

Witold SOLNICA

Anna LEWIŃSKA-ROMICKA

J. PAPIS

S. PISKORSKI

Politechnika Warszawska
Centrum Uczelniano-Przemysłowe
Metrologii i Systemów Pomiarowych

METODY ANALIZY SYGNAŁÓW PRZETWORNIKÓW WIROPRAĐOWYCH

Streszczenie. Przedstawiono metody analizy sygnałów otrzymywanych z różnych typu przetworników wiroprowadowych z podkreśleniem tendencji rozwojowych w dziedzinie defektoskopii. Szczególną uwagę poświęcono analizie statystycznej, problematyce cyfrowego przetwarzania sygnałów defektoskopowych, metodzie uśredniania polepszającej stosunek sygnału użytecznego do szumu, wreszcie analizie korelacyjnej.

METHODS OF THE SIGNAL ANALYSIS FROM THE EDDY-CURRENT TRANSDUCERS

Summary. Methods of analysis for signals from different eddy-current transducers are presented with the emphasis on the tendencies in flaw detection. Statistical analysis, digital flaw signal processing, averaging improving signal-to-noise ratio and correlation analysis are the central problems under consideration

МЕТОДЫ АНАЛИЗА СИГНАЛОВ ВИХРЕТОКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Резюме. В статье представлены методы анализа сигналов получаемых из разного типа вихретоковых преобразователей, с одновременным обозначением новых течений в дефетоскопии. Особое внимание обращено на статический анализ, проблемы цифрового преобразования дефетоскопических сигналов, метод усреднения улучшающий параметр сигнал/шум и корреляционный анализ.

WSTĘP

Metoda prądów wirowych jest jedną z dwu głównych metod badań nieniszczących materiałów i obiektów. Badania nieniszczące mają za cel określenie geometrii, składu chemicznego, mikrostruktury, właściwości fizykochemicznych oraz wykrywanie defektów, a szczególnie - pęknięć obiektów badanych.

W niniejszym artykule podjęto zagadnienia analizy sygnałów przetworników wiroprądowych przelotowych (obiekty badane prowadzone są poprzez przetworniki), zastosowanych do wykrywania wad obiektów (defektoskopia wiroprądowa).

Najbardziej istotnym ograniczeniem defektoskopii wiroprądowej [14] jest to, że może być zastosowana tylko do materiałów i obiektów przewodzących prąd elektryczny, tj. do metali. Podkreślić wszakże należy, że jakość produktów światowej metalurgii w znacznym stopniu ocenia się właśnie wykorzystując prądy wirowe.

Dalszą cechą prądów wirowych jest ich "naskórkowość", a więc ograniczona głębokość wnikania [8]. Ma to swoje konsekwencje w wyborze częstotliwości pracy defektoskopów [13, 18, 12] - można bowiem stosować metody wieloczęstotliwościowe. Jednakową czułość wykrywania wad niezależnie od głębokości ich zalegania można uzyskać stosując metodę przepuszczania, z przetwornikami podwójnymi pracującymi w polu "dalekim", analogicznie do technik badań ultradźwiękowych. Zagadnieniom tym obecnie poświęcone jest wiele publikacji, np. w czasopiśmie Materials Evaluation (lata 1988-1989).

Przy wykorzystaniu prądów wirowych możliwe jest określenie wielkości wad obiektu. W przypadku kontroli z użyciem przetworników przelotowych nie jest możliwa lokalizacja wad na obwodzie obiektów (druty, pręty, rury). Jeszcze inną wadą defektoskopii wiroprądowej jest "sumowanie wskazań" - sygnałów pochodzących od wad znajdujących się w tym samym przekroju obiektu.

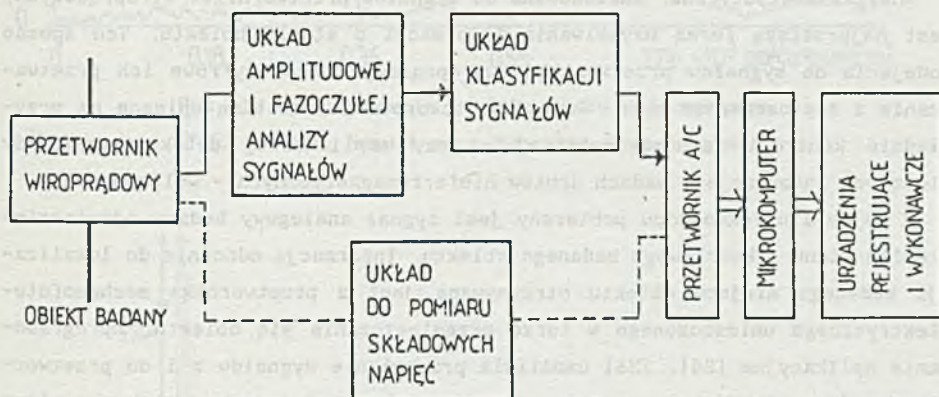
Do praktycznej realizacji kontroli wiroprądowej konieczne jest uzyskanie odpowiedniego stosunku sygnałów wywołanych przez nieciągłości obiektów do zakłóceń, którymi są sygnały wywołane przez zmiany geometrii, chropowatość powierzchni, zmiany mikrostruktury oraz nieodpowiednie - nieosiowe prowadzenie obiektów przez przetwornik. Realizacja tego celu wymaga opracowania odpowiednich układów analizy sygnałów przetworników oraz zaimplementowania odpowiednich (cyfrowych) technik poprawy stosunku sygnałów użytecznych - do zakłóceń.

Innym, niezwykle istotnym zagadnieniem defektoskopii wiroprądowej, wokół którego koncentruje się obecnie jej rozwój, jest analiza "całkowitego" sygnału przetworników wiroprądowych. Analiza taka umożliwiła uzyskanie bogatszej,

w stosunku do dotychczas stosowanych metod, informacji odnośnie do wad obiektu. Innymi słowy obserwuje się [7, 2, 3, 4, 11, 20], podobnie jak w całej technice pomiarowej, tendencje budowy inteligentnej aparatury przeznaczonej do badań nieniszczących.

Niektórym zagadnieniom związanym z analizą sygnałów przetworników wiroprowodowych poświęcony jest niniejszy artykuł.

