#### ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Seria: AUTOMATYKA z. 111

Stanisław MALZACHER

Leszek DZICZKOWSKI

Instytut Elektroniki Politechniki Śląskiej

## KOMPARACYJNY KONDUKTOMETR WIROPRADOWY ZE WSKAŹNIKIEM ANALOGOWYM

Streszczenie. Przedstawiono koncepcję teoretyczną i praktyczne rozwiązanie konduktometru wiroprądowego opartego na metodzie komparacyjnej, z odczytem konduktywności wykonywanym na przyrządzie wychyłowym w MS/m i % IACS. Opisano zasadę działania konduktometru, podano równanie przetwarzania i wyniki badania modeli prototypowych.

## A COMPARATIVE EDDY CURRENT CONDUCTIVITY METER WITH ANALOG READING

Summary. An idea and practical solution of the conductivity meter of the comparative eddy-current type are presented. The conductivity reading in MS/m and % IACS is carried out by means of a scale of the indicating instrument. The principle of opertion, the equation of processing and results of the tests for prototype models are presented.

# КОМПАРАТИВНЫЙ ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНДУКТОМЕТР С АНАЛОГОВЫМ УКАЗАТЕЛЕМ

Резюме. В статье представлена теоретическая концепция и практическое решение вихретокового кондуктометра основанного на компаративном методе с отсчетом проводимости на аналоговом указателе проградуированным в МСм/м и в % стандарта США (IACS). Описан принцип действия кондуктометра, даны уравнение преобразования и результаты испытания прототипных моделей.

Nr kol. 1180

#### 1. WPROWADZENIE

W procesie realizacji tematu "Konduktometria wiroprądowa wspomagana komputerowo" (CPBP 02.20-VII.02) powstał problem znalezienia obiektu - w postaci prostego konduktometru wiroprądowego - na którym można byłoby sprawdzać przydatność metody pośredniego skalowania przy użyciu wspomaganego komputerowo konduktometru z automatycznym doborem częstotliwości. W tym celu rozpatrzono różne firmowe rozwiązania konduktometrów wiroprądowych, których parametry mogły stanowić podstawę opracowania (tablica 1).

Jako podstawowy zakres pomiarowy przyjęto najczęściej spotykany i najbardziej interesujący metalurgię kolorową zakres pomiaru konduktywności od około 5 MS/m do około 60 MS/m, co odpowiada grupie metali od ołowiu, poprzez stopy miedzi (brąz, mosiądz), aluminium i jego stopy, aż do czystej miedzi elektrolitycznej. Założono również, że układ pomiarowy musi być na tyle elastyczny, aby mógł być łatwo przystosowany również do badania metali o mniejszych konduktywnościach np. od około 1 MS/m (tantal), a także do celów defektoskopii, po odpowiednim przestrojeniu. Kolejnymi warunkami, które musiały być spełnione była prostota konstrukcji przyrządu, jego względna taniość, łatwość obsługi i możliwość produkcji seryjnej.

Założenia te wydaje się spełniać układ zaproponowany przez autorów w ramach tematu CPBP 02.20-VII.02 pod nazwą "komparacyjnego konduktometru wiroprądowego ze wskażnikiem analogowym".

## 2. ZASADA DZIAŁANIA KONDUKTOMETRU KOMPARACYJNEGO

W konduktometrii wiroprądowej mogą być wykorzystywane dwie różne grupy przetworników indukcyjnościowych w postaci cewek przelotowych dla przedmiotów walcowych i cewek stykowych o bardziej uniwersalnym zastosowaniu. Konstrukcja tych ostatnich może być różna; spotyka się np. cewki pojedyncze, różnicowe lub w układzie transformatorowym. W przypadku cewek pojedynczych, zresztą o różnej budowie – np. bezrdzeniowych lub rdzeniowych – zbliżenie, zasilanej prądem zmiennym o podwyższonej częstotliwowści, cewki na małą i stałą odległość do powierzchni metalu, którego konduktywność chcemy zmierzyć, powoduje wzbudzenie prądów wirowych w objętości metalu blisko jego powierzchni (efekt naskórkowości). Sytuację powyższą ilustruje rys. 1a. Oddziaływanie wtórnego strumienia magnetycznego, pochodzącego od prądów wirowych na strumień pierwotny, pochodzący od cewki, powoduje w rezultacie powstanie

