Janusz GUZIK Brunon SZADKOWSKI

DOBÓR PARAMETRÓW KONSTRUKCYJNYCH WIROPRĄDOWEGO CZUJNIKA GRUBOŚCI WARSTW NIEPRZEWODZĄCYCH NAŁOŻONYCH NA METALOWE SIATKI

<u>Streszczenie</u>. W diagnostyce elektrod stosowanych w procesach elektrochemicznych wymagany jest pomiar grubości warstwy azbestowej (tzw. przepony) nałożonej na elektrodę w postaci metalowej siatki. Znane rozwiązania czujników wiroprądowych stosowane są tylko w przypadku współpracy czujnika z jednorodnym podłożem metalowym. Przypadek współpracy czujnika z niejednorodnym podłożem (siatką) autorzy przeanalizowali w pracy [4], w której przedstawiono odpowiedni model matematyczny. Model taki został wykorzystany w niniejszej pracy do określenia metodyki optymalnego doboru parametrów konstrukcyjnych czujnika i związanych z nim obwodów elektrycznych przy założonych zakresach pomiarowych oraz parametrach podłoża. Uwzględniono przy tym ograniczenia wynikające ze standaryzacji elementów konstrukcyjnych (rdzeni magnetycznych, przewodów nawojowych itp.) zgodnie z asortymentem podanym w odpowiednich katalogach. Przedstawiono wyniki weryfikacji doświadczalnej czujnika wykonanego według opisanej metodyki postępowania i współpracującego z niejednorodnym podłożem w postaci metalowej siatki. Sformukowano ważniejsze uwagi i wnioski przydatne do projektowania.

1. Wprowadzenie

Znane rozwiązania wiroprądowych czujników grubości warstw nieprzewodzących [1, 2, 3, 5, 6, 7, 8] odnoszą się do sytuacji, w których mierzona warstwa nałożona jest na jednorodne, metalowe podłoże. W przypadku, gdy podłoże nie jest jednorodne – np. w postąci metalowej siatki, charakterystyka przetwarzania czujnika ulega istotnym zmianom, które mogą uniemożliwić wykonanie pomiarów. Sytuacja taka występuje w elektrolizerach przemyskowych, gdzie w celach diagnostycznych należy mierzyć grubość warstwy azbestowej (tzw. przepony [9]) nałożonej na metalową siatką, która stanowi właściwą elektrodę stosowaną w procesach elektrochemicznych.

W pracy [4] wyznaczone zostały równania czujnika wiroprądowego oddziałowującego na niejednorodne podłoże w postaci metalowej siatki. Zmiana reaktancji ΔX(d) cewki czujnika umieszczonej w odległości d od podłoża (rys.i)

- 57 -



Rys.1. Czujnik wiroprądowy sprzężony z podłożem typu siatka (S - powierzchnia całkowita i-tego elementu podłoża, S - powierzchnia oczka siatki)

Fig.1. Eddy-current sensor coupled with netlike base (S - total surface of the i-base element, S - surface of the net's mesh)

może być określona zależnośią:

$$\Delta X(d) = \sum_{i=1}^{N} \Delta X_i(d) = N \Delta X_i(d),$$

gdzie: N - liczba i-tych elementów podłoża umieszczonych pod cewką czujnika,

przy czym spełniona jest relacja:

$$N = Entier (\Pi r^2/S),$$

gdzie: r - promień cewki czujnika,

S - powierzchnia całkowita i-tego, powtarzalnego elementu podłoża (por. rys.i).

Występująca we wzorze (1) elementarna zmiana reaktancji cewki ΔX (d) jest wtedy równa [4]:

$$X_{(d)} = \frac{S-S_{o}}{S} = \frac{\mu_{o}\mu_{vr}\omega r z^{2}}{d\sqrt{2}\omega\mu_{o}\mu_{vr}} - \mu_{o}\mu_{vr}\omega r z^{2} [\ln(4r/d) - 2], \qquad (3)$$

gdzie:

۵

S - powierzchnia oczka siatki (por. rys.1),

µ - przenikalność magnetyczna rdzenia cewki czujnika.

przenikalność magnetyczna podłoża,

7 - konduktvwność podłóża.

- z liczba zwojów cewki czujnika,
- σ pulsacja prądu zasilającego cewkę czujnika.

