

## KOMPUTEROWE WSPOMAGANIE METODY SPEKTROSKOPII IMPEDANCJI. CZ. 2 - DIAGNOZOWANIE STANU TECHNICZNEGO METALI

### Streszczenie

Prezentowano aspekt metrologiczny niskoczęstotliwościowej spektroskopii impedancji, przykładową aparaturę pomiarową oraz wybrane wyniki badań paramagnetycznych i ferromagnetycznych stopów używanych w transporcie. Główną uwagę zwrócono na identyfikację wiarygodnych symptomów diagnostycznych postępującej degradacji struktury i oceny jakości struktury (elementów nowych i z eksploatacji).

### WSTĘP

Bezpieczna eksploatacja środków transportu wymaga stosowania wiarygodnych metod nieniszczących (ang. *Non-Destructive Testing*, NDT) i monitorowania stanu technicznego (ang. *Structural Health Monitoring*, SHM) krytycznych elementów. Od nowoczesnej diagnostyki wymaga się m.in. możliwości detekcji symptomów postępującego zmęczenia materiału na etapie poprzedzającym otwarte pęknięcie, co jest podstawą wiarygodnego prognozowania i wydłużania horyzontu bezpiecznej eksploatacji nadzorowanego obiektu, bez zbędnego zwiększenia częstości badań kontrolnych.

W artykule przedstawiono zagadnienie pomiaru i analizy niskoczęstotliwościowej impedancji elektromagnetycznej metali (ferromagnetycznych i paramagnetycznych), identyfikowanej w paśmie częstotliwości radiowych do 10 MHz. Celem badań była detekcja symptomów wczesnej fazy degradacji struktury materiału, przed wystąpieniem otwartego pęknięcia. Zagadnienie wykraczające poza zakres klasycznych metod badań nieniszczących i monitorowania stanu technicznego konstrukcji, rozwiązywane również przez nieliniową spektroskopię ultradźwiękową [1,2].

Zastosowana technika pomiaru widma impedancji elektromagnetycznej materiału z użyciem cewki bez rdzenia umożliwia detekcję wad struktury oraz ocenę jakości mikrostruktury materiału na różnej głębokości.

W artykule przedstawiono zagadnienia metrologiczne i analityczne, zobrazowane wynikami badań. Charakterystykę problemu badawczego i podstawy teoretyczne metody opisano w części 1.

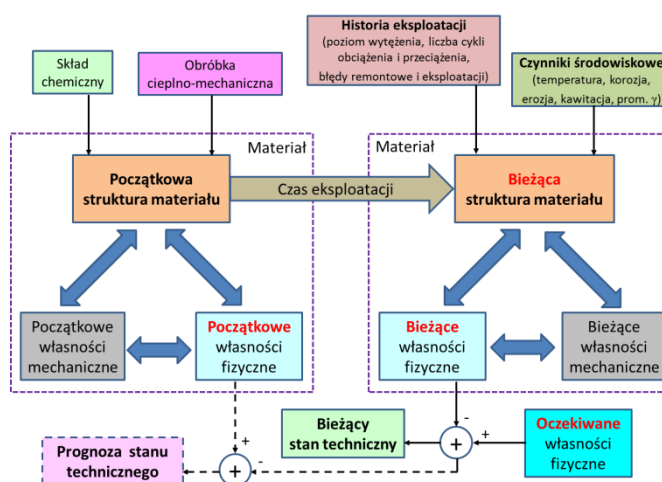
### 1. MOTYWACJA

Dla każdego materiału istnieje ścisła nieliniowa relacja pomiędzy składem chemicznym i mikrostrukturą, a własnościami mechanicznymi i własnościami fizycznymi [3], m.in. elektrycznymi, magnetycznymi, akustycznymi – Rysunek 1. Podczas degradacji materiału ulegają zmianie m.in.:

- **konduktywność** (przewodność elektryczna właściwa)  $\sigma$ ,
- **przenikalność magnetyczna**  $\mu$ ,
- **przenikalność elektryczna**  $\varepsilon$ ,

Ww. parametry mogą być obserwowane i analizowane podczas badań elektromagnetycznych w paśmie częstotliwości do 10 MHz, z wykorzystaniem współczesnych technik pomiarowych, analizy numerycznej i komputerowego wsparcia badań diagnostycznych. Niska częstotliwość sygnału testującego umożliwia używanie taniej aparatury pomiarowej w badaniach polowych (koszt do 200 Euro). Niski koszt aparatury, w tym mikroprocesorowych sond jest prze-

slanką zastosowania opisywanej metody w zintegrowanych systemach NDT i SHM.



Rys. 1. Przesłanki teoretyczne badań elektro-magnetycznych w diagnozowaniu stanu degradacji metali

### 2. IMPEDANCJA ELEKTROMAGNETYCZNA METALU

W niskoczęstotliwościowej spektroskopii impedancji zakłada się, że wszystkie elementy obwodu zastępczego RLC [4], odwzorowującego impedancję elektryczną metalu  $Z_e$ , mogą zmienić swoje wartości pod wpływem nieznannej historii naprężeń  $\sigma_m(t)$  lub odkształceń  $\varepsilon_m(t)$  – parametrów procesu degradacji struktury  $D$ , którego końcową fazą jest otwarte pęknięcie poprzedzające sytuację awaryjną. Przyjęte założenie opisuje relacja (1).

$$L(t) = L(0) + \Delta L(t) \quad (1.1)$$

$$R_L(t) = R_L(0) + \Delta R_L(t) \quad (1.2)$$

$$C(t) = C(0) + \Delta C(t) \quad (1.3)$$

$$R_c(t) = R_c(0) + \Delta R_c(t) \quad (1.4)$$

$$R_p(t) = R_p(0) + \Delta R_p(t) \quad (1.5)$$

gdzie:

$t$  – czasem eksploatacji, który jest również argumentem funkcji postępującej degradacji materiału

$$D = D(D_0, t) \quad (2)$$

gdzie:

$D_0$  – początkowy stan degradacji struktury (jakość produkcji).

Zmiana wartości impedancji elektrycznej  $Z_e$  materiału wywołuje zmianę admitancji  $Y_e$  obwodu zastępczego.

$$Z_e(D, \omega, t) \equiv \frac{U(\omega, t)}{I(\omega, t)} = Z_e(0) + \Delta Z_e(D, \omega, t) \quad (3)$$

$$Y_e(D, \omega, t) \equiv \frac{1}{Z_e(D, \omega, t)} = Y_e(0) + \Delta Y_e(D, \omega, t) \quad (4)$$

gdzie:

$U$  – napięcie przemiennie testujące materiał

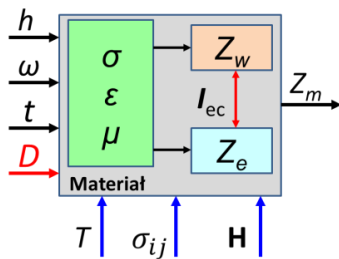
$I$  – prąd elektryczny w materiale.