Ogólny schemat realizacji procesu kontroli wiroprowodowej przedstawiono na rys. 1. Wytworzenie w obiekcie prądów wirowych i odbiór sygnałów zawierających informację o stanie obiektu odbywa się za pośrednictwem przetworników wiroprowodowych o różnych konfiguracjach [8, 10, 13, 25, 12]. W najprostszym



Rys. 1. Schemat procesu kontroli metodą wiroprowodową

Fig. 1. Testing process diagram using eddy-current technique

przypadku sygnały przetworników poddawane są obróbce amplitudowej. Przypadek taki występuje, gdy zakłócające wykrywanie nieciągłości wpływy mogą być pominięte, np. przy kontroli niemagnetycznych drutów ciągnionych - wolframowych [5] produkowanych przy wysokiej tolerancji średnicy. We wszystkich innych przypadkach (kontrola drutów, prętów oraz rur) ze względu na to, że sygnały wywołane przez nieciągłości obiektów i zmiany ich geometrii, czy też zmiany w sprzężeniu przetwornika wskutek nieosiowego prowadzenia obiektu, mają różne kąty przesunięcia fazowego, stosowana jest analiza fazoczuła [23, 16, 14]. Klasyfikacja sygnałów w zależności od wad obiektów przeprowadzana jest hardware'owo [22] lub obecnie - software'owo. Mikrokomputerowa selekcja zarejestrowanych sygnałów obejmuje analizę statystyczną oraz cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Informacja o stanie obiektu może być przedstawiona przy użyciu urządzeń rejestrujących: drukarek, plotterów, a także służy do sterowania

odpowiednich urządzeń wykonawczych, takich jak piły, sortowniki i znakowniki. W przypadku kontroli podczas procesu wytwarzania tak zorganizowany proces kontroli umożliwia nie tylko segregację obiektów w zależności od ich jakości, tj. natężenia występowania wad, ale przede wszystkim - natychmiastową ingerencję w proces produkcyjny w przypadku częstego występowania znacznych co do wielkości defektów obiektu [26].

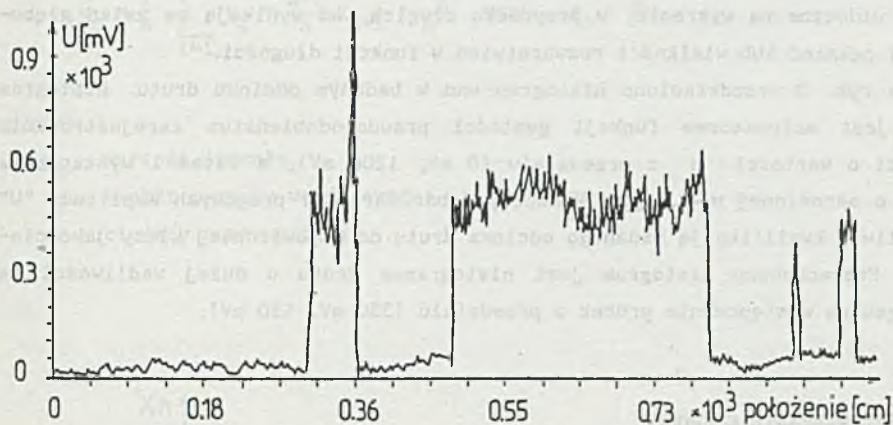
ANALIZA STATYSTYCZNA

Analiza statystyczna, zastosowana do sygnałów przetworników wiroprądowych, jest najprostszą formą uzyskiwania informacji o stanie obiektu. Ten sposób podejścia do sygnałów przetworników wiroprądowych oraz cyfrowe ich przetwarzanie z zastosowaniem m.in. funkcji autokorelacji, zostaną opisane na przykładzie kontroli jednoparametrowej - przy amplitudowej detekcji sygnałów niosących informację o wadach drutów nieferromagnetycznych - wolframowych.

Z wyjścia defektoskopu pobierany jest sygnał analogowy będący odzwierciedleniem stanu jakościowego badanego obiektu. Informacja odnośnie do lokalizacji badanego miejsca obiektu otrzymywana jest z przetwornika mechanofotoelektrycznego umieszczonego w torze przemieszczania się obiektu. Oprogramowanie aplikacyjne [24], [26] umożliwia przesyłanie sygnałów z i do przetwornika analogowo-cyfrowego poprzez program obsługujący proces badań z poziomu języka Pascal. Oprogramowanie zapewnia parametryczne ustalanie kroku eksperymentu, poziomów ponad- i podprogowych oraz automatyczną rejestrację napięć uzyskiwanych z defektoskopu. Analiza statystyczna może być prowadzona przy wykorzystaniu uniwersalnego pakietu STATGRAPHICS. Pakiet ten umożliwia m.in. stosowanie procedur aproksymacyjnych, analizę korelacyjną, całkowanie i różniczkowanie numeryczne, wyznaczanie typowych parametrów zmiennych losowych, analizę szeregów czasowych, a także - sporządzanie wykresów funkcji, histogramów itp.

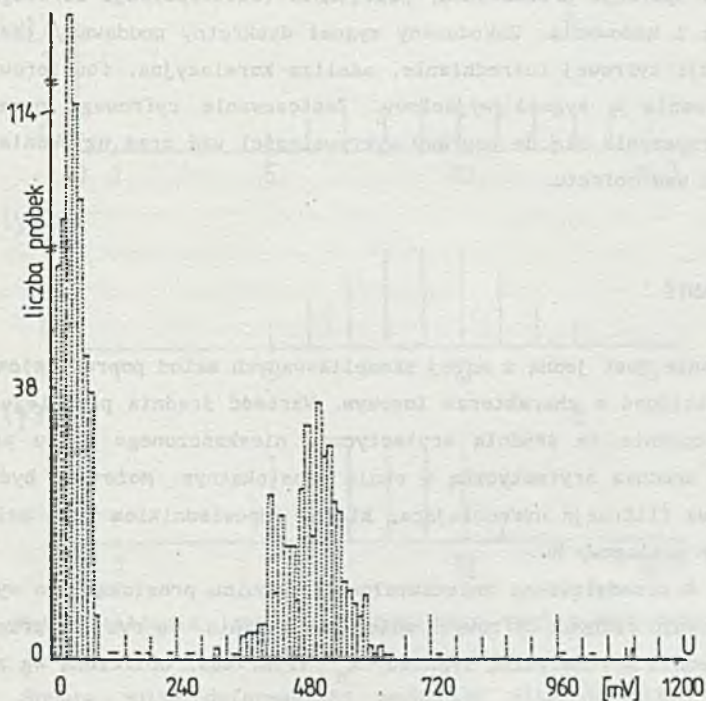
Na rys. 2 przedstawiono wynik badania odcinka drutu wolframowego w formie zależności sygnału uzyskanego z defektoskopu od odległości miejsca kontroli od punktu startowego, a zatem od położenia miejsca badania w obiekcie.