Tablica 1

Parametry konduktometrów wiroprądowych produkcji zagranicznej

								_	
Nazwa przyrządu – typ	Kraj pro- du- centa	Zakres po- miarowy kon- duktywności	Badane metale 1 stopy	Rozdziel- ność	Dokład- ność	Częstotli- wość prądu zasilania cewki	Dopuszczal- ne uniesie- nie sondy ("lift-off")	Ro- dzaj od- czytu	Uwagi
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NORTEC NDT - 5A	USA	26-65% IACS	Al,Mg prasowa- ne i walcowane oraz różne ich stopy	0,5% IACS	± 0,5% IACS	60 kHz	0,075 mm	anal.	Konduk- tometr
NORTEC NDT - 17	USA	24-65% IACS	22.842.9	0,5% IACS	± 1% IACS	62,5 kHz	0,125 mm 0,3% IACS	cyfr	Konduk- tometr
SIGMATEST 2.067-060	RFN	5-62 MS/m	Od ołowiu do srebra	0,1 MS/m pocz.zakr. 0,25 MS/m koniec zak.	1%	60 kHz	0,15 mm	anal.	Konduk- tometr
SIGMATEST 2.067-061	RFN	8-107% IACS	Od brązu krze- mowego do srebra	ok. 0,5% IACS	1%	60 kHz	- 14	anal.	Konduk- tometr
SIGMATEST 2.067-062	RFN	0,016-0,2μΩm	Od srebra do ołowiu		1%	60 kHz	0,1 mm Cu 0,15 mm stopy op.	anal.	Miernik rezysty- wności
SIGMATEST 2.067-500	RFN	0,5-5,5 MS/m	Od stopów opo- rowych do oło- wiu i stali austen.	0,05 MS/m pocz. zakr. 0,1 MS/m koniec zak.	1%	600 kHz		anal.	Konduk- tometr
SIGMATEST 2.067-501	RFN	1-9,7% IACS	Od tytanu do chromu (stopy oporowe)	ok. 0,25% IACS	1%	600 kHz	11-12	anal.	Konduk- tometr
SIGMATEST 2.067-502	RFN	0,18-2 μΩm	Od brązu do stopów Sn, Bi Pb		1%	600 kHz		anal.	Miernik rezysty- wności
B - 21 H	ZSRR	1 - 8 MS/m	Od manganu do tantalu	-	3%	1 MHz	0,1 mm	anal.	Konduk- tometr

167



# element badany

Rys. 1. Obwód zastępczy układu "cewka stykowa - materiał badany" a) schematyczne przedstawienie układu "cewka stykowa - materiał badany", b) interpretacja elektryczna - dwuobwodowy schemat zastępczy układu; c) schemat zastępczy jednoobwodowy

Fig. 1. Substitutional circuit of the system "contact coil - investigated material"

 a) schematic presentation of the system "contact coil - investigated material", b) electric interpretation - two-circuit substitutional scheme,
c) substitutional single-circuit scheme

znanego zjawiska będącego rezultatem wzajemnego sprzężenia polem magnetycznym dwóch obwodów prądu zmiennego. Uważając cewkę za obwód pierwotny o indukcyjności  $L_1$  i rezystancji  $R_1$ , a badany metal za obwód wtórny o indukcyjności  $L_2$  i rezystancji  $R_2$  możemy układ "cewka stykowa – badany metal" zastąpić układem jak na rys. 1b i ic. W wyniku takiego sprzężenia otrzymamy znane związki

$$R'_1 = R_1 + R_2 / \theta^2 = R_1 + R'_2$$
  
 $L'_1 = L_1 - L_2 / \theta^2 = L_1 - L'_2$ 

gdzie:

- R' wypadkowa, podwyższona rezystancja cewki, w wyniku sprzężenia indukcyjnościowego,
- L' wypadkowa, obniżona indukcyjność cewki w wyniku sprzężenia indukcyjnościowego,

