

Miniaturowy defektoskop rezonansowy dla diagnostyki wstępnej w transporcie szynowym. Pomiar magnetyczne i magnetoindukcyjne

Zbigniew Hilary Żurek, Paweł Idziak, Krzysztof Kowalski, Grzegorz Peruń

1. Wstęp

Wprowadzenie procedury badania stanu materiału metodą magnetyczną lub magneto indukcyjną po metodę rezonansową, wymaga wiedzy o parametrach fizycznych materiałów [4, 5, 6], a szczególnie o związkach materiałowych mechanicznych i magnetycznych. Są to dane z zakresu:

- właściwości fizycznych stali pod względem podatności na badania magnetyczne;
- jakościowej i ilościowej odpowiedzi magnetycznej materiału wejściowego/wyjściowego;
- jakościowej i ilościowej odpowiedzi magnetycznej materiału w fazie obciążeń sprężystych resztkowych, montażowych i zmęzeniowych;
- parametrów przetwarzania przetworników pomiarowych;
- czynników wpływających na utratę czułości i powtarzalności pomiaru;
- czynników wykluczających możliwość detekcji wpływu obciążeń mechanicznych zmęzeniowych (cechy konstrukcyjne).

Wiedza ta jest niezbędna przy projektowaniu systemów pomiarowych. W zakresie diagnostyki ciągłości strukturalnej i materiałowej [4] możliwy jest wybór pomiaru:

- krzywizny pierwotnego magnesowania dla wybranych gatunków stali konstrukcyjnej;
- czułości magnetomechanicznej;
- przenikalności magnetycznej, indukcji remanencji, indukcji nasycenia natężenia i pola koercji;
- użytecznego zakresu częstotliwości magnetycznego pola testującego (F. Förster);
- granicznego zakresu częstotliwości magnetycznego pola testującego (F. Förster);
- stanu naprężeń resztkowych i technologicznych.

2. Podział metod na magnetyczne i magnetoindukcyjne

Wybrana metoda magnetyczna jest wypadkową cechy pola magnetycznego i zakresu parametrów pomiaru. Przedstawione w opracowaniu przykłady dotyczą wybranych wyników badań. Badania prowadzono na powierzchni tocznej zestawu przetwornikiem MR (rys. 1).

Podczas testów wykryto strefy utwardzeń (tzw. martenzyt mechaniczny), pozostałe po przetoczeniu na kolejny wymiar naprawczy.

Streszczenie: Trwałość (i niezawodność) podzespołów jest podstawowym celem zapewnienia ważnego aspektu bezpieczeństwa (*security and safety*). W transporcie szynowym po katastrofie w Eschede stosuje się ulepszone techniki badań w zakresie ultradźwięków i prądów wirowych, tzn. stosuje się głowice wieloczujnikowe, automatyzację badań, złożoną obróbkę cyfrową sygnału i archiwizację wyników badań. W artykule przedstawiono przykłady detekcji powierzchniowej materiału w zakresie metod magnetycznych, magnetoindukcyjnych aż po rezonans magnetyczny. Badania te pozwalają stwierdzić obecność stref o znacznych zmianach magnetycznych materiału, sugerujących zmiany ciągłości struktury, często powiązane z procesem pękania. Przedstawione urządzenia można stosować manualnie lub półautomatycznie. Ze względu na niski koszt przedstawionych rozwiązań i ich nowatorstwo są warte dalszego rozwijania we współpracy z koleją.

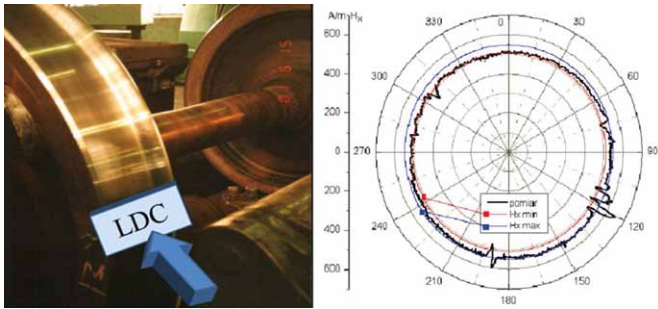
Słowa kluczowe: NDT, SHM, transport kolejowy, bezpieczeństwo