(2)

(1)

Zależność (3) wyprowadzono przy założeniu, że pulsacja spełnia dodatkowy warunek:

$$\omega \gg \frac{1}{2 d^2 \mu \mu_{\omega} \gamma} (\ln (8r/r_1) - 2)^2$$
(4)

gdzie przez d oznaczono minimalną odległość cewki czujnika od podłoża (uwarunkowaną konstrukcją karkasu cewki), a r_i oznacza promień przekroju drutu użytego do nawinięcia cewki. Warunek (4) jest w praktyce łatwy do spełnienia i powoduje, że zmiana rezystancji cewki czujnika jest pomijalnie mała w porównaniu z $\Delta X(d)$.

Czujnik wiroprądowy jest częścią składową obwodu zasilania (rys.2) [1, 2], dla którego obowiązuje następująca zależność:

0, dia C =
$$1/\alpha X$$
 i $\Delta X(d) = 0$

Y(A) /P

| AU(d) | =

$$|\mathbf{E}_{g}| = \frac{g}{\sqrt{1 + (\Delta X(d)/R_{g})^{2}}}, \quad dla \; \Delta X(d) \neq 0$$



Rys.2. Typowy układ zasilania czujnika wiroprądowego Fig.2. Typical eddy-current sensor supply system

Celem dalszych rozważań jest przeprowadzenie analizy optymalnego doboru parametrów konstrukcyjnych czujnika (r, z, μ , d, r) oraz parametrów obwodu zasilania (E, R, C, ω) przy założonym zakresie pomiarowym warstwy (0-d,) i założonych parametrach podłoża (μ_{up} , γ , S, S).

(5)

2. Kryteria i metodyka projektowania

Z metrologicznego punktu widzenia, tor przetwarzania sygnału wiroprądowego czujnika grubości obejmuje dwa bloki, przedstawione na rys.3a, których wypadkowa charakterystyka przetwarzania AU/d jest nieliniowa (rys.3b).



Rys.3. Tor przetwarzania sygnału wiroprądowego czujnika grubości (a) i jego wypadkowa charakterystyka przetwarzania (b) (i - rzeczywista, 2 - idealna)

Fig.3. Eddy-current thickness sensor signal processing line (a) and its resultant conversion characteristic (b) (1 - real, 2 - ideal)

Dla takiej charakterystyki mieliniowość przetwarzania określa się poprzez podanie błędu nieliniowości (zdefiniowanego wg pracy [10]):

$$\delta_N^0 = \frac{u}{\Delta U} 100 \%,$$

gdzie: - maksymalna rozbieżność pomiędzy rzeczywistą (1) a idealną (2) charakterystyką przetwarzania czujnika odniesiona dla d = d___,

$$\Delta U_{\max} = \Delta U(d) \Big|_{d=d_{\max}}, \text{ zgodnie z zależnością (5)}.$$

Optymalizację charakterystyk przetwarzania czujnika wiroprądowego można przeprowdzić dwuetapowo, dokonując oddzielnej optymalizacji charakterystyk przetwarzania poszczególnych bloków przedstawionych na rys.3a.

(6)

d

Charakterystyka przetwarzania obwodu zasilania jest też nieliniowa (Tablica 1), przy czym wynika z niej, że dla wartości określonej zależnością:

$$(\Delta X(d)/R) | \leq 0,2$$
 (7)

można przyjąć, że przetwarzanie obarczone jest błędem nieliniowości δ_N° nie większym niż 1 % . Wynika stąd potrzeba zapewnienia odpowiedniej wartości wyrażenia $\Delta X(d)/R_o$, co jest stosunkowo łatwe do spełnienia w praktyce.

Wartości błędu nieliniowości $\delta^{\circ}_{...}$ obwodu zasilania

Tablica 1

dia wybranych wartości stosunku AX/d/R/g					
AX/d/R g d=d max	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
ΔU/d/ E ₉	0,0995	0,1961	0,2873	0,3714	0,4472
8° N	1 %	1 %	2,5 %	5,7 %	10,4 %

Z drugiej strony, na podstawie badań przeprowadzonych przez autorów [4], dla różnych typów podłoża (Al, Fe) i rozmiarów oczek siatek (2x2 -- 4x4 mm) stwierdzono następującą zależność:

$$(\Delta X(d)/X) \Big|_{d=d_{max}} \leq 0.5$$
 (8)

co pozwala ostatecznie uściślić ograniczenie na wartość reaktancji cewki $czujnika X (dla \Delta X(d) = 0)$, zapisując je w postaci:

Wymaganą wartość indukcyjności L cewki czujnika (dla AX(d) = 0) uzyskuje się wówczas ze wzoru:

$$L \ge 0.4 R / \omega , \qquad (10)$$

przy założeniu, że pulsacja o spełnia warunek (4).

