

# Przetwornik LDC 1000 m w zastosowaniu do defektoskopii i badań parametrów materiału

Zbigniew Hilary Żurek, Dominik Kukla

## 1. Wprowadzenie

Praca jest kontynuacją badań [4, 7] nad zastosowaniem spektroskopii impedancji oraz unormowanych składowych w wykrywaniu zmian ciągłości struktury lub geometrii oraz procesów zmian parametrów materiału w procesie eksploatacji [5, 6]. Za pomocą przetwornika LDC wyznaczamy parametry elektryczne i magnetyczne w rezonansie utworzonym przez parametry cewki obejmującej materiał lub będącej w jego bezpośredniej bliskości [1]. Współczynnik odma-gnesowania w pomiarach indukcyjnych jest zależny od lokalizacji przetwornika testującego kształtu i wielkości elementu. Niezwykle istotna jest przestrzeń pomiędzy cewką a badaną próbką, definiowana wartością współczynnika wypełnienia [11, 12]. Przeprowadzenie badań na próbkach znormalizowanych pozwoli nam wyeliminować dodatkowe badania parametrów materiału.



Napięcie uzwojenia cewki (sondy) przed włożeniem próbki wynosi  $\epsilon_0$ , a po włożeniu próbki  $\epsilon$  zmienia się proporcjonalnie do impedancji  $Z$ . W rozważaniu analitycznym zaproponowanym przez Förstera i zastosowaniach opisanych w pracach [11, 12] wprowadzono pojęcie przenikalności skutecznej –  $\mu_{sk}$  oraz założenie, że część rzeczywista  $R_0$  dla pustej cewki pomiarowej jest pomijana. Pozostaje jedynie składowa urojona  $\omega L_0$  i składowa rzeczywista przyrostowa  $R$ :

**Streszczenie:** Moduł LDC 1000 [1, 2] jest przetwornikiem pomiarowym indukcyjnym produkcji Texas Instruments. W podstawowej wersji został zaprojektowany do pomiaru odległości od powierzchni materiałów przewodzących. Jego konstrukcja i oprogramowanie umożliwiają wiele innowacyjnych zastosowań. Zastosowania można przenieść na diagnostykę maszyn (pomiar skrzywienia wałów napędowych, wykrywanie i pomiar nierównoważenia mas wirujących), a także w obszar badań nieniszczących defektów ciągłości kształtu i struktury. W artykule opisano przykłady zastosowania w defektoskopii pęknięć, w pomiarze parametrów elektrycznych i magnetycznych oraz w pomiarze odległości od powierzchni materiałów przewodzących.

Układ LDC 1000 jest dostępny od kilku lat na rynku. Obszar podstawowy jego zastosowania

jest ciągle poszerzany [4, 5]. Jest też tematem prac doktorskich [7]. Przedstawione na wstępie zasady pomiaru unormowanych składowych impedancji są wstępem do opisu działania przetwornika LDC. Przetwornik LDC 1000 pracuje w obszarze rezonansu prądu: cewka indukcyjna – materiał badany.

Spośród możliwości diagnostycznych układu zaprezentowano jego zastosowanie w wykrywaniu defektów. Przeprowadzono pomiar pęknięć, pomiar przewodności oraz pomiar odległości. Wartościami rejestrowanymi była lokalna indukcja obwodu. Pomiar prowadzono na wzorcach stosowanych w defektoskopii magneto-indukcyjnej. Wykonano badania na powtarzalność czasową pomiaru.

Słowa kluczowe: NDT, NDE, diagnostyka parametrów i struktury materiału

## 🇬🇧 LDC 1000 CONVERTER FOR NDT AND MATERIAL CHARACTERIZATION

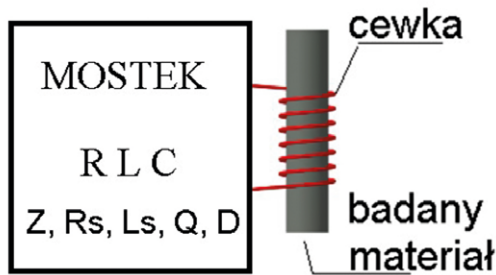
**Abstract:** LDC 1000 module [1, 2] measurement tool is an inductive converter made by TI. It has been designed to measure distance from the surface of conducting materials. Its design and software make it possible to use the device in many innovative applications. The possible applications may be found in machine diagnostics (measurement of shaft torsions, detection and measurement of rotating masses' unbalance) as well as in non-destructive testing (NDT) of continuity, shape and structure flaws. Examples of applying this converter to flaw crack detection, measurement of electrical and magnetic parameters and distance from the surface of conducting materials as a thickness of nonconductive layer, are described in the paper.

