

## Mostki pomiarowe RLC i moduły serii LDC1000 w diagnostyce stanu stali elektrotechnicznej słabymi polami magnetycznymi

**Streszczenie.** W artykule przybliżono problematykę pomiaru zmiany parametrów fizycznych materiału. Przedstawiono podstawy teoretyczne defektoskopii magneto-indukcyjnej w nowym obszarze badań struktury i degradacji zmęczeniowej elementów ze stali ferromagnetycznych. Przedstawiono wyniki eksploatacyjnych badań zmian parametrów elektrycznych i magnetycznych materiału. Wykazano wysoką rozdzielczość pomiarów w identyfikowaniu stanu elementów stalowych poprzez analizę parametrów elektrycznych i magnetycznych w funkcji częstotliwości. Zaproponowano nisko-kosztowe rozwiązania praktyczne pomiaru mostkami RLC i modulem pomiarowym LDC1000.

**Abstract.** This article presents issues connected with measurements of material physical parameters changes. It presents theoretical foundations of magneto-inductive (eddy-current) detection in a new area of testing the structure and fatigue degradation of ferromagnetic steel elements. The article presents operational test results of material electric and magnetic parameters changes. High measuring resolution in identification of metal elements condition has been shown by analysis of electric and magnetic parameters as a function of frequency. It also presents low-cost practical solutions using LCR measuring bridges and LDC1000 measuring module. (LCR measuring bridges and LDC1000-series modules in diagnostics of electromagnetic steel condition using low magnetic fields).

**Słowa kluczowe:** przetworniki indukcyjne, mostki RLC, pomiary składowych impedancji, spektroskopia impedancji, diagnostyka rezonansowa, badania nieniszczące, NDT.

**Keywords:** inductive converters, LCR bridges, impedance components measurements, impedance spectroscopy, resonance diagnostics, non-destructive testing, NDT.

### Wstęp

Z punktu najnowszej strategii bezpieczeństwa eksploatacji niezbędne są wczesne działania diagnostyczne i zapobiegawcze. Niezbędna jest wiedza o zmianach parametrów fizycznych zachodzących pod wpływem postępu eksploatacyjnych obciążeń zmęczeniowych w materiale elementu [1, 2] - klasycznie definiowanych według krzywej Wöhlera. Jedną z możliwości poznania tych zmian jest prowadzenie pomiarów parametrów magnetycznych i elektrycznych materiału.

Pomimo współistnienia wielu czułych metod do określania procesu degradacji materiału (kamera rentgenowska lub neutronowa), metody magnetyczne są metodami przyszłościowymi.

Katastroficzny charakter zniszczenia zmęczeniowego wynika z kumulacji i rozprzestrzeniania się mikropęknięć rozwijających się do osiągnięcia parametrów krytycznych [1, 5-6] ze względu na wzrost obciążeń dynamicznych konstrukcji. Ma on miejsce (według najnowszych badań) w końcowym okresie czasu życia elementu, który dla większości materiałów nie przekracza 5%. Wykrywanie defektów (dotyczy również zmian ich wymiaru) klasycznymi urządzeniami defektoskopowymi przestało być wystarczające. Także rola klasycznych badań NDT ulega zmianie.

Szybki rozwój diagnostyki rezonansu i spektroskopii impedancji dla ferro i paramagnetyków zmierza w kierunku nowych potrzeb badań. Profesjonalne drogie urządzenia pomiarowe mogą być zastępowane nowymi metodami badawczymi. W artykule opisano potencjał diagnostyczny i badawczy klasycznych mostków RLC i najnowszych modułów pomiarowych serii LDC1000 [8].

