

Dr inż. Leszek Dzikowski

Instytut Elektroniki Politechniki Śląskiej w Gliwicach
ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice,
E-mail: ldzik@wp.pl

Prof. dr hab. inż. Andrzej Buchacz

Instytut Automatykacji Procesów Technologicznych i Zintegrowanych Systemów
Wytwarzania Politechniki Śląskiej w Gliwicach
ul. Konarskiego 35, 44-100 Gliwice,
E-mail: andrzej.buchacz@polsl.pl

Modyfikacja metody skalowania konduktometru

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

Streszczenie: Zaproponowano oryginalną, ulepszoną metodę podwójnego skalowania konduktometru wiroprądowego. Realizując tę metodę można uzyskać niezależność wskazań przyrządu od stanu powierzchni badanych elementów. Funkcja skalująca konduktometr jest wyznaczana dynamicznie w czasie trwania pomiaru na podstawie parametrów przypisanych eksperymentalnie sondzie-cewce stykowej oraz uniwersalnych równań matematycznych. Obliczona poprawka może być traktowana jako miara chropowatości powierzchni. Stosując opisaną modyfikację można znacznie usprawnić badania eksploatacyjne elementów wykonanych z metali nieżelaznych.

1. Wstęp

Konduktometr wiroprądowy jest urządzeniem służącym do nieniszczącego pomiaru konduktywności (przewodności właściwej) materiału, z którego wykonano badany element. Sondę wykonaną w postaci cewki stykowej zasila się napięciem przemiennym i przybliża do powierzchni elementu. Wokół cewki z prądem istnieje pierwotne pole magnetyczne. Pod wpływem tego pola w przewodzącym materiale indukują się prądy wirowe. Zgodnie z regułą Lentz'a wtórne pole magnetyczne wytworzone przez te prądy jest skierowane przeciwnie do wzbudzającego pola pierwotnego. W rezultacie w obrębie cewki-sondy powstaje pole wypadkowe zmieniające jej impedancję. Składowa pola pochodząca od prądów wirowych zależy od konduktywności materiału tworzącego badany element. Zatem zmiana impedancji sondy też będzie zależęć od mierzonej konduktywności. W konduktometrach wiroprądowych dokonuje się pomiaru składowych impedancji cewki-sondy i na tej podstawie wyznacza się konduktywność. Konduktometry, jako mierniki bezwzględnej wartości konduktywności, służą nie tylko do pomiaru elektrycznej przewodności właściwej metali nieżelaznych czy elektrolitów, ale wykorzystywane są do określania czystości metali, monitorowania struktury i jednorodności stopów metali kolorowych, pośredniego badania wytrzymałości i twardości, szacowania zawartości fosforu w miedzi, kontroli odlewów (polaryzacja miedzi), monitorowania procesów separacji np. Cu-Cr, sortowania złomu, wykrywania uszkodzeń zmęczeniowych i cieplnych w stopach aluminium (badania eksploatacyjne samolotów) i wielu innych.

Konduktometr skalowany jest za pomocą wzorców. W wyniku takiego skalowania przyporządkowuje się wielkościom bezpośrednio mierzonym (rezystancji i indukcyjności cewki) wartość wyznaczaną, czyli konduktywność. Jeżeli struktura badanych elementów jest podobna do struktury i kształtu stosowanych wzorców to wyniki pomiarów będą dokładne. Niestety w trakcie badań metodą prądów wirowych obserwuje się dwa zjawiska wyraźnie

utrudniające pomiary. Granice stosowania metod wiroprądowych są określone następstwami istnienia tych zjawisk.