Badaniu poddano 10-metrowy odcinek drutu wolframowego o średnicy 0,35 mm. Sygnał napięciowy z defektoskopu próbkowano co 10 mm wzdłuż badanego drutu. Widoczne na wykresie impulsy świadczą o obecności wad. Na podstawie wykresu można określić długość i położenie każdej z nich w badanej próbce drutu. Wielkość wady, np. głębokość pęknięcia, jest wprost proporcjonalna do amplitudy



Rys. 2. Wynik badania odcinka drutu wolframowego

Fig. 2. Test result of a tungsten wire fragment



Rys. 3. Histogram wad w odcinku drutu wolframowego

Fig. 3. Flaws histogram in the fragment of a tungsten wire

tudy zarejestrowanej próbki. Nierównomierności w przebiegu grzbietów impulsów, widoczne na wykresie, w przypadku długich wad wynikają ze zmian głębokości pęknięć lub wielkości rozwarstwień w funkcji długości.

Na rys. 3 przedstawiono histogram wad w badanym odcinku drutu. Histogram ten jest estymatorem funkcji gęstości prawdopodobieństwa zarejestrowania próbki o wartości u z przedziału (0 mV, 1200 mV), a zatem i wystąpienia wady o określonej wielkości. Właściwy dobór wartości progowych amplitudy "U" umożliwia kwalifikację badanego odcinka drutu do odpowiedniej klasy jakościowej. Prezentowany histogram jest histogramem drutu o dużej wadliwości ze względu na występowanie próbek z przedziału (350 mV, 650 mV).

PRZETWARZANIE CYFROWE

Cyfrowe przetwarzanie sygnałów polega na transformacji zbioru próbek - w odpowiedni zbiór wyników. Poprzedza je przetwarzanie analogowo-cyfrowe realizujące operacje próbkowania, pamiętania (ekstrapolacji zerowego rzędu), kwantyzacji i kodowania. Zakodowany sygnał dyskretny poddawany jest następnie filtracji cyfrowej (uśrednianie, analiza korelacyjna, fourierowska itp.) i przetwarzaniu w sygnał wyjściowy. Zastosowanie cyfrowego przetwarzania sygnałów przyczynia się do poprawy wykrywalności wad oraz uzyskania pełniejszego opisu wad obiektu.

UŚREDNIANIE

Uśrednianie jest jedną z mniej skomplikowanych metod poprawy stosunku sygnałów do zakłóceń o charakterze losowym. Wartość średnia przebiegu może być obliczana zgodnie ze średnią arytmetyczną nieskończonego ciągu próbek lub (częściej) średnią arytmetyczną w oknie prostokątnym. Może też być zastosowana cyfrowa filtracja uśredniająca, której odpowiednikiem jest dolnoprzepustowy filtr analogowy RC.

Na rys. 4 przedstawiono zniekształcenia impulsu prostokątnego występujące przy stosowaniu różnych cyfrowych metod uśredniania. Na rys. 4b przedstawiono wartość średnią arytmetyczną sygnału x_n (rys. 4a), obliczoną wg zależności (1)

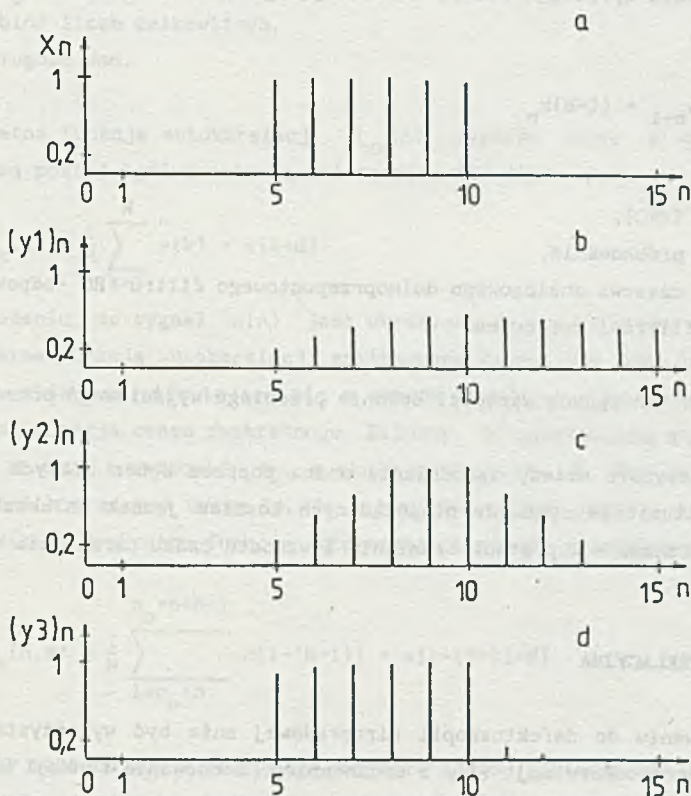
$$y_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{n-1}{n} y_{n-1} + \frac{x_n}{n} \quad \text{przy} \quad y_0 = 0 \quad (1)$$

gdzie:

y_n - wartość średnia,

x_1 - próbki sygnału wejściowego,

n - bieżący numer próbki.



Rys. 4. Zniekształcenia impulsu prostokątnego występujące przy stosowaniu różnych metod uśredniania

Fig. 4. Square pulse deformations occurring with different methods of averaging

W tym przypadku zapamiętywana jest wartość średnia z poprzedniej iteracji, która to wartość wpływa na wartość bieżącą y_1 z wagą wielokrotnie większą (zależną od n) niż waga próbki x_n . W konsekwencji obserwuje się (rys. 4b) wydłużone czasy opadania impulsów, szczególnie dla długich czasów trwania sygnału (duże wartości n).

Dwa następne sposoby uśredniania polegają na obliczaniu średniej arytmetycznej w oknie prostokątnym o długości N (zależność (2))

$$y_n = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_{n-1} \quad \text{przy } y_{-N+1} \dots y_0 = 0 \quad (2)$$

oraz zastosowaniu cyfrowego filtra uśredniającego (I rzędu) opisanego równaniem (3)

$$y_n = b y_{n-1} + (1-b)x_n \quad (3)$$

gdzie:

$$b = \exp(-T/RC),$$

T - okres próbkowania,

RC - stała czasowa analogowego dolnoprzepustowego filtra RC odpowiadającego filtrowi cyfrowemu.

Otrzymane w ten sposób wartości średnie przebiegu wyjściowego przedstawiono na rys. 4c i 4d.

Stosując powyższe metody uśredniania można poprzez dobór stałych " N " lub " b " uzyskać tłumienie sygnałów niepożądanych kosztem jednak zniekształcenia sygnału użytecznego - w postaci tłumienia i wzrostu czasu narastania zboczy.

ANALIZA KORELACYJNA

W zastosowaniu do defektoskopii wiroprowadowej może być wykorzystana dyskretna funkcja autokorelacji [1], z opóźnieniem. Stosowanie funkcji korelacji wzajemnej jest niedogodne, gdyż wymaga dysponowania sygnałem odniesienia, pochodzącym od (określonej) wady wzorcowej. Jako zakłócenia wzięto pod uwagę wahania poziomu sygnału dla miejsc drutu pozbawionych wad oraz wnikające ze zmian głębokości wad wahania poziomu wywołanych przez nie sygnałów.