### Przesłanki badań zmian parametrów magnetycznych dla oceny stanu materiału

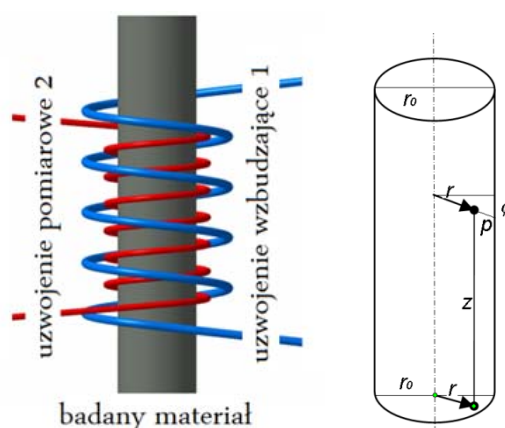
Zmieniające się parametry fizyczne materiału [4, 5] w procesie eksploatacji jak i potrzeba selekcjonowania materiałów do produkcji, wynikająca z istotnych zmian parametrycznych w obrębie tego samego produktu przemawiają za rozwojem szybkich i tanich metod diagnostycznych.

Przemiany fazowe są jednym z najbardziej czytelnych zjawisk zmian parametrów fizycznych materiału. Związki

odkształceń plastycznych ze zmianą struktury materiału, a także skład chemiczny i procesy obróbki mają swoje odniesienie w parametrach fizycznych materiału. Udział degradacji struktury i zmiany związane z defektami liniowymi lub punktowymi mają także miejsce w procesie zmian parametrów materiału. Zmiana parametrów magnetycznych stali pracujących pod wysokim ciśnieniem pary i temperaturą (energetyka) jest wykazywana w stalach używanych w energetyce (13HMF, 15HM oraz 20H12M1F) jako istotny przykład możliwości badań.

### Diagnostyka polem magnetycznym i prądami wirowymi na przykładzie magnesowania walcowej próbki materiału

W próbce (rys. 1) poddanej działaniu zmiennego pola magnetycznego rozkład pola magnetycznego i prądów wirowych zmienia się wraz z głębokością [3-5].



Rys.1. Próbką cylindryczną w podłużnym polu magnetycznym uzwojenia wzбудzającego

Teoretycznym punktem wyjścia do obliczeń rozkładu pola magnetycznego w próbce cylindrycznej są równania Maxwella [3]. Dla praktyków istotne są związki pomiędzy materiałem a parametrami metrologicznymi impedancji cewki pomiarowej (5,6).

Zdefiniowana przez Förstera przenikalność magnetyczna skuteczna związku te ujawnia:

$$(1) \quad \mu_{sk} = \frac{2 J_1(kr_0)}{kr_0 J_0(kr_0)},$$

$$(2) \quad |kr_0| = \left| r_0 \sqrt{2\pi f \gamma \mu_0 \mu_r} \right| = \left| \sqrt{-j} \right| \cdot r_0 \sqrt{2\pi f \gamma \mu_0 \mu_r}$$

$$(3) \quad |kr_0|_f = \frac{|kr_0|_f}{|kr_0|_{fg}} = \frac{r_0 \sqrt{2\pi f \gamma \mu_0 \mu_r}}{r_0 \sqrt{2\pi f_g \gamma \mu_0 \mu_r}} = \sqrt{\frac{f}{f_g}}$$

gdzie:  $J_1$  i  $J_0$  są funkcjami Bessela. Przenikalność magnetyczna skuteczna zależy od średnicy próbki  $D_p=2r_0$ , przewodności elektrycznej właściwej  $\gamma$  i przenikalności magnetycznej względnej  $\mu_r$  materiału próbki, oraz od częstotliwości  $f$  pola wzbudzającego.

Napięcie indukowane w uzwojeniu wzbudzającym zmienia się po włożeniu próbki tak samo jak impedancja uzwojenia wzbudzającego.

