0 \mu_r n^2 \beta \cdot Q(\alpha, \beta) \quad (3)$$

We wzorze (3)  $Q(\alpha, \beta)$  jest unormowaną zmianą impedancji cewki:

$$Q(\alpha, \beta) = \int_0^{\infty} c(\lambda) \cdot e^{-\alpha\beta\lambda} J_1^2(\beta\lambda) d\lambda \quad (4)$$

$$c(\lambda) = \frac{\lambda - \sqrt{\lambda^2 + j}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + j}} \quad (5)$$

Wyznaczając część rzeczywistą i urojoną impedancji, obliczono zmianę rezystancji i indukcyjności cewki:

$$r = R - R_0 = n^2 \omega \pi \mu_0 r_0 \varphi(\alpha, \beta) \quad (6)$$

gdzie:

$$\varphi(\alpha, \beta) = \operatorname{Re} Q(\alpha, \beta) \quad (7)$$

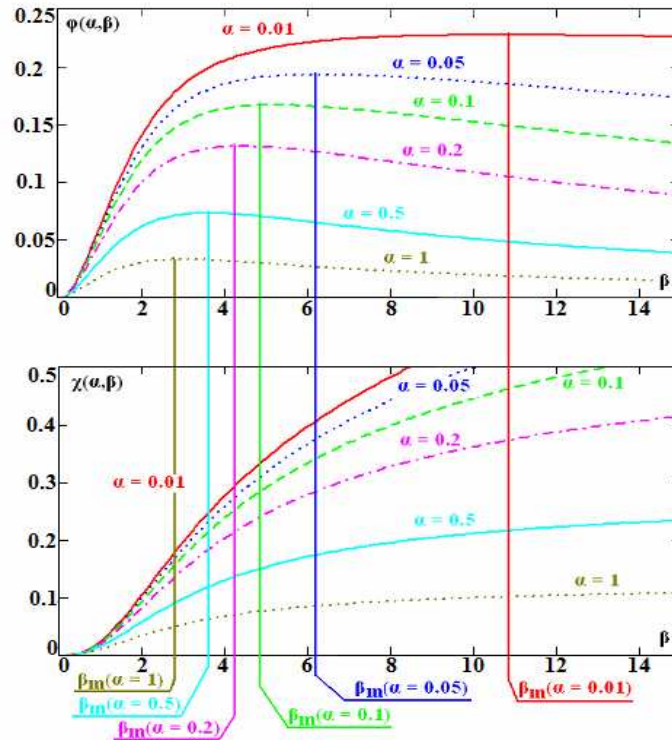
$$l = L_0 - L = n^2 \pi \mu_0 r_0 \chi(\alpha, \beta) \quad (8)$$

gdzie:

$$\chi(\alpha, \beta) = -\operatorname{Im} Q(\alpha, \beta) \quad (9)$$

Przy obliczeniach zmiany indukcyjności przyjęto konwencję wygodną w przypadku materiałów nieferromagnetycznych. Jeśli pod wpływem przewodzącego ośrodka indukcyjność cewki maleje, a rezystancja rośnie, to wygodnie jest zdefiniować te zmiany tak, aby zawsze były dodatnie. Przez  $R_0$  i  $L_0$  oznaczono rezystancję i indukcyjność cewki oddalonej od przewodzącego ośrodka, a  $R$  i  $L$  to odpowiednio rezystancja i indukcyjność cewki zbliżonej do badanej powierzchni. Wartości funkcji  $\varphi(\alpha, \beta)$  i  $\chi(\alpha, \beta)$  można wyznaczyć numerycznie z dowolną dokładnością. Okazało się także, że można wystarczająco dokładnie obliczać wartości tych funkcji bezpośrednio we współczesnym przyrządzie pomiarowym w trakcie trwania testów. Aby poznać własności prądów wirowych przydatne dla badań nieniszczących, wykonano obliczenia numeryczne, a wyniki zamieszczono w formie wykresów na rysunku 2. Wykresy funkcji  $\varphi(\alpha, \beta)$  i  $\chi(\alpha, \beta)$  wykonano w zależności od uogólnionego parametru  $\beta$  przy różnych wartościach parametru  $\alpha$ . Obserwując kształt wykresu funkcji  $\varphi(\alpha, \beta)$ , zauważono, że osiąga ona maksimum przy pewnej wartości parametru  $\beta$ . Konduktywność we wzorach opisujących zmianę impedancji cewki stykowej spowodowanej obecnością przewodzącego ośrodka występuje tylko pod postacią tego uogólnionego parametru  $\beta$ . Zatem w przypadku tej wartości  $\beta$  zmiany konduktywności nie będą wpływały na zmiany rezystancji cewki pomiarowej. Uogólniony parametr  $\beta$  jest proporcjonalny do pierwiastka z iloczynu konduktywności  $\sigma$  badanego materiału i częstotliwości prądów wirowych  $f = \frac{\omega}{2\pi}$ . Znalezienie optymalnej, dla konkretnych zastosowań, częstotliwości prądów wirowych jest równoznaczne z wyznaczeniem

optymalnej wartości parametru  $\beta$ . Przez  $\beta_m$  oznaczono wartość charakterystyczną argumentu, dla którego funkcja  $\varphi(\alpha, \beta)$  osiąga maksimum. Wartość ta zależy od odległości między cewką a powierzchnią badanego elementu.