RESONANCE DEFECTOR FOR ELEMENTARY DIAGNOSTICS IN RAILWAY TRANSPORT MAGNETIC AND MAGNETIC-DYNAMIC MEASUREMENTS

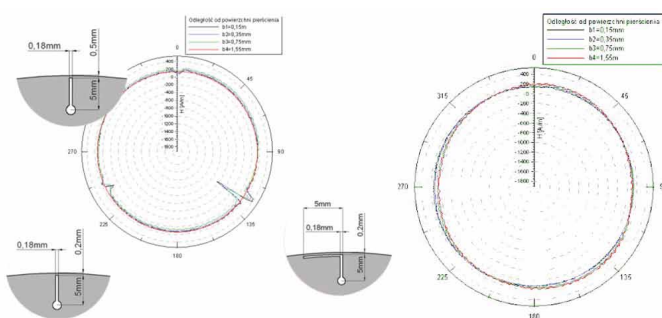
Abstract: *The durability (and reliability) of the components is the main goal of providing an important aspect of safety (safety and security). On railway transport after the Eschede disaster, we use an improved test method in the field of ultrasonic and eddy currents. Multisensor heads, test automation, complex digital signal processing and archiving test results are used. The article presents examples of surface detection of material in the field of magnetic methods, magnetic induction and magnetic resonance.*

Many solutions can improve the safety of the chassis by detecting areas with significant magnetic changes in the material. Differentiation of the signal level indicates a change in the continuity of the structure, which is often associated with a close process of cracking. The presented devices can be used manually or semi-automatically. Because of the low cost of the solutions presented and their innovativeness, it is worth continuing to develop from cooperation with the railway.

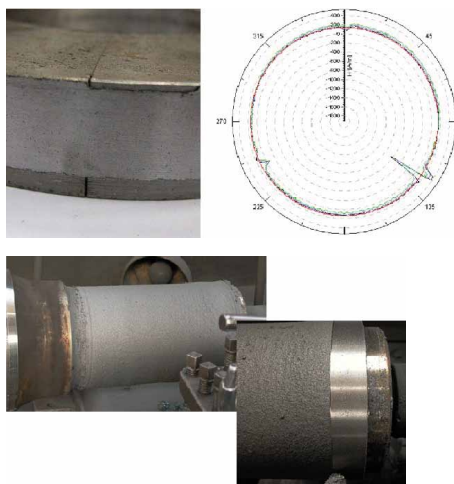
Keywords: NDT, SHM, railway transport, security



Rys. 1. Badanie stanu powierzchni tocznej koła po naprawie i badaniach NDT [12]



Rys. 2. Defekty i wyniki ich detekcji. Od lewej: model i wyniki wykrycia defektów oraz wzorec odniesienia (bez defektów) [12]



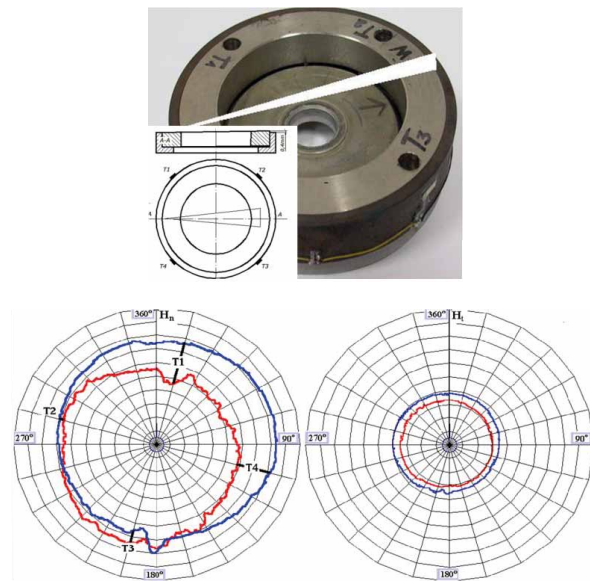
Rys. 3. Realizacja przemysłowa w zakładach naprawczych wykorzystana przy badaniu efektu naprawy czopa wg. stosowanych technologii [12]

W kolejnych, prezentowanych przypadkach, z powodu braku dostępności obiektów rzeczywistych wykonywano modele. Badano wpływ defektów na zewnętrzne pole magnetyczne. Na rysunku 2 przedstawiono defekty i wyniki ich detekcji na tarczy o średnicy 25 cm, jak na rysunku 3.