Zmiany parametrów elektrycznych i magnetycznych materiału modyfikują parametry impedancji falowej materiału  $Z_w$ . W efekcie zmienia się **impedancja elektromagnetyczna** materiału  $Z_m$ . Parametr, którego wartość zależy nie tylko od poziomu degradacji struktury, ale również od:

- lokalnych parametrów elektromagnetycznych materiału: konduktywności  $\sigma$ , przenikalności elektrycznej  $\epsilon$  i przenikalności magnetycznej  $\mu$  (parametrów zdefiniowanych w cz. 1 artykułu, zależnych m.in. od składu chemicznego materiału i typu obróbki cieplno-mechanicznej);
- częstotliwości promieniowania elektromagnetycznego lub prądów przemiennych  $\omega$ , używanych do testowania właściwości materiału;
- głębokości od powierzchni badanego elementu,  $h$ ;
- czasu eksploatacji badanego elementu,  $t$ ;
- rozkładu prądów wirowych,  $I_{ec}$ ;
- temperatury materiału,  $T$ ;
- naprężeń mechanicznych  $\sigma_{ij}$  (własnych I, II i III rodzaju, eksploatacyjnych)
- natężenia i kierunku pola magnetycznego,  $H$ .

Impedancja elektromagnetyczna materiału jest odwzorowana przez model MISO (ang. **M**ulti **I**nput, **S**ingle **O**utput) z wewnętrznymi sprzężeniami zwrotnymi, co zobrazowano poglądowo na rysunku 2 i opisano relacją (5).

$$Z_m = f(Z_e, Z_w) = f(D, \sigma, \epsilon, \mu, \omega, h, H, T, \sigma_{ij}, t) \quad (5)$$



**Rys. 2.** Impedancja elektromagnetyczna metalu jako obiekt typu MISO

### 3. OBSERWATOR STANU

Zmiana wartości impedancji elektromagnetycznej wywołuje zmianę strat odbicia  $R$  i strat absorpcji  $A$  materiału dla promieniowania elektromagnetycznego o danej częstotliwości  $\omega$ , używanego w bezstykowych badaniach spektroskopii impedancji (6). W polu bliskim

$$R_E = f(\sigma/\mu, r^2, \omega^3) \quad (6.1)$$

$$R_M = f((\sigma/\mu)^{0.5}, r, \omega^{0.5}) \quad (6.2)$$

$$A = f(\sigma \cdot \mu, \omega) \quad (6.3)$$

W efekcie zmienia się parametr sprzężenia sondy pomiarowej z badanym materiałem  $K_m$ , którego wartość zależy również od:

- odległości sondy od badanej powierzchni  $r$ ,
- cech geometrycznych sondy  $PS$ ,

$$K_m = K_m(r, PS, \sigma\mu, \sigma/\mu, \omega, t) \quad (7)$$

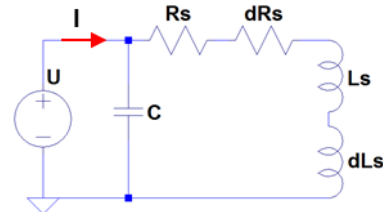
Zmienia się również wartość **impedancji elektrycznej** sondy  $Z_s$  (8). Wielkość mierzona w niskoczęstotliwościowej spektroskopii impedancji z uwzględnieniem typu i właściwości rezonansowych obwodu RLC sondy, m.in. częstotliwości rezonansowej  $SRF_0$  i dobroci  $Q_0$ .

$$Z_s = f(Z_{s,0}, Z_M, K_M, SRF_0, Q_0) = Z_{s,0} + \Delta Z_{s,m} \quad (8)$$

Do bezstykowego monitorowania postępującej degradacji materiału wykorzystuje się obserwator stanu, który zawiera:

- **tor pomiarowy** do wyznaczania charakterystyk impedancji badanego obiektu – rysunek 3 (pomiar napięcia i prądu);
- **algorytmy analizy sygnału pomiarowego**, wspierane wspólną wiedzą z elektrotechniki, spektroskopii, fizyki, inżynierii materiałowej i metod wnioskowania.

Na wyjściu obserwatora stanu otrzymuje się wiarygodną informację ilościową i jakościową o stanie technicznym badanego materiału (obiektu typu „black box”), pod warunkiem zachowania staranności metrologicznej i analitycznej oraz spełnienia kryterium  $SNR > 6$  dB.

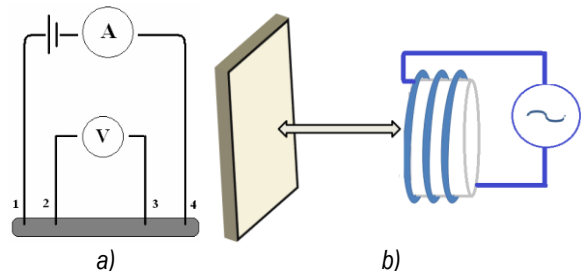


**Rys. 3.** Idea pomiaru impedancji metalu z wykorzystaniem cewki:  $U = u \sin(\omega t)$  – sygnał testujący,  $I = i \sin(\omega t + \varphi)$  – prąd elektryczny;  $C$ ,  $R_s$  i  $L_s$  – pojemność, rezystancja i indukcyjność sondy bez wpływu badanego metalu;  $dR_s$  i  $dL_s$  – wpływ impedancji badanego materiału i sprzężenia cewki z badanym obiektem

### 4. POMIAR IMPEDANCJI

Współczesne przyrządy do pomiaru impedancji, w tym podręczne i laboratoryjne mostki LCR oraz analizatory wektorowe, wykonują automatyczny pomiar i analizę składowych impedancji i admitancji badanego obiektu – w naszym przypadku sondy sprzęgniętej indukcyjnie z badanym materiałem. Użytkownik otrzymuje wynik pomiaru impedancji w żądanej postaci, z automatycznym wyznaczeniem składowych badanego obwodu szeregowego lub równoległego RLC:  $|Z|$ ,  $|Y|$ ,  $R$ ,  $X$ ,  $G$ ,  $B$ ,  $R_s$ ,  $R_p$ ,  $C$ ,  $L$  [5]. Wystarczy badany obiekt podłączyć galwanicznie do przyrządu - metoda 4T, rys. 4.a), lub sprzęgnąć indukcyjnie z cewką pomiarową (metoda pośrednia) – rys. 4.b). Osoba wykonująca pomiar musi jednak zadbać o jakość pomiaru:

- wykonywanie badań wg przyjętej metodyki;
- minimalizowanie pasożytniczych sprzężeń pojemnościowych, powstające pomiędzy sondą pomiarową i aparaturą używaną do pomiaru impedancji [5].



**Rys. 4.** Pomiar impedancji materiału: a) metodą stykową 4T, b) metodą bezstykową, przy pomocy cewki pomiarowej

W przypadku pomiarów impedancji wykonywanych nietypową aparaturą, np. 24-bitową kartą dźwiękową, sondami na bazie przetworników indukcyjności LDC1000 i LDC1101 czy przetworników impedancji na bazie AD5933 lub AD5934, użytkownik musi zapewnić własne procedury obliczania  $|Z|$ ,  $|Y|$ ,  $R$ ,  $X$ ,  $G$ ,  $B$ ,  $R_s$ ,  $R_p$ ,  $C$ ,  $L$  na bazie mierzonych wielkości i znanych relacji z elektrotechniki [5].