Rys. 2. Wykresy funkcji  $\varphi(\alpha, \beta)$  i  $\chi(\alpha, \beta)$  w zależności od parametru  $\beta$  dla kilku wybranych wartości parametru  $\alpha$

Źródło: Opracowanie własne

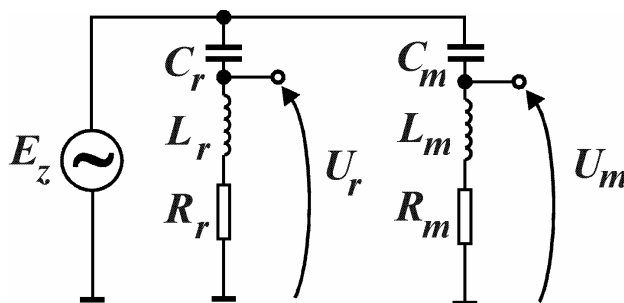
Postanowiono odległość tę wyrażać za pomocą uogólnionego parametru  $\alpha$ . Im  $\alpha$  jest mniejsze, czyli cewka jest bliżej badanego elementu, tym większa jest wartość parametru  $\beta_m(\alpha)$ . Wartości  $\beta_m(\alpha)$  odpowiada jednoznacznie charakterystyczna częstotliwość:

$$f_m(\alpha) = \frac{\beta_m^2(\alpha)}{2\pi r_0^2 \mu_0 \sigma} \quad (10)$$

## 2. KOMPENSACJA ODDALENIA CEWKI OD BADANEJ POWIERZCHNI

Obserwując wykresy z rysunku 2 oraz dokładne analizy [6], można zauważyć wyjątkowo duży wpływ oddalenia cewki od badanej powierzchni na zmianę składowych impedancji sondy. To znaczy, że błąd spowodowany zmianą oddalenia sondy, czy chropowatością powierzchni będzie znaczny. Najpopularniejszym sposobem kompensacji tych błędów jest sposób zaproponowany przez Förstera i stosowany w podobnej formie w wielu współczesnych urządzeniach. Każda sonda przeznaczona do badań metodą prądów wirowych jest pojedynczą cewką lub układem kilku cewek. Cewka ta włączona jest w układ pomiarowy zaprojektowany tak, aby zmiany składowych impedancji cewki wpływały na wygodne do pomiaru parametry obwodu

elektrycznego. Wysoką czułość można uzyskać na przykład wtedy, gdy cewka jest elementem obwodu rezonansowego, a częstotliwość prądu cewki jest bliska częstotliwości rezonansowej. Na rysunku 3 przedstawiono schemat [7] dwóch szeregowych obwodów rezonansowych zasilanych z tego samego źródła napięcia zmiennego. Cewki zastąpiono na schemacie rezystancją i indukcyjnością. Prawy obwód rezonansowy zawiera cewkę pomiarową. To właśnie jej rezystancja i indukcyjność zmieniają się w wyniku obecności przewodzącego, badanego elementu. Kondensator  $C_m$  posiada stałą, niezmienną w czasie pomiaru pojemność. Cewka lewego obwodu jest cewką odniesienia i posiada stałą, niezmienną w czasie pomiaru impedancję  $R_r + j\omega L_r$ . Pojemność  $C_r$  jest przestrajana. Można wyobrazić sobie, że jest to kondensator trwale połączony precyzyjną przekładnią z obrotową tarczą z narysowaną skalą, odczytywaną na płycie czołowej przyrządu. Może to być także zestaw diod pojemnościowych polaryzowanych napięciem zmiennym za pomocą mikrokontrolera. W czasie pomiaru operator lub mikrokontroler powinien zmieniać pojemność  $C_r$ , przesuując wyskalowaną tarczę lub zmieniając napięcie, równocześnie obserwując wskazanie woltomierza mierzącego różnicę amplitud napięć na obu cewkach tak, by doprowadzić do ich równości  $|U_r| = |U_m|$ . Równość tę uzyskuje się przy pewnej wartości pojemności  $C_r$ , która w zasadzie jest miarą konduktywności materiału, z którego wykonano badany element. Wystarczy wykonać proces skalowania polegający na przypisaniu każdej wartości pojemności odpowiadającej jej wartości konduktywności. Liczby będące wyznaczaną konduktywnością są umieszczone na obrotowej tarczy połączonej z przestrajającym kondensatorem. W systemie mikroprocesorowym przyporządkowane wartości napięcia polaryzującego diody odpowiadają bezpośrednio wartościom konduktywności. Należy je zapamiętać w pamięci mikrokontrolera.

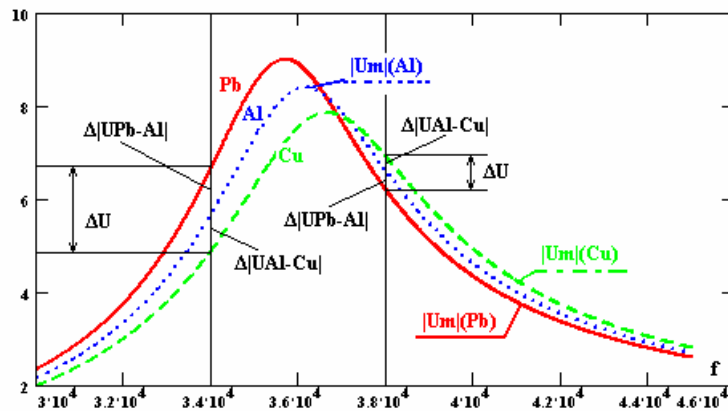


Rys. 3. Przykładowy schemat mostka pomiarowego

*Źródło: Opracowanie własne*

Na rysunku 4 pokazano wartość modułu napięcia  $|U_m|$  w funkcji częstotliwości  $f$  napięcia  $E_z$  zasilającego mostek pomiarowy. Zamieszczono tam trzy wykresy w przypadkach, gdy cewka pomiarowa zbliżona jest do miedzi Cu, aluminium Al oraz ołowiu Pb. Miedź jest najlepszym przewodnikiem prądu, ołów najgorszym z omawianych. Zbliżając cewkę pomiarową do powierzchni badanego, przewodzącego elementu, zmniejsza się indukcyjność cewki pomiarowej  $L_m$ , a tym samym przesuwa się częstotliwość rezonansowa obwodu  $L_m C_m$  w prawo, w stronę wyższych częstotliwości tym bardziej, im lepiej ów materiał przewodzi prąd elektryczny. Równocześnie następuje wzrost rezystancji cewki  $R_m$ , a więc zmniejszenie dobroci obwodu rezonansowego, czyli „spłaszczenie” charakterystyki  $|U_m(f)|$ , opisującej zależność modułu napięcia na cewce pomiarowej w funkcji częstotliwości tym bardziej, im