1. Powierzchnia badanego elementu nie zawsze jest płaska. Często obserwuje się wklęsłości i wypukłości. W wyniku umieszczenia pierścienia dystansowego pod cewką pomiarową niweluje się kołysanie sondy na powierzchni, ale i tak nie można jej przytknąć do badanej powierzchni tak, by odległość od cewki była identyczna jak w czasie skalowania. Zmiana odległości cewki od badanego elementu silnie wpływa na zmiany jej impedancji, wyraźniej niż zmiany wyznaczonej konduktywności. Problem ten rozwiązuje się w ten sposób, że wprowadza się mechanizm kompensacji oddalenia cewki od powierzchni badanego elementu. Klasyczny mechanizm zaproponowany przez F. Förstera opisano między innymi w pracy Dzikkowskiego [5]. Do realizacji tej metody wykorzystano strukturę mostka. W jednej gałęzi umieszczono cewkę pomiarową włączoną szeregowo z kondensatorem. Drugą gałąź zbudowano też z szeregowego obwodu rezonansowego złożonego z cewki porównawczej i przestrajanego kondensatora. Pomiar polega na jednowymiarowym równoważeniu mostka za pomocą zmian pojemności kondensatora. Charakterystyka obwodu rezonansowego zmienia się w zależności od zmian rezystancji i indukcyjności cewki, a te z kolei zależą równocześnie od konduktywności badanego materiału i odległości sondy od powierzchni. Dzięki umiejętnemu zestrojeniu obwodów rezonansowych uzyskano wzrost wskazania mierzonej konduktywności wtedy, gdy cewka jest odsuwana na nieznaczną odległość. Dalsze odsunięcie cewki powoduje gwałtowny spadek wskazania będącego wynikiem pomiaru. Ostatecznie uzyskano strefę pewnych oddaleń sondy, dla których wynik pomiaru mieści się w granicach założonego błędu. W ten sposób zmniejszono dokładność przyrządu na korzyść możliwości pomiaru niepłaskich elementów. Według autorów było to najważniejsze osiągnięcie techniki pomiarowej realizowanej z wykorzystaniem zjawiska prądów wirowych w badaniach nieniszczących. Współczesne przyrządy wyposażono w mikrokontrolery o dużych mocach obliczeniowych i realizuje się obliczenia w czasie rzeczywistym, w trakcie pomiaru. Należy zatem szukać takich algorytmów obliczeniowych, którymi można kompensować zmiany odległości cewki od badanej powierzchni nie zwiększając wyraźnie błędu wyznaczania konduktywności.

2. Pole magnetyczne indukowanych prądów wirowych jest skierowane przeciwnie do pola wzbudzającego. Tworzy się zatem specyficzna zaporą utrudniająca wnikanie pola pierwotnego w głąb badanych elementów. Ostatecznie prądy wirowe indukują się tylko blisko powierzchni badanych elementów i tylko własności przypowierzchniowej warstwy wpływają na wynik pomiaru. Głębokość wnikania prądów wirowych silnie zależy od ich częstotliwości. Eksperymentalne badania są opisane między innymi w zbiorowej pracy traktującej o modelowaniu i wykrywaniu wad powierzchniowych [8]. W tej pracy, jak i w innej literaturze, stosuje się uproszczoną definicję pojęcia głębokości wnikania prądów wirowych, pochodzącą z grzejnictwa wiroprądowego. Nieco dokładniejszy opis tego zjawiska można znaleźć w opracowaniu Dzikkowskiego [2]. Skoro prądy wirowe płyną tylko na powierzchni badanego elementu to wszelkie chropowatości tej powierzchni utrudnią ich przepływ. Wówczas mierząc konduktywność wiroprądowym przyrządem zinterpretuje się ten stan jako pozorny wzrost konduktywności i pozorny wzrost oddalenia cewki od powierzchni. Przyrząd był skalowany za pomocą polerowanych wzorców, więc należy spodziewać się sporych błędów. Istniejący powszechnie pogląd, opisywany w zaleceniach i literaturze, proponuje stosowanie niskich częstotliwości. Wtedy prądy wnikają głęboko i ewentualne chropowatości powierzchni zakłócają pomiar tylko w niewielkim stopniu. Z dokładniejszej analizy wynika, że częstotliwość prądów wirowych wpływa nie tylko na głębokość penetracji, ale także na czułość przyrządu [4], [6].

Dla konkretnego testu, w wielu przypadkach, korzystnie jest dobrać optymalną, ze względu na maksymalną czułość, częstotliwość. Zawsze jednak procesy: dobór

częstotliwości, eliminacja wpływu chropowatość i kompensacja niedokładności ustawienia sondy względem powierzchni są ze sobą nierozdzielnie związane.