Istotnym zagadnieniem z punktu widzenia zastosowania metod korelacyjnych są: charakter sygnałów wywołanych przez wady oraz charakter sygnałów wywołanych przez zakłócenia.

Sygnał użyteczny wywołany występującymi w drutach niemagnetycznych i prętach wadami wzdłużnymi może być opisany w następujący prosty sposób

$$x(n) = \begin{cases} U & \text{dla } n \in A \\ 0 & \text{dla } n \in Z-A \end{cases} \quad (4)$$

gdzie:

$$A = \{n_0+1, \dots, n_0+k\}$$

Z - zbiór liczb całkowitych,

k - długość wad.

Dyskretna funkcja autokorelacji $R_{xx}(d)$ sygnału $x(n)$ w oknie o długości N ma postać ogólną opisaną zależnością (5) [1]

$$R_{xx}(d) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x(k) \cdot x(k+d) \quad (5)$$

przy założeniu, że sygnał $x(n)$ jest określony dla co najmniej N+d próbek.

Dyskretna funkcja autokorelacji zastosowana do analizy sygnałów niestacjonarnych, jakimi są pojawiające się w sposób dowolny, impulsy wywołane przez wady, jest funkcją czasu dyskretnego. Załóżmy, że analizujemy sygnał pojawiający się w chwili czasowej n_0 , w oknie o długości N. Zamieniając zmienne sumowania i biorąc pod uwagę to, że możemy dysponować jedynie sygnałem opóźnionym $x(k-d)$ dyskretną funkcję autokorelacji możemy przedstawić następująco

$$R_{xx}(n, d) = \frac{1}{N} \sum_{i=n_0+n}^{n_0+n+N-1} x[i-(N-1)] \cdot x[i-(N-1)-d] \quad (6)$$

Sygnały zakłócające w przypadku kontroli drutów nieferromagnetycznych charakteryzują się, jak to wynika z przeprowadzonych badań [24], wartościami unormowanej funkcji autokorelacji $R_{xx}(d)/R_{xx}(0) \in \langle -0,15; +0,15 \rangle$ - dla opóźnień d z zakresu $\langle 1; 20 \rangle$.

Stosunek sygnału użytecznego do zakłóceń S/N wynosi [24] dla wad długich, tj. przy $N \leq k-d$

$$S/N = \sqrt{N} \frac{(S/N)_{we}^2}{\sqrt{1+2(S/N)_{we}^2}}, \quad (7)$$

a dla wad krótkich, tj. przy $N > k$

$$S/N = \frac{k-d}{\sqrt{N}} \frac{(S/N)_{we}^2}{\sqrt{1+2 \frac{k}{N} (S/N)_{we}^2}} \quad (8)$$

gdzie $(S/N)_{we} = U/\sigma_s$, przy czym U jest sygnałem wejściowym, a σ_s - wariancją sygnału zakłócającego.

Zastosowanie dyskretnej funkcji autokorelacji daje znaczące zwiększenie odstepu sygnału od zakłóceń jedynie dla wad długich, opisanych zależnością (4). Poprawę α -krotną odstepu sygnału od zakłóceń uzyskujemy dla długości okna

$$N = \alpha^2 \left\{ 2 + \frac{1}{(S/N)_{we}} \right\} \quad (9)$$

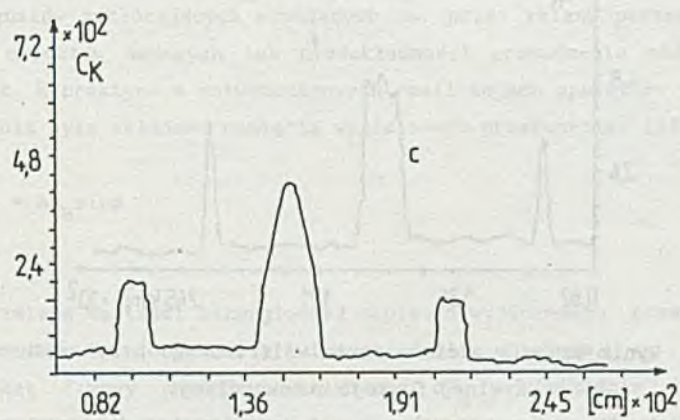
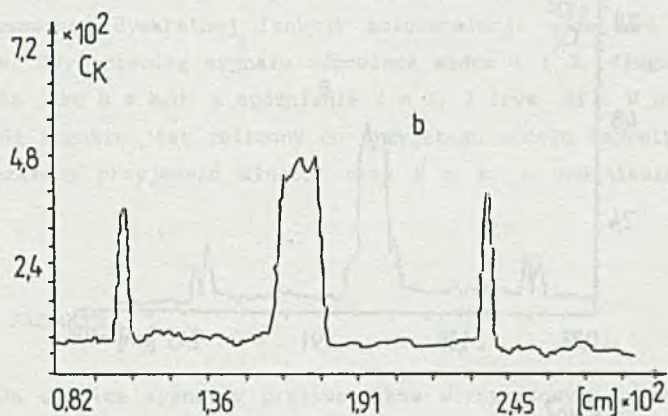
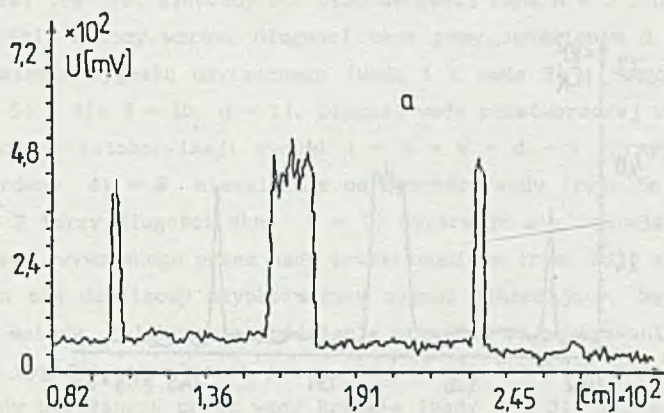
Niżej przedstawione zostaną przykłady zastosowań dyskretnej funkcji autokorelacji do analizy sygnałów defektoskopu wiroprądowego. Obiektem kontrolowanym był drut wolframowy o długości 3 m i średnicy 0,35 mm, zawierający trzy wady o długości 1 odpowiednio:

- wada 1: $U(103) + U(109)$ $l_1 = 6$ cm, $k_1 = 6$
- wada 2: $U(161) + U(180)$ $l_2 = 19$ cm, $k_2 = 19$
- wada 3: $U(234) + U(239)$ $l_3 = 5$ cm, $k_3 = 5$