### 1.1. Aparatura pomiarowa

Do weryfikacji rozważań teoretycznych z cz. 1 artykułu oraz oceny rzeczywistych możliwości diagnozowania wczesnej fazy degradacji metali podczas eksploatacji środków transportu, wykonano cykl badań metodą niskoczęstotliwościowej spektroskopii impedancji. W badaniach używano:

- laboratoryjny, automatyczny, cyfrowy mostek RLC IM3532-50 firmy Hioki [6],
- podręczny, automatyczny, cyfrowy mostek RLC typ UT 612 firmy Uni-T [7],
- moduł ewaluacyjny LDC1000 firmy Texas Instrument [8],
- moduł ewaluacyjny AD 5933 firmy Analog Device [9].

oraz cewki bez rdzenia, w tym cewki powierzchniowe wykonane w technologii PCB. Odległość cewki od powierzchni badanego elementu zawierała się w przedziale 1 - 10 mm.

#### Hioki IM 3532-50

Mostek LRC Hioki IM 3532-50 – rysunek 5, oferuje:

- szerokie pasmo sygnału testującego: 42 Hz - 5 MHz, w którym dostępnych jest bardzo duża liczba częstotliwości testujących ustawianych programowo;
- bardzo wysoką dokładność pomiarów: 0.08%;
- dużą prędkość pomiaru: od 5 ms;
- transmisję danych na komputer poprzez złącze EXT I/O lub opcjonalnie przez magistralę RS-232 lub GPIB;
- sterowanie z komputera profilem pomiaru widma impedancji, w zadanym paśmie częstotliwości i krokiem dyskretyzacji częstotliwości, co zmniejsza pracochłonność i poziom błędów operatora.



Rys. 5. Mostek laboratoryjny RLC typ IM3532-50 firmy Hioki [6]

#### Mostek UT-612

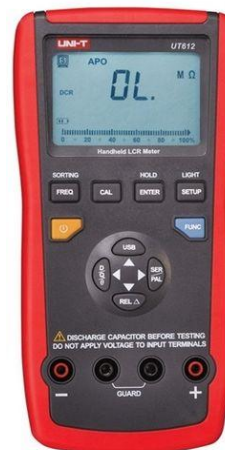
Miernik UT-612 - rysunek 6, jest typowym przedstawicielem tanich, podręcznych mostków RLC, które umożliwiają automatyczny pomiar impedancji i składowych obwodu LRC (szeregowego lub równoległego w zależności od wartości impedancji) dla częstotliwości testujących: 100 Hz, 120 Hz, 1 kHz, 10 kHz i 100 kHz (ręczne przelączenie częstotliwości), z najlepszą uzyskiwaną rozdzielczością 0.5%. Przyrząd umożliwia transmisję danych pomiarowych do komputera poprzez magistralę USB 2.0 (ang. *Universal Serial Bus*), ale jak większość tanich mostków RLC nie udostępnia funkcji sterowania profilem badań z komputera. Powyższe ograniczenie wydłuża czas badań i zwiększa ryzyko wystąpienia błędów pomiarowych generowanych przez operatora.

#### Przetwornik LDC1000

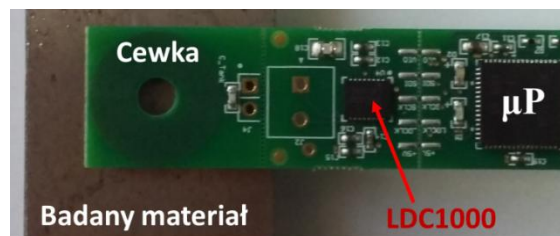
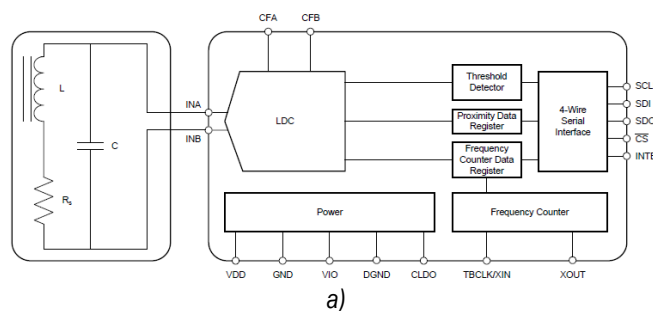
LDC1000 – rysunek 7.a), jest pierwszym na świecie (wg firmy TI) zintegrowanym przetwornikiem indukcyjności, który oferuje [8]:

- metodę rezonansową pomiaru impedancji  $R_p$  obwodu równoległego RLC;
- niskie koszty toru pomiarowego;
- małe zużycie prądu;
- niewielkie rozmiary (obudowa SON-16);
- amplitudę sygnału testującego: 1, 2, 4 V;
- 24-bitową rozdzielczość pomiaru indukcyjności;
- 16-bitową rozdzielczość pomiaru impedancji w zakresie od 0,798 k $\Omega$  do 3,926 M $\Omega$  (rzeczywista rozdzielczość pomiaru  $R_p$  wynika z ustawienia zakresu pomiarowego:  $R_{p,min}$ ,  $R_{p,max}$ );
- 222 częstotliwości sygnału testującego wybieranych programowo w paśmie 5 kHz – 5 MHz (jednocześnie używana jest tylko jedna częstotliwość);
- transmisję wyników i danych konfiguracyjnych poprzez interfejs SPI (ang. *Serial Peripheral Interface*).

Dostępny jest moduł ewaluacyjny – rysunek 7.b), który zawiera: obwód LC, przetwornik LDC1000 i lokalny procesor obsługujący transmisję danych z przetwornika do komputera po magistrali USB 2.0 oraz wspiera programową konfigurację przetwornika przez użytkownika.



Rys. 6. Podręczny mostek RLC typ UT-612 firmy Uni-T [7]



Rys. 7. Zobrazowano: a) schemat blokowy LDC1000 [8]; b) widok modułu ewaluacyjnego

Związek pomiędzy zmierzonymi wielkościami a identyfikowanymi parametrami obwodu LRC opisują relacje

$$SRF = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L+\Delta L(K_m, Z_m, \omega)) \cdot C}} \quad (9.1)$$

$$L + \Delta L(K_m, Z_m, \omega) = \frac{1}{(2\pi \cdot SRF)^2 \cdot C} \quad (9.2)$$

$$R_p = \frac{L_s + \Delta L_s(K_m, Z_m, \omega)}{(R_s + \Delta R_s(K_m, Z_m, \omega)) \cdot C} \quad (9.3)$$

gdzie:

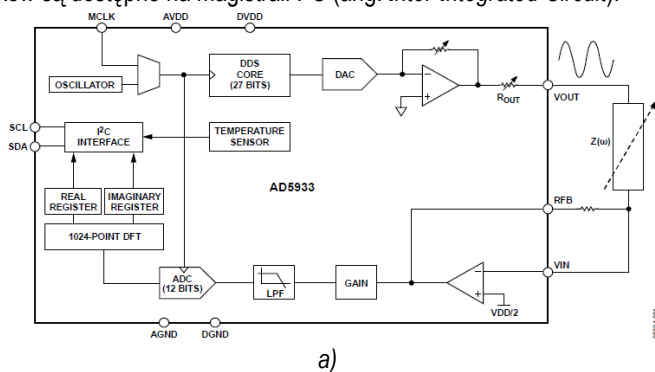
- C – znana pojemność w obwodzie RLC sondy;
- $L_s$  – znana indukcyjność cewki bez wpływu badanego materiału;
- $\Delta L_s$  – obserwowana zmiana indukcyjności cewki wywołana przez sprzężenie cewki z badanym materiałem;
- $R_p$  – impedancja obwodu równoległego RLC (sondy z lub bez sprzężenia z badanym materiałem wyznaczona dla częstotliwości rezonansowej z kryterium minimalnej wartości prądu elektrycznego w obwodzie RLC;
- $R_s$  – rezystancja szeregowo obwodu RLC sondy;
- $\Delta R_s$  – zmiana rezystancji sondy pod wpływem badanego materiału;
- SRF – częstotliwość rezonansowa obwodu równoległego RLC sondy.