Impedancja cewki pomiarowej jest wielkością zespoloną, zatem mierząc obie jej składowe można wyznaczyć niezależnie dwa parametry badanego elementu lub wyznaczyć jeden i skompensować wpływ innego. Sposób wykorzystania dwóch wyników pomiaru do wyznaczenia jednego, wybranego parametru zależy od typu urządzenia. Między defektoskopami i konduktometrami istnieje poważna różnica. Proces pomiaru realizowany w konduktometrze utożsamiany jest z ciągiem czynności zmierzających do wyznaczenia bezwzględnej wartości konduktywności materiału, z którego wykonano element. Ostateczny wynik powinien być niezależny od innych czynników, niestety też wpływających na zmiany składowych impedancji cewki, takich jak ułożenie sondy względem badanego elementu oraz stan jego powierzchni. W badaniach defektoskopem nieistotna jest znajomość bezwzględnej wartości konduktywności materiału, z którego wykonano badany element natomiast ważne jest wykrycie wszelkich nieciągłości badanej struktury [9]. Zauważone powinno być każde pęknięcie czy chropowatość powierzchni. Takim urządzeniem powinno się zatem mierzyć pozorne zmiany konduktywności w odróżnieniu od konduktometru, który na owe pozorne zmiany powinien być nieczuły.

2. Własności poszukiwanego modelu matematycznego

Wynikiem opisanego procesu skalowania za pomocą wzorców jest przyporządkowanie wartościom wielkości bezpośrednio zmierzonym wartości wyznaczonej wielkości. Każdy zastosowany wzorzec służy do wyznaczenia jednego punktu skali. Między tymi punktami skala powinna być aproksymowana. Im funkcja aproksymująca będzie dokładniejsza tym mniej potrzeba wzorców do wyznaczenia skali zapewniającej akceptowany błąd w zadanym zakresie pomiarowym.

Jeżeli urządzeniem wiropiętym realizuje się pomiary dla różnych częstotliwości pola wzbudzającego lub nawet automatycznie dobiera się tę częstotliwość w czasie trwania testu oraz obligatoryjnie kompensuje zmiany odległości sondy od badanej powierzchni to skalowanie jest równoznaczne ze zbudowaniem funkcji czterech zmiennych. Argumentami funkcji skalującej są: częstotliwość prądów wirowych, odległość sondy od badanej powierzchni, zmierzona zmiana rezystancji cewki (składowa rzeczywista impedancji), zmierzona zmiana indukcyjności cewki (zależna od składowej urojonej impedancji cewki). Każdej czwórce wymienionych argumentów jednoznacznie przyporządkowano wyznaczaną konduktywność.

Proces skalowania z wykorzystaniem wzorców należy realizować dla zestawu składającego się z urządzenia pomiarowego i cewki-sondy. Po każdej zmianie sondy proces skalowania należy powtórzyć.

Aby wyznaczyć funkcję skalującą należy dysponować uniwersalnym, ale zarazem dokładnym modelem matematycznym umożliwiającym uwzględnienie wymienionych uwarunkowań.

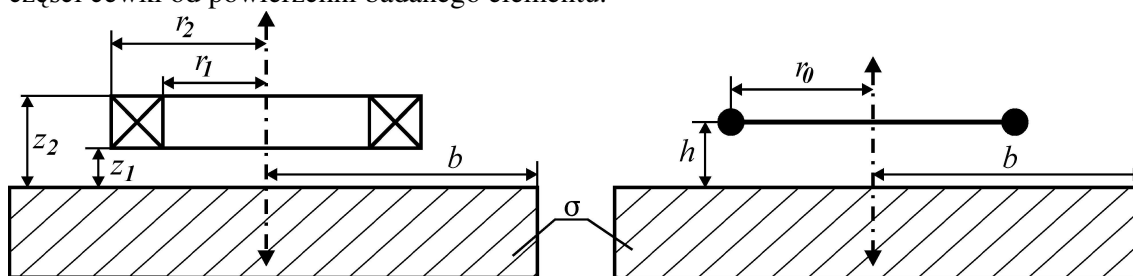
3. Matematyczny opis zjawiska wpływu przewodzącego obiektu na zmiany impedancji cewki pomiarowej

W dostępnej literaturze można znaleźć wiele matematycznych modeli przydatnych do wykonania opisanych czynności. Modele te uzyskano po rozwiązaniu równań Maxwella. Różnią się one sposobem rozwiązania i innymi zastosowanymi uproszczeniami.