LDC 1000 has been available commercially for a few years. Its basic scope of applications expands all the time [4, 5]. It has been the sub-

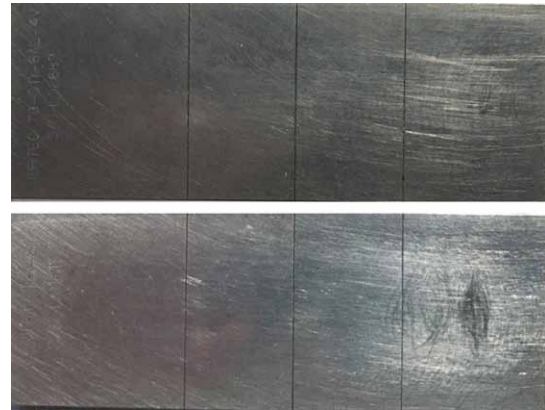
ject matter for some Ph.D. theses [7]. The principles for measuring normalized impedance components explained in the initial part of the paper are necessary for full description of converter's operation. LDC 1000 converter operates in the current resonance region (resonance takes place between inductive coil and tested material). From among many diagnostic possibilities of the converter, we have chosen to present its application in flaw detection. Crack, conductivity and distance measurements have been carried out.

Local circuit inductance has been recorded. Measurements have been conducted with standards flaw detection probe used. We have also investigated the time repeatability of measurements.

Keywords: NDT, NDE, parameters and structure of the material



Rys. 1. Ogólny schemat układu pomiarowego



Rys. 2. Przykłady wzorców kalibracyjnych z tytanu i aluminium

$$\frac{\underline{\varepsilon}}{\underline{\varepsilon}_0} = \frac{\underline{Z}}{\omega L_0} = j(1 - \eta + \eta \mu_r \underline{\mu}_{sk}) \quad (1)$$

z czego wynikają następujące zależności dla unormowanych składowych impedancji [10]:

$$\frac{\operatorname{Re} \underline{\varepsilon}}{\underline{\varepsilon}_0} = \frac{R}{\omega L_0} = \eta \mu_r (-\operatorname{Im} \underline{\mu}_{sk}) \quad (2)$$

$$\frac{\operatorname{Im} \underline{\varepsilon}}{\underline{\varepsilon}_0} = \frac{\omega L}{\omega L_0} = 1 - \eta + \eta \mu_r (\operatorname{Re} \underline{\mu}_{sk}) \quad (3)$$

gdzie:

$\mu_r$  – przenikalność magnetyczna względna;

$\eta$  – współczynnik wypełnienia cewki, definiowany jako stosunek średnic próbki  $D_p$  i cewki  $D_s$ .

$$\eta = (D_p / D_s)^2 \quad (4)$$

Dla przekroju prostokątnego otworu cewki i złożonego kształtu współczynnik wypełnienia zależy od ilorazu powierzchni:

$$\eta' = (s_p / s_s) \quad (5)$$

## 2. Szczegóły eksperymentu

Badania eksperymentalne przeprowadzono przy użyciu certyfikowanych materiałów i próbek do badań wiroprowadowych, dobrano cewkę testującą TI [2] oraz podano zasady pracy modułu LDC1000EVM [1].

### 2.1. Materiał badań

Testowi poddano wzorce stosowane do kalibrowania defektoskopów wiroprowadowych. Badane wzorce są wykonane ze stali węglowej, tytanu i aluminium. Na powierzchni każdego wzorca wykonane są trzy nacięcia o stałej szerokości, lecz zmiennej głębokości 0,2 mm, 0,5 mm i 1 mm, jak pokazano na rysunku 2.

Parametry magnetyczne i elektryczne materiału przedstawia tabela 1.

Tabela 1. Materiał wzorców próbek i i normy

Materiał próbek	Norma
Stal niskowęglowa	S/N X00030, SRSM - 2503
Tytan	P/N 191961,021
Aluminium	P/N1902510,01

Cewkę wzbudzającą pole magnetyczne w materiale wzorców testowych wybrano z zestawu cewek oferowanych przez Texas Instruments do wszystkich modułów ewolucyjnych LDC *evaluation module* LDC EVM [2].

### 2.2. Cewka pomiarowa

Zastosowano moduł LDC 1000 EVM oraz cewkę *E* z zestawu [2]. Cewka jest strukturą czterowarstwową o 48 zwojach. Na rysunku 3 zamieszczono układ zwojów jednej warstwy i fotografię cewki z zestawu.

