

# Identyfikacja zakresu rozrzutu fizycznych parametrów eksploatacyjnych łopatek wirnika turbiny stopnia WP ze stali X22CrMoV12-1+QT2

Zbigniew Hilary Żurek, Tomasz Jasiński

## Przedmiot badania

Badania są prowadzone na łopatkach trzech wskazanych na rys. 1 stopni wirnika części WP turbiny klasy 200 (model: 13K250). Pierwsze w tej klasie turbiny wyprodukowane w Zakładach Mechanicznych ZAMECH w Elblągu pod koniec lat 60. XX w. na licencji radzieckich zakładów LMZ i oznaczono je jako TK200 i PWK-200-130. W wyniku kolejnych modernizacji w fabryce powstały modele 13K200 i 13K215 [4].



Rys. 1. Wirnik WP – oznaczenie stopni łopatek (Fot. zbiory prywatne autora)

## Warunki pracy łopatek

Powszechnie stosowanym materiałem są stale nierdzewne, martenzytyczne, o zawartości chromu powyżej 13% [1]. Stale te są najczęściej uszlachetniane przez składniki stopowe, jak: Mo, V, W, Nb, Ni, podnoszące własności materiału w wyższych temperaturach. Łopatki pracujące w temperaturach poniżej 450°C wykonuje się głównie ze stali 1H13 lub 2H13, a w temperaturach wyższych – do 550°C – ze stali 15H11MF, 15H12WMF oraz 23H12MNF [2].

Wirnik poddany badaniom posiada łopatki z tego samego materiału na każdym kole. Łopatki w turbinach parowych są najczęściej uszkodzonymi elementami. Za główną przyczynę uszkodzenia łopatek uważa się zmęczenie małowykliczne wywołane wielokrotnym quasistycznym obciążeniem spowodowanym siłami odśrodkowymi. W takim przypadku za jeden cykl obciążenia łopatki uważa się narastanie od zera do wartości maksymalnej siły odśrodkowej w czasie uruchamiania. W następnym kroku siła odśrodkowa zmniejsza się do zera podczas zatrzymywania maszyny. Uszkodzenia łopatek powstają w miejscach korbów technologicznych lub konstrukcyjnych,

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono metodę pomiaru zmian poeksploatacyjnych parametrów magnetycznych i elektrycznych łopatek wirnika turbiny 13K225 części wysokopiętnej (WP) ze stali X22CrMoV12-1+QT2. Zastosowano zmodyfikowaną metodę badań magneto-indukcyjnych, opisującą zmiany materiału poprzez składowe impedancje układu pomiarowego. Cewka układu pomiarowego podłączonego do klasycznego mostka pomiarowego rejestruje w tej metodzie zmiany składowych impedancji. Po uwzględnieniu rezystancji i reaktancji początkowej analizowano względne zmiany przenikalności skutecznej i przewodności właściwej materiału. Badania przeprowadzono urządzeniami minimalizującymi koszty badań, nie pogarszając dokładności i powtarzalności. Badania są nadal kontynuowane na większej ilości próbek materiału przed i po eksploatacji. Jak ujawniono w toku badań, w procesie modernizacji nie dokonano znaczących zmian składu chemicznego, a jedynie kształtu oraz przekroju łopatek, co ma zapewnić podwyższoną wydajność turbozespołu i wydłużyć czas niezawodnej eksploatacji. Wyznaczanie czasu niezawodnej eksploatacji wiąże się z koniecznością monitorowania zmian degradacyjnych materiału, a więc utraty parametrów mechanicznych. Najczęściej odbywa się to pośrednio za pomocą monitorowania parametrów fizycznych, a szczególnie magnetycznych i elektrycznych.

Słowa kluczowe: metody magneto-indukcyjne, NDT, NDE

**Abstract:** In article there has been presented the method for measurement of post exploitation differences of the magnetic and electric properties of high pressure (HP) turbine 13K225 blades made of X22CrMoV12-1+QT2. There has been used a modified method for magnetic-induction tests, which let us describe the changes of material through measurement of system impedance. Measurement system coil connected with pure LCR meter registers in this method the changes of impedance. After considering the resistance and initial reactivity, the relative changes of effective permeability and thermal conductivity of the material was analyzed. The tests have been done with use of equipment minimizing the costs, while maintaining accuracy and repeatability. The test are being continued in order to reach the possibility of comparison of material properties before and after exploitation. The tests have revealed, that blades' modernization hadn't changed the chemical composition, but only shape and cross-section were changed, which shall ensure better efficiency of the unit and extending the time of reliable operation. Therefore the predicting of reliable operation requires the monitoring of material degradation changes, i.e. the loss of mechanical parameters in connection with changes in physical parameters, particularly magnetic and electrical.