Najpopularniejszą jest Metoda Elementów Skończonych MES. Sporo obliczeń wykonuje się też Metodą Elementów Brzegowych oraz Metodą Różnic Skończonych w Domenie Czasu. Wymienione sposoby obliczeń są przydatne w defektoskopii do

modelowania wad. Za ich pomocą można wyznaczyć wpływ struktury dowolnego kształtu na wielkości bezpośrednio mierzone.

Przy założeniu, iż podlegająca badaniu struktura jest jednolita, duża, o kształtach naturalnie opisanych walcowym układem współrzędnych wygodniejsze są metody analityczne. Kompletnie równania opisujące omawiane zjawiska opublikowali Dodd C.D., Deeds W.E oraz Luquire J.W. na początku lat 70-tych [1]. W modelu Dodd'a i Deeds'a funkcje będące rozwiązaniem omawianych równań różniczkowych mają postać całki w nieskończonych granicach z funkcji Bessela. Wygodnie jest zapisać wektor potencjału magnetycznego jako sumę szeregu. Wtedy stosunkowo łatwo jest uwzględnić skończone, ale walcowe wymiary badanych elementów oraz ominąć uciążliwy proces obliczania całki. Metoda ta znana pod angielską nazwą TREE (Truncated Region Eigenfunction Expansion) była wielokrotnie modyfikowana i stała się szybką oraz wygodną w zastosowaniach praktycznych [12]. W cytowanej pracy podano wyrażenia w formie możliwej do bezpośredniego zastosowania. Z lewej strony rysunku 1 przedstawiono modelowaną [12] cewkę powietrzną zawierającą n zwojów, skupionych w pierścieniu o wymiarach: r_1 – promień wewnętrzny uzwojenia, r_2 – promień zewnętrzny uzwojenia, z_1 – odległość zewnętrznej części cewki od powierzchni badanego elementu, z_2 – odległość wewnętrznej części cewki od powierzchni badanego elementu.



Rysunek 1. Wymiary modelowanych cewek stykowych

Pod cewką znajduje się gruby walec o promieniu b wykonany z przewodzącego materiału o konduktywności σ . Materiał walca nie jest ferromagnetykiem. Zmianę impedancji cewki powietrznej, o znanych wymiarach, w wyniku zbliżenia jej do przewodzącego elementu wyraża się wzorem [12]:

$$\Delta Z_r = \frac{j\omega 2\pi\mu_0 n^2}{(r_2 - r_1)^2 (z_2 - z_1)^2} \bullet \sum_{i=1}^{\infty} \text{Int}^2(q_i, r_1, q_i, r_2) \frac{[\exp(-q_i z_1) - \exp(-q_i z_2)]^2}{[(q_i b) J_0(q_i b)]^2} \frac{q_i - p_i}{q_i + p_i} \quad (1)$$

gdzie:

$$\text{Int}(x_1, x_2) = \int_{x_1}^{x_2} x J_1(x) dx \quad (2)$$

Przez x_i oznaczono miejsca zerowe równania:

$$J_1(x_i) = 0 \quad (3)$$

a współczynniki q_i wyrażono wzorem:

$$q_i = \frac{x_i}{b} \quad (4)$$

Współczynniki p_i oblicza się natomiast z zależności:

$$p_i = \sqrt{q_i^2 + j\omega\mu_0\sigma} \quad (5)$$

Ze wzoru (1) można obliczyć zmianę rezystancji i indukcyjności cewki powietrznej z uwzględnieniem jej wymiarów geometrycznych:

$$r = \operatorname{Re}(\Delta Z_T) \quad (6)$$

$$l = -\frac{\operatorname{Im}(\Delta Z_T)}{\omega} \quad (7)$$

Sporą niedogodnością opisanego modelu, utrudniającą jego wykorzystanie do budowy funkcji skalujących, jest uwzględnienie wszystkich wymiarów cewki. Wprowadzając do obliczeń dodatkowe elementy znacznie komplikuje się wzory, wydłuża czas obliczeń i uniemożliwia wyznaczanie skali w czasie rzeczywistym w trakcie testu. Mimo, iż wykonano dwie cewki posiadające te same wymiary i tę samą liczbę zwojów to sposób ich nawinięcia w czasie produkcji nie jest kontrolowany. Ostatecznie wykonane z nich sondy cechują się nieco innymi wrażliwościami. Zatem dla każdej z nich należy przeprowadzić odrębną procedurę skalowania.