przewodność właściwa materiału jest większa. Przyrząd pomiarowy skonstruowany jest w ten sposób, że częstotliwość zmian napięcia zasilającego mostek  $E_z$  jest stała. Jeżeli pomiar będzie wykonywany przy częstotliwości mniejszej od rezonansowej, czyli znajdującej się na „lewym zboczach charakterystyk”, to na zmianę modułu mierzonego napięcia  $U_m$  wpływają w tym samym kierunku równocześnie zmiany rezystancji i indukcyjności. Wówczas zmiany  $\Delta|U_{Al-Cu}|$  oraz  $\Delta|U_{Pb-Al}|$  są duże, zatem duża będzie też czułość przyrządu. Jeżeli wybierze się częstotliwość pomiaru większą od częstotliwości rezonansowej, znajdującej się na „prawym zboczach charakterystyk”, to zmiany rezystancji cewki zmniejszą zmiany spowodowane zmniejszeniem indukcyjności, ponieważ kierunki obu zmian są przeciwne. Zmiany napięć  $\Delta|U_{Al-Cu}|$  oraz  $\Delta|U_{Pb-Al}|$  są wówczas dużo mniejsze. Czułość tak zestrojonego przyrządu będzie zauważalnie mniejsza. Ten drugi sposób strojenia przyrządu, „na prawym zboczach charakterystyk”, mimo mniejszej czułości, ma ważną zaletę. Dobierając odpowiednią częstotliwość oraz parametry cewki porównawczej i konstrukcję kondensatora  $C_r$ , można zrealizować kompensację wpływu wad powierzchniowych, nierówności powierzchni i oddalenia cewki na wynik pomiaru konduktywności. Mechanizm kompensacji wpływu oddalenia cewki od powierzchni badanego elementu można zrealizować dwojako. W pierwszym wykorzystuje się fakt, iż zmiany amplitudy napięcia  $U_m$  wywołane zmianą indukcyjności, spowodowaną pewną zmianą konduktywności, są większe od zmian amplitudy napięcia  $U_m$  wywołane zmianą rezystancji spowodowaną tą samą zmianą konduktywności. Ten mechanizm kompensacji wymaga dobrania częstotliwości prądów wirowych, czyli częstotliwości zmian napięcia zasilającego cewkę tak, aby zmiany konduktywności nie wpływały lub wpływały w niewielkim stopniu na zmiany rezystancji cewki pomiarowej. Częstotliwość ta odpowiada uogólnionemu parametrowi  $\beta = \beta_m$ .

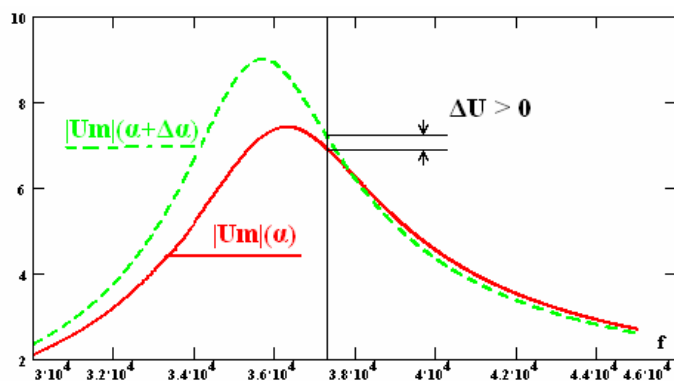


Rys. 4. Moduł napięcia  $U_m$  na cewce pomiarowej z układu przedstawionego na rysunku 3. w funkcji częstotliwości napięcia zasilającego

*Źródło: Opracowanie własne*

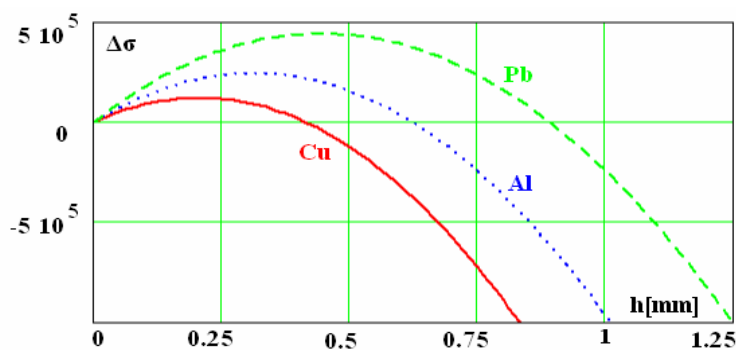
Wraz ze wzrostem odległości cewki od badanej powierzchni rezystancja cewki maleje, a indukcyjność rośnie. Na rysunku 5 narysowano wykres amplitudy napięcia  $U_m$  na cewce pomiarowej w funkcji częstotliwości w przypadku, gdy cewka zbliżona jest do badanej powierzchni na odległość odpowiadającą wartości parametru  $\alpha$  i  $\alpha + \Delta\alpha$ . Po wybraniu częstotliwości prądów wirowych, zaznaczonej na rysunku pionową kreską,