Ponieważ  $\underline{\varepsilon}_0 = i\varepsilon_0$  oraz  $\underline{Z}_0 = i\omega L_0$ , więc:

$$(4) \quad \frac{\underline{\varepsilon}}{\varepsilon_0} = \frac{\underline{Z}}{\omega L_0} = i(1 - \eta + \eta \mu_r \mu_{sk}),$$

z czego wynikają następujące zależności dla unormowanych składowych impedancji [3-6]:

$$(5) \quad \frac{\text{Re } \underline{\varepsilon}}{\varepsilon_0} = \frac{R}{\omega L_0} = \eta \mu_r (-\text{Im } \mu_{sk}),$$

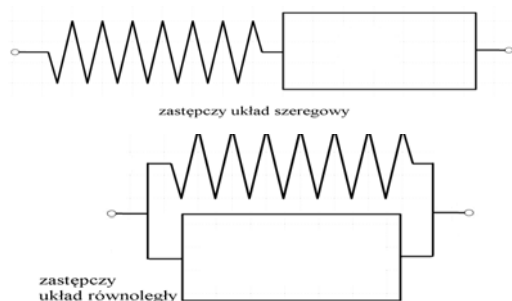
$$(6) \quad \frac{\text{Im } \underline{\varepsilon}}{\varepsilon_0} = \frac{\omega L}{\omega L_0} = 1 - \eta + \eta \mu_r (\text{Re } \mu_{sk}).$$

gdzie:  $R$  – rezystancja cewki pomiarowej z badanym materiałem,  $L$  – indukcyjność cewki pomiarowej z badanym materiałem,  $L_0$  – indukcyjność cewki pustej,  $\eta$  – współczynnik wypełnienia cewki pomiarowej.

W badaniach nieniszczących, aby pominąć kolejne straty sygnału od sprzężenia pracujemy z obwodem, w którym cewka zasilająca jest jednocześnie pomiarową.

### Uproszczona metodyka badań

Mostki pomiarowe RLC są produkowane w wielu grupach i klasach. Z punktu widzenia niniejszego opracowania skupiono się na dwóch grupach mostków RLC. W pierwszej uwzględniono mostki profesjonalne o szerokim zakresie regulacji częstotliwości, napięcia zasilania i prądu pomiarowego z automatyką pomiaru i zapisów [10]. W drugiej grupie znajdują się mostki z jednym poziomem napięcia i prądu testowania oraz z ograniczonym zakresem częstotliwości pomiaru, najczęściej w przedziale 100 Hz, 120 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz. Podstawowe układy pracy pokazano na rysunku 2.

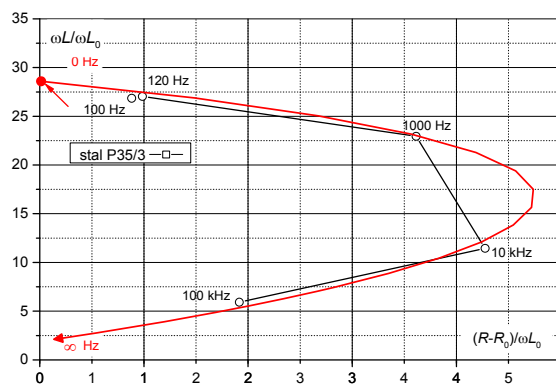


Rys.2. Podstawowe zastępcze szeregowy i równoległy układy pracy mostka RLC

W mostkach RLC o uproszczonej konstrukcji jest ustalona liczba zakresów częstotliwości od czterech do pięciu, jeden zakres prądu oraz jeden zakres napięcia.

Przełączanie zakresów pomiarowych w obwód szeregowy lub równoległy, zmiana parametru mierzonego i zakresu częstotliwości odbywa się ręcznie. W celu wykazania wysokiego stopnia czułości i rozdzielczości pomiarowej podstawowego miernika RLC wykonano pomiary porównawcze dla różnych parametrów cewek. Materiałem testowanym była stal węglowa stosowana w transporcie do budowy zestawów kołowych. Na rysunku 3 przedstawiono wynik pomiaru zmian unormowanych składowych impedancji przeprowadzonego miernikiem RLC mającym jedynie 5 zakresów częstotliwości. Odpowiedni dobór liczby zwojów i rezystancji cewki zbliża pomiar do przebiegu teoretycznego.