Charakterystyka częstotliwościowa cewki, jej wartość szeregową  $R_s$  (obejmująca zmiany przewodności drutu cewki oraz zmiany przewodności materiału) i indukcyjność  $L$  pokazane są na wykresie fabrycznym, zamieszczonym na rysunku 4.

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

### 2.3. Moduł pomiarowy LDC 1000 EVM

Zasada pomiaru modułem LDC 1000 jest podobna do pomiaru odległości za pomocą defektoskopu wiropiędowego. Metodę pomiaru za pomocą prądów wirowych przedstawiono na rysunku 5. Prądy wirowe, generowane w materiale o przenikalności  $\mu$  i przewodności  $\gamma$ , wpływają na impedancję cewki, zmieniając wartości jej składowej czynnej i biernej. Indukcyjność szeregową cewki  $L_s$  pozostaje indukcyjnością  $L$ , a rezystancja cewki  $R_s$  jest powiększona o szeregową rezystancję pasożytniczą  $R_{(d)}$ . Szeregową rezystancję  $R_{(d)}$  jest zależna od odległości  $d$ , czyli jest funkcją materiału i odległości  $d$  od jego powierzchni, jak pokazano na rysunku 6.

Dodany, zewnętrzny kondensator  $C$  ogranicza pobór prądu w zakresie częstotliwości poza przedziałem pracy sondy w rezonansie. Główne zmiany parametrów obwodu widoczne są w pomiarach rezystancji  $R_{s(d)}$  i są funkcją prądów wirowych. Układ szeregowy podłączony do oscylatora przedstawiono na rysunku 6.

Na rysunku 7 przedstawiono sposób pomiaru realizowany przez LDC 1000. Rezystancja szeregową jest mierzona przez ekwiwalentną rezystancję równoległą  $R_{p(d)}$  (6):

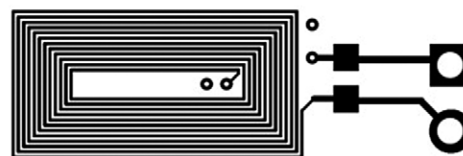
$$R_{p(d)} = \frac{L_s + L_{(d)}}{[R_s + R_{p(d)}] \times C} \quad (6)$$

## 3. Pomiary

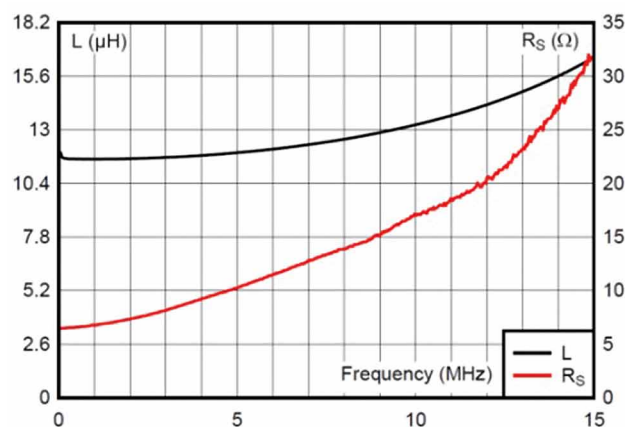
Element badań to głównie wzorce służące do kalibrowania profesjonalnych defektoskopów wiropiędowych, a także testowe wzorce konduktywności.

### 3.1. Pomiar defektów

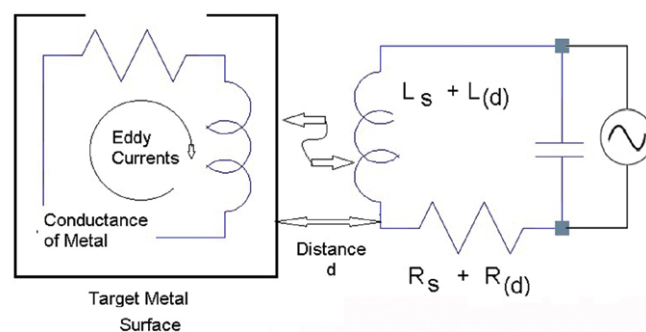
Badane wzorce kalibracyjne wykonane są z aluminium, tytanu i stali. Metale te charakteryzują się różnymi wartościami przenikalności magnetycznej, zbliżonej do powietrza dla aluminium i tytanu oraz znacznie większej dla stali. Przewodność tych materiałów jest różna. Dlatego odpowiedzi składowych cewki pomiarowej, jej indukcyjności i rezystancji równoległej



Rys. 3. Schemat uzwojeń i zdjęcie płytki wielowarstwowej obwodu drukowanego [3]