Komparacyjny konduktometr wiroprądowy. -

przy czym  $\vartheta = \sqrt{\frac{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}{\omega^2 M^2}}$  jest przekładnią napięciową sprzężenia między

cewką stykową i badanym metalem, a M – jest współczynnikiem indukcyjności wzajemnej w tym układzie. Wielkości  $R'_2 = R_2/\vartheta^2$  i  $L'_2 = L_2/\vartheta^2$  stanowią zastępczą rezystancję i indukcyjność metalu (reaktancję indukcyjnościową metalu), przeniesione na stronę pierwotną układu, to znaczy wniesione z różnym znakiem do cewki stykowej. Oczywiście informacja o poszukiwanej



Rys. 2. Normowane składowe impedancji  $\omega L'_1$  i R'\_1 cewki stykowej "obciążonej" badanym materiałem, w funkcji konduktywności i grubości (f = 60 kHz), wg Förstera [2]

Fig. 2. Normed impedance components  $\omega L'_1$  and  $R'_1$  for the contact coil "loaded" by the investigated material, as a function of conductivity and thickness (f = 60 kHz) according to Förster [2] konduktywności jest zawarta w zastępczej rezystancji  $R'_2$  i zastępczej indukcyjności  $L'_2$ . Zmiana konduktywności powoduje więc w rezultacie zmianę  $R'_1$ i  $L'_1$ , a ściślej  $R'_1$  i  $\omega L'_1$  czyli składowych impedancji ( $Z'_1$ ) cewki stykowej "obciążonej" badanym metalem. Mierząc obydwie składowe dla różnych badanych metali, przy założeniu, że pozostają nie zmienione – częstotliwość prądu zasilającego cewkę stykową, sama cewka i jej odległość od powierzchni badanego materiału, zaś jego grubość jest znacznie (co najmniej 4-krotnie) większa od głębokości wnikania prądów w metal dla danej częstotliwości – otrzymujemy w rezultacie znany wykres ilustrujący zależność tych składowych od konduktywności (rys. 2).

Problem pomiarowy zmierzający do znalezienia opisaną metodą konduktywności badanego metalu sprowadza się więc do pomiaru składowych impedancji, "obciążonej" metalem, cewki stykowej:  $R'_1$  i  $\omega L'_1$  i odpowiedniego skalowania. Dla tego celu, zgodnie z rozwiązaniami klasycznymi wybrano zerową metodę różnicową. Dwie, niby-rezonansowe gałęzie indukcyjnościowo-pojemnościowe, tworzące pseudo-mostek jak na rys. 3, pozwalają na wyskalowanie jednego z elementów doprowadzających układ do stanu zerowego napięcia wyjściowego wprost w jednostkach konduktywności. Obie gałęzie: nieparzysta z prądem  $I_1$  i parzysta z prądem I, pracują w istocie w warunkach odstrojenia od rezonansu. Biorąc pod uwagę wykres przedstawiony na rys. 2 możemy zauważyć, że częstotliwość prądu zasilającego układ różnicowy należy dobrać tak, aby w najbardziej interesującym zakresie pomiarowym zmiana urojonej składowej impedancji cewki wywołana zmianą konduktywności była możliwie duża, a zmiana składowej rzeczywistej możliwie mała. W praktyce więc przejście od materiału o dużej kondukrywności (np. miedzi) do materiału o mniejszej konduktywności (np. ołowiu) pociąga za sobą znaczną zmianę składowej urojonej ( $\omega L_1' \ll \omega L_1$ ), mniejszą natoniast zmianę składowej rzeczywistej ( $R'_1$ ). Pozwala to wnioskować, że proces doprowadzania układu różnicowego do równowagi można przedstawić w uproszczeniu jak na rys. 4. Gałęż pomiarowa (nieparzysta) z prądem I, znajduje się zawsze w stanie oddalonym od rezonansu, szczególnie przy "pustej" cewce stykowej  $L_1$ , to jest oddalonej na tyle od badanego metalu, by wpływ jego mógł być pominięty. Przyłożenie lub zbliżenie na stałą odległość cewki do metalu o małej konduktywności (np. ołowiu) powoduje, że indukcyjność  $L_1'$  staje się mniejsza od indukcyjności  $L_1$  i wynosi np.  $L'_1$  (Pb). Odpowiada temu napięcie na cewce U'(Pb). Jeśli cewkę zbliżymy do metalu o dużej konduktywności, a więc np. miedzi, spowoduje to z kolei znaczniejsze zmniejszenie indukcyjności wypadkowej  $L'_1$  np, do wartości  $L'_1(Cu)$  i w następstwie powiększenie się