### Przetwornik AD5933 i AD5934

Układy AD5933 i AD5934, których schemat blokowy i przykładowy moduł ewaluacyjny przedstawiono na rysunku 8, są zintegrowanymi (w obudowie SSOP) platformami realizującymi automatyczny pomiar impedancji z dużą precyzją w paśmie do 100 kHz. Układy zawierają [9]:

- 12-bitowy programowalny generator z 27-bit rozdzielczością ustawianej częstotliwości (<0.1 Hz) i maksymalną częstotliwością 100 kHz;
- przetworniki DAC i ADC;
- procesor sygnałowy z transformatą FFT i procedurą kalibracji toru pomiarowego.

Przy jednopunktowej kalibracji układy zapewniają 0.5% dokładność pomiaru impedancji. Zwiększenie dokładności do ok. 0.1% uzyskuje się poprzez kalibrację dwupunktową. Dalsza poprawa dokładności jest realizowana numerycznie na etapie wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych impedancji. Wyniki pomiaru z obu przetworników są dostępne na magistrali I<sup>2</sup>C (ang. *Inter-Integrated Circuit*).



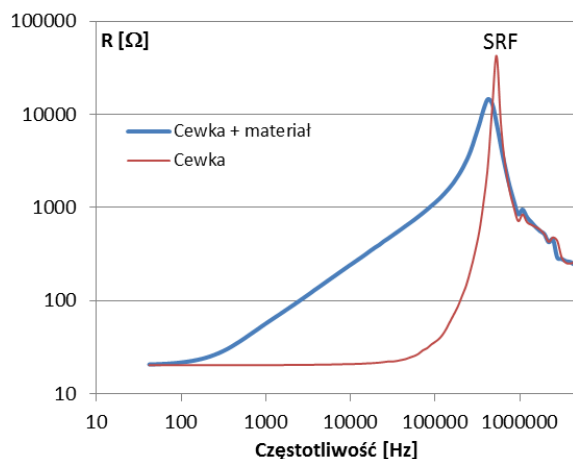
Rys. 8. Zobrazowano: a) schemat blokowy AD5933 [15]; b) widok modułu ewaluacyjnego z optoizolacją i programowalną zmianą zakresu pomiarowego (cewka pomiarowa podłączana poprzez złącze).

Różnica pomiędzy AD5933 i AD5934 dotyczy częstotliwości próbkowania (odpowiednio 1 MSPS i 250 kSPS). Układ AD5934 ma wbudowany wewnętrzny termometr oraz umożliwia pomiar temperatury z zewnętrznego termometru (funkcja wykorzystywana w elektrochemicznej spektroskopii impedancji, EIS) [10,11].

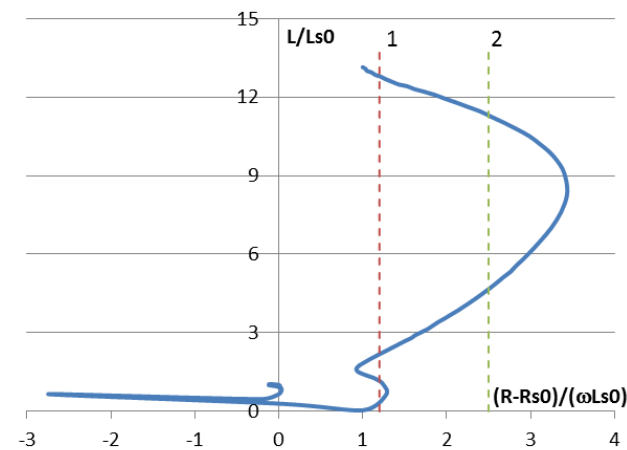
### 5. ANALIZA DANYCH POMIAROWYCH

Sprzężania cewki z badanym materiałem można analizować ilościowo i jakościowo w postaci:

- charakterystyki częstotliwościowej impedancji (części rzeczywistej, części urojonej, modułu, kąta);
  - charakterystyki impedancji na unormowanej płaszczyźnie impedancji;
  - charakterystyki współczynnika odbicia;
- co zobrazowano przykładami na rysunkach 9 – 11.

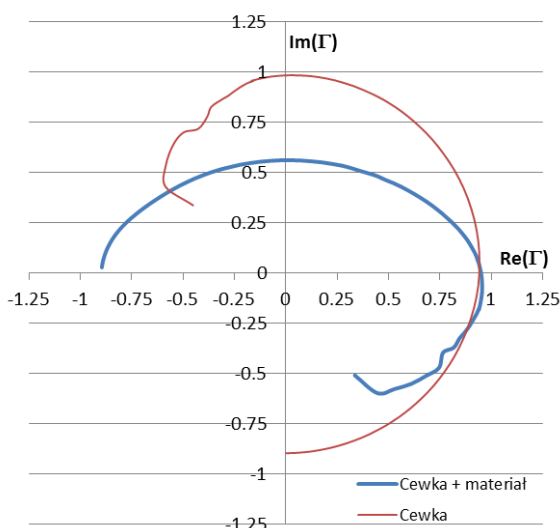


Rys. 9. Charakterystyka częstotliwościowa składowej rzeczywistej impedancji sondy (obwodu szeregowego RLC) bez i z wpływem badanego materiału (staliwa). Dane zarejestrowano przy pomocy mostka LRC Hioki IM 3532-50



Rys. 10. Wpływ sprzężenia cewki z badanym materiałem (staliwem), dane wejściowe z rys.9) zobrazowany na płaszczyźnie unormowanej impedancji - liniami przerywanymi 1 i 2 zobrazowano przykładową wieloznaczność odwzorowania  $L/L_0$  dla danego argumentu  $(R - R_0)/(\omega L_0)$

W badaniach nieniszczących metodą wiroprądową i elektrochemicznej spektroskopii impedancji stosowane jest zobrazowanie wyników pomiarów na unormowanej płaszczyźnie impedancji [12,13], co odwzorowuje relacja (10)



Rys.11. Wpływ materiału na charakterystykę odbicia (dane z pomiaru zobrazowanego na rys. 9)