Wyznaczenie parametrów cewki czujnika (z, r) o znanej indukcyjności L umieszczonej na standardowym rdzeniu o narzuconych parametrach (µ, r, d) przeprowadza się zgodnie z metodyką projektowania podawaną przez autorów odpowiednich katalogów (np. "Materiały i rdzenie ferrytowe prod

UNITRA" [13]), przy czym istotne jest, aby dobrać taki typ rdzenia (najlepiej kubkowy), którego powierzchnia styku z mierzoną przeponą będzie możliwie duża, bowiem przy nierównomiernych grubościach przepon, miarodajne są pomiary uśrednionej grubości – na powierzchni będącej pewną wielokrotnością powierzchni oczka siatki S.

Dobór parametrów obwodu zasilania czujnika (por. rys.2) jest stosunkowo prosty: wartość E_g dobiera się ze względu na parametry woltomierza V (lub poprzedzającego go wzmacniacza), mając na uwadze typowe wartości dobroci cewki czujnika (rzędu 100 ... 800 [13]), które łatwo zmienić, odpowiednio dobierając wartość rezystancji R_g (por. równanie (10)) [11].

Istniejącą nieliniowość charakterystyki przetwarzania czujnika można skompensować za pomocą różnych metod [15]; najszersze zastosowanie znalazły metody realizujące linearyzację łańcuchową [2, 5, 12]. Polegają one na włączeniu w tor przetwarzania bloku linearyzującego o charakterystyce odwrotnej do charakterystyki przetwarzania czujnika [6, 15].

Innym wariantem tej metody linearyzacji jest pomiar spadku napięcia ΔU(d) na kondensatorze C_o (por. rys.2) [5]. Wartości błędów nieliniowości δ[°] można w ten sposób zmniejszyć 5 ... 10 krotnie [6].

3. Wyniki weryfikacji doświadczalnej

Celem weryfikacji jest porównanie teoretycznych charakterystyk przetwarzania czujnika wiroprądowego z charakterystykami zdjętymi w sposób doświadczalny dla przypadku czujnika o parametrach dobranych według zaproponowanej metodyki.

Dane wyjściowe do zaprojektowania czujnika są następujące:

zakres mierzonych grubości d = 0-3 mm, parametry podłoża Fe: γ_{F} = 10,3 · 10⁶ s/m, μ_{vp} = 250, parametry podłoża Al: γ_{Al} = 38,2 · 10⁶ s/m, μ_{vp} = 1, zakres rozmiarow oczek: 2x2 - 4x4 mm (co odpowiada S/S = 0,25 - 0,44 przy grubości drutu siatki 2 mm).

Jako rdzeń cewki wybrano rdzeń kubkowy serii M o największej powierzchni czynnej styku cewki z podłożem, o oznaczeniu M-42/29, którego podstawowe parametry są następujące: r = 17,65 mm, d = 0,7 mm (rys.4).

Doboru materiału magnetycznego na rdzeń czujnika dokonano na podstawie charakterystyk dobroci rdzenia M-42/29 - przyjmując normalny zakres czestotliwości pracy cewki czujnika w granicach 0,05 - 0,8 MHz [13]. Rdzeń z materiału F-1001 posiadał przenikalność magnetyczną µ_{ur} = 1500.

Czujnik przeznaczony jest do pracy w układzie zasilania współpracującym z ultrametrem typu B-70 (rys.5) [14] o nastpujących danych: C = 625 pF, C₂= 100 pF, E = 100 mV, R 1600 Ω, C_k= 100 pF i pulsacji nastawianej w sposób płynny ω = 2 Π (0,1 + 1) 10[°] rad/s. Dla podanych wyżej danych wzorcowanie przyrządu odbywa się dla pulsacji ω = 1/ $\sqrt{C + C}$) Σ ≃ 2 ∏ 0,5 · 10⁶ rad∕s. Zgodnie z zależnością (10), obliczono wymaganą wartość indukcyjności: L ≥ 203,8 µH. Z nomogramów [13] odczytano: z = 44 zwoje.