Na powierzchni regenerowanych czopów wykryto miejscowe strefy braku spójności warstwy napylanej z powierzchnią czopa o powierzchni do kilkunastu milimetrów kwadratowych.



Rys. 4. Stanowisko badawcze i efekty degradacji stanu powierzchni [12]



Rys. 5. Model i wyniki detekcji dla składowych normalnych i stycznych pola magnetycznego [12]

Na kolejnym rysunku 4, przedstawiono badanie, na modelu, wpływu naprężenia kontaktowego w styku powierzchni tocznej z szyną.

Rysunek 5 przedstawia model wykazujący poprawność koncepcji wykrywania naprężenia montażowego metodą magnetyczną. Stosując opisywaną metodę, wykryto błąd wcisku (zamierzony skos wcisku) i dodatkowy błąd w strefie tensometru T1 (dodatkowa nierówność pierścienia wewnętrznego o grubości 0,04 mm na długości kilku mm).

Konstrukcja zastosowanego w pomiarach magnetorezystora umożliwiła wykrywanie jedynie składowej normalnej natężenia pola magnetycznego.

3. Metoda magnetoindukcyjna w rezonansie

Metoda ta polega na badaniu częstotliwości rezonansu przetwornika indukcyjnego, która jest funkcją konstrukcji i geometrii przetwornika indukcyjnego w odniesieniu do badanej powierzchni materiału o określonej wartości przenikalności magnetycznej μ_r , elektrycznej przewodności właściwej γ oraz odległości d od materiału.

Wykonując pomiary profesjonalnym mostkiem RLC [4, 7], można dobierać zakres częstotliwości testujących (dla mostka podstawowego i ferromagnetyków możliwy dostępny zakres to 1000 Hz). Pomiar prowadzony przetwornikiem LDC 1000 [1, 2] ograniczony jest do częstotliwości rezonansu utworzonego przez obwód pomiarowy i testowany materiał [3, 5, 8, 9, 10]. Pole magnetyczne magnesowanego obiektu magnetycznego jest zależne od kształtu obiektu. Kształt elementu zmienia jego namagnesowanie i odmagnesowanie. Dlatego ważna jest proporcja geometrii sondy i wzorca. Współczynnik odmagnesowania wyznaczano teoretycznie lub laboratoryjnie na próbkach testowych, będących seryjnymi, unormowanymi elementami do testowania wiroprądowych urządzeń defektoskopowych.

Testowaniu poddano wzorce stosowane do kalibrowania defektoskopów wiroprądowych. Badane wzorce są wykonane ze stali węglowej, tytanu i aluminium. Na powierzchni każdego wzorca wykonane są trzy nacięcia o stałej szerokości, lecz zmiennej głębokości, tzn.: 0,2 mm, 0,5 mm i 1 mm. Pokazano to na rysunku 6. W tabeli 1 podano dane o wzorcach.

Cewkę wzbudzającą pole magnetyczne wybrano z zestawu cewek dla modułów ewolucyjnych LDC *evaluation module* [1, 2].

Cewka pomiarowa zastosowana w pomiarach jest strukturą czterowarstwową po 48 zwojów w warstwie. Na rysunku 7 zamieszczono schemat układu zwojów jednej warstwy.

Charakterystyka częstotliwościowa cewki, jej wartość szeregową R_s i indukcyjność L pokazane są na wykresie fabrycznym, zamieszczonym na rysunku 8.

Przewidywana częstotliwość graniczna rezonansu równoległego dla materiałów poddanych testowaniu zmienia się w przedziale od 3 do 6 MHz.