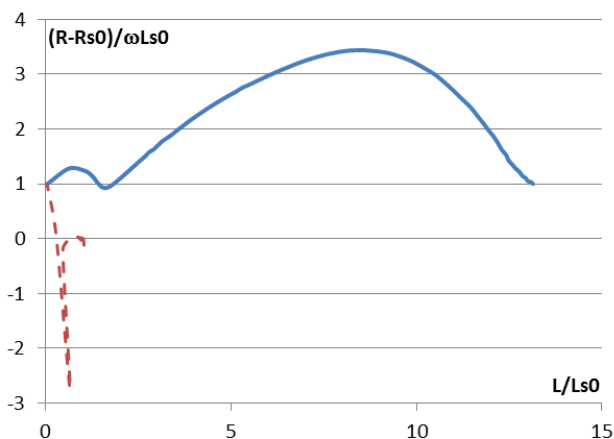
$$Z_n = \{(R - R_0)/(\omega L_0); L/L_0\} \quad (10)$$

w której  $L_0$  i  $R_0$  są reaktancją i rezystancją odniesienia (częścią urojoną i rzeczywistą liczby zespolonej odwzorowującej zmierzoną impedancję sondy  $Z_s$ ). Dla cewki i metalu reaktancja ma cechy indukcyjności, stąd w oznaczeniu osi jest  $L/L_0$  a nie  $X/X_0$ .

Analiza przykładowych danych z rysunek 10. uświadamia, że odwzorowania wyników pomiaru impedancji cewki sprzężanej indukcyjnie z metalem na unormowanej płaszczyźnie impedancji nie jest funkcją. Dla jednej wartości argumentu  $(R - R_0)/(\omega L_0)$  dostępne są dwie lub więcej wartości  $L/L_0$ . Sytuacja taka utrudnia weryfikację wyników badań. Dlatego w niskoczęstotliwościowej spektroskopii impedancji Autorzy stosują odwrotny układ osi współrzędnych - rysunek 12, który potwierdza mechanizm sprzężenia indukcyjnego cewki z badanym metalem oraz gwarantuje:

- jednoznaczne odwzorowanie identyfikowanej funkcji (11) w paśmie częstotliwości od DC do częstotliwości rezonansowej obwodu RLC
- możliwość aproksymowania charakterystyki impedancji  $Z_s(\omega)$ .

$$(R - R_0)/\omega L_0 = f(L/L_0) \quad (11)$$



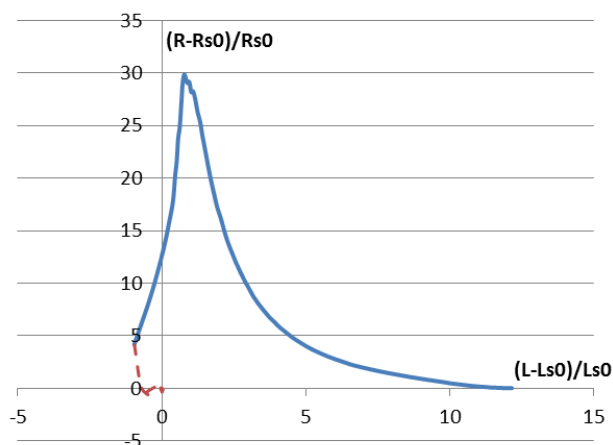
b)

Rys. 12. Wpływ sprzężenia cewki z badanym materiałem (staliewem, dane z pomiaru zobrazowanego na rys.9) zobrazowany na płaszczyźnie unormowanej impedancji po zamianie osi współrzędnych (linią przerywaną zobrazowano charakterystykę impedancji powyżej częstotliwości rezonansowej obwodu RLC)

Znając oczekiwany stopień wielomianu opisującego identyfikowaną charakterystykę impedancji możliwe jest:

- weryfikowanie jakości danych pomiarowych;
- automatyczne, programowe korygowanie błędów pomiarowych;
- ograniczenie liczby częstotliwości testujących używanych do identyfikacji charakterystyki impedancji badanego metalu;
- zoptymalizowanie toru pomiarowego dla danego zadania badawczego (NDT i/lub SHM).

Do oceny ilościowej i jakościowej zmian degradacyjnych materiału wyznaczana jest również względna zmiana impedancji materiału  $\Delta Z_m(t)/Z_m(0)$  oraz jej składowych  $\Delta R_m(t)/R_m(0)$  i  $\Delta X_m(t)/X_m(0)$ , zobrazowana przykładem na rysunku 13. Danymi wejściowymi są względne zmiany składowych impedancji sondy wywołane sprzężaniem z badanym materiałem. Analizowane są również zmiany parametrów modelu Druda  $\Delta\omega_p(t)/\omega_p(0)$  i  $\Delta\tau(t)/\tau(0)$ .



Rys. 13. Względne zmiany parametrów obwodu RLC podczas sprzężenia cewki z badanym materiałem (dane z pomiaru zobrazowanego na rys.9)

Na podstawie powyższych przykładów widzimy, że sprzężenie badanego metalu z cewką pomiarową daje bardzo wyraźne zmiany wartości składowych obwodu RLC i mierzonej impedancji sondy  $Z_s$ . Pod względem metrologicznym i analitycznym jest to zadanie łatwe, które może być realizowane wszystkimi ww. przyrządami pomiarowymi i modułami ewaluacyjnymi.

Trudniejszym zadaniem badawczym jest detekcja wczesnej fazy degradacji struktury badanego materiału – głównego celu badań opisanego w artykule. W tym przypadku oczekuje się tylko niewielkich zmian impedancji względem impedancji wyjściowej badanego materiału, a nie powietrza. Dlatego pomiar i analiza danych pomiarowych wymaga:

- znajomości rzeczywistych możliwości toru pomiarowego, (bardzo istotne dla modułów ewaluacyjnych i amatorskiego toru pomiarowego);
- stosowania algorytmów odmiennych od używanych w badaniach NDT i EIS, które m.in. będą uwzględniały charakterystykę rezonansową sondy oraz nieliniowe wzmocnienie symptomów diagnostycznych w paśmie rezonansowym sondy.

Wskazane jest również numeryczne modelowanie rozwiązywanego zadania badawczego na etapie pozyskiwania symptomów diagnostycznych, z uwzględnieniem wiedzy z inżynierii materiałowej dotyczącej fizyki ciągłego zmęczenia materiału.

## 6. WYNIKI BADAŃ

Badania wykonano na:

- a) Elementach wykonanych z materiałów ferromagnetycznych (stali i staliw) używanych m.in. w kolejnictwie, których przenikalność magnetyczna zmienia się nieliniowo w zależności od zewnętrznego pola magnetycznego, naprężeń i temperatury, pochodnych ww. parametrów oraz lokalnych maksimum ww. parametrów odwzorowanych przez maksimum natężenia ekwiwalentnego pola magnetycznego  $H_{eq\_max}$

$$\mu = \mu \left( \mathbf{H}, \sigma_{ij}, T, \frac{d\mathbf{H}}{dt}, \frac{d\sigma_{ij}}{dt}, \frac{dT}{dt}, \mathbf{H}_{eq\_max}, \right) \quad (12)$$

Efektom ubocznym nieliniowości przenikalności magnetycznej jest pamięć magnetyczna metalu – zmiana namagnesowania ferromagnetyka obserwowana po całkowitym odciążeniu badanego elementu, odwzorowująca wypadkowy wpływ nieznannej historii eksploatacji [14,15].