W proponowanej przez autorów metodzie skalowania wykorzystuje się uproszczony model uwzględniający cewkę dwuwymiarową. Zakłada się, iż wszystkie n zwojów cewki skupione są w jednym okręgu o promieniu r_0 umieszczonym równoległe w odległości h od powierzchni badanego elementu. Założono, że element przewodzący jest półprzestrzenią. Z prawej strony rysunku 1 schematycznie przedstawiono dwuwymiarową cewkę modelową. Podobne rozwiązanie zastosowano w [11] i zmodyfikowano w [3]. Pierwotną przyczyną zastosowanych uproszczeń była chęć zbudowania szybkiego w obliczeniach modelu służącego do wyznaczania optymalnej, ze względu na minimalizację błędów, częstotliwości prądów wirowych. Wygodnie jest zastosować uogólnione parametry:

$$\alpha = \frac{2h}{r_0} \quad (8)$$

$$\beta = r_0 \sqrt{\omega\mu_0\sigma} \quad (9)$$

Wówczas zmiana impedancji cewki opisana jest równaniem

$$\Delta Z = \omega\pi_0\mu_0\mu_r n^2 \cdot j\beta \int_0^\infty \frac{\lambda - \sqrt{\lambda^2 + j}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + j}} e^{-\alpha\beta\lambda} J_1^2(\beta\lambda) d\lambda \quad (10)$$

Wyodrębniając część rzeczywistą i urojoną zmiany impedancji wyznaczono zmianę rezystancji

$$r = R - R_0 = n^2 \omega\pi\mu_0 r_0 \varphi(\alpha, \beta) \quad (11)$$

gdzie:

$$\varphi(\alpha, \beta) = \operatorname{Re} \left(j\beta \int_0^{\infty} \frac{\lambda - \sqrt{\lambda^2 + j}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + j}} e^{-\alpha\beta\lambda} J_1^2(\beta\lambda) d\lambda \right) \quad (12)$$

i indukcyjności cewki:

$$l = L_0 - L = n^2 \pi \mu_0 r_0 \chi(\alpha, \beta) \quad (13)$$

gdzie:

$$\chi(\alpha, \beta) = -\operatorname{Im} \left(j\beta \int_0^{\infty} \frac{\lambda - \sqrt{\lambda^2 + j}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + j}} e^{-\alpha\beta\lambda} J_1^2(\beta\lambda) d\lambda \right) \quad (14)$$

Wyrażenia (12) i (14) są uogólnionymi zmianami składowych impedancji cewki wywołanymi obecnością przewodzącej półprzestrzeni.

4. Wyznaczanie funkcji skalującej konduktometr

Do realizacji proponowanej metody wymaga się zastosowania wzorców o znanej konduktywności, o polerowanych powierzchniach i o grubości wyraźnie większej od przewidywanej głębokości penetracji prądów wirowych. Cewkę stykową przykładają się do wzorca i przy zadanej częstotliwości prądów wirowych mierzy się zmiany rezystancji r i indukcyjności cewki l . Z układu równań powstałego po podstawieniu (8) i (9) do (11) i (13) oraz znajomości zmierzonych zmian r i l oblicza się wartości r_0 oraz $h=h_0$. Wyliczone wartości r_0 i h_0 są parametrami zastępczymi cewki. Zapamiętuje się je i wykorzystuje każdorazowo do wyznaczania konduktywności. W cyklu pomiarowym mierzy się zmiany rezystancji i indukcyjności. Następnie za pomocą wbudowanego wewnątrz mikrokontrolera wykonuje się obliczenia numeryczne. Rozwiązywany jest układ równań (11) i (13) ze względu na wartości α i β . Następnie z równań (9) i zmodyfikowanego równania (8):