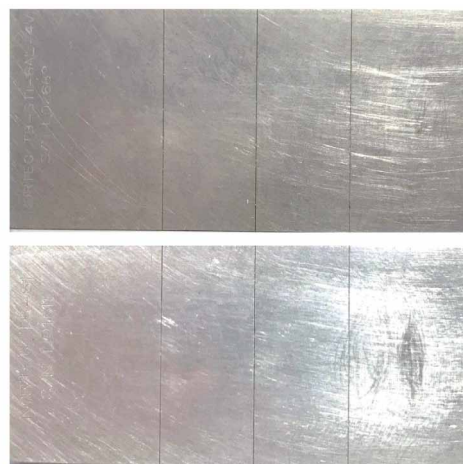
Dla układu LDC 1000 podstawowy obszar zastosowania jest ciągle poszerzany [1, 2]. Był i jest też on tematem prac doktorskich o zastosowaniach przemysłowych, szczególnie w energetyce [13]. Przetwornik LDC 1000 pracuje w obszarze rezonansu prądu: cewka indukcyjna – materiał badany. Analiza wyniku oparta jest o zasady unormowanych składowych impedancji (zasada prof. Förstera).

4. Wykrywanie defektów we wzorcach

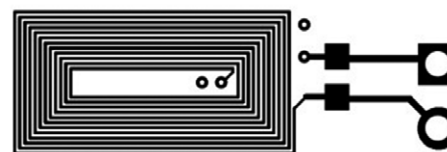
W badaniach użyto wzorców kalibracyjnych wykonanych z aluminium, tytanu i stali. Metale te charakteryzują się różnymi wartościami przenikalności magnetycznej, zbliżonej do powietrza dla aluminium i tytanu oraz znacznie większej dla stali. Ponieważ przewodność tych materiałów jest różna, dlatego odpowiedzi składowych impedancji cewki pomiarowej, jej indukcyjności i rezystancji (szeregowej/równoległej), muszą być różne. Pomiar zmian parametrów cewki pomiarowej ma w tym przypadku jedynie odzwierciedlać zmianę kształtu defektu [11]. Na kolejnych rysunkach (rys. 9, 10 i 11) przedstawiono zarejestrowane zmiany indukcji cewki pomiarowej. Spośród wielu możliwości diagnostycznych układu zaprezentowano jego zastosowanie w wykrywaniu defektów [10]. Przeprowadzono detekcję pęknięć, pomiar przewodności oraz pomiar odległości. Wielkością rejestrowaną była lokalna indukcyjność obwodu przy przejściu sondy nad wadą.

Tabela 1. Parametry magnetyczne i elektryczne materiału

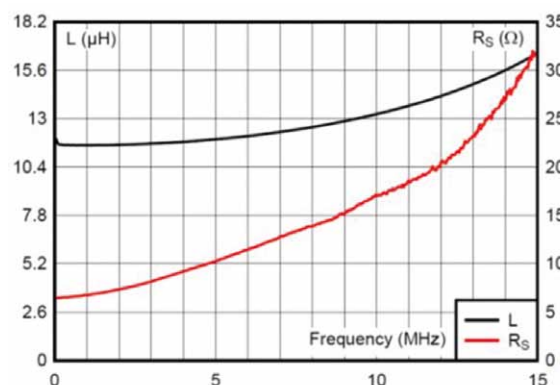
Material próbek	Norma
Low carbon steel	S/N X00030, SRSM - 2503
Titanium	P/N 191961,021
Aluminium	P/N1902510,01



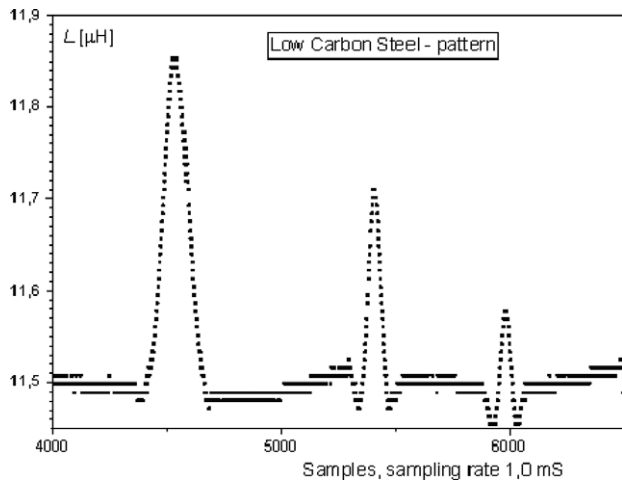
Rys. 6. Zastosowane w teście wzorce kalibracyjne