- b) Elementach wykonanych ze stopów paramagnetycznych na bazie aluminium. Materiałach, których względna przenikalność magnetyczna  $\mu_r \approx 1.02$  jest praktycznie niezmienna podczas zmian zewnętrznego pola magnetycznego  $\mathbf{H}$ . Niewielkie zmiany przenikalności magnetycznej wykazują bardzo słabą nieliniowość nawet w silnych polach magnetycznych.

Badanie materiałów paramagnetycznych jest zadaniem łatwiejszym w badaniach elektromagnetycznych.

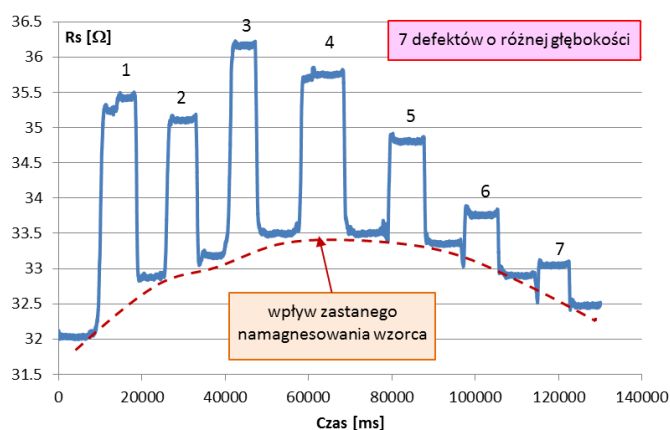
## 6.1. Badanie wzorca defektów

Badania wykonano z odległości 4 mm modułem ewaluacyjnym LDC1000 na płaskim wzorcu defektów stosowanym w defektoskopii magnetycznej, wykonanym z ferromagnetycznej stali niskowęglowej. Wzorec posiadał 7 sztucznych wad struktury w postaci cienkich nacięć o grubości 0,2 mm i różnej głębokości. Materiał wzorca był przemagnesowany wzdłużnie (efekt wcześniejszego używania defektoskopu magnetycznego). Wyniki badań zobrazowano na rysunkach 14 - 16.

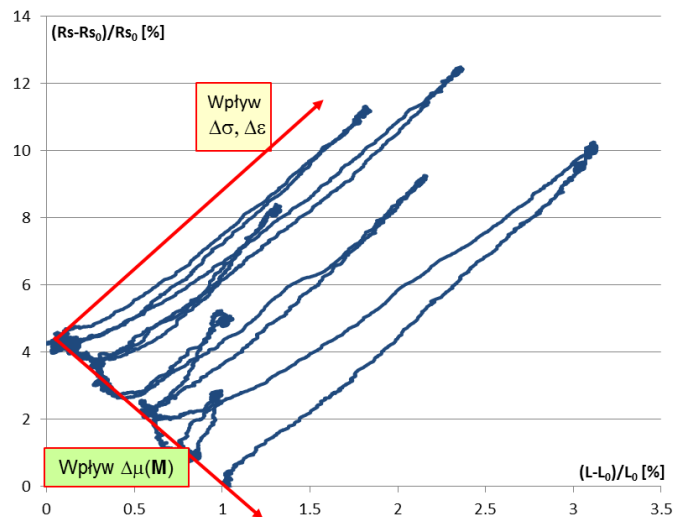
Na podstawie przeprowadzonych pomiarów quasi-statycznych i dynamicznych oraz analiz stwierdzono:

- 100% efektywność detekcji sztucznych wad przez przetwornik LDC1000 z cewką powierzchniową;
- ortogonalność składowej konduktywności i przenikalności magnetycznej w zobrazowaniu na płaszczyźnie zmian względnych obwodu RLC (rysunek 15) oraz możliwość analizy ilościowej lokalnej konduktywności i przenikalności magnetycznej materiału.

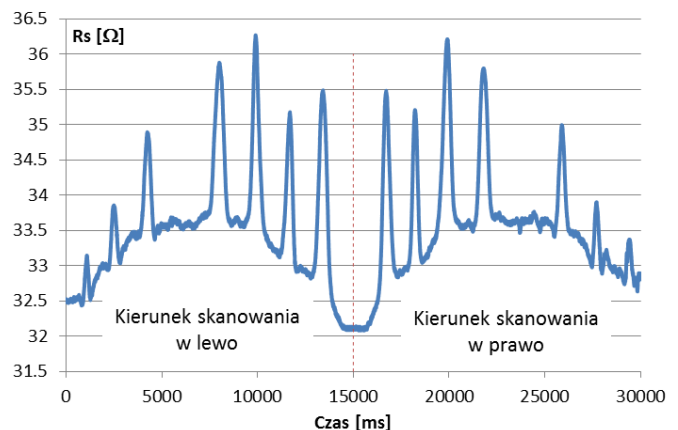
Uwzględniając częstotliwość próbkowania sygnału impedancji w przetworniku LDC1000 stwierdzono również, że moduł ewaluacyjny może być stosowany w badaniach nieniszczących i systemach monitorowania stanu technicznego konstrukcji, np. kół wagonów czy szyn kolejowych.



**Rys. 14.** Pomiary quasi-statyczne wzorca defektów (ruch cewki był zatrzymywany nad wadą i w połowie odległości między wadami, częstotliwość próbkowania 1 kHz, odległość cewki 4 mm)



**Rys. 15.** Zobrazowanie wyników pomiaru impedancji sondy podczas diagnozowania wzorca defektów (na płaszczyźnie zmian względnych)



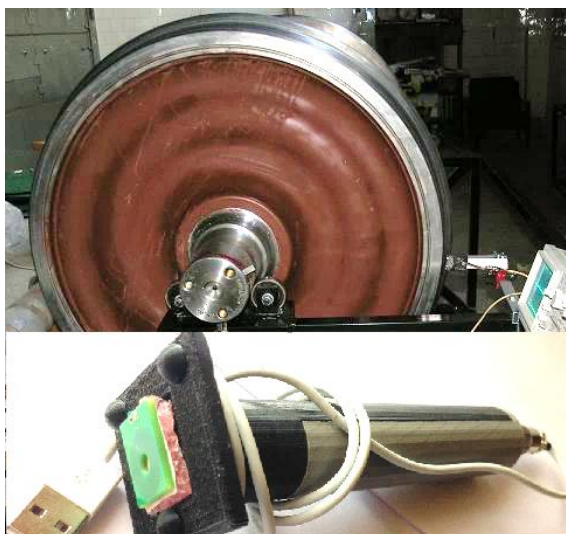
**Rys. 16.** Diagnozowanie wzorca defektów przetwornikiem LDC1000 z prędkością skanowania 0.02 m/s – uzyskano 100% efektywność detekcji sztucznych wad i ich rozmiarów oraz bardzo dużą powtarzalność pomiarów realizowanych w dwóch przeciwnych kierunkach skanowania wzorca

## 6.2. Badanie koła kolejowego

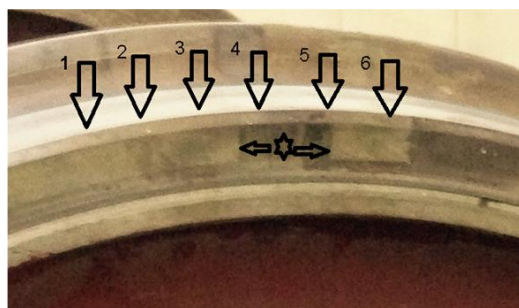
Elementem krytycznym w transporcie kolejowym są koła kolejowych zestawów kołowych [16]. Uwzględniając typowe uszkodzenia koła i obręczy wykonano badania, których celem była ocena możliwości detekcji stref termomechanicznej degradacji struktury (odpuszczenia, zahartowania) i naprężeń własnych przetwornikiem LDC1000. Na rysunku 17. zobrazowano stanowisko badawcze oraz położenie punktów pomiarowych na kole. Wybrane wyniki badań przedstawiono w tabeli 1.