Brak pełnego zakresu częstotliwości badań nie stoi na przeszkodzie, aby dokładnie (z błędem miernika deklarowanym przez producenta) zdefiniować parametry materiału w procesie eksploatacji, tzn. jego stan początkowy i końcowy. Na rysunku 3 pokazano wyniki dla zakresów częstotliwości miernika RLC: 100 Hz, 120 Hz, 1 kHz, 10 kHz i 100 kHz. Zbieżność pomiaru mostkiem RLC (5 punktów) z przebiegiem teoretycznym uzyskano dzięki użyciu cewki pomiarowej o niskiej rezystancji uzwojenia.

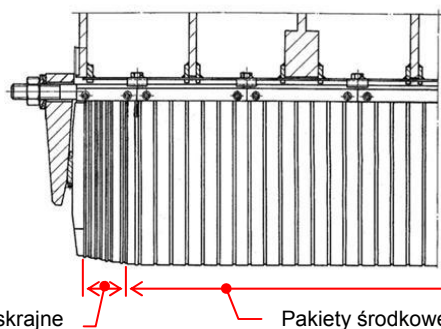


Rys.3. Porównanie przebiegu pomierzonego z teoretycznym

Cechą charakterystyczną przebiegu teoretycznego jest zbliżanie się wyników pomiaru do zera układu współrzędnych wraz z przyrostem częstotliwości pracy od zera do nieskończoności.

### Zastosowanie mostka RLC do oceny stanu blach krzemowych rdzenia stojana generatora

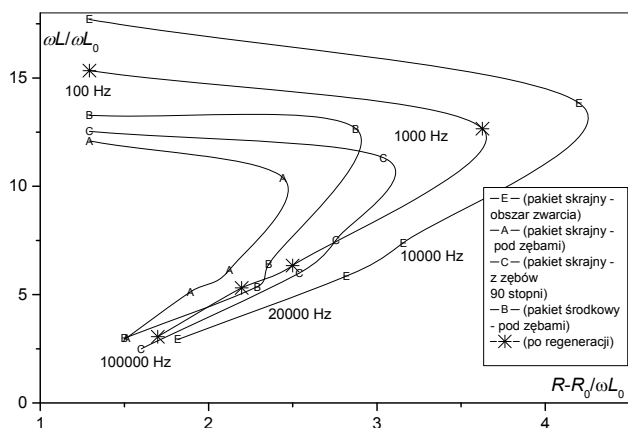
Przydatność prezentowanej metody diagnostycznej potwierdzono w badaniach parametrycznych zmian blach rdzenia stojana generatora [1, 6, 9, 10]. Pakiety skrajne blach rdzenia stojana należą do elementów strefy skrajnej generatora, na które oddziałuje pole magnetyczne rozproszenia wytwarzane przez prądy płynące w połączeniach czołowych uzwojeń stojana i wirnika, wirujące synchronicznie względem stojana. Intensywność dodatkowego nagrzewania się pakietów skrajnych jest zależna od charakteru obciążenia generatora, od którego zależy kształt drogi strumienia rozproszenia. Najbardziej niekorzystne efekty tego zjawiska występują w warunkach pracy generatora z niedowzbudzeniem, przy obciążeniu pojemnościowym i prądzie twornika zbliżonym do znamionowego. W generatorach dużej mocy stosowanych jest wiele metod ograniczających skutki tego zjawiska, jednak pomimo tego przegrzewanie się pakietów skrajnych jest przyczyną licznych awarii i uszkodzeń generatorów. Na rysunku 4 pokazano przykładowy widok pakietów skrajnych rdzenia stojana, z których pobierano próbki. Poniżej zamieszczono schemat lokalizacji pakietów w stojanie [6].