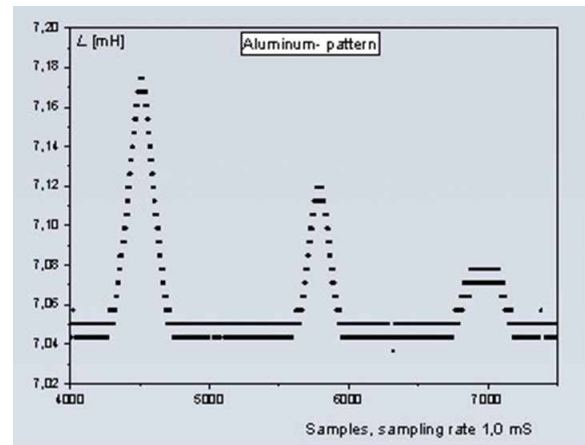
Rys. 7. Schemat uzwojeń płytki wielowarstwowego obwodu drukowanego [2]



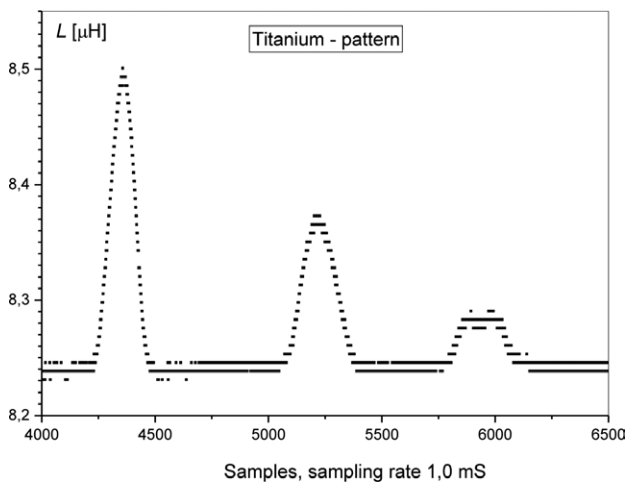
Rys. 8. Charakterystyka częstotliwościowa zastosowanej cewki [1, 2]



Rys. 9. Zestawienie pomiaru trzech wad próbki testowej stalowej [10]



Rys. 11. Zestawienie pomiaru trzech wad próbki testowej aluminiowej [10]



Rys. 10. Zestawienie pomiaru trzech wad próbki testowej tytanowej [10]



Rys. 12. Zestawienie trzech kolejnych pomiarów dla trzech próbek [10]

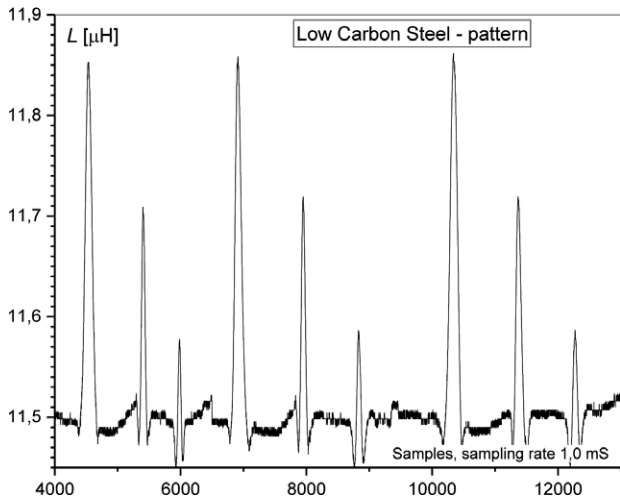
Zgodnie z przewidywanym wpływem parametrów materiału wykazano także zróżnicowane wartości amplitudy sygnału dla tych samych głębokości defektu próbki. Powierzchnia próbki została pokryta folią teflonową dla ograniczenia tarcia. Wyniki pomiaru trzech kolejnych próbek wzorcowych zamieszczono na rysunku 12.