oddalenie cewki od badanej powierzchni spowoduje wzrost amplitudy napięcia na cewce pomiarowej. Teraz zmiany amplitudy napięcia  $U_m$  wywołane zmianą rezystancji, spowodowaną pewną zmianą konduktywności, są większe od zmian amplitudy napięcia  $U_m$  wywołane zmianą indukcyjności spowodowaną tą samą zmianą konduktywności. Porównując ten rysunek z rysunkiem 4 widać, że wzrost amplitudy napięcia na cewce pomiarowej odpowiada zwiększeniu konduktywności. Innymi słowy, wzrost konduktywności powoduje wzrost amplitudy napięcia tak, jak niewielkie oddalenie cewki od badanej powierzchni. Ostatecznie udało się w opisany sposób tak zestroić przyrząd pomiarowy, że zwiększenie oddalenia cewki od powierzchni zwiększa wynik pomiaru konduktywności tak, jak przedstawiono to na rysunku 6. Wykreślono tam trzy krzywe. Każda jest wykresem bezwzględnego błędu pomiaru konduktywności w funkcji odległości cewki pomiarowej od powierzchni elementu o znanej konduktywności. Opisana metoda kompensacji działa też w przypadku, gdy „oddalenie cewki-sondy” spowodowane jest chropowatością powierzchni.



Rys. 5. Wpływ oddalenia cewki pomiarowej od badanej powierzchni

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 6. Kompensacja wpływu oddalenia cewki od badanej powierzchni

Źródło: Opracowanie własne

### 3. PROPONOWANA METODA SKALOWANIA KONDUKTOMETRU

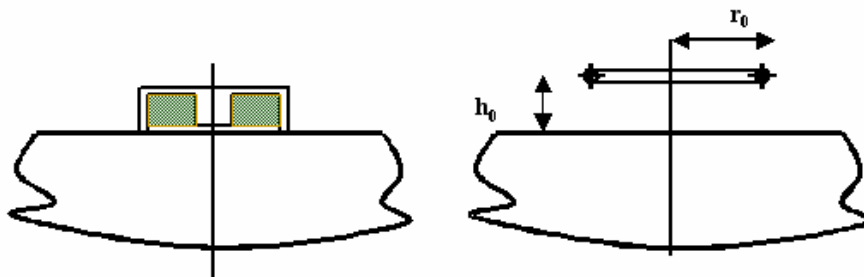
W technice metrologii wiropądowej nie da się uniknąć procesu skalowania przyrządów za pomocą wzorców. Modele matematyczne nie są w stanie uwzględnić wszystkich zjawisk pasożytniczych. Nie da się też nawinąć dwóch identycznych cewek. Zważywszy, iż wpływ zmian mierzonej konduktywności na składowe impedancji jest



niewielki, co skutkuje koniecznością budowy bardzo dokładnych przyrządów pomiarowych, często wykorzystujących wyrafinowane systemy elektroniczne, należy zawsze przyporządkować eksperymentalnie wielkościom bezpośrednio mierzonym wartości wyznaczanych parametrów.

Proces skalowania polega na ogół na zapamiętaniu kilku punktów wyznaczonej charakterystyki. Skala między tymi punktami jest aproksymowana lub interpolowana krzywą wyliczoną teoretycznie na podstawie jakiegoś modelu matematycznego. Uproszczenia modelu matematycznego czynią pewną rozbieżność między rzeczywistą i aproksymowaną charakterystyką przyrządu. Eksperymentalne zapamiętywanie punktów charakterystyki jest dokonywane poprzez pomiar z wykorzystaniem wzorca o znanej wartości konduktywności i o znanych wymiarach geometrycznych. Jeżeli model, którym wyznacza się charakterystykę przyrządu między punktami skalowania, jest niedokładny, to należy zastosować więcej punktów skalowania, aby uzyskać wymaganą dokładność wyznaczonej skali.

Do realizacji proponowanej metody skalowania wykorzystano prezentowany model matematyczny uproszczonej cewki o  $n$  zwojach skupionych w jednym okręgu o promieniu  $r_0$  umieszczonej w odległości  $h$  od powierzchni badanego elementu. Za pomocą tego modelu zbudowano skalę przyrządu, czyli określono przyporządkowanie: zmierzonym wartościom zmian rezystancji i indukcyjności cewki przypisano wartości wyznaczanych parametrów, na przykład; konduktywność materiału, odległość między cewką a badaną powierzchnią. W procesie skalowania każdej rzeczywistej cewce, przedstawionej z lewej strony rysunku 7, przyporządkowuje się jej zastępcze parametry  $h_0$  oraz  $r_0$  w ten sposób, aby zmiany składowych impedancji cewki modelowej, przedstawionej z prawej strony rysunku 7, były identyczne ze zmianami impedancji cewki rzeczywistej. Wtedy, przynajmniej wokół punktu skalowania, wyliczoną matematycznie skalę wyznacza się szukane wielkości z akceptowanym błędem. Aby wykonać takie skalowanie, należy rzeczywistą cewkę stykową zbliżyć do powierzchni polerowanego wzorca, zmierzyć zmianę jej rezystancji i indukcyjności, a z układu równań (6) i (8) wyliczyć wartość uogólnionego parametru  $\alpha_0$  oraz wartość promienia cewki  $r_0$ , przy których zmiany rezystancji i indukcyjności będą równe zmierzonym. Na podstawie wyliczonej wartości  $\alpha_0$  wyznacza się odległość  $h_0$ .