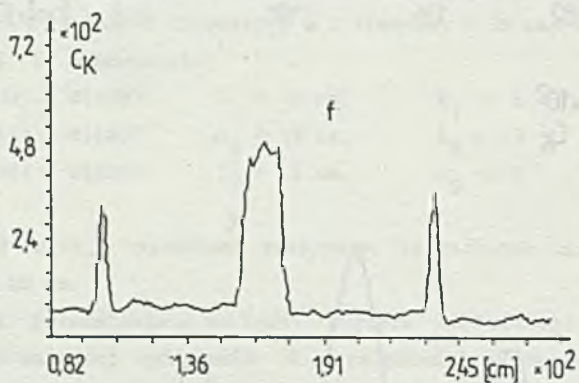
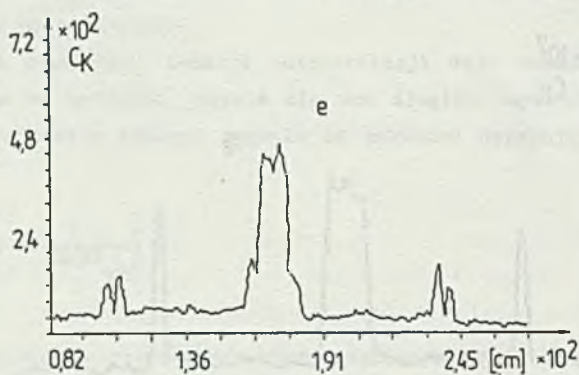
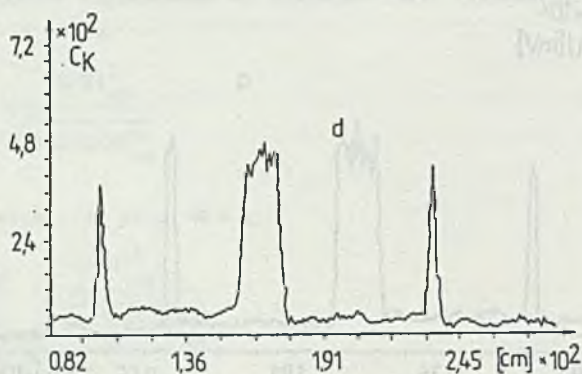
Długości wad k_1+k_3 wyznaczono zważywszy, że zdolność rozdzielcza defektoskopu wynosi 10 mm.

Na rys. 5b-f przedstawiono wartości sygnału użytecznego $\sqrt{R_{uu}(k,d)} = c_k$ dla określonych wartości opóźnienia d , w zależności od parametru k skojarzonego z położeniem punktu kontroli. Jako odniesienie podano wykres sygnału napięciowego $U(k)$ wywołanego obecnością drutu (rys. 5a).

Zastosowanie dyskretnej funkcji autokorelacji daje znaczące zmniejszenie poziomu zakłóceń sygnału zarówno w przypadku zmian sygnału wywołanego przez małe wady powierzchniowe, jak i w przypadku zmian sygnału pochodzącego od



Rys. 5a, b, c



Rys. 5d,e,f. Wynik badania odcinka drutu wolframowego przy zastosowaniu dyskretnej funkcji autokorelacji

Fig. 5. Test results of a tungsten wire fragment using discrete autocorrelation function

wady 2. Efekt ten jest widoczny np. przy długości okna $N = 3$ i opóźnieniu $d = 1$ (rys. 5b). Dalszy wzrost długości okna przy opóźnieniu $d = 1$ powoduje jednak tłumienie sygnału użytecznego (wada 1 i wada 3) i przyrost długości wady (rys. 5c - dla $N = 10$, $d = 1$). Długość wady przetworzonej za pomocą dyskretnej funkcji autokorelacji wynosi $l = N + k - d - 1$. Przyrost długości wady jest równy $\Delta k = 8$ niezależnie od długości wady (rys. 5c). Przy opóźnieniu $d = 2$ (przy długości okna $N = 1$) obserwuje się zmniejszenie sygnału zakłócającego, wywołanego przez wady powierzchniowe (rys. 5d), ale jednocześnie pojawia się dodatkowy szybkozmienny sygnał zakłócający, będący skutkiem stosowanej metody. Zwiększanie opóźnienia prowadzi do powstawania zniekształceń zboczy sygnałów wywołanych przez wady długie (wada 2) oraz rozszczepienia impulsów wywołanych przez wady krótkie (wady 1 i 3). Zilustrowano to na rys. 5e dla opóźnienia $d = 5$ (przy długości okna $N = 1$). Dobór parametrów przy zastosowaniu dyskretnej funkcji autokorelacji może być zrealizowany empirycznie. Gdy przebieg sygnału odpowiada wadom 1 i 3, długość okna może być przyjęta jako $N \approx k/d$, a opóźnienie $d = 1, 2$ (rys. 5f). W przypadku zaś, gdy przebieg sygnału jest zbliżony do przyjętego modelu teoretycznego (wzór (4)), należałoby przyjmować długość okna $N \leq k$, a opóźnienia o wartości kilku.