$$\alpha = \frac{2(h_0 + h)}{r_0} \quad (15)$$

wyliczane są parametry σ i h . Poprzez wyznaczenie dwóch parametrów równocześnie, w sposób naturalny kompensuje się wpływ oddalenia sondy na wynik pomiaru konduktywności. Jeżeli powierzchnia mierzonego elementu jest płaska i gładka to wartość h powinna być równa zero. Sondę bowiem przytknięto do badanej powierzchni bez podkładki dystansowej. Jeśli zmierzona odległość $h=h_p$ wzrośnie to będzie to informacją o nierównościach na powierzchni. Doświadczenia zebrane w trakcie badań eksploatacyjnych sugerują uwzględnienie dwóch typów nierówności powierzchniowych. Pierwszy typ to nierówności powierzchniowe tworzące kształt przedmiotu obserwowany na długości porównywalnej z wymiarami poziomymi cewki. Owe nierówności nie będą zauważane jako pozorne zwiększenie konduktywności. Stosowanie proponowanej metody pomiaru i obliczeń umożliwia kompensację wpływu tych nierówności na zasadzie kompensacji zmian odległości sondy od powierzchni badanego elementu. Wynik pomiaru konduktywności jest wtedy obarczony tylko dodatkowym błędem spowodowanym zmniejszeniem wrażliwości [6].

Drugi typ nierówności nie jest związany ze zmianą kształtu przedmiotu. Te nierówności to pęknięcia, rysy, rozwarstwienia, pozostałość po obróbce skrawaniem. W teorii budowy maszyn te nierówności nazwane zostały chropowatością [10]. W wyniku istnienia chropowatości powierzchni zauważa się pozorny wzrost konduktywności, a zaproponowana metoda pomiaru, obliczeń i skalowania nie jest w tym przypadku wystarczająco skuteczna.

Wyznaczone w procesie skalowania parametry r_0 oraz h_0 można traktować jako przyporządkowanie każdej rzeczywistej cewce pewnej bezwymiarowej cewki modelowej.

Wówczas uproszczony model matematyczny dla tej bezwymiarowej cewki może być zastosowany do wyznaczania skali przyrządu. Jeżeli warunki pomiaru będą nieznacznie różne od warunków skalowania wzorcem to błąd wyznaczania konduktywności będzie niewielki i akceptowany. Pozostaje problemem określenia liczby punktów skalowania, a tym samym ilości niezbędnych wzorców. Należy bowiem zapewnić dopuszczalny błąd skalowania w całym zakresie pomiarowym.

5. Kompensacja wpływu chropowatości na wynik pomiaru konduktywności

W trakcie pomiarów z wykorzystaniem zaproponowanej metody skalowania numerycznie wyznaczone są dwa parametry: konduktywność σ i odległość $h=h_p$. Wartość h_p jest miarą pozornego wzrostu oddalenia sondy od powierzchni badanego elementu. Ten pozorny wzrost odległości jest informacją o istnieniu chropowatości.

Po wykonaniu pierwszego skalowania z wykorzystaniem próbek polerowanych należy ponowić proces skalowania, ale na próbkach wzorcowych chropowatych. Przyjęto założenie, że średni profil chropowatości badanych elementów jest podobny do tych profili, które występują na dostępnych wzorcach. Wystarczy teraz zmierzyć pozorną odległość sondy od powierzchni wzorca, wywołaną chropowatością kilku próbek wzorcowych o znanej konduktywności. Po pomiarze należy zapamiętać pary liczb: pozorna odległość h_p i pozorna zmiana konduktywności wyrażona zmianą uogólnionego parametru β . Zmianę tę można opisać równaniem:

$$\Delta\beta_{zo} = \beta_s - \beta_z = r_0 \sqrt{2\pi f \mu_0} (\sqrt{\sigma_s} - \sqrt{\sigma_z}) \quad (16)$$

gdzie:

σ_s - konduktywność rzeczywista stosowanego, chropowatego wzorca lub rzeczywista konduktywność wyznaczana w trakcie pomiaru,

σ_z - konduktywność zmierzona, czyli pozornie zmniejszona wskutek chropowatości powierzchni,

β_z - uogólniony parametr opisany równaniem (9) dla $\sigma = \sigma_z$,

β_s - uogólniony parametr opisany równaniem (9) dla $\sigma = \sigma_s$.