Rys. 7. Po przytknięciu rzeczywistej cewki do badanego elementu zmieniają się jej składowe impedancji o pewne wartości. Proces skalowania polega na wyznaczeniu parametrów cewki modelowej, dla których zmiany jej impedancji będą identyczne jak cewki rzeczywistej

*Źródło: Opracowanie własne*

$$h_0 = \frac{\alpha_0 r_0}{2} \quad (11)$$

Jest to teoretycznie wyliczona odległość będąca parametrem rzeczywistej cewki. Nazwano ją zastępczą odległością cewki od badanej powierzchni. Wartość  $\alpha_0$  jest natomiast uogólnioną zastępczą odległością cewki od badanej powierzchni. Jeżeli tę rzeczywistą cewkę oddali się od badanej powierzchni o wartość  $h$ , to uogólniony parametr  $\alpha$  wynosi:

$$\alpha = \frac{2(h + h_0)}{r_0} \quad (12)$$

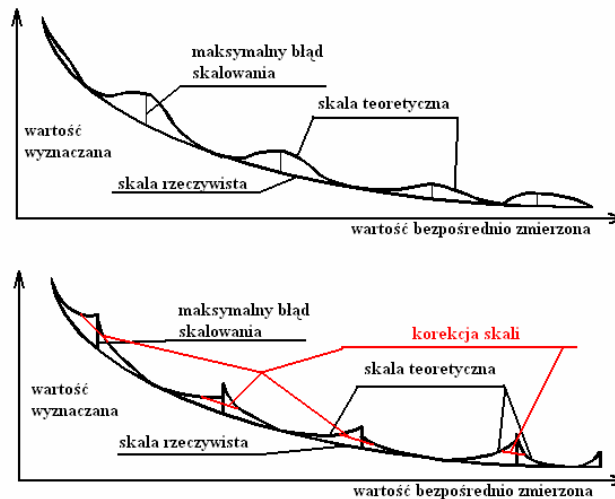
Parametr  $h_0$  charakteryzuje cewkę. Określa on, w jaki sposób „uzwojenia cewki są zbliżone do badanej powierzchni”, wyznaczając minimalną wartość uogólnionego parametru  $\alpha$  cewki modelowej. Im większa jest wartość parametru  $\alpha$ , tym mniejsza będzie czułość tej cewki-sondy. Zatem trzeba starać się tak konstruować cewki stykowe, aby ich parametr  $h_0$  był jak najmniejszy. Parametr  $r_0$  jest zastępczym promieniem cewki. Jest on też swoistym parametrem cewki-sondy określającym obszar badanej cewką powierzchni. Parametry tego obszaru wpływają na zmiany składowych impedancji cewki. Jeżeli ten obszar nie jest jednorodny, to wynik pomiaru będzie pewną średnią z parametrów tego obszaru. Promień zastępczy też będzie określał możliwości badania krawędzi elementu.

Opisany proces skalowania czyni, że wielowymiarowa, w omawianym przypadku dwuwymiarowa, przestrzeń teoretycznej skali przyrządu jest styczna do rzeczywistej skali w punkcie skalowania. Jeżeli wykona się pomiary w warunkach nieznacznie różnych od warunków skalowania, to błąd przyporządkowania tak stworzonej skali przyrządu względem rzeczywistej będzie niewielki. Problem komplikuje się wtedy, gdy zakres przyrządu jest bardzo szeroki. Dodatkowo, gdy zastosuje się wyższe częstotliwości, przy których teoretyczny model wyznaczający skalę teoretyczną jest mniej dokładny, to spowoduje się większą rozbieżność obu skal. Proponuje się wtedy wykonać proces skalowania w kilku punktach.

Tworzona wówczas skala teoretyczna będzie styczna do rzeczywistej w wielu punktach, w których błąd skalowania jest równy zero. Przyjęcie tej zasady jest równoznaczne z faktem, iż parametry cewki pomiarowej  $h_0$  i  $r_0$  są różne w różnych warunkach. Ostatecznie po zmierzeniu zmian składowych impedancji cewki odczytuje się jej parametry zastępcze  $h_0$  i  $r_0$ , zapamiętane w procesie skalowania i przypisane do fragmentu przestrzeni skalującej.

Każdym procesem skalowania wyznacza się funkcję-skalę teoretyczną, przyporządkowującą wartościom bezpośrednio zmierzonym pewną wartość wyznaczanego parametru. Funkcja ta jest tylko przybliżeniem funkcji idealnej, będącej skalą rzeczywistą. Stosowanie wzorców doprowadza do identyczności skali teoretycznej z rzeczywistą w pewnych punktach skalowania. Między tymi punktami charakterystyka przyrządu jest aproksymowana. Na rysunku 8 przedstawiono na jednym wykresie obie skale: rzeczywistą i teoretyczną. W celu uproszczenia wykreślono funkcję będącą skalą jednowymiarową. Górna część rysunku przedstawia skalę przyrządu wyznaczoną klasycznie. Obie skale pokrywają się w punktach skalowania. Między tymi punktami wyznaczono teoretycznie funkcje, którymi zastąpiono rzeczywiste, w projektowanym urządzeniu. Są to funkcje ciągłe na przykład opisane wielomianami. Oczekuje się zatem, że błąd skalowania przyjmuje największe

wartości między punktami skalowania. Proponowana metoda skalowania, wyznaczająca parametry zastępcze cewki, w opisanej wersji posiada pewną niedogodność. Wokół każdego punktu skalowania, gdzie pokrywają się skale rzeczywista i teoretyczna, stosuje się pewne wzory matematyczne i wyznaczone parametry. Inny punkt skalowania należy do innej strefy, gdzie obowiązują inne parametry. Wyznaczona tam skala jest obliczana według innej zależności. Powstaje zatem na granicy stref, wokół punktów skalowania, nieciągłość skali. Efekt ten przedstawiono w dolnej części rysunku 8. W tym przypadku błąd skalowania też jest największy między punktami skalowania.