ANALIZA FAZOCZUŁA

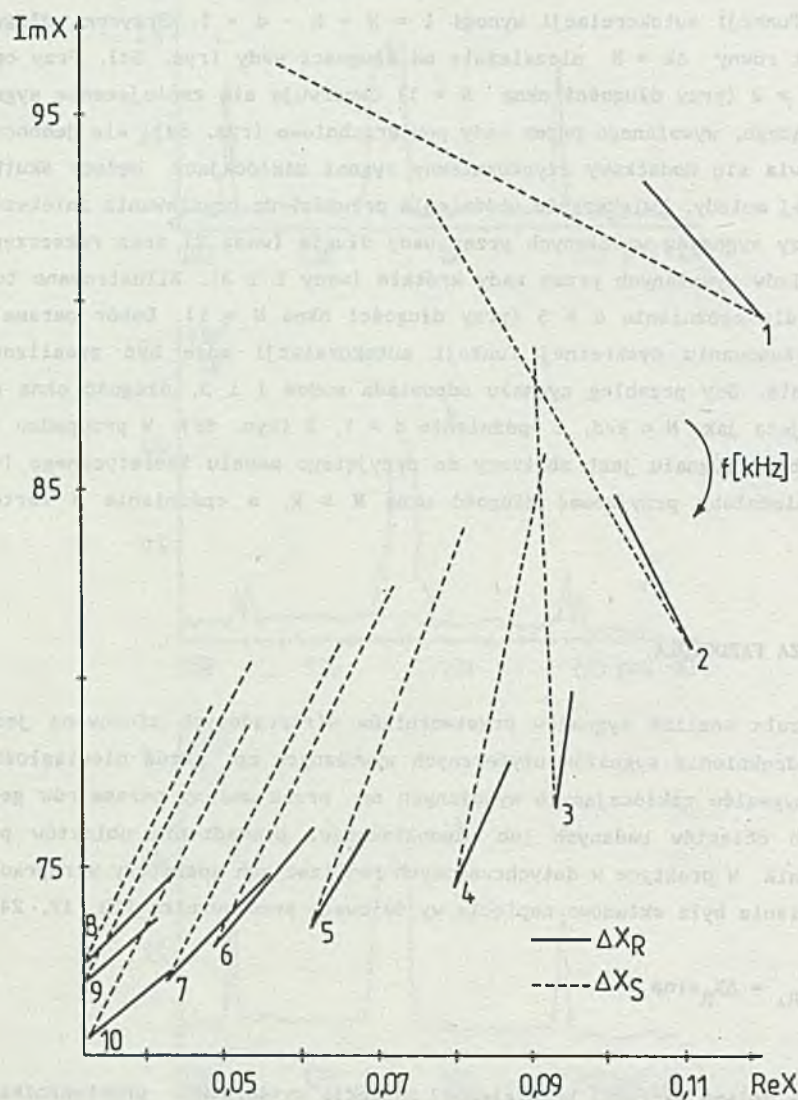
Fazoczwała analiza sygnałów przetworników wiroprowodowych stosowana jest w celu wyodrębnienia sygnałów użytecznych wywołanych np. przez nieciągłości - na tle sygnałów zakłócających wywołanych np. przez zmiany parametrów geometrycznych obiektów badanych lub niedokładności prowadzenia obiektów przez przetwornik. W praktyce w dotychczasowych realizacjach aparatury wiroprowodowej wyodrębniania była składowa napięcia wyjściowego przetwornika [13, 17, 24]

$$\Delta X_{R1} = \Delta X_R \sin \phi \quad (10)$$

gdzie:

- ΔX_R - zmiana wartości bezwzględnej napięcia wyjściowego przetwornika wywołana istnieniem wady (nieciągłości) w obiekcie,
- ϕ - kąt fazowy pomiędzy wielkością ΔX_R i wielkością ΔX_S wywołaną zmianą określonego parametru geometrycznego, np. średnicy obiektu,

ΔX_{R1} - rzut zmiany wartości bezwzględnej napięcia wyjściowego przetwornika na kierunek prostopadły do kierunku wyznaczonego przez ΔX_S .



Rys. 6: Unormowane napięcie przetwornika wiropądowego bezwzględnego zawierającego rurę miedzianą

Fig. 6. Normalized voltage of an absolute eddy-current transducer with a copper tube in it

Składowe napięcia wyjściowego przetwornika wiroprądowego, zawierającego rurę miedzianą o średnicy zewnętrznej 8 mm i grubości ścianki 0,7 mm - z wadą w postaci przelotowego rowka o długości 21 mm i szerokości 0,5 mm i zmniejszeniem średnicy zewnętrznej do 6,8 mm, przedstawiono na rys. 6 [24]. Na rys. 6 pokazano unormowane składowe napięcia wejściowego przetwornika, obliczone z następujących zależności:

$$\operatorname{Re}X = \frac{U_R - U_{RO}}{U_{IO}} \quad \operatorname{Im}X = \frac{U_I}{U_{IO}} \quad (11)$$

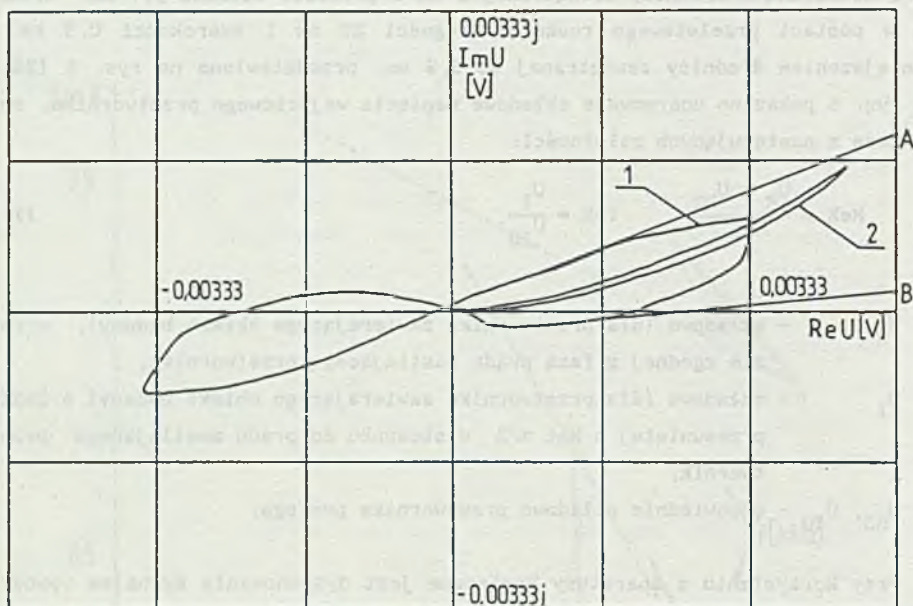
gdzie:

- U_R - składowa (dla przetwornika zawierającego obiekt badany), o fazie zgodnej z fazą prądu zasilającego przetwornika,
- U_I - składowa (dla przetwornika zawierającego obiekt badany) o fazie przesuniętej o kąt $\pi/2$ w stosunku do prądu zasilającego przetwornik,
- U_{RO}, U_{IO} - odpowiednie składowe przetwornika pustego.

Przy korzystaniu z aparatury konieczne jest dysponowanie sygnałem wywołanym przez czynnik zakłócający wykrywanie nieciągłości. Umożliwia to wybór relacji fazowych defektoskopu w celu uniezależnienia jego wskazań od jednego (rzadziej kilku - o ile charakteryzują się sygnałami o analogicznych kątach przesunięcia fazowego) czynnika zakłócającego. Przy tym sposobie podejścia z maksymalną czułością wykrywane są określonego typu wad, np. tylko zewnętrzne. Czułość wykrywania innych wad jest mała, a nawet mogą one zostać pominięte w procesie kontroli.

Obecne tendencje rozwojowe w defektoskopii wiroprądowej sprowadzają się do dążenia do uzyskania bogatszej, w stosunku do wyżej opisanej, informacji o wadach obiektów. Ideą tę można zrealizować analizując "całkowite" napięcie (impedancję) przetworników wiroprądowych o dowolnych konfiguracjach. Przedmiotem analizy są przedstawiane na płaszczyźnie zmiennej zespolonej, dla danej częstotliwości pracy, trajektorie zmian napięcia (impedancji) przetworników. Trajektorie takie uzyskiwane są podczas przesuwu poprzez przetwornik odcinków obiektu z wadami [9, 15, 19, 21, 27, 28]. W krajach zachodnich oparto na tym sposobie nową generację defektoskopów wiroprądowych.