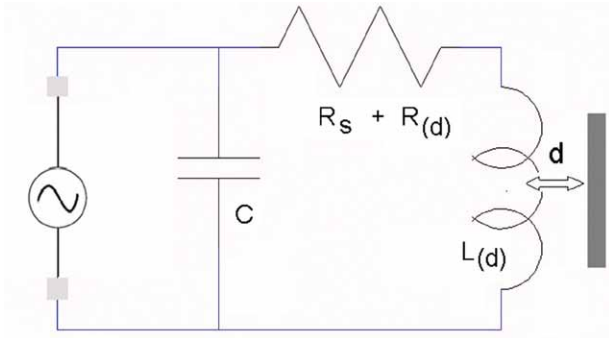


Rys. 4. Charakterystyka częstotliwościowa cewki *E* zestawu i przebiegi zmian indukcyjności oraz rezystancji szeregową [3]

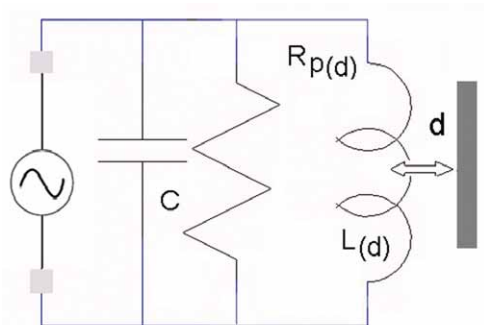


Rys. 5. Schemat sprzężenia indukcyjnego materiału i cewki oddalonej o dystans  $d$

muszą być także różne. Rejestracja zmian parametrów cewki pomiarowej odzwierciedla zmianę kształtu defektu. Na kolejnym rysunku (rys. 8) przedstawiono zarejestrowane zmiany indukcji cewki pomiarowej nad powierzchnią próbki i kolejnymi nacięciami (defektami).

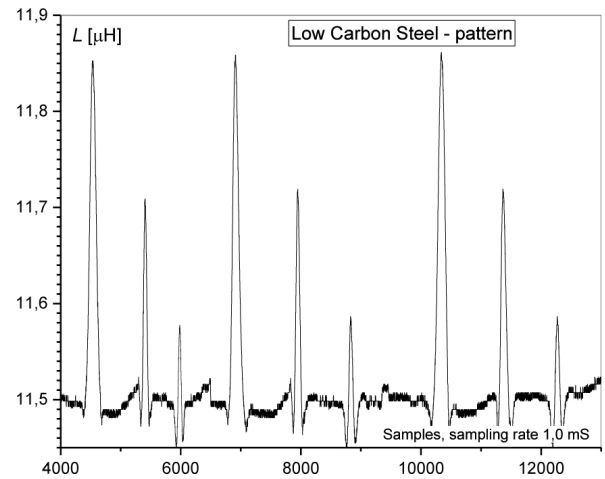


Rys. 6. Układ szeregowy cewki podłączony do oscylatora (fizyczny)