Rys. 8. Porównanie własności skali klasycznej i zaproponowanej

*Źródło: Opracowanie własne*

Dobierając odpowiednio punkty skalowania i granice stref, można uzyskać błąd skalowania, nawet w skomplikowanych wielowymiarowych aplikacjach, znacznie mniejszy od błędów skalowania wykonanego innymi metodami. Nieciągłość wyznaczonej skali jest jednak uciążliwa. Sugeruje ona istnienie drobnej wady w badanym materiale. Przykładowo, w trakcie ciągłego pomiaru grubości folii przesuwa się cewkę w miejsce, gdzie folia jest nieznacznie cieńsza. Zmniejszenie grubości folii jest niewielkie, zatem oczekuje się, że przyrząd pokaże tę samą wartość, ewentualnie ostatnia cyfra ulegnie zmniejszeniu. Tymczasem wskutek nieciągłości skali wskazanie przyrządu może nieznacznie wzrosnąć. Aby wyeliminować tę niedogodność, zastosowano pewną eucharystyczną modyfikację. Wprowadzono jednostkę miary odległości punktu, scharakteryzowanego współrzędnymi, będącymi bezpośrednio mierzonymi wielkościami od punktu skalowania określonego znanymi współrzędnymi. Na rysunku 8 jest to długość odcinka na osi odciętych łączącego interesujący punkt z najbliższym punktem skalowania. Za pomocą tej miary można opisać i zapamiętać granice stref przynależnych do konkretnych punktów skalowania. W każdej strefie obowiązują inne, wynikające ze skalowania, parametry zastępcze cewki. Za pomocą tej miary opisano w każdej strefie pas buforowy o przyjętej „a priori” szerokości. Jeżeli bezpośredni wynik pomiaru odpowiada punktowi znajdującemu się wewnątrz strefy ograniczonej pasem buforowym, to obliczenia są realizowane zgodnie z zadanymi parametrami. Jeżeli natomiast wynik pomiaru wskazuje punkt znajdujący się w pasie buforowym, to uruchamiany jest

algorytm korekcji. Korekcja polega na znalezieniu najkrótszego odcinka (funkcji liniowej), łączącego jeden punkt graniczny pasa buforowego jednej strefy z punktem granicznym w strefie sąsiedniej, zawierającego punkt odpowiadający aktualnemu pomiarowi. Po znalezieniu równania tego odcinka odczytywane są wartości wielkości wyznaczanych. W przypadku skali jednowymiarowej, przedstawionej na rysunku 8, opisany proces korekcji polega na zastąpieniu skali teoretycznej między sąsiednimi strefami linią prostą, zaznaczoną na rysunku. W przypadku skali jednowymiarowej algorytm korekcji zmniejsza błąd skalowania. W przypadku skali wielowymiarowych najkrótszy odcinek aproksymujący niekoniecznie jest tym optymalnym, jednak skala przyrządu będzie funkcją ciągłą.

#### 4. ELIMINACJA WPLYWU CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI

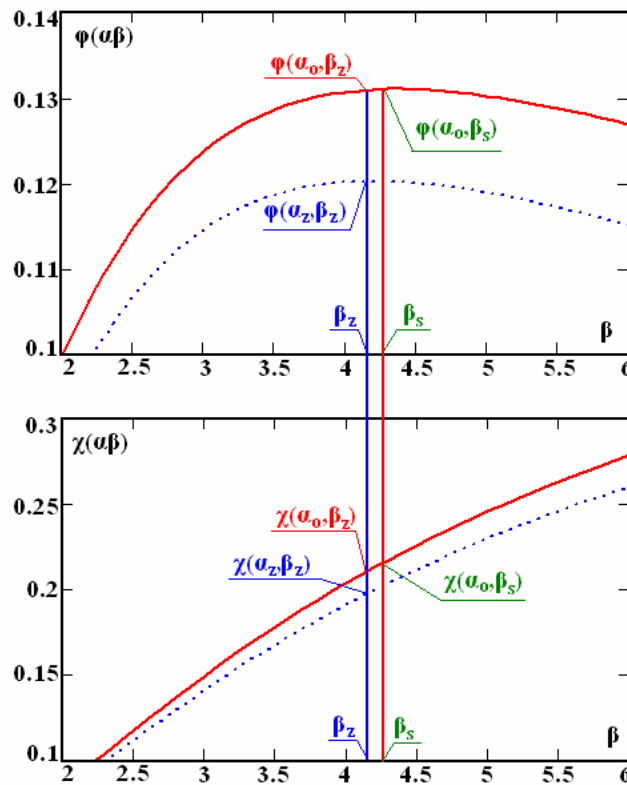
Typowe drobne wady będące pęknięciami, rysami, rozwarstwieniami, oddziałują na przyrząd pomiarowy tak, jakby nastąpiło pozorne zmniejszenie konduktywności i równocześnie nastąpił pozorny wzrost odległości cewki od powierzchni badanego elementu. Twierdzenie to jest oczywiście słuszne wtedy, gdy do wyznaczania konduktywności i odległości, zastosuje się model matematyczny i proces skalowania nieuwzględniający istnienia wad. Trudno jest sobie wyobrazić zbudowanie uniwersalnego modelu matematycznego, pozwalającego opisać choćby tylko kilka typowych nieciągłości w strukturze badanego elementu w taki sposób, aby skutecznie wyliczyć poprawkę, umożliwiającą uniezależnienie wyniku pomiaru konduktywności od omawianych wad. Kłopoty te można ominąć, stosując modyfikację zaproponowanego procesu skalowania.