Przykładowe trajektorie napięcia przetwornika różnicowego zawierającego rurę mosiężną o średnicy zewnętrznej 8 mm pokazano na rys. 7. Trajektorja 1 dotyczy wady w postaci rowka przelotowego, trajektorja 2 - zmiany średnicy zewnętrznej (grubości ścianki) rury, jak w przypadku rys. 6. Rozpiętość ra-



Rys. 7. Trajektorie napięcia przetwornika wiropięradowego różnicowego

Fig. 7. Voltage plane trajectories of a differential eddy-current transducer

mion trajektorii - to amplituda sygnału wyjściowego przetwornika. Kształt i położenie fazowe trajektorii są różne - dla różnych wad obiektów [15, 24]. Stanowi to podstawę do rozróżniania wad obiektów - na podstawie trajektorii. I tak np. firma Sandvik (Szwecja) opracowała przystawkę o nazwie Sector Classifier, współpracującą z defektoskopem wiropięradowym. Użytkownik wybiera ćwiartkę płaszczyzny zmiennej zespolonej oraz sektor ćwiartki (wielkości A i B), w którym znajdować się mogą trajektorie odpowiadające interesującym go wadom.

Innym, bardziej zaawansowanym, sposobem podejścia do analizy sygnałów przetworników wiropięradowych może być określenie cech charakteryzujących trajektorie i klasyfikacja wad obiektów na podstawie tych cech. Rozwiązanie takie, należące do dziedziny rozpoznawania obrazów, opisano w [15, 24].

Klasyczny defektoskop wiropięradowy, zawierający np. układ fazoczułej analizy sygnałów oraz hardware'owy układ klasyfikacji sygnałów w zależności od wielkości wad, zastępowany jest układem do pomiaru składowych (rzeczywistej i

urojonej) napięć. Dane odnośnie do tych składowych wprowadzane są do komputera i analizowane w postaci cyfrowej.

W tym miejscu należy również wspomnieć o dwuwymiarowej transformacji Fouriera, zastosowanej do określania wielkości ziarna w materiałach polikrystalicznych [6] oraz metodzie współczynników Fouriera, opracowanej do analizy zmian impedancji przetwornika wiropądowego przelotowego pracującego w układzie różnicowym, w zależności od położenia [28]. Obie metody prowadzą do ilościowego określenia wielkości i kształtu wady.

ZAKOŃCZENIE

Współczesna aparatura do badań defektoskopowych powinna umożliwiać nie tylko wykrycie wady, ale również określenie jej wielkości, kształtu i położenia w badanym obiekcie. Sygnały przetworników wiropądowych są w sposób cyfrowy przetwarzane w celu wyodrębnienia zawartej w nich informacji o wadach obiektu, przy jednoczesnym zmniejszeniu wpływu czynników zakłócających. Te trendy dają się zauważyć w aparaturze wiropądowej przeznaczonej do kontroli półfabrykatów podczas procesu ich wytwarzania, ale przede wszystkim - w aparaturze stosowanej do kontroli tychże - ale zainstalowanych. W szczególności uwaga ta dotyczy badania rur w wytwornicach pary i wymiennikach ciepła siłowni jądrowych, ale również - w przemyśle chemicznym i naftowym.

Stosowalność opisanych metod analizy sygnałów zależy od konkretnych wymagań dotyczących procesu kontroli i właściwości samej metody.

Opisane klasyczne metody analizy statystycznej stosowane są do kontroli partii zawierającej dużą liczbę wyrobów - w warunkach przemysłowych, co wynika z właściwości metod statystycznych oraz łatwości w uzyskaniu całościowej charakterystyki kontrolowanej partii wyrobów.

Przedstawione w pracy metody cyfrowego przetwarzania sygnałów (uśrednianie i analiza korelacyjna) umożliwiają - poprzez zwiększenie czułości - wykrywanie drobnych wad obiektu w skomputeryzowanych systemach pomiarowo-kontrolnych.

Innym celom służy stosowanie analizy fazoczułej sygnałów. Analiza fazoczuła umożliwia kontrolę określonego parametru obiektu eliminując wpływ drugiego dominującego parametru na proces kontroli. Z tego względu metodę analizy fazoczułej stosuje się do badania zmian przewodności (występowania wad) przy współistniejących zmianach geometrii obiektu badanego.

Najnowsze tendencje w dziedzinie analizy sygnałów wyznaczają metody analizy zespolonego napięcia przetwornika wirowego umożliwiając, oprócz detekcji, klasyfikację rodzajów wad na podstawie badań porównawczych. Metoda ta, jakkolwiek bardzo cenna ze względu na praktyczne podjęcie problemu diagnozy w defektoskopii wirowej, znajduje się jeszcze w fazie wstępnej.

LITERATURA

- [1] Beauchamp K.G.: Przetwarzanie sygnałów metodami analogowymi i cyfrowymi. WNT, Warszawa 1972.
- [2] Benas J.C., Lefevre F.M.: Automatic system for eddy current examination of steam generator tubes, Non-destructive testing, Proceedings of the 12th World Conference, Amsterdam 1989.04.23-28, wyd. J. Boogard, G.M. van Dijk, Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo 1989, vol. 1.
- [3] Chen C.H.: Tutorial on signal processing and pattern recognition in non-destructive evaluation of materials, jw.
- [4] Corazza A., Milana E., Zanardi F.A., Ziprani F.M.: A new smart eddy-current system for on-line flaws detection, jw.
- [5] Dydyński K., Dźwiarek M., Lewińska-Romicka A.: Defektoskop wirowy do badania elementów niemagnetycznych, patent nr 145699.
- [6] Generazio R.E.: Determination of grain - size distribution function using two-dimensional Fourier transforms of tonepulse-encoded images, Materials Evaluation, March 1988.
- [7] Goebels K.: State of the art and short term development tendencies in nondestructive surface defect detection and evaluation, Non-destructive testing. Proceeding of the 12th World Conference, Amsterdam, 1989.04.23-28, wyd. J. Boogaard, G.M. van Dijk, Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo 1989, vol. 1.
- [8] Heptner H., Stroppe H.: Magnetyczne i indukcyjne badania metali, Wyd. Śląsk, Katowice 1972.
- [9] Ida N.: Alternative approaches to the numerical calculation of impedance, NDT International, Nr 1, 1988.
- [10] Ida N., Palanisamy R., Lord W.: Eddy current probe design using finite element analysis, Materials Evaluation, Nov., 1983.
- [11] Judd T.W.: An eddy - current inspection system using signal correlation to improve signal to noise ratio, Materials Evaluation, Oct., 1984.