Rys. 3. Typowy układ różnicowo-zerowy (pseudomostek) do pomiaru konduktywności

- G generator prądu zmiennego, W wskaźnik zera, C<sub>4</sub> pojemność nastawna, skalowana w jednostkach konduktywności
- Fig. 3. Typical differential-zero system (pdeudo-bridge) for conductivity measurements
- G alternative current generator, W zero indicator,  $C_4$  ajdustable capacity scaled in conductivity units

napięcia na cewce do wartości U'(Cu), w wyniku znacznego zbliżenia do rezonansu. Warto zauważyć, że sytuacja taka może wystąpić tylko wzdłuż prawego zbocza krzywej rezonansowej U' =  $f(L_1')$ , jak to ilustruje rys. 4a. Chcąc sprowadzić układ do równowagi musimy zmienić napięcie na cewce porównawczej L<sub>2</sub> np. przez zmianę pojemności w gałęzi parzystej mostka z prądem I<sub>2</sub>, czyli odpowiednio dostrojenie tej gałęzi. Tak więc np. dla miedzi uzyskamy nastawę pojemności C<sub>4</sub> = C<sub>4min</sub> = C<sub>4</sub>(Cu), a dla ołowiu odpowiednio C<sub>4</sub> = C<sub>4max</sub> = C<sub>4</sub>(Pb). Pozwala to w zasadzie na odczyt mierzonej konduktywności wprost ze skali nastawy pojmeności C<sub>4</sub>, jak np. w konduktometrach typu "Sigmatest".

Opisany układ różnicowy (pseudomostek) jest złożony z dwóch, odstrojonych, szeregowych obwodów rezonansowych stanowiących gałęzie: nieparzystą i parzystą. Są to obwody takie same, ale nie te same. Bieg ich krzywych rezonanso-



Rys. 4. Uproszczony obraz procesu doprowadzania układu pseudomostka do równowagi przez wykorzystanie zboczy charakterystyk rezonansowych obu gałęzi a) gałąż pomiarowa, b) gałąż porównawcza

Fig. 4. Simplified picture of the process pseudo-bridge balancing process using edges of resonance characteristics of both branches a) measurement branch, b) comparison branch

wych może się różnić między sobą, co wpływa, oczywiście, na dokładność pomiaru. Aby zwiększyć "przyleganie" tych krzywych, przeprowadza się ich kalibrację, wykonując pomiar dla próbek wzorcowych odpowiadających w przybliżeniu początkowi i końcowi zakresu konduktywności mierzonych przez przyrząd. W tym celu krzywą rezonansową gałęzi parzystej, z cewką wzorcową (kompensacyjną)  $L_2$  i przestrajanym kondensatorem  $C_4$ , przemieszczamy w górę lub w dół zmieniając dobroć obwodu za pomocą dodatkowej rezystancji  $R_2$  bocznikującej cewkę  $L_2$  oraz w lewo lub w prawo zmieniając wartość dodatkowej pojemności  $C_4$  bis bocznikującej główną pojemność  $C_4$ .

Proces kalibracji opiera się na fakcie, że zmiany rezystancji R<sub>2</sub> bardziej wpływają na górny zakres skali, a zmiany pojemności bocznikującej C<sub>4</sub> bis prawie równomiernie na całą skalę. Wykonując kalibrację iteracyjną na dwóch próbkach o znacznie różniących się konduktywnościach można skutecznie przybliżyć kształt krzywej rezonansowej obwodu porównawczego do krzywej obwodu pomiarowego.

### Komparacyjny konduktometr wiroprądowy ....

W omawianym przypadku do przeprowadzenia pomiaru konduktywności wykorzystano prawe zbocze dwóch krzywych rezonansowych obwodów szeregowych. Nic nie stoi na przeszkodzie wykorzystania tylko lewych zboczy lub kombinacji prawych i lewych. Kombinacje takie mogą być wykorzystane do pewnych dodatkowych celów, np. kompensacji wpływu odległości ("lift off"), uzyskiwania przyrządu do wykrywania wad powierzchniowych (defektoskop) itp.