Uzyskane wyniki badań potwierdziły możliwość stosowania niskoczęstotliwościowej spektroskopii impedancji oraz przetwornika LDC1000 i cewek PCB do diagnostyki kół kolejowych i szyn. Uwzględniając dostępną częstotliwość próbkowania sygnału analogowego oraz aperturę używanej cewki pomiarowej możliwe jest uzyskanie rozdzielczości przestrzennej detekcji wady rzędu 1 mm przy prędkości postępowej 40 km/h (prędkości stosowanej podczas badania szyn przy pomocy wagonu diagnostycznego). Większą prędkość skanowania przy zachowaniu wymaganej rozdzielczości detekcji wady będzie można uzyskać po zmianie rozmiarów cewki i zastosowaniu cewek asymetrycznych. Monitorowanie stanu technicznego kół może być realizowane przy maksymalnej prędkości

obrotowej, przy czym algorytm analizy danych musi uwzględniać wpływ efektu powielenia widmowego (ang. *aliasing*) [17].



a)



b)

Rys. 17. Zobrazowano [18]: a) stanowisko badawcze i sondę używaną do weryfikacji możliwości diagnostycznych przetwornika LDC1000; b) rozmieszczenie punktów pomiarowych na kole

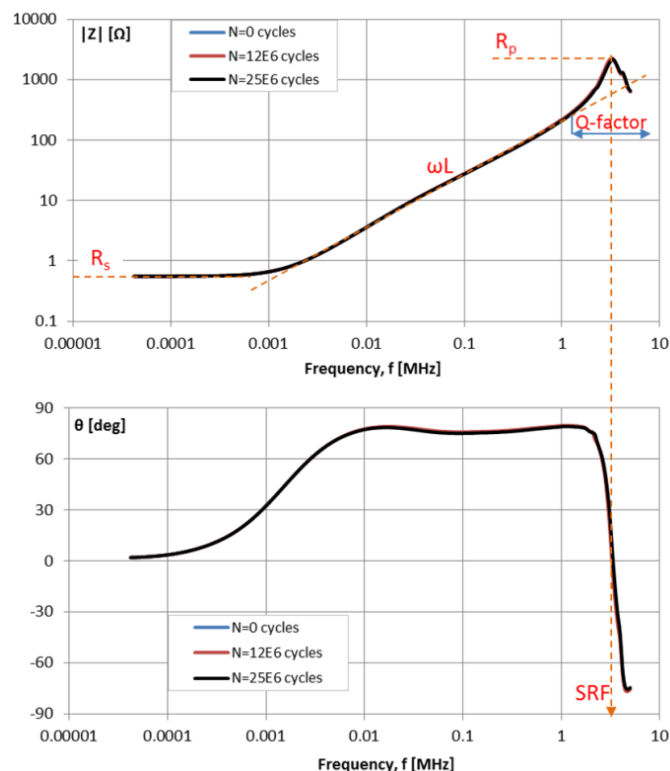
Tabela 1 Wyniki pomiarów i analizy defektów koła kolejowego przy pomocy przetwornika LDC1000 i cewki powierzchniowej (częstotliwość sygnału testującego 7,5 kHz) [18].

Pomiar				
Punkt	Stan	L ( $\mu\text{H}$ )	$R_p$ ( $\text{k}\Omega$ )	SRF (MHz)
1	Ok	<b>12.94</b>	<b>0.964</b>	<b>4.42438</b>
2	$\sigma_I$	12.96	0.969	4.42097
3	TMF	13.08	<b>0.985</b>	4.40064
4	TMF	13.20	<b>0.957</b>	4.38059
5	TMF	<b>13.37</b>	0.961	<b>4.35266</b>
6	$\sigma_I$	13.02	0.984	4.41077
Max-Min		<b>0.43</b>	<b>0.028</b>	<b>0.07172</b>
Analiza				
Punkt	Stan	$\frac{L - L_{ref}}{L_{ref}}$	$\frac{R_p - R_{p,ref}}{R_{p,ref}}$	$\frac{SRF - SRF_{ref}}{SRF_{ref}}$
		[%]	[%]	[%]
1	Ok	Poziom odniesienia		
2	$\sigma_I$	0.155	0.519	-0.077
3	TMF	1.082	<b>2.178</b>	-0.537
4	TMF	2.009	<b>-0.726</b>	-0.990
5	TMF	<b>3.323</b>	-0.311	<b>-1.621</b>
6	$\sigma_I$	0.618	2.075	-0.308
Max-Min		<b>3.168</b>	<b>2.905</b>	<b>1.544</b>

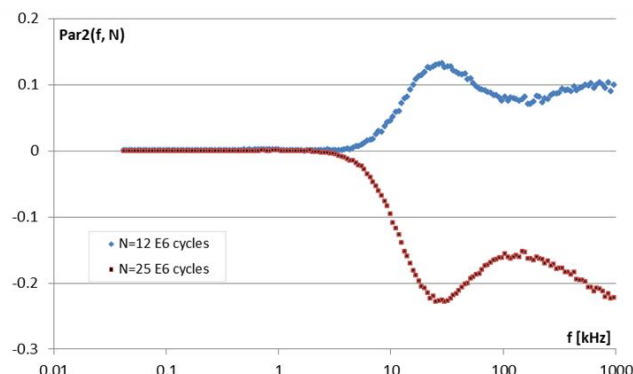
### 6.3. Monitorowanie postępującej degradacji materiału

Ocenę możliwości detekcji postępującej degradacji zmęczeniowej struktury z wykorzystaniem niskoczęstotliwościowej spektroskopii impedancji zobrazowano na rysunkach 18 i 19. Pomiary impedancji wykonano na materiale pochodzącym z prób zmęczeniowych o znanej liczbie cykli i poziomie wyężenia.

Uzyskane wyniki badań potwierdziły możliwość detekcji postępującej degradacji struktury metodą niskoczęstotliwościowej impedancji materiału, ale do wydzielenia wiarygodnych symptomów diagnostycznych poza zakresem rezonansowym sondy (w paśmie częstotliwości dostępnym w podręcznych miernikach RLC) wymagane jest dodatkowe, numeryczne przetwarzanie wyników pomiaru i metodologia identyfikacji parametrów odniesienia.