Rys.4. Widok pakietów skrajnych rdzenia stojana generatora i schemat ich lokalizacji

Z przeprowadzonych mostkiem RLC pomiarów parametrów  $Z$ ,  $R$ ,  $L$  cewki pomiarowej (z badanym materiałem i pustej) wyznaczono unormowane składowe impedancji (czynne i urojone) dla częstotliwości 100 Hz, 1000 Hz, 10 000 Hz, 20 000 Hz i 100 000 Hz (rys. 5).

Krzywe unormowanych składowych impedancji wyznaczone w pięciu podzakresach częstotliwości charakteryzują względne zmiany parametrów przenikalności magnetycznej względnej i przewodności elektrycznej właściwej materiału. Istotne zmiany parametryczne po okresie eksploatacji wykazują próbki blachy pakietu skrajnego pobrane z miejsca zwarcia „E” oraz próbki blachy po regeneracji „D”.

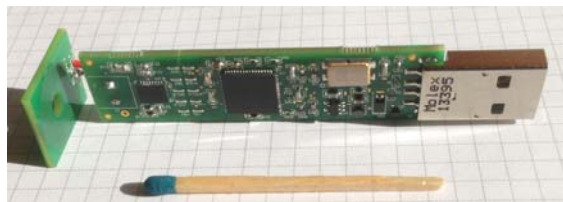


Rys.5. Wykresy unormowanych składowych impedancji blach elektrotechnicznych dla wybranych częstotliwości

Pomiary potwierdziły zajście istotnych zmian parametrów fizycznych w eksploatowanych blachach pakietów skrajnych. Pakiety te pracują w trudniejszych warunkach obciążeń cieplnych w porównaniu do blach pakietów środkowych rdzenia stojana. Podczas badań nie dysponowano blachą w stanie magazynowym.

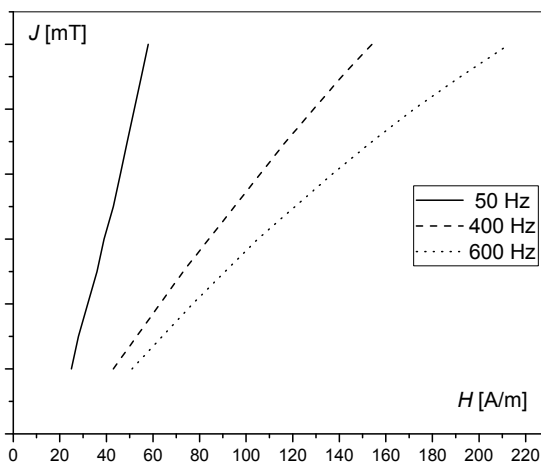
### Sonda pomiarowa na bazie modułu LDC1000

Znaczne przyspieszenie badań umożliwia zastosowanie modułu pomiarowego Texas Instruments pokazanego na rysunku 6. Wymiar tego modułu porównano do gabarytu zapałki.