Dokonywanie odczytu na skali elementu równoważącego mostek nie jest wygodne. Czynność ta jest długotrwała, zwłaszcza że przed pomiarem musi być przeprowadzana kalibracja wstępna. Z tego względu bardziej korzystna wydaje się metoda wychyłowa, a szczególnie metoda automatycznej komparacji. Metoda komparacyjna polega na pośrednim porównaniu (komparowaniu) za pomocą komparatora, mierzonej wielkości prądu zmiennego, np. napięcia, z prądem lub napięciem stałym, które to wielkości stają się miarą napięcia zmiennego lub wielkości pośrednio z nim związanej, jak w naszym przypadku - konduktywności. Ażeby dwa napięcia różnego rodzaju (zmienne i stałe) mogły być ze sobą porównane, należy je wpierw przetworzyć; np. wystarczy przekształcić mierzone napięcie zmienne w napięcie stałe.

Idea konduktometru wiroprądowego wykorzystującego, komparacyjną metodę pomiarową jest przedstawiona na rys. 5. Generator przeblegów sinusoidalnych (1) o stałej częstotliwości wybranej w granicach 60-100 kHz zasila dwa szeregowe obwody  $L_1C_2$ -(2) i  $L_2C_4$ -(3) stanowiące w istocie gałąż nieparzystą i parzystą układu pomiarowego z rys. 3. Pierwszy z nich - obwód pomiarowy - jest przestrajany stykową cewką pomiarową L1, dla której składowe impedancji (rezystancja i reaktancja indukcyjnościowa) zmieniają się m.in. w zależności od wartości mierzonej konduktywności. Drugi obwód - porównawczy ze stałą indukcyjnością L\_ – jest przestrajany pojemnością  $C_4$  do chwili uzyskania równości amplitudy napięcia na obu cewkach (L, i L,). Różnica amplitud napięć między obydwiema cewkami jest mierzona po przetworzeniu (4) napięcia zmiennego na stałe, przez odpowiednio czuły układ pomiarowy (5). Wartość pojemności C, w gałęzi porównawczej (parzystej), dla której to wartości nastapiło zrównanie amplitud napięć, jest związana określoną zależnością funkcyjną z mierzoną konduktywnością. Rolę zmiennej pojemności spełnia dioda pojemnościowa, a przestrajające ją napięcie jest miarą szukanej konduktywności. Napięcie to jest czerpane z części (6) wspomnianego obwodu pomiarowego.

173



Rys. 5. Zasada działania konduktometru wiroprądowego z wykorzystaniem komparacyjnej metody pomiarowej

Fig. 5. A principle of eddy-current conductometer work based on the comparator measurement method

Chcąc znależć równanie przetwarzania układu konduktometru posłużymy się jego uproszczonym schematem blokowym przedstawionym na rys. 6. Przy jego analizie trzeba uwzględnić fakt, że na zmianę składowych impedancji cewki pomiarowej wpływa zarówno zmiana konduktywności, jak i zmiana odległości cewki od powierzchni badanego materiału. Tego drugiego wpływu w poprzednich naszych rozważaniach, nie uwzględniliśmy zakładając dla uproszczenia, że odległość jest stała lub wręcz zerowa. W takim przypadku zarówno indukcyjność wypadkowa  $L'_1$ , jak i rezystancja wypadkowa  $R'_1$  są złożonymi funkcjami konduktywności badanego materiału  $\sigma$  i odległości h cewki stykowej od jego powierzchni

$$L'_{1} = \varphi(\sigma, h)$$
$$R'_{1} = \kappa(\sigma, h)$$



Rys. 6. Uproszczony schemat blokowy wiroprądowego konduktometru komparacyjnego

Fig. 6. A simplified block-scheme for eddy-current comparator conductometer

Amplituda napięcia na cewce pomiarowej L, wyraża się wówczas wzorem

$$J' = \sqrt{\frac{\omega^2 c_1^{2} R_1'^2 + \omega^4 L_1'^2 c_1^2}{(1 - \omega^2 L_1' c_1) + \omega^2 R_1'^2 c_1^2}} U_{AB}$$

zaś amplituda napięcia na cewce porównawczej L, odpowiednio

$$U'' = \sqrt{\frac{\omega^2 c_4^2 c_4^2 + \omega^4 L_4^2 c_4^2}{(1 - \omega^2 L_4 c_4) + \omega^2 c_4^2 c_4^2}} U_{AB}$$

gdzie:

UAR - napięcie zasilające pseudomostek.