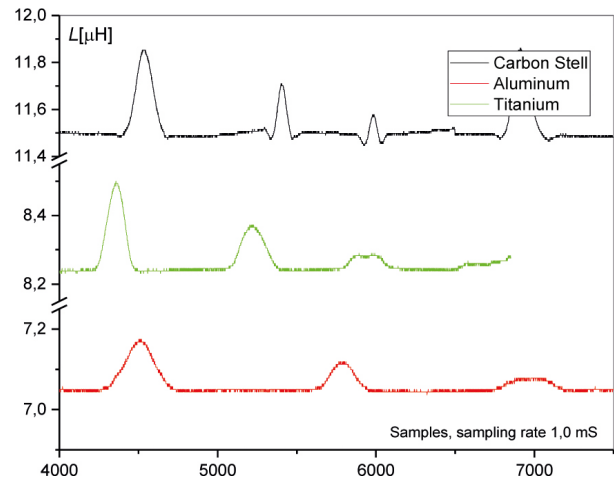


Rys. 7. Ekwiwalent cewki pomiarowej modułu LDC 1000 w obwodzie równoległym

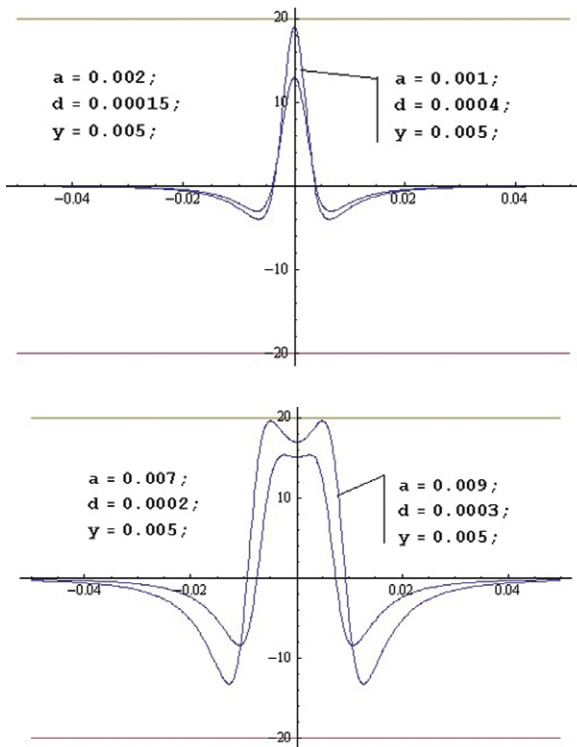
Geometria defektu, jej szerokość i głębokość wpływa na zróżnicowanie amplitudy sygnału sondy LDC. Odległość powierzchni sondy od powierzchni materiału podyktowana była grubością folii teflonowej, ograniczającą tarcie. Wyniki pomiaru trzech kolejnych próbek wzorcowych zamieszczono na rysunku 9.



Rys. 8. Porównanie trzech kolejnych pomiarów dla próbki wykonanej ze stali węglowej



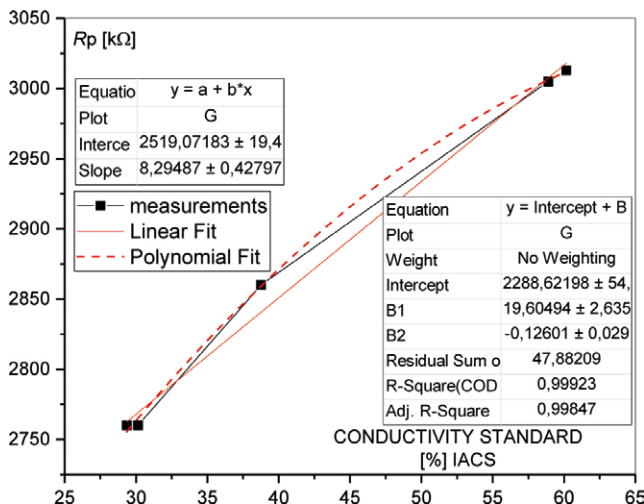
Rys. 9. Zestawienie trzech kolejnych pomiarów dla trzech próbek



Rys. 10. Teoretyczny rozkład pola magnetycznego zależny od głębokości i szerokości defektu



Rys. 11. Zestawy standardów przewodności elektrycznej



Rys. 12. Wykres zmian rezystancji  $R_p$  w funkcji przewodności wzorców z rys. 11

Teoretyczny rozkład magnesującego pola magnetycznego stałego, jak i przemiennego podczas pomiaru dowolnym typem przetwornika jest zawsze uśredniany. Wynik pomiaru jest zależny od czynnej powierzchni przetwornika lub jego geometrii w stosunku do głębokości  $d$  i szerokości, a defektu wyrażonego w metrach (rys. 10).

Wielkość wartości mierzonej jest zależna co do wartości amplitudy od kształtu wzajemnych relacji wymiarów: defekt – przetwornik. Teoretyczny rozkład pola magnetycznego wyznaczony [14] w programie MATHEMATICA przedstawia rys. 10. Teoretyczne przebiegi indukcji są zbliżone dla pola magnetycznego stałego, jak i przemiennego [8, 9, 10, 13].

Wymiar przetwornika wpływa na wynik pomiaru pola magnetycznego nad defektem. Najniższe błędy można uzyskać, stosując miniaturowe przetworniki GMR, MR, lub super miniaturowe sondy indukcyjne Förstera czy sondy półprzewodnikowe. Użyta do badań cewka ma wymiar  $6 \times 11$  mm (rys. 3) i w pomiarze defektu wzorcowego i powoduje błąd co do amplitudy i kształtu, jednak dokładnie wykrywa lokalizację.

### 3.2. Pomiar przewodności elektrycznej

Do pomiaru przewodności elektrycznej sondą LDC 1000 zastosowano profesjonalne standardy konduktywności, pokazane na rysunku 11. Wartość  $R_{p(d)}$  zmienia się łącznie ze zmianą odległości  $d$ , jak przewodność elektryczna.