Przykładowe rozwiązanie omawianego mechanizmu można opisać, posługując się rysunkiem 9. Wykreślono tam funkcje  $\varphi(\alpha, \beta)$  oraz  $\chi(\alpha, \beta)$  w zależności od zmian uogólnionego parametru  $\beta$ . Funkcje te zdefiniowano wzorami (7) i (9). Są one unormowanymi zmianami rezystancji i indukcyjności, wywołanymi obecnością przewodzącego ośrodka. Mierząc zatem obie składowe impedancji cewki, można z układu równań (6) i (8), wyliczyć zmierzone uogólnione parametry  $\alpha = \alpha_z$  i  $\beta = \beta_z$ . Parametr  $\alpha$ , zdefiniowany wyrażeniem (12), jest unormowaną odległością cewki-sondy od badanej powierzchni. Bezwymiarowy parametr  $\beta$  opisany wzorem (2) jest zależny od częstotliwości prądów wirowych i szukanej konduktywności  $\sigma$ .

Ostatecznie zmierzono odległość cewki od powierzchni elementu wyrażoną wartością  $\alpha = \alpha_z$ . Wartość ta jest większa od wartości  $\alpha = \alpha_0$ , zmierzonej w procesie skalowania zestawu cewka-konduktometr na próbkach polerowanych. Z wyrażenia (12) można wyliczyć pozorny wzrost odległości cewki od powierzchni badanego elementu.

$$h_p = \frac{\alpha_z r_0}{2} - \frac{\alpha_0 r_0}{2} = \frac{r_0}{2} (\alpha_z - \alpha_0) = \frac{r_0}{2} \Delta \alpha_{zo} \quad (13)$$

Pozorna odległość cewki od badanej powierzchni  $h_p$  jest proporcjonalna do różnicy zmierzonego i ustalonego procesem skalowania uogólnionego parametru  $\Delta \alpha_{zo}$ . Przyjęto założenie, że średni profil chropowatości badanych elementów jest podobny do tych profili, które występują na dostępnych wzorcach.



Rys. 9. Ilustracja mechanizmu kompensacji stanu powierzchni badanego elementu oraz zmian oddalenia sondy na wynik pomiaru konduktywności

Źródło: Opracowanie własne

Wystarczy teraz zmierzyć pozorną odległość wywołaną chropowatością kilku próbek wzorcowych o znanej konduktywności, aby zapamiętać pary liczb:

- pozorną odległość  $h_p$  lub odpowiadająca jej wartość uogólniona  $\Delta\alpha_{zo}$ ,
- pozorną zmianę konduktywności wyrażoną zmianą uogólnionego parametru  $\beta$  równa:

$$\Delta\beta_{zo} = \beta_s - \beta_z = r_0 \sqrt{2\pi f \mu_0} (\sqrt{\sigma_s} - \sqrt{\sigma_z}) \quad (14)$$

gdzie:

- $\sigma_s$  – konduktywność rzeczywista w trakcie skalowania i szukana w trakcie pomiaru,
- $\sigma_z$  – konduktywność zmierzona, czyli pozornie zmniejszona wskutek chropowatości powierzchni.

Następnie można metodą interpolacji zbudować i zapamiętać funkcję :

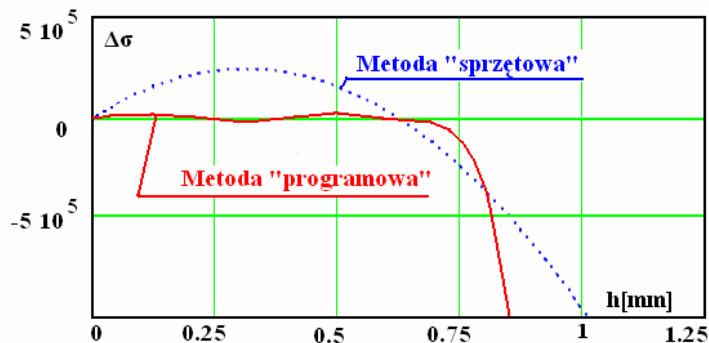
$$\Delta\beta_{zo} = f(\Delta\alpha_{zo}) \quad (15)$$

W prostszej wersji funkcję (15) należy wyznaczyć, stosując wzorec o wartości konduktywności mieszczącej się w środku zakresu pomiarowego. Dokładniejsza metoda wymaga wyznaczenia kilku takich funkcji. Każda z nich powinna być wyznaczana za pomocą wzorca o dobranej konduktywności. Zaleca się wtedy interpolację dwuwymiarową, wykonywaną w trakcie pomiaru na podstawie

zapamiętanych danych. Ostatecznie wykonując pomiar, wyznacza się wartości  $\alpha=\alpha_z$  i  $\beta=\beta_z$  obarczone błędem chropowatości lub oddalenia cewki od powierzchni elementu. Na podstawie znajomości  $\alpha_0$  oblicza się uogólnioną pozorną zmianę odległości  $\Delta\alpha_{z0}$ . Wykorzystując eksperymentalnie wyznaczoną funkcję (15), określa się pozorną zmianę uogólnionego parametru  $\Delta\beta_{z0}$  i z równania (14) oblicza się szukaną wartość  $\sigma_s$ .