Rys. 18. Klasyczne zobrazowanie charakterystyki częstotliwościowej impedancji sondy sprzęgniętej indukcyjnie ze staliwem – zmiany składowych impedancji po 12 i 25 mln cykli obciążenia są bardzo małe w porównaniu do zakresu zmian charakterystyki i trudne do wykrycia bez dwuwymiarowej analizy danych [19]

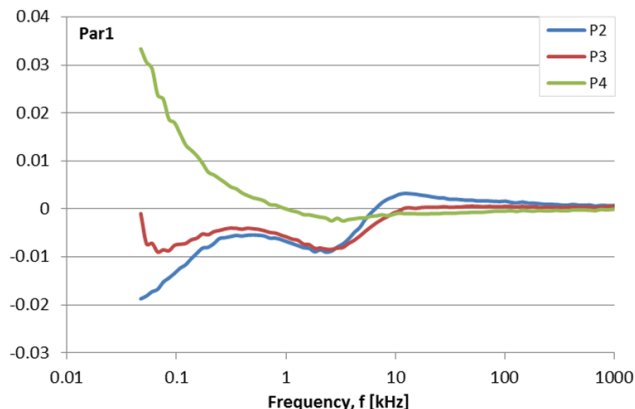


Rys. 19. Jednoznaczne odwzorowanie stopnia degradacji materiału (staliwa z rys. 18) w parametrze estymowanym – możliwe rozróżnienie fazy cyklicznego umocnienia i cyklicznego osłabienia materiału również na podstawie danych z podręcznych mostków LRC (pomiarach z częstotliwością testującą 10 i 100 kHz) [19]

## 6.4. Badania jakości struktury

Ocenę możliwości kontroli jakości mikrostruktury z wykorzystaniem niskoczęstotliwościowej spektroskopii impedancji zobrazowano na rysunku 20. Pomiarów wykonano na próbkach ze stopu aluminium [19].

Uzyskane wyniki badań potwierdziły możliwość kontroli jakości struktury materiału metodą niskoczęstotliwościowej spektroskopii impedancji.



**Rys. 20.** Zmiany wartości estymatora (utworzonego na bazie zmierzonej impedancji sondy) obserwowane dla próbek ze stopu aluminium o różnej jakości mikrostruktury (próbka nr 1 – odniesienie) – możliwa detekcji jakości struktury również na bazie danych z podręcznych mostków RLC (pomiarach z częstotliwością testującą 100 Hz, 120 Hz i 1 kHz) [19]

## 7. PODSUMOWANIE

Możliwe jest diagnozowanie stopnia degradacji struktury paramagnetycznych i ferromagnetycznych metali metodą niskoczęstotliwościowej spektroskopii impedancji.

Współczesne możliwości metrologiczne wspierają niskoczęstotliwościową spektroskopię impedancji oraz automatyzację badań nieniszczących i monitorowania stanu technicznego.

Efektywne wykorzystanie danych pomiarowych do detekcji wczesnej fazy degradacji struktury wymaga programowego wsparcia.

## BIBLIOGRAFIA

- Ostrovsky L.A., Johnson P.A., *Dynamic nonlinear elasticity in geomaterials*. *Revista del Nuovo Cimento*, 2001 Vol. 24, N. 7, pp. 1 – 46.
- Kober J., Převorovský Z., *Nondestructive Evaluation of Corrosion Damage of Al-Alloys by In-Situ AE Monitoring and by Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy Testing*. 6<sup>th</sup> NDT in Progress 2011, International Workshop of NDT Experts, Prague 10-12 Oct 2011
- Stolzenberg M. et al., *Online material characterization at strip production*. Research Found of Coal and Steel. Final report EUR 25879 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg 2013, doi: 10.2777/77313
- Green L., *RF-inductor modeling for the 21st century*, <http://m.eet.com/media/1142818/19256-159688.pdf>
- Keysight Technologies, *Impedance Measurement Handbook. A guide to measurement technology and techniques*, 4th Edition, Keysight Technologies, 2014, <http://www.keysight.com>. <https://www.hioki.com/products>
- <http://www.uni-trend.com>
- <http://www.ti.com/product>
- <http://www.analog.com/en/products>

- Impedance Spectroscopy Theory, Experiment, and Applications*, Edts. Barsoukov E., Macdonald J. R., A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2005
- Lasia A., *Electrochemical Impedance Spectroscopy and its Applications*, *Modern Aspects of Electrochemistry*, B. E. Conway, J. Bockris, and R.E. White, Edts., Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 1999, Vol. 32, p. 143-248.
- Eddy Current Testing at Level 2: Manual for the Syllabi Contained in IAEA-TECDOC-628. Rev. 2 "Training Guidelines for Non Destructive Testing Techniques"*, Printed by the IAEA in Austria, February 2011.
- Żurek Z. H., Duka P., *RLC circuits for material testing and NDT*, Institute of Electrical Drives and Machines KOMEL, Katowice 2015.
- Dubow A.A., Dubow Al. A., Kołokolnikow S.M., *Metoda magnetycznej pamięci metalu (MPM) i przyrządy kontroli*. RESURS Warszawa, 2004.
- ISO 24497:2007 Non-Destructive Testing -- Metal Magnetic Memory.
- Szudyga M., *Diagnozowanie metodą magnetyczną procesów zmęczeniowych stali stosowanych do kół i obręczy kolejowych zestawów kołowych*. Rozprawa doktorska. Politechnika Śląska, Katowice 2011.
- Witos M., *Zwiększenie żywotności silników turbinowych poprzez aktywne diagnozowanie i sterowanie*. *Płace Naukowe ITWL*, 2011, Issue 29, 324 p., doi: 10.13140/RG.2.1.4341.-4560.
- Żurek Zb. H., Łazarz B., Witoś M., Rockstroh B., *Hochpräzise Induktive Digital Wandler LDC 1000 zur Erfassung von Ermüdung des Radsatz-Stahles*, Dresden, 23.- 25. September 2015.
- Żurek Zb. H., Witoś M., *Diagnostics of degradative changes in paramagnetic alloys with the use of low frequency impedance spectroscopy*. 7th International Symposium on NDT in Aerospace, Bremen, 16-18 November 2015.

## COMPUTER-AIDED IMPEDANCE SPECTROSCOPY. PART 2. – DIAGNOSIS CONDITION OF METAL

### Abstract

*The article presents the aspect of metrological low-frequency impedance spectroscopy, a sample measuring equipment and selected results of paramagnetic and ferromagnetic alloys used in transport. The main attention was paid to the identification of reliable diagnostic symptoms of progressive degradation of the structure and assess the quality of the structure (of new elements and exploitation).*

Autorzy:

dr hab. inż. **Zbigniew Hilary Żurek**, prof. nadzw. PŚI – Politechnika Śląska, Wydział Transportu, Katedra Budowy Pojazdów Samochodowych, e-mail: [zbigniew.zurek@polsl.pl](mailto:zbigniew.zurek@polsl.pl)

dr inż. **Mirosław Witoś** – Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Zakład Informatycznego Wsparcia Logistyki, e-mail: [witom@itwl.pl](mailto:witom@itwl.pl)

mgr inż. **Dariusz Baron** – EthosEnergy Poland S.A., Dział Rozwoju Produktu i Marketingu; e-mail: [Dariusz.Baron@turbocare.pl](mailto:Dariusz.Baron@turbocare.pl)