Wyniki pomiaru zmian składowej  $R_s + R_{p(d)}$  są związane ze zmianą przewodności i dystansu  $d$ . W przeprowadzonej serii dystans ustalono grubością folii teflonowej, którą zabezpieczono powierzchnię cewki. Wyeliminowano w ten sposób wpływ odległości  $d$ . Zmiana  $R_{p(d)} = \text{const.}$  jest zależna od przewodności materiału i przenikalności magnetycznej (F. Förster). Pomierzone wartości rezystancji równoległej w stosunku do zmiany przewodności elektrycznej wzorców wskazują statystycznie istotną korelację, jak pokazano na rysunku 12.

Zależność pomiędzy standardem konduktywności dla kolejnych badanych materiałów (rys. 13) a rezystancją  $R_p$  potwierdza zastosowanie sondy LDC do pomiaru przewodności materiału.

Wpływ dystansu  $d$  na pomiar jest zawarty w pomiarze kolejnego wzorca przedstawionego na rysunku 14. Wzorec ten zawiera grupę sześciu materiałów przeznaczonych do identyfikacji przewodności elektrycznej. Wymiar wzorców i sposób ich montażu uniemożliwił pomiar dla dystansu minimalnego (grubość folii teflonowej). Pomiarzy wykonano w odległości 0,9 mm.

Wyniki pomiaru rezystancji równoległej  $R_{p(d)}$  zamieszczono na wykresie (rys. 17).

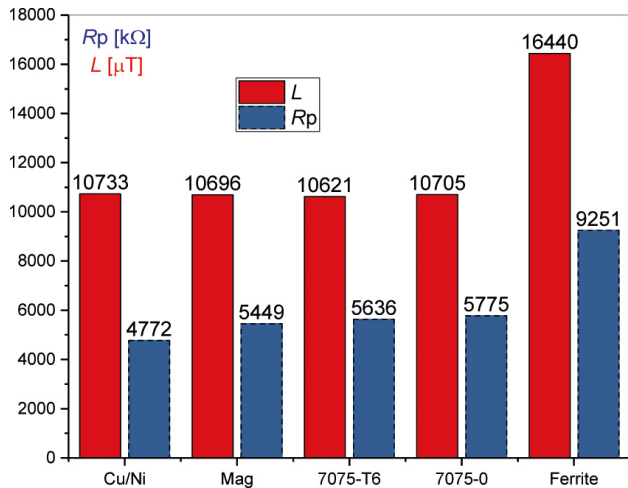
Parametry przewodności ferrytu znacznie odbiegają od pozostałych materiałów. W celu wykazania wpływu odległości  $d$  przeprowadzono pomiar konduktywności na płycie stalowej ze stali węglowej w zmiennej odległości  $d$ .

### 4. Pomiar dystansu

Pomiar dystansu  $d$  jest założonym przez twórców zadaniem pomiarowym dla przetwornika LDC 1000. Uzyskana linowość świadczy o czułości przetwornika. Zmiany rezystancji  $R_p$  w funkcji odległości badano dla płytki stalowej o wymiarach  $50 \times 50$  mm i grubości 7,65 mm.



Rys. 13. Zestaw sześciu wzorców dla testów konduktywności



Rys. 14. Wyniki pomiaru wartości rezystancji  $R_{p(d)}$

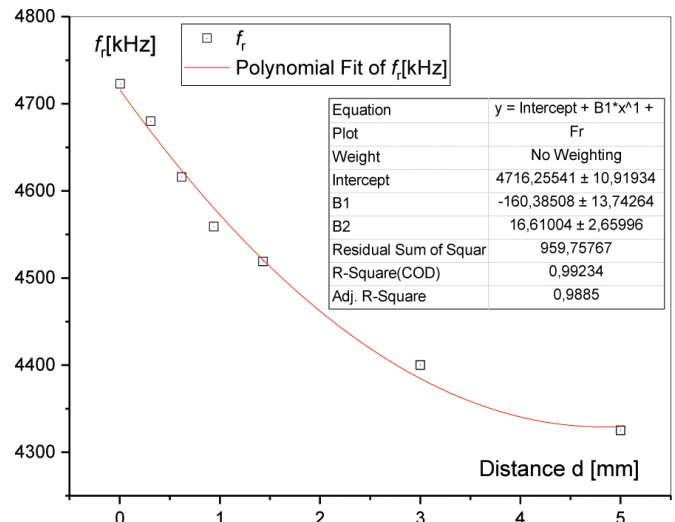
Wyniki pomiaru zamieszczono na rysunku 15. Na rysunku 16 podano odpowiadające kolejnym pomiarom zmiany częstotliwości rezonansowej przetwornika LDC.