Następnie można metodą interpolacji zbudować i zapamiętać funkcję :

$$\Delta\beta_{zo} = f(h_p) \quad (17)$$

Wykonując pomiar wyznacza się wartości h_p i wartość uogólnionego parametru $\beta = \beta_z$ obarczoną błędem chropowatości. Wartości β_z odpowiada źle zmierzona konduktywność σ_z . Z równania (17) wyznacza się poprawkę uogólnionego parametru $\Delta\beta_{zo}$. Następnie za pomocą równania (16) oblicza się szukaną wartość σ_s .

6. Miara chropowatości

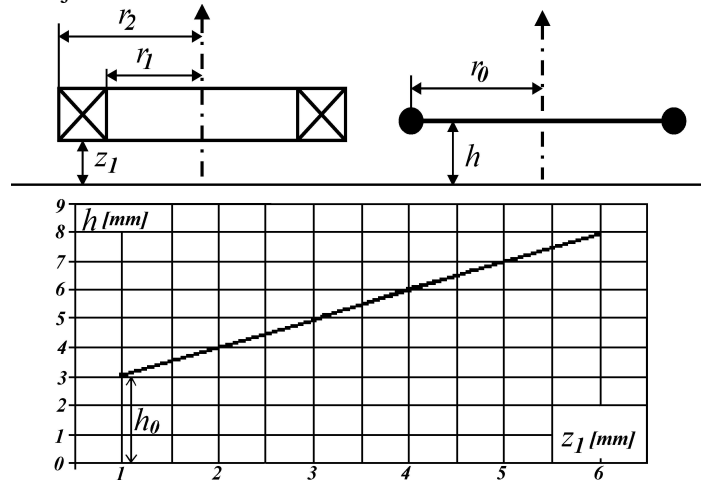
Wykorzystując opisany proces podwójnego skalowania można wyznaczyć poprawkę dla wyniku pomiaru konduktywności. Skuteczność tej metody okazała się bardzo dobra wtedy, gdy profil chropowatości wzorców jest identyczny z profilem mierzonych elementów. Z przypadkiem takim spotkano się na przykład wtedy, gdy wzorce chropowatości pochodzą z tej samej linii produkcyjnej, na której wykonywane są pomiary konduktywności. W trakcie badań zauważono, że mierzona na potrzeby kompensacji pozorna zmiana odległości h_p sondy od powierzchni badanego elementu jest wiroprawdową miarą chropowatości. Miara ta nie jest tożsama z miarami stosowanymi w mechanice, ale można znaleźć między nimi korelację [7]. Przykładowe wyniki pomiarów metodami Ra i Rz oraz wiroprawdową przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Ra [μm]	Rz [μm]	h_p [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	h_p [μm]
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

7. Weryfikacja procesu skalowania

Realizując opisaną metodę skalowania polegającą na obliczaniu parametrów zastępczych cewki r_0 i h_0 , wyznacza się funkcję skalującą wokół punktu opisanego parametrami wzorca i wartością częstotliwości. W trakcie eksperymentów zauważono, że zmiana punktu skalowania, to znaczy zmiana częstotliwości lub konduktywności nie powoduje zmian wyznaczanych, opisaną metodą parametrów r_0 i h_0 . Rejestrowane zmiany tych parametrów nie były większe od szacowanych błędów wynikających z własności elektronicznego toru pomiarowego. Przyrząd wystarczy zatem skalować tylko w jednym punkcie, za pomocą jednego wzorca. Aby zweryfikować tę hipotezę wykonano kolejne obliczenia.