W wyniku działania ujemnego sprzężenia zwrotnego w układzie, w stanie ustalonym napięcia, U' i U" stają się sobie równe. Następuje to dla pewnej określonej wartości napięcia wyjściowego U<sub>wy</sub>, przestrajającego diodę pojemnościową, czyli odpowiednik pojemności  $C_4$ . Zależność między napięciem U i pojemnością  $C_4$  zapiszemy w ogólnej postaci

$$U_{wy} = f_1(C_4)$$

Dla funkcji f<sub>1</sub> istnieje funkcja odwrotna  $f_1^{-1}$  taka, że C<sub>4</sub> =  $f_1^{-1}(U_{wy})$ ; przy czym będąc w istocie charakterystyką sterowania diody pojemnościowej jest ona zawsze dokładnie znana.

Z warunku równowagi układu U' = U" można wyznaczyć funkcję f<sub>2</sub> opisującą zależność między pojemnością  $C_4$  a parametrami "obciążonej" cewki pomiarowej: L'<sub>1</sub> i R'<sub>1</sub>:

$$C_4 = f_2(L'_1, R'_1)$$

Szukaną pojemność można wyznaczyć rozwiązując równanie kwadratowe

$$AC_A^2 + BC_A + D = 0$$

gdzie:

$$A = (R_4^2 + \omega L_4^2) \left[ (1 - \omega^2 L_1' C_1)^2 + \omega^2 R_1'^2 C_1^2 \right]$$
$$- (\omega^4 L_4^2 + \omega^2 R_4^2) C_1^2 (R_1'^2 + \omega L_1'^2)$$
$$B = 2\omega^2 L_4 C_1^2 (R_1'^2 + \omega L_1'^2)$$
$$D = -C_1^2 (R_1'^2 + \omega L_1'^2)$$

Istnieją zatem dwa rozwiąznia

$$C_{4(1)} = f_{2(1)}(L'_{1}, R'_{1}) = \frac{-B + \sqrt{\Delta}}{2A}$$
$$C_{4(2)} = f_{2(2)}(L'_{1}, R'_{1}) = \frac{-B - \sqrt{\Delta}}{2A}$$

które pozwalają wyznaczyć dwie funkcje  $f_2$ . Jedna z funkcji –  $f_{2(1)}(L'_1, R'_1)$ opisuje zależność pojemności  $C_4$  od  $L'_1$  i  $R'_1$ , odpowiadającą narastającemu zboczu krzywej rezonansowej obwodu  $R_4L_4C_4$ , druga –  $f_{2(2)}(L'_1, R'_1)$  występuje przy zestrajaniu układu na opadającym zboczu tej samej krzywej rezonansowej. Ostatecznie równanie przetwarzania konduktometru będzie mieć ogólną postać typu

$$U_{wy} = f_1 \left\{ f_2 \left[ \varphi(\sigma, h); \kappa(\sigma, h) \right] \right\}$$

Ze względu na to, że istnieją dwie funkcje  $f_2$ , a dodatkowo w obwodzie pomiarowym  $R'_1$ ,  $L'_1 C_1$ może być również wykorzystywane zbocze narastające lub opadające krzywej rezonansowej – powstają cztery sposoby strojenia konduktometru. Przez wybór funkcji  $f_2$ , czyli wybór strojenia obwodu  $R_4$ ,  $L_4$ ,  $C_4$ określamy charakter nieliniowości skali przyrządu, natomiast przez wybór metody strojenia obwodu pomiarowego  $R'_1$ ,  $L'_1 C_1$  – określamy dominującą czułość przyrządu na zmiany konduktywności  $\sigma$  lub odległości h, cewki od powierzchni badanej.

# 3. WYNIKI BADANIA KONDUKTOMETRU KOMPARACYJNEGO

W ramach tematu zostały opracowane trzy modele konduktometrów komparacyjnych: KW-O, KW-1 i KW-2. Modele te były poddane próbom i badaniu przy zastosowaniu wzorców konduktywności. W szczególności zostały wykonane badania wpływu odległości cewki stykowej od powierzchni badanego elementu na błąd pomiaru (tzw. efekt "lift - off"). Badania te przeprowadzono dla trzech różnych próbek wzorcowych (miedź, aluminium i brąz) przy wykorzystaniu konduktometru komparacyjnego KW-O. Wyniki przedstawiono w postaci wykresów na rys. 7. W podobny sposób przeanalizowano również wpływ odległości krawędzi cewki stykowej od krawędzi badanego elementu; wyniki tych prób przedstawiono z kolei na rys. 8.