Przebieg zmian rezystancji  $R_p$ , uzyskany z pomiarów testowych odległości  $d$  od materiału, jest charakterystyczny dla podstawowej cechy konstrukcji sondy przetwornika [1, 3], jaką jest pomiar odległości.

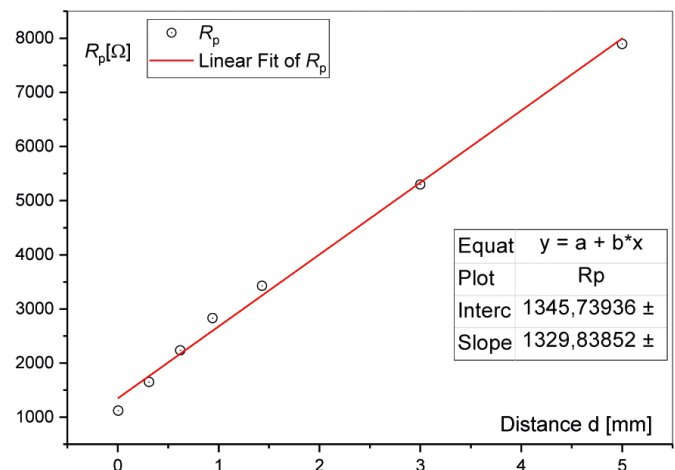
### 5. Pomiar strat blach transformatorowych

Pomiar strat blach transformatorowych w zakładach produkujących urządzenia przetwarzania i przemiany energii elektrycznej jest niezwykle istotny ze względu na unijny wymóg podwyższania sprawności maszyn elektrycznych. Pomiar na aparaturze znanej z historii elektrotechniki czy współczesne rozwiązania przyrządów pomiarowych są pracochłonne i kosztowne. Możliwość przybliżonego pomiaru – jednak bardzo dokładnego – jest znacznym udogodnieniem dla pracowników linii produkcyjnych czy projektowych. Z wykonanych znormalizowanych pomiarów przeprowadzonych w zakładzie producenta transformatorów [17] wykazano, że błąd pomiędzy pomiarem znormalizowanym a pomiarem wykonanym zmodyfikowaną (z produkcji prototypowej) sondą LDC jest zadowalająco dokładny, jak przedstawia rysunek 17.

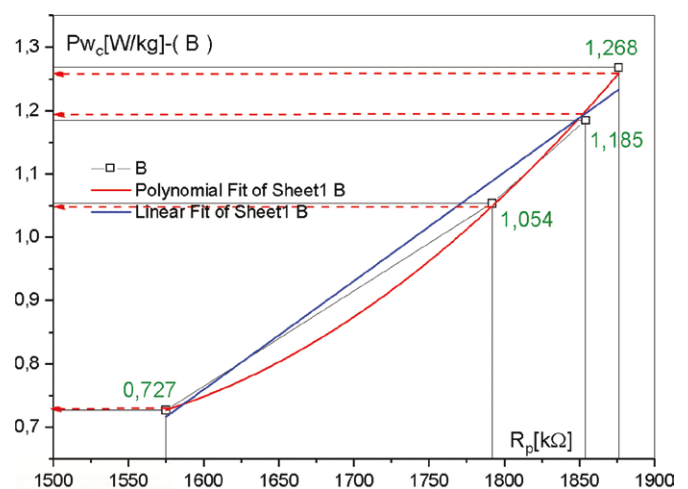
Zakłady produkcyjne otrzymują nowe możliwości szybkiego testowania materiałów [15].



Rys. 15. Zmiany częstotliwości rezonansowej w funkcji  $d$



Rys. 16. Zmiany rezystancji  $R_p$  w funkcji  $d$



Rys. 17. Pomiar trzech blach transformatorowych w przedziale wartości strat od 0,7 do 1,3 W/kg i przeprowadzone aproksymacje liniowe i wielomianowe

### 6. Weryfikacja zastosowań przetwornika LDC 1000

Weryfikacja polegała na porównaniu wyników z zastosowaniem standardowych wzorców częstotliwości oraz sposobu obsługi przetwornika. Dla uzyskania powtarzalności w przebiegu czasu i wartości urządzenie musi pracować jałowo przez okres minimum 30 min. Po tym czasie powtarzalność czasowa pomiędzy wynikami jest znacząca, jak pokazano na serii trzech pomiarów wzorca stalowego (tabela 1) wykonanych w odstępach kilkunastu minut. Wyniki pokazano na rysunku 8. Wielkość błędu i możliwość rozróżniania konduktywności, jak i odległości  $d$ , została wykazana na wzorcach i uwzględniona na rysunku (12, 15, 16). Jednoczesny pomiar częstotliwości rezonansowej i indukcyjności umożliwia wyznaczenie przenikalności magnetycznej materiału w niskich polach magnetycznych. Aproksymacja liniowa i wielomianowa wykazuje błąd umożliwiający zastosowanie w szybkiej ocenie poligonowej parametrów materiału.