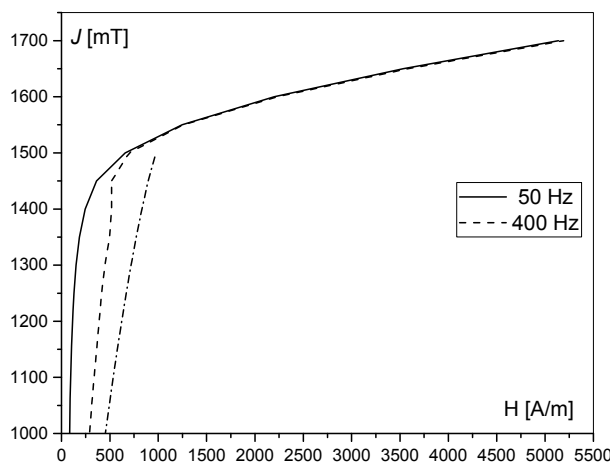


Rys.6. Moduł pomiarowy z modyfikowaną cewką

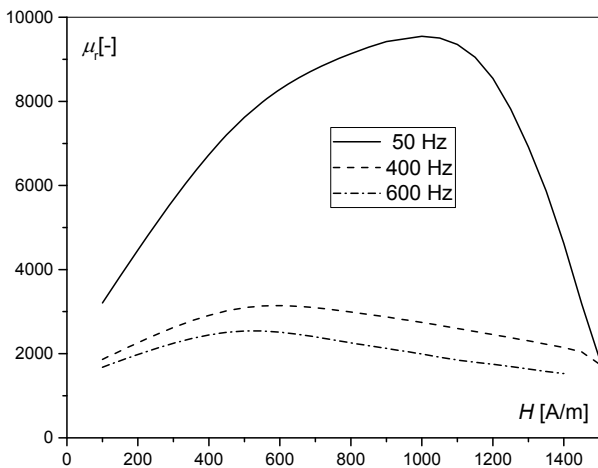
Sondę zastosowano do segregowania blach elektrotechnicznych tego samego typu M450, lecz różnych producentów: A, B, C, D. Wyznaczano indukcyjność  $L[\mu\text{H}]$  cewki pomiarowej w stałej odległości od testowanej powierzchni blachy (grubość przekładki 1,5 mm), częstotliwość rezonansu równoległego układu pomiarowego  $f_{rezll}$  i rezystancję cewki  $R_p$ . Parametry te charakteryzują w dużym stopniu różnicowanie struktury i jej wpływ na parametry elektryczne i magnetyczne. Pomiar prowadzono w polach magnetycznych niskich. Moduł pracuje w niskich wartościach pola magnetycznego. Możliwa jest regulacja napięcia zasilania cewki w trzech zakresach 1V, 2V, 4V.



Rys.7. Krzywe magnesowania blachy prądnicowej w obszarze słabych pól magnetycznych dla 3 zakresów częstotliwości 50Hz, 400Hz, 600Hz



Rys.8. Krzywe magnesowania blachy prądnicowej w obszarze pól magnetycznych nasycenia dla 3 zakresów częstotliwości 50Hz, 400Hz, 600Hz



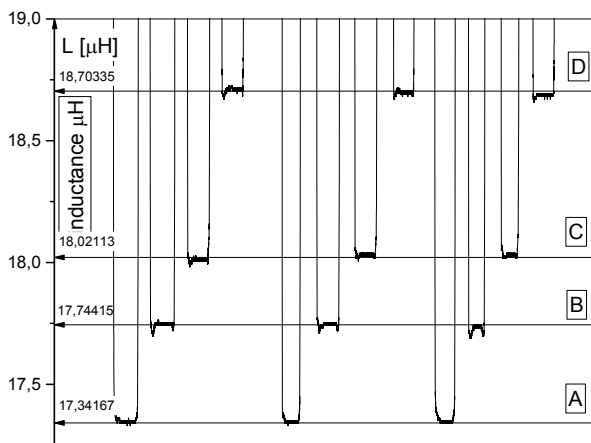
Rys.9. Przybliżone przebiegi przenikalności magnetycznej blachy prądnicowej

Wartość mierzona podawana jest w bezpośredniej wartości indukcyjności. Pozostałe wartości należy przeliczyć zgodnie ze wzorami producenta dla modułu LDC1000.

Na rysunkach zamieszczono przybliżone charakterystyki magnesowania blachy prądnicowej w trzech zakresach częstotliwości i przybliżone przebiegi przenikalności magnetycznej. Wykresy magnesowania podano w zakresach natężenia pola magnetycznego od 20 do 200 A/m (rys. 7) i do 5000 A/m zbliżającego materiał do poziomu nasycenia (rys. 8). Zakres poziom 20 do 50 A/m jest poziomem natężenia pola magnetycznego ziemskiego zależnym od stanu jonosfery i aktywności słońca.