Rzeczywisty rozkład magnesującego pola magnetycznego stałego, jak i przemiennego podczas pomiaru dowolnym typem przetwornika jest uśredniony. Wynik pomiaru jest zależny od czynnej powierzchni przetwornika i jego geometrii, w stosunku do defektu. Wielkość wartości mierzonej jest zależna, co do wartości amplitudy, od kształtu wzajemnych relacji wymiarów, defekt – przetwornik. Najmniejsze błędy można uzyskać, stosując miniaturyzację przetworników GMR, MR lub superminiaturowe sondy indukcyjne Förstera. Użyta do badań cewka ma wymiar 6×11 mm (rys. 7). Wykrywany kształt defektu wzorcowego może powodować niewielki błąd odchylenia [11] dla przetwornika indukcyjnego, jednak jest on nieistotny dla przyjętego celu badań, jakim jest sama detekcja.

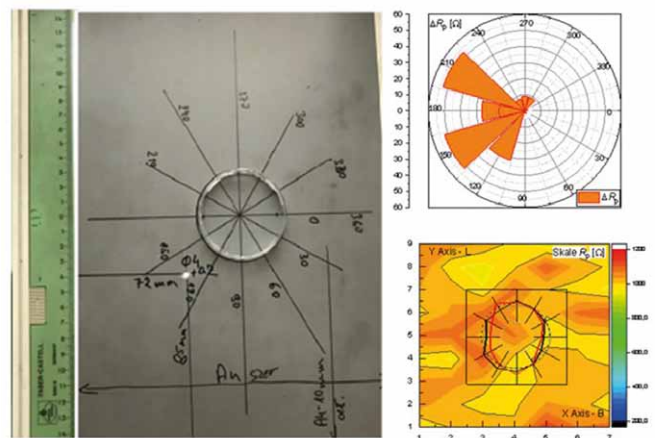
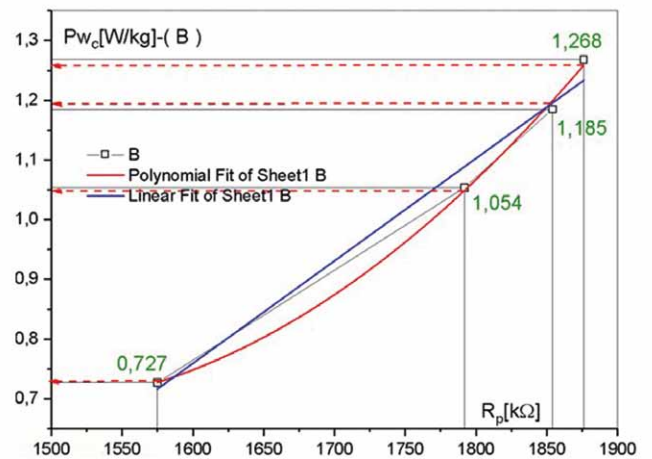
5. Weryfikacja dodatkowych zastosowań przetwornika LDC 1000

Prowadzono porównanie wyników uzyskanych z badań z zastosowaniem standardowych wzorców częstotliwości oraz wspomnianego przetwornika. Dla uzyskania powtarzalności wartości wyznaczanych w różnych chwilach czasowych urządzenie (sondę) włączano na co najmniej 30 min przed badaniem. Po tym czasie powtarzalność czasowa pomiędzy wynikami jest znacząca. Wykazują to wartości uzyskane w serii trzech pomiarów wzorca stalowego wykonanych w odstępach kilkunastu minut. Wynik zamieszczono na rysunku 13.