Rys.4. Podstawowe parametry rdzenia kubkowego serii M użytego do konstrukcji czujnika Fig.4. Basic parameters od a M-type tumbler magnetic core used for sensor constructions



Rys.5. Układ zasilania czujnika wiroprądowego ultrametru B-70 (C₁, C pojemności kondensatorów obwodu rezonansowego, C₁ - pojemność przewodu połączeniowego)

Fig.5. Eddy-current sensor supply system applied in ultrametr B-70 (C, C - capacitances of the resonance circuit, C - capacitance of the feeder

W celu dobrania odpowiedniej średnicy drutu do nawinięcia cewki można skorzystać z nomogramów podanych w katalogu [13] i sprawdzić, czy uzwojenie o danej średnicy drutu i wymaganej liczbie zwojów mieści się w oknie rdzenia. Dobrano 2 • r = 0,3 mm.

Znając dane cewki czujnika, sprawdzono warunek dotyczący minimalnej wartości pulsacji (4); odpowiednio dla podłoża Fe, Al: $\omega \gg 2\Pi \cdot 477$ rad/s i $\omega \gg 2\Pi \cdot 128$ rad/s.

Charakterystyki przetwarzania wykonanego modelu czujnika zdjęte doświadczalnie i obliczone ze wzorów (1) - (3) przedstawiono na rys.6 i 7.



Rys.6. Charakterystyki przetwarzania czujnika wiroprądowego dla podłoża Fe (linią przerywaną zaznaczono charakterystyki obliczone z równań (1) -(3)) Fig.6. Plot of the eddy/current sensor conversion characteristics for Fe type netlike base (the broken line denotes characteristics calculated from engs. (1)-(3))



Rys.7. Charakterystyki przetwarzania czujnika wirorądowego dla podłoża Al (linią przerywaną zaznaczono charakterystyki obliczone z równań (1) - (3)) Fig.7. Plot of the eddy/current sensor conversion characteristics for Al type netlike base (the broken line denotes characteristics calculated from

eqns. (1) - (3))

4. Wnioski i uwagi końcowe

Porównanie charakterystyk doświadczalnych z charakterystykami otrzymanymi na drodze obliczeń wykazuje pewne różnice między nimi, których żrodłem jest przyjącie w toku obliczeń idealizującego założenia o izotropowości materiału podłoża oraz przyjącie danych katalogowych jako wiarygodnych. Zmiany przenikalności magnetycznej rdzenia μ (np. wg [13]) mogą ulegać znacznym rozrzutom - do 20 %. Dokładne sprawdzenie rzeczywistych wartości poszczególnych parametrów katalogowych, izotropowości materiałów itp. - uznano za niecelowe wobec możliwości stosunkowo łatwego doświadczalnego skorygowania charakterystyk. Zauważmy, że zdjęte doświadczalnie charakterystyki przetwarzania wykazują mniejszą czułość niż charakterystyki otrzymane z obliczeń. Korekcję czułości do wymaganej wartości można przeprowadzić włączając w tor przetwarzania sygnału wzmacniacz o stosownie dobranym wzmocnieniu.

Z drugiej strony, wartości błądów nieliniowości charakterystyk doświadczalnych i otrzymanych z obliczeń są porównywalne. Linearyzacji czujnika wiroprądowego można dokonać zgodnie z uwagami poczynionymi w p.3. Z uwagi na to, że czujnik wiroprądowy współpracujący z ultrametrem B-70 jest połączony przewodem o długości ok. 2 m, nie zaleca się stosować wersji obwodu zasilania czujnika z pomiarem napięcia AU(d) na kondensatorze C_o (por. rys.2), gdyż w przeciwnym wypadku ujawnia się bocznikujące działanie pojemności przewodu łączącego czujnik z ultrametrem.

Ustalenie szczegółowych rozwiązań obwodów korekcyjnych jest zagadnieniem złożonym, wymagającym osobnego rozpatrzenia. Przedstawiona w pracy metodyka doboru parametrów konstrukcyjnych czujnika wiroprądowego pozwala uzyskać czujnik o założonych charakterystykach przetwarzania, przy czym konieczna jest adiustacja zarówno obwodu zasilania, jak i toru przetwarzania sygnału.

LITERATURA

- [1] Creed B.T., Sokalski R.G.: Applications of non-contact position sensor of the eddy current tube, SAE Technical Paper Series No 860477, 1986, str. 103-105.
- [2] Diakin W.W., Sandowskij W.A.: Tieorija i rasczot nakładnych vichretokovych preobrazovatelej. Izd. "Nauka", Moskva 1981.
- [3] Grabovieckij I.I.: Bezkontaktnyj metod izmierenija udelnogo soprotivlenija i gieometriczeskich razmierov pri pomoszczi vichrevych tokov, Avtomatika i Tielemechanika, 1959, Nr 7, str. 946-954.
- [4] Guzik J., Szadkowski B.: Sonda do pomiarów grubości przepon azbestowych w elektrolizerach przemysłowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Elektryka, nr 114. Gliwice 1990.