## WNIOSKI

Wpływ oddalenia sondy od gładkiej powierzchni badanego elementu wywołuje skutek identyczny jak chropowatość, zabrudzenia i brak płaskich obszarów. Proponowany proces podwójnego skalowania konduktometru umożliwi skuteczniejszą od dotychczas stosowanych kompensację tych wpływów. W trakcie eksperymentu rejestrowano wyniki pomiaru konduktywności gładkiego, płaskiego wzorca przy różnych oddaleniach cewki od powierzchni. Oddalenia te zmieniano, stosując nieprzewodzące podkładki o znanej grubości. Na rysunku 10 przedstawiono wyniki takich eksperymentów, wykonane za pomocą konduktometru realizującego omawianą metodę korekcji. Wykres ten oznaczono napisem „Metoda programowa”. Dla porównania zamieszczono identycznie wykonany wykres „Metoda sprzętowa”, sporządzony w przypadku klasycznego konduktometru SIGMATEST 2.067-060.



Rys. 10. Porównanie charakterystyk kompensacji omawianych metod

Źródło: Opracowanie własne

Okazuje się, że wyznaczona korekta ostatecznego wyniku pomiaru jest uniwersalna [8]. Ciekawe jest to, że korekta ta jest wiroprądową miarą chropowatości powierzchni, a więc tych nierówności, które nie wyznaczają kształtu elementu. Miara ta nie jest zgodna z żadną z zalecanych normami. Z obserwacji wynika, że najbardziej adekwatna do miar mechanicznych jest pozorną odległość cewki od badanej powierzchni  $h_p$  lub bezwymiarowy odpowiednik tej pozornej odległości  $\Delta\alpha_{z0}$ . W tabeli 1. obok ogólnie przyjętych miar chropowatości: Ra i Rz, zamieszczono tę wiroprądową, pierwotnie będącą korektą na potrzeby konduktometrii. Pomiar wykonano dla próbek ze stopu PA-38 o konduktywności 30.2 MS/m. Chropowatość zmierzono metodami Ra i Rz, następnie wiroprądowo. Przyrząd skalowano, wykorzystując wzorce chropowatości z materiału AM-10 o konduktywności równej 16 MS/m.

Tabela 1. Miary chropowatości

Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	$h_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	$h_p$ [ $\mu\text{m}$ ]
347	1579	690	26	80	130
156	747	850	15	48	60
96	347	250	6.2	22	30
35	198	250	1.4	7.4	10

Okazuje się zatem, że podwójny proces skalowania nie tylko umożliwia skuteczny pomiar konduktywności nierównych i chropowatych elementów, ale także pozwala szacować chropowatość badanej powierzchni. Opisana metoda sprawdza się nawet wtedy, gdy skalowanie polegające na znalezieniu funkcji (15), jest dokonywane jeden raz, na etapie produkcji, dla danej cewki pomiarowej.

## LITERATURA

- [1] Lewińska-Romicka A., *Badania nieniszczące. Podstawy defektoskopii*, Wydawnictwa Naukowo - Techniczne, Warszawa 2001.
- [2] Dzikowski L., *A definition of eddy current penetration depth useful for flaw detection and conductivity measurement*, [in:] "The Journal PAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics", Volume 8, Issue 1, Date: December 2008, pp. 10205-10206.
- [3] Jasiński W., Zawada P., *The investigation of discreteness in material of catalytic pipes by the eddy current method*, [w:] "Eksploracja i Niezawodność - Maintenance and Reliability", nr 2/2003, s. 28-30.
- [4] Yang Zhao-Jun, Liu Jian-Ying, *Reliability assessment of burnishing operation of aluminum alloy*, [w:] "Eksploracja i Niezawodność - Maintenance and Reliability", nr 4(44)/2009, s. 53-56.
- [5] Dzikowski L., *A mathematic model to determine optimum conditions for measurements of material conductance by means of the eddy current method applicable to large structures*, [in:] *Mašinstroenie i Technosfera XXI weka. Sbornik Trudov XV Meždunarodnoj Naučno-techničeskoj Konferenciji*, T.4, Donieck 2009, pp. 69-73.
- [6] Dzikowski L., *Errors in conductance measurement of materials that are used for construction of thick plates*, [in:] *Avtomatizacija: Problemy, Idei, Rešenija, Materialy Meždunarodnoj Naučno-techničeskoj Konferenciji*, Sewastopol 2009, Vidavnictvo SevNTU, pp. 87-90.
- [7] Dzikowski L., *Effect of eddy current frequency on measuring properties of devices used in non-destructive measurements of non-ferromagnetic metal plates*, [in:] "Archives of Materials Science and Engineering", Volume 32, Issue2, August 2008, pp. 77-84.
- [8] Dzikowski L., *Eddy current measurements of surface roughness*, [w:] *81<sup>th</sup> Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics, Gesellschaft für Angewandte Mathematik und Mechanik (GAMM)*. 22-26 march 2010, Karlsruhe-Germany, electronic version.

## EXAMINATION OF ROUGH SURFACES WITH EDDY CURRENT METHOD

### Summary

*As the relationship between some important parameters of materials and their electric conductivity really exists, it makes it possible to use the eddy current method to measure*

*conductivity of material in a non-destructive manner and then infer about the desired properties of materials, their continuous or non-continuous structure or some geometrical parameters. However, the substantial impact of surface condition demonstrated by examined materials onto test results is a significant drawback of the eddy current method. This is why, a new and innovative method for compensation of material surface roughness onto results of conductance measurements is proposed. The presented method is based on the double calibration process applied to the measuring kit of the conductometer and the measuring probe.*

**Key words:** *non-destructive testing, eddy currents, flaw detection, conductometry, surface roughness*

*Artykuł recenzował: dr hab. inż. Andrzej BAIER, prof. nadzw. PŚI.*