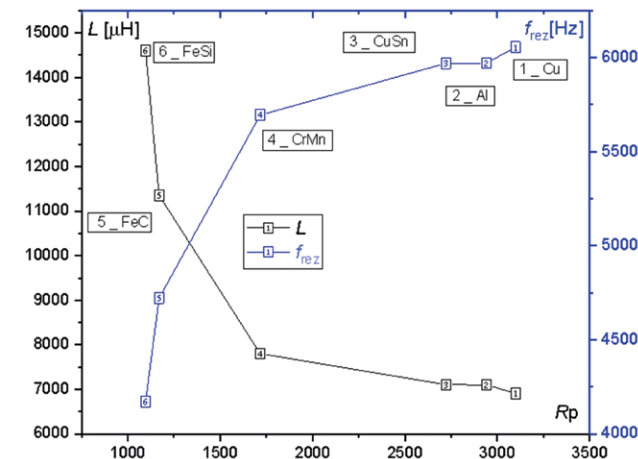
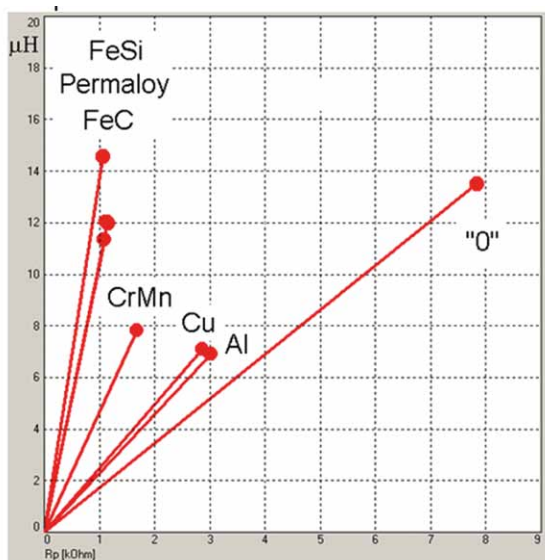
Kolejnym istotnym problemem jest wielkość błędu i możliwość rozróżniania – oprócz przenikalności magnetycznej – także konduktywności i odległości d . Wykazano to podczas pomiarów prowadzonych z wykorzystaniem wzorców. Równoległy pomiar częstotliwości rezonansowej i indukcyjności umożliwia pomiar przenikalności magnetycznej w polach słabych. Aproksymacja liniowa i wielomianowa wykazują na tyle nieznaczny błąd, że możliwe jest zastosowanie prezentowanej



Rys. 13. Porównanie trzech kolejnych pomiarów dla próbki ze stali węglowej [10]



Rys. 15. Wynik selekcjonowania stratności (u góry), jak i wykrywania stref naprężeń resztkowych [3]



Rys. 14. Zmodernizowany ekran pomiarowy sondy LDC [14] i odpowiadające składowe impedancji cewki pomiarowej podczas selekcjonowania różnych stopów [10]

metody w szybkiej ocenie rodzaju i gatunku materiału (rys. 14). Wykazano możliwość rozróżnienia materiałów. Z uzyskiwanych wyników można wyznaczyć parametry przenikalności skutecznej (def. Förster).

Na rysunku 15 zaprezentowano efekty badania blach transformatorowych. Wykazano użyteczność metod rezonansowych w selekcjonowaniu blach transformatorowych i prądnicowych oraz wykrywaniu naprężenia resztkowego.

Rysunek 16 przedstawia wersję sondy przygotowaną do produkcji prototypowej, jak pokazano w czasopiśmie „Napędy i Sterowanie” z grudnia 2016 roku, oraz reklamę firmy, która podjęła się tej produkcji. Należy przy tym zaznaczyć, że firma oprócz podjęcia się produkcji prototypowej przypisała sobie własność badań nad sondą, nie podając w ofercie literatury do obszernych fragmentów zaczerpniętych z artykułu we wspomnianym czasopiśmie.

Podsumowanie

Cel miniaturyzacji defektoskopu został zrealizowany. Przewidywane są zastosowania w edukacji średniej i wyższej na



Rys. 16. Prototyp sondy pomiarowej [10]

wydziałach elektrycznych, mechanicznych i inżynierii materiałowej oraz w szkoleniu diagnostów. Jego dostępność i koszty oraz różnorodność zastosowań została potwierdzona i niejednokrotnie udokumentowana [5–10].