Rysunek przedstawia wpływ wzrostu częstotliwości na spadek wartości przenikalności magnetycznej.

Na rysunku 10 zamieszczono serię trzech pomiarów badanych blach. Wyznaczano indukcyjność zastosowanego układu pomiarowego blacha – cewka.

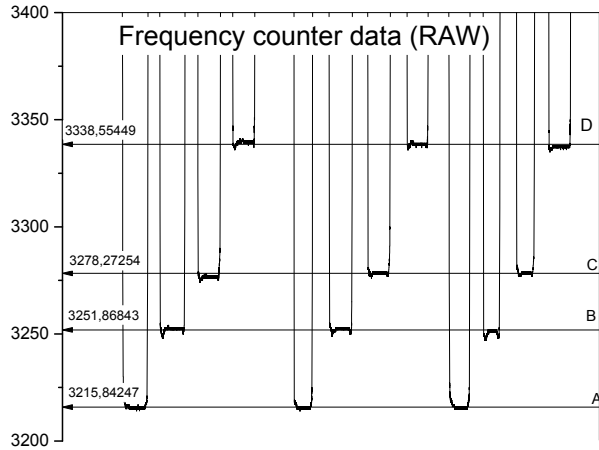


Rys.10. Różnice w indukcyjności cewki pomiarowej dla blach A-D

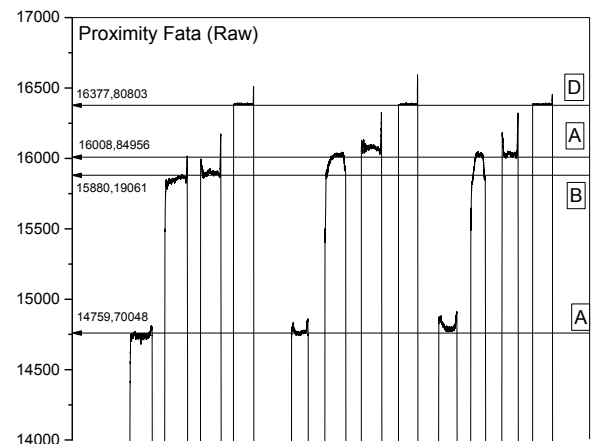
Zmiana indukcyjności świadczy o zmianach przenikalności magnetycznej w parametrach testowanej grupy.

Na rysunkach 11 i 12 przedstawione są dane, z których można wyznaczyć wartość częstotliwości rezonansowej (ze wzoru producenta).

Częstotliwość czujnika: $f_{\text{sensor}} = 1/3 \times (F_{\text{ext}}/F_{\text{count}}) \times \text{Response Time}$
<b>Przykład:</b> Jeśli $F_{\text{ext}} = 6 \text{ MHz}$ , Response time = 6144, $C = 100 \text{ pF}$ i mierzona $F_{\text{count}} = 3000 \text{ (dec)}$ (address 0x23 do 0x25)
$f_{\text{sensor}} = (1/3) \times (6000000/3000) \times (6144) = 4.096 \text{ MHz}$