### 7. Podsumowanie

Założony cel sformułowany w zadaniu badawczym został zrealizowany, wykazując możliwość zastosowania przetwornika w bardzo szerokim zakresie diagnostyki materiału i defektów. Jego dostępność (NETMED.PL, Katowice), niskie koszty oraz różnorodność zastosowań zostały potwierdzone i udokumentowane wieloma pomiarami zaprezentowanymi na Światowym Kongresie NDT – WCNDT Monachium 2016. Innowacyjność zastosowań przetwornika LDC 1000 omawiano w wielu artykułach <http://www.ndt.net/search/docs.php3?edit=1&MainSource=-1&AuthorID=7187>, referatach oraz prezentacjach konferencyjnych.

### Literatura

- [1] <http://www.ti.com/tool/ldc1000evm>
- [2] <http://www.ti.com/general/docs/litabsmultiplefilelist.tsp?literatureNumber=snou136>
- [3] <https://www.wolfram.com/mathematica>
- [4] <http://www.ndt.net/search/docs.php3?edit=1&MainSource=-1&AuthorID=7187>
- [5] [https://www.researchgate.net/profile/Zbigniew\\_Zurek3](https://www.researchgate.net/profile/Zbigniew_Zurek3)
- [6] <http://pe.org.pl/articles/2016/3/46.pdf>
- [7] SCHILDER P.: *Eddy current measurements with the LDC1000EVM digital inductance sensor*, Universiteit van Amsterdam, Faculty of Science, van der Waals-Zeeman Institute, Report Bachelor Project Physics and Astronomy 2015. <https://esc.fnwi.uva.nl/thesis/centraal/files/f1250956148.pdf>

- [8] HARZALLAH S., CHABAAT M.: *Eddy Current Sensor Modeling For the Nondestructive Evaluation of Stress intensity Factor*, 2014 AASRI Conference on Circuit and Signal Processing (CSP 2014), AASRI Procedia 9(2014)57-632014 AASRI.
- [9] SAKA M., SATO I., ABÉ H.: NDE of a 3-D surface crack using magnetic field induced by DC current flow, Original Research Article, Vol. 31, No. 5, pp. 325–328, 1998.
- [10] MINKOV D., SHOJI T.: *Method for sizing of 3-D surface breaking flaws by leakage flux*, NDT&E International, Vol. 31, No. 5, pp. 317–324, 1998.
- [11] 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/search/docs.php3?edit=1&MainSource=-1&AuthorID=7187> [http://www.ndt.net/article/aero2015/papers/We\\_5\\_A\\_7\\_Zurek1.pdf](http://www.ndt.net/article/aero2015/papers/We_5_A_7_Zurek1.pdf)
- [12] ŻUREK Z.H., DOBMANN G., ROCKSTROH B., KUKLA D.: *Examination of service life of power system components made of p91 steel (x10crmovnb9-1) using impedance spectroscopy and magnetic resonance technique* WCNDT 2016, 2016-07, ISBN 978-3-940283-78-8 <http://www.ndt.net/search/docs.php3?edit=1&MainSource=-1&AuthorID=7187> <http://www.ndt.net/article/wcndt2016/papers/tu2f1.pdf>
- [13] MAZLUMI F., SADEGHI S.H.H., MOINI R.: *Using open-ended rectangular waveguide probe for detection and sizing of fatigue cracks in metals*, Electronics Letters [ieeexplore.ieee.org/iel5/2220/30709/01421182.pdf](http://ieeexplore.ieee.org/iel5/2220/30709/01421182.pdf)
- [14] DUKA P., ŻUREK Z.H.: *Badania własne*, Politechnika Śląska,
- [15] ŻUREK Z.H., JASIŃSKI T., GLINKA T., SOBOTA J.: *Pole magnetyczne wokół transformatorów energetycznych*, „Przegląd Elektrotechniczny” 11/2017.

 Zbigniew Hilary Żurek – Politechnika Śląska,  
e-mail: [zbigniew.zurek@polsl.pl](mailto:zbigniew.zurek@polsl.pl);  
Dominik Kukla – IPPT PAN, e-mail: [dkukla@gov.pl](mailto:dkukla@gov.pl)

artykuł recenzowany

reklama



Preferujesz internet?

Wypromuj się na [www.nis.com.pl](http://www.nis.com.pl)