Prezentowane pomiary i rozwiązania finansowano ze środków własnych (prywatnych). Tematyka zastosowań przetwornika LDC 1000 znalazła się w wielu artykułach, referatach, prezentacjach konferencyjnych prezentowanych przez szeroką grupę współautorów – badaczy i naukowców (znanych w świecie NDT.net) [5]. Zainteresowanie tematem rośnie w szybkim tempie [5, 9]. Początki prac nad przemysłowym zastosowaniem przetwornika LDC 1000 zainicjowane zostały wspólnie przez pracowników Politechniki Śląskiej i Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych. Grono zainteresowanych ciągle rośnie. Metoda ta została zastosowana w zakończonym doktoracie [Dariusz Baron, Politechnika Opolska/EthosEnergy] i kolejnym, nowo otwartym na Wydziale Transportu [13] w dziedzinie eksploatacji i utrzymania w zastosowaniach dla energetyki. Prezentowana była także w gronie współautorów na WCNDT 2016 w Monachium [5]. W realizacji testów i zastosowań przemysłowych uczestniczyły grupy: Schneider Electric, TurboCare, a obecnie EthosEnergy i Politechnika Poznańska. Nadszedł czas na kolejnictwo.

Literatura

- [1] http://www.ti.com/tool/ldc1000_evm.
- [2] Cewki TI <http://www.ti.com/general/docs/litabsmultiplefilelist.tsp?literatureNumber=sno136>.
- [3] ŻUREK Z.H., DOBMANN G., IDZIAK P., KOWALSKI K.: *SHM structural health monitoring and NDT for thin steel sheets under LDC testing with pcb flat asymmetric sonde*, SHM NDT 2018, Saarbrücken.
- [4] ŻUREK Z.H., DUKA P.: *RLC circuits for material testing and NDT*, Institute of Electrical Drivers & Machines KOMEL, 01-2015, ISBN 978-83-931090-8-0, BOOKomel. <http://www.komel.katowice.pl/ksiazki.html>.
- [5] PortalNDTnet, SHMldc-e <https://www.ndt.net/search/docs.php3?edit=1&MainSource=-1&AuthorID=7187>.
- [6] https://www.researchgate.net/profile/Zbigniew_Zurek3.
- [7] WARSZA Z.L.: *Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP Warszawa i Polskie Towarzystwo Metrologiczne – Recenzja*. „Przegląd Elektrotechniczny”, 3/2016, <http://pe.org.pl/articles/2016/3/46.pdf>.
- [8] SCHILDER P.: *Eddy current measurements with the LDC1000EVM digital inductance sensor*. Universiteit van Amsterdam, Faculty of Science, van derWaals-Zeeman Institute, Report Bachelor Project Physics and Astronomy 2015. <https://esc.fnwi.uva.nl/thesis/centraal/files/f1250956148.pdf>.
- [9] ŻUREK Z.H., WITOS M.: *Diagnostics of degradative changes in paramagnetic alloys with the use of low frequency impedance spectroscopy*. 7th International Symposium on NDT in Aerospace – We.5.A.7. http://www.ndt.net/article/aero2015/papers/We_5_A_7_Zurek1.pdf.
- [10] ŻUREK Z.H., KUKLA D.: *Przetwornik ldc 1000 m w zastosowaniu do defektoskopii i badań parametrów materiału*, „Napędy i Sterowanie” 12/2017.
- [11] DUKA P., ŻUREK Z.H.: *Badania własne*, Politechnika Śląska.
- [12] ŻUREK Z.H.: *Badania stanu ferromagnetycznych elementów maszyn w polu magnetycznym*, Monografia, ZN. 196 = Nr 1678, Gliwice 2005, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, praca habilitacyjna.
- [13] ŻUREK Z.H., JASIŃSKI T.: *Identyfikacja zakresu rozrzutu fizycznych parametrów eksploatacyjnych łopatek wirnika turbiny stopnia WP ze stali X22CrMoV12-1+QT2*. „Napędy i Sterowanie” 9/2017.
- [14] PERUŃ G.: *Badania własne, Oprogramowanie przetworników pomiarowych*, Politechnika Śląska WT.

✉ Zbigniew Hilary Żurek – Politechnika Śląska WT,
e-mail: zbigniew.zurek@polsl.pl;
Grzegorz Peruń – Politechnika Śląska WT,
e-mail: grzegorz.perun@polsl.pl;
Paweł Idziak – Politechnika Poznańska WE,
e-mail: pawel.idziak@put.poznan.pl;
Krzysztof Kowalski – Politechnika Poznańska WE,
e-mail: krzysztof.kowalski@put.poznan.pl