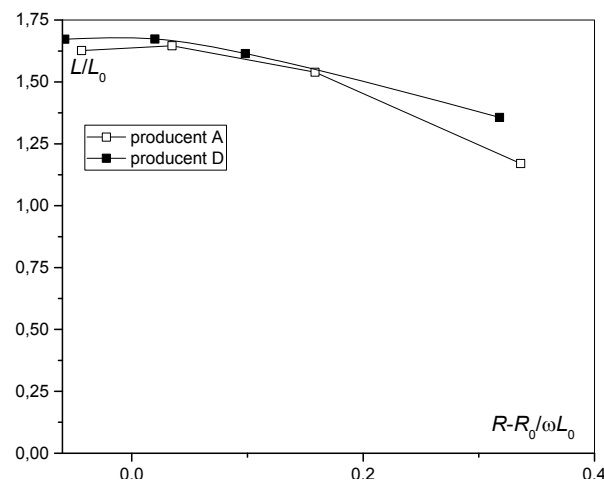


Rys.11. Dane do wyznaczenia częstotliwości rezonansowej



Rys.12. Dane do wyznaczenia  $R_p$  cewki pomiarowej

Impedancja rezonansowa może być obliczona z kodu wyjścia cyfrowego, w następujący sposób:  
 $RP = (RPMAX \times RPPMIN) / (RPPMIN \times (1 - Y) + RPMAX \times Y)$ , w  $\Omega$   
 gdzie:  
 •  $Y = \text{Proximity Data} / 2^{15}$   
 • Proximity data jest sygnałem wyjściowym LDC output, register address 0x21 i 0x22.



Rys.13. Składowe impedancji wyznaczone miernikiem RLC UNIT T dla dwóch skrajnych blach A i D

### Podsumowanie

Wysoka precyzja pomiaru modułem LDC może stanowić wielką konkurencję w badaniach diagnostycznych.

Dwadzieścia cztery bity pomiaru stwarzają możliwości przeprowadzenia pomiaru powtarzalnego i wiarygodnego. Moduł ten może być znacznym wsparciem dla miernictwa jak i diagnostyki NDT.

Metody pośrednich i bezpośrednich pomiarów parametrów magnetycznych i elektrycznych, jak również znajomość relacji pomiędzy zmianami strukturalnymi w materiale a procesem eksploatacji, umożliwiają tworzenie nowej generacji urządzeń badawczych.

Autorzy artykułu obecnie przygotowują stanowisko pomiarowe, które będzie przetwarzało pośrednie dane wyjściowe zbudowanej sondy pomiarowej na odpowiednie wartości końcowe.

#### LITERATURA

- [1] Baron D., Żurek Z.H.: Spektroskopia impedancji – metoda oceny stopnia wyeksploatowania kołpaków wirników generatorów. *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 3/2014, s. 255-259.
- [2] Bozorth R.: Ferromagnetism. The Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Magnetics Society, Sponsor, Inc., New York 1936, An IEEE Press Classic Reissue, Magnetic Society, 1993, 2001.
- [3] Förster F.: Theoretische und experimentelle Ergebnisse des magnetischen Streufluseverfahrens. *Materialprüfung*, 23, 1981, pp. 371-378.
- [4] Heptner H., Stroppe H.: Magnetische und Magnetoinduktive Werkstoffprüfung, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1969 1972.
- [5] Żurek Z.H.: Wprowadzenie do elektromagnetycznej diagnostyki degradacji stali. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012.
- [6] Żurek Z.H. Duka P.: RLC circuits for material testing and NDT. Adres wydawniczy: Katowice 2015, KOMEL, PL ISBN 978-83-931-909-8-
- [7] Żurek Z.H., Baron. D. Niestabilność eksploatacyjna parametrów magnetycznych i elektrycznych blach rdzenia stojana generatora TWW-200-2A. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2014 R. 90 nr 1, s. 221-223
- [8] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmc1000.pdf>
- [9] Keysight Technologies, Impedance Measurement Handbook. A guide to measurement technology and techniques, 4th Edition, Keysight Technologies, 2014, <http://www.keysight.com>
- [10] Agilent Impedance Measurement Handbook. A guide to measurement technology and techniques, 4th Edition, Agilent Technology Inc., 2013, <http://www.agilent.com/find/impedance>

---

**Autorzy:** dr hab. inż. Zbigniew Hilary Żurek, Profesor Politechniki Śląskiej, Politechnika Śląska, Wydział Transportu, e\_mail: [zbigniew.zurek@polsl.pl](mailto:zbigniew.zurek@polsl.pl)  
mgr inż. Dariusz Baron, EthosEnergy Poland S.A., Lubliniec, e\_mail: [dariusz.baron@turbocare.pl](mailto:dariusz.baron@turbocare.pl)