Z analizy przedstawionych wykresów wynika, że w przypadku uniesienia cewki ponad przedmiot na odległość nie przekraczającą ok. 0,2 mm błąd pomiaru mieści się w granicach ± 5% dla najczęściej spotykanych metali kolorowych. Uwaga ta dotyczy wszystkich trzech typów konduktometrów. Jeśli chodzi o błąd wynikający ze zbliżenia cewki do krawędzi przedmiotu badanego, to przyrząd wykazuje tym mniejszy błąd, im mniejsza jest średnica cewki.

Wygląd zewnętrzny konduktometru KW-O przedstawiono na rys. 9, zaś konduktometrów KW-1 i KW-2 na rys. 10.





Fig. 7. Graph presenting conductivity measurement error resulting from raising of the contact coil over the investigated element (conductometer KW-0)





a) konduktometr KW-O cewka o średnicy 18 mm, b) konduktometr kontrolny Főrstera

Fig. 8. Graph presenting conductivity measurement error resulting from approaching of the measuring coil to the edge of investigated element

a) conductometer KW-O coil with diameter 18 mm, b) control Forster conducto-



Rys.9. Widok przedprototypowego konduktometru przemysłowego działającego na zasadzie metody komparacyjnej; typ KW-0. Konduktometr ten stanowił przedmiot badań opisanych w p. 3

Fig. 9. View of the beforeprototype industrial conductometer based on the comparator method: KW-O type. The conductometer was investigated as described in this issue





Rys.10. Widok prototypowych konduktometrów komparacyjnych: u góry konduktometr typu KW-1; u dołu konduktometr typu KW-2

Fig. 10. View of the prototype comparative conductometers: in the upper level conductometer KW-1, at the bottom conductometer type KW-2

Konduktometry prototypowe KW-1 i KW-2 różnią się od kondutometru KW-0 bardziej zwartą konstrukcją oraz doskonalszym schematem elektroniczym. Ponadto konduktometr KW-2 jest kalibrowany za pomocą dwóch próbek wzorcowych, a nie trzech, jak konduktometry KW-0 i KW-1.

Konduktometr KW-2 jest wyposażony w dwie skale: skalę konduktywności w MS/m oraz skalę konduktywności wg standartu amerykańskiego IACS, to jest w stosunku do konduktywności czystej miedzi elektrolitycznej, której konduktywność przyjęto za 100%.

Recenzent: Prof. dr hab. Zdzisław PAWŁOWSKI

Wpłynęło do Redakcji w maju 1990 r.

### Abstract

The measurement of conductivity of current conducting media with a nondestructive eddy current method is the simplest way to obtain the result without the labour-consuming and expensive preparation of samples. A comparative eddy current conductivity meter described in the paper is an electronic instrument for measuring conductivity of non-ferromagnetic metals and their alloys within a range of 5-60 MS/m, which covers approximately the conductivity of such metals as brass (lower limit), aluminium and its alloys and electrolytic copper (upper limit). The conductivity reading in MS/m is carried out by means of a scale of the indicating instrument. It is also possible to scale the instrument in % IACS (International Annealed Copper Standard) after the American standard according to which a 100 % IACS reading is equivalent to the conductivity of pure annealed copper (57,96 MS/m) at a temperature of 20°C. The principle of operation of the instrument is as follows. Two series LC circuits are fed with a sinusoidal voltage. The first, measuring, circuit is tuned by a measuring contact coil (probe) of which the inductance and resistance change as a result of placing the coil on the surface of a metal sample. The second, compensatory, circuit is tuned by a capacitor until the amplitudes of voltage at the terminals of both coils become equal. The capacitance of the compensatory circuit for which the voltages become equal is a specified function of the measured conductivity. In the instrrument a varicap is used as a tuning capacitor and the tuning voltage is a measure of the unknown conductivity.