- [5] Heptner H., Stroppe H.: Megnetyczne i indukcyjne bedenie metali Wydawnicto "Śląsk", Katowice 1972.
- [6] Hofmann D.: Handbuch Messtechnik und Qualitatssicherung. VEB Verlag Technik, Berlin 1979.
- [7] Klujev V.V.: Izmierienije tokszcziny stalnych listov metodom vichrevych tokov. Izmieritielnaja Technika, 1970, Nr 11, str. 3-35.
- [8] Lewinska-Romicka A.: Przetworniki wiroprądowe do badań nieniszczących rur nieferromagnetycznych. Rozprawy Elektrotechniczne, 1988, 2.3, str. 839-873.
- [9] Mantell C.L.: Elektrochemia przemysłowa, WNT, Warszawa 1965.
- [10] Romer E .: Miernictwo przemysłowe, PWN, Warszawa 1970.
- [11] Sobolew V.S., Szkarlet J.M.: Nakładnyje i ekrannyje datcziki, Izd. "Nauka", Novosybirsk 1967.
- [12] Tietze U., Schenk Ch.: Układy półprzewodnikowe, WNT, Warszawa 1987.
- [13] Materiały i rdzenie ferrytowe. Ferryty magnetycznie miękkie. Ferrooxyd. Katalog "UNITRA", Wyd. "Wema", Warszawa 1979.
- [14] Warstwomierz ultrametr B-70. Instrukcja obsługi.
- [15] Zakrzewski J.: Metodyka syntezy układów linearyzujących nieliniowe charakterystyki statyczne przetworników pomiarowych, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka, z. 65, Gliwice 1979.

Recenzent: doc. dr hab. inz. Zygmunt Kusmierek

Wpłynęło do redakcji dnia 3 kwietnia 1990 r.

ПОДБОЛ КОНСТРУКЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ВИХРЕТОКОВОГО ДАТЧИКА ТОЛЩИНЫ НЕПРОВОДЯЩИХ СЛОЕВ НАЛОЖЕННЫХ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СЕТКИ

Резюне

В днагностике электродов приненяеных в электрохимических процессах требуется изнерять толщины асбестного слоя (т.н. диафрагны) наложенного на электрод в виде металлической сетки. Известные решення внхретоковых датчиков приненяются только в случае соединения с однородной металлической основой. Случай соединения датчика с неоднородной основой решен авторани в работе [4], в которой представлена соответствующая математическая модель. используется в данной работе для определения Эта нодель метолики оптимального подбора конструкционных параметров датчика и связанных с ним электрических схем для определенных изнерительных диапазонов и паранетров основы. Ограничення вытекающие из стандарта конструкционных элементов учтены согласно с (нагнитных сердечников, обноточных проводов итп.) ассортиментом приведенным в соответствующих каталогах. Представлены датчика изготовленного результаты экспериментальной проверки no приведенной методике и соединенного с неоднородной основой в виле неталлической сетки. Сфорнулированы важнейшие примечания и выводы служащие проектированию.

SELECTION OF CONSTRUCTION PARAMETERS OF THE EDDY-CURRENT THICKNESS SENSOR FOR NON-CONDUCTIVE LAYER MEASUREMENT PLACED ON METALLIC NETS

Summary

In diagnostics of electrodes applied in electrochemical processes the thickness measurement of the asbestos laver (so-called diaphragm) placed on the electrode in a metallic net form is required. The well-known eddycurent sensor solutions are applied only in the case when the sensor collaborated, with a homogenous base (net) was analyzed by the authors in paper [4], in which the adequate mathematical model was also the described. The same model has been used in the present paper to qualify the methodology of the optimum sensor constructional parameter selection and related to the sensor electrical circuits under assumed measuring ranges and base parameters. The limitations resulting to constructional elements standarization (magnetic cores, winding conductors, and the like) consistent to the assortment given in adequate catalogues are included. The experimental verification results of the sensor made using the described methodology and collaborated with a heterogenous net are presented. The important remarks conclusions for sensor design are formulated.

- 67 -