- [12] Lewińska-Romicka A.: Problemy nieniszczących badań rur niemagnetycznych metodą prądów wirowych, Rozprawy Elektrotechniczne, nr 3, 1986, s. 801-812.
- [13] Lewińska-Romicka A.: Przetworniki wiropądowe do nieniszczących badań rur niemagnetycznych metodą prądów wirowych, Rozprawy Elektrotechniczne, nr 3, 1988. s. 839-873.
- [14] Lewińska-Romicka A.: Defektoskopia wiropądowa rur nieferromagnetycznych spawanych. Rozprawy Elektrotechniczne, nr 3, 1990 (artykuł przyjęty).
- [15] Lewińska-Romicka A.: Trajektorie napięcia przetworników wiropądowych samoporównawczych. Rozprawy Elektrotechniczne, artykuł przyjęty.
- [16] Lewińska-Romicka A., Piskorski S.: Defektoskop do badania rur metodą indukcyjną, patent nr 150449.
- [17] Lewińska-Romicka A., Piskorski S.: Właściwości przetworników wiropądowych do nieniszczących badań prętów ferromagnetycznych, Rozprawy Elektrotechniczne, nr 3, 1989.
- [18] Papis J.: Problemy doboruczęstotliwości pracy przetwornika wiropądowego w układzie samoporównawczym do kontroli rur spawanych wykonanych z materiałów nieferromagnetycznych, Sympozjum Metrologia'89 "Metrologia wielkości mechanicznych i kontrola jakości produkcji". Organizator: Centrum Uczelniano-Przemysłowe Metrologii i Systemów Pomiarowych Politechniki Warszawskiej. Materiały konferencji.
- [19] Qendro F., Benoist B., Lengelle R., Gaillard P.: Eddy current NDT signal to noise ratio enhancement via estimation of impulsive signals in band limited stationary additive noise, Non-destructive testing, Proceedings of the 12th World Conference, Amsterdam, 1989.04.23-28, wyd. J. Boogard, G.M. van Dijk, Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo 1989, vol. 1.
- [20] Sabbagh H.A., Radecki D.J., Barkeshli S., Jenkins S.: Inversion of eddy-current data and the reconstruction of three-dimensional flaws, jw.
- [21] Sikora R., Gawrylczyk K.M., Gratkowski S., Ziółkowski M.: Raporty tematu VII.01 "Algorytmy defektoskopii wiropądowej" CPBP 02.20 "Wybrane zagadnienia podstawowych problemów współczesnej metrologii oraz technologii i konstrukcji systemów i urządzeń pomiarowo-kontrolnych, etapy I-IV (1986-1989).
- [22] Solnica W., Lewińska-Romicka A., Dydyński K., Owsiany M.: Układ cyfrowej rejestracji wad do defektoskopów, patent nr 103992.
- [23] Solnica W., Lewińska-Romicka A., Dydyński K., Piskorski S., Owsiany M.: Defektoskop do badania elementów ferromagnetycznych, patent nr 113172.

- [24] Solnica W., Lewińska-Romicka A., Piskorski S., Papis J.: Raporty tematu VII.03 "Problemy badań nieniszczących obiektów metalowych metodą prądów wirowych" CPBP 02.20 "Wybrane zagadnienia podstawowych problemów współczesnej metrologii oraz technologii i konstrukcji systemów i urządzeń pomiarowo-kontrolnych", etapy I-IV (1986-1989).
- [25] Solnica W., Lewińska-Romicka A., Piskorski S., Papis J.: Konfiguracje przetworników przelotowych w defektoskopii wiroprądowej, Metrologia i Systemy Pomiarowe, artykuł zgłoszony.
- [26] Solnica W., Lewińska-Romicka A., Piskorski S., Papis J.: Analiza sygnałów z defektoskopu wiroprądowego wspomagana komputerowo, Metrologia i Systemy Pomiarowe, artykuł przyjęty.
- [27] Stegeman D., Kelb W., Scheer G.: Application of digital data analysis in eddy current tube inspection, Non-destructive testing, Proceedings of the 12th World Conference, Amsterdam, 1989.04.23-28, wyd. J. Boogaard, G.M. van Dijk, Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo 1989, vol. 1.
- [28] Udpa S.S., Lord W.: A Fourier descriptor classification scheme for differential probe signals, Materials Evaluation, Aug. 1984.

Recenzent: Prof. dr inż. Tadeusz ZAGAJEWSKI

Wpłynęło do Redakcji w lutym 1990 r.

A b s t r a c t

The methods of the signal analysis from the eddy-current transducers are described, relating to the new trends in defectoscopy.

Eddy-current technique is one of the two main methods of non-destructive testing of materials and objects. "Classical" eddy-current defectoscopes supply information only about the flaws occurrence in the tested object, and flaws classification depended on its size.

Integral part of the latest generation defectoscopes, are mini- and micro-computers. They are applied to:

- digital processing of signals coming from the eddy-current transducers in order to improve flaws detection,
- transducers linearization and autocalibration,
- improve test results presentation,

- control of manufacturing process,
- prepare documentation of testing.

The methods of digital signal processing, that are described here, are destined both to improve signal to noise ratio and retrieve the information concerning various types of detecting flaws in order to recognizing them.

The objects used for testing are made of non-magnetic materials. The testing results obtained by means of described methods, are also presented.

CONDUCTOMETRIC INSPECTION OF AUTOMATICALLY CONTROLLED
 CIRCULARITY OF MEASUREMENTS

Struktura i funkcje komputera w procesie pomiarowym i kontrolnym w praktyce produkcyjnej. Wskazanie na możliwości i ograniczenia komputera w dziedzinie pomiarów i kontroli. Opis sposobu pomiaru przewodności i jego zastosowania w procesie pomiarowym i kontrolnym. Opis sposobu pomiaru przewodności i jego zastosowania w procesie pomiarowym i kontrolnym.

LOW-CURRENT CONDUCTIVITY MEASUREMENTS
 OF ALUMINUM SURFACES

Summary: An idea and a process of measuring surface conductivity of current conductor with a contactless method is presented. The basic form of measurement is used in an application of the method of investigation of detecting surface conductivity with a contactless method and using the results of measurement to determine error.

PROPERTIES OF CONDUCTIVITY IN MEASUREMENTS OF
 SURFACES

Podany jest sposób pomiaru przewodności powierzchniowej w procesie pomiarowym i kontrolnym. Wskazanie na możliwości i ograniczenia komputera w dziedzinie pomiarów i kontroli. Opis sposobu pomiaru przewodności i jego zastosowania w procesie pomiarowym i kontrolnym.