Rysunek 2. Wpływ oddalenia cewki trójwymiarowej od powierzchni badanego elementu na oddalenie ekwiwalentnej cewki modelowej

Korzystając z opisaney metody TREE wyliczono zmianę rezystancji i indukcyjności cewki o konkretnych założonych wymiarach. Następnie rozwiązując układ równań (11) i (13), z uwzględnieniem (8) i (9) oraz znając zmiany rezystancji i indukcyjności cewki wyliczono uogólnione parametry r_0 i h . Okazało się, że wartość parametru r_0 nie zależy od częstotliwości, konduktywności oraz oddalenia cewki od powierzchni elementu. Wartość h też nie zależy od częstotliwości i konduktywności. Aby sprawdzić zależność h od odległości cewki od powierzchni badanej wykonano następane obliczenia. Założono stałe wartości wymiarów r_1 i r_2 oraz stałą wartość różnicy $z_2 - z_1$. Zmieniało wartość z_1 i obliczano zastępczy parametr h . Wyniki obliczeń zaprezentowano na rysunku 2. Zaobserwowano liniową zależność między wartością h a z_1 . Odchyłki od liniowości są mniejsze od spodziewanych błędów wynikających z dokładności obliczeń numerycznych.

8. Wnioski

Stosując zaproponowaną metodę skalowania konduktometrów skutecznie wyznacza się w czasie rzeczywistym konduktywność i równocześnie kompensuje wpływ zmian oddalenia sondy od powierzchni badanego elementu. Realizując podwójną metodę skalowania można skutecznie kompensować wpływ chropowatości powierzchni badanych elementów jeżeli profil chropowatości wzorców jest zbliżony do profilu badanych elementów. Wyznaczana poprawka kompensująca wpływ nierówności powierzchni jest wiroprowadową miarą chropowatości. Dzięki parametrom zastępczym cewki wyznaczanym w trakcie skalowania zastępuje się każdą cewką rzeczywistą cewką modelową nie tylko na potrzeby skalowania, ale także dla innych analiz numerycznych. W szczególności można korzystać z prostego modelu matematycznego do wyznaczania optymalnej, dla konkretnego zastosowania, częstotliwości prądów wirowych.

9. Literatura

1. Dodd C.V, Deeds W.E, Luquire J.W. Integral solutions to some eddy current problems. *International Journal of Nondestructive Testing* 1969; 1: 29–90.
2. Dzikowski L. A definition of eddy current penetration depth useful for flaw detection and conductivity measurement. *The Journal PAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics* 2008; 8(1): 10205-10206.
3. 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. *Mašinstroenie i Technosfera XXI weka. Sbornik Trudow XV Meždunarodnoj Naučno-techničeskoj Konferenciji. Donieck* 2009; 4: 69-73.
4. Dzikowski L, Dzikowska M. Effect of inaccurate setting for the exciting field frequency onto results of conductance measurements with use of the eddy current method. *Avtomatizacija: Problemy, Idei, Rešenija, Materialy Meždunarodnoj Naučno-techničeskoj Konferenciji. Sevastopol: Vidavnictvo SevNTU, 2010; 2: 3-5.*
5. Dzikowski L. Effect of eddy current frequency on measuring properties of devices used in non- destructive measurements of non-ferromagnetic metal plates. *Archives of Materials Science and Engineering* 2008; 32(2): 77-84.
6. Dzikowski L. Errors in conductance measurement of materials that are used for construction of thick plates. *Mašinstroenie i Technosfera XXI weka. Sbornik Trudow XV Meždunarodnoj Naučno-techničeskoj Konferenciji. Donieck* 2009; 4: 66-69.
7. Dzikowski L. Surface roughness and eddy current. *6th International Conference Mechanic Systems and Materials. MSM Opole – Poland 5 – 8 July 2010: 58 –59.*

8. Geirinhas Ramos H.M, Postolache O, Corrêa Alegria F, Lopes Ribeiro A. Using the Skin Effect to Estimate Cracks Depths in Mettalic Structures. International Instrumentation and Measurement Technology Conference. I2MTC Singapore 5-7 May 2009: 1-6.
9. Jasiński W, Zawada P. The investigation of discreteness in material of catalytic pipes by the eddy current method. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2003; 2: 28-30.
10. PN-87/M-04251. Struktura geometryczna powierzchni. Chropowatość powierzchni. Wartości liczbowe parametrów. Norma Polska 30.06.1987.
11. Simankowa L. Mathematical presentation of impedance variation of a coil cause by the measured object. *TESLA electronics* 1971; 4: 112-117.
12. Theodoulidis T, Kriezis E. Series expansions in eddy current nondestructive evaluation models. *Journal of Materials Technology* 2005; 161(1-2): 343-347.