Keywords: magneto inductive method, NDT, NDE



Rys. 2. Erozja powierzchni łopatek turbiny (Fot. zbiory prywatne autora)

wszędzie tam, gdzie występują znaczne zmiany wymiarów i tzw. ostre przejścia [10].

Przyczyny uszkodzeń łopatek wynikają z następujących czynników:

- obciążenia mechaniczne (własna siła odśrodkowa, zginanie siłami od przepływu gazu, drgania);
- niszczenie korozyjne (w szczególności erozja) jak na rys. 2;
- stosowany materiał (jego obróbka cieplna i stan powierzchni);
- montaż i eksploatacja turbiny [3, 11].

Ostatnie stopnie turbin parowych pracujące w zakresie pary mokrej zużywają się w inny sposób. Można tam zaobserwować silną erozję łopatek, spowodowaną przez złożone zagadnienia termodynamiczne i przepływowe czynnika dwufazowego w postaci pary wodnej i kropeł wody, gdzie szczególnie erozyjnym czynnikiem jest faza ciekła, czyli duże krople wody poruszające się z dużą prędkością [3, 11] (rys. 2).

## 1. Definiowanie problemu

Awaryjność turbozespołów jest wciąż zmniejszana poprzez nowe rozwiązania projektowe, nowe materiały oraz nowe technologie. Niemniej jednak należy przyznać, że nadal najczęstszym uszkodzeniom ulegają elementy układów przepływowych, czyli łopatki i wirniki. Bliższe poznanie rodzaju uszkodzenia i próba określenia przyczyn jego powstania mogą ułatwić przyjęcie skutecznej metody diagnozowania.

Łopatki robocze wirnika stanowią podstawowy i jeden z najważniejszych układów turbiny, a liczba ich we współczesnych turbinach jest liczona w tysiącach sztuk. Występuje duża różnorodność kształtów, wymiarów i sposobów mocowania łopatek. W łopatkach wirnikowych energia prędkości jest zamieniana na energię mechaniczną. Łopatki robocze powinny mieć dużą wytrzymałość na zmęczenie, pękanie, korozję i erozję [4, 9].

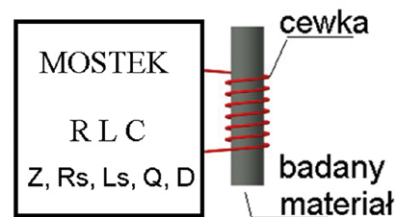
Zmieniające się parametry fizyczne stalowego elementu podzespołu, w tym elektryczne i magnetyczne, charakteryzują postęp degradacji w procesie jego eksploatacji. Bieżące parametry elektryczne i magnetyczne charakteryzują stan materiału [6–8] i wraz z parametrami cewki pomiarowej zmieniają przebieg impedancji układu pomiarowego [9, 10]. Zmiany impedancji, a szczególnie jej składowe, mogą korelować z przebiegiem eksploatacji. Preferowana obecnie w badaniach

procesu degradacji eksploatacyjnej rozłączna analiza zmian eksploatacyjnych przenikalności magnetycznej i przewodności elektrycznej jest zbyt uproszczona.

Pełna ocena zmian materiału wymaga łącznej analizy parametrów elektrycznych oraz magnetycznych i jest możliwa poprzez pomiar unormowanych składowych impedancji układu pomiarowego w funkcji częstotliwości. Podstawy metody są wsparte o pojęcie przenikalności skutecznej Förstera (wartości ujednocionej we wszystkich kierunkach) [10]. Rozdzielenie wpływu czynników magnetycznych od pozostałych (głównie termicznych, mechanicznych, strukturalnych, cyklicznych o określonej symetrii itd.) szczegółowo charakteryzuje stopień degradacji materiału [7, 9, 10]. Uproszczenie metod nie wpływa na dokładność badań. W metodzie badań wykorzystana zostanie cewka (solenoid) obejmująca próbkę przy niecałkowitym jej wypełnieniu.

## 2. Założenia teoretyczne pomiaru unormowanych składowych impedancji

Uzwojenie sondy (cewki) pomiarowej ma rezystancję  $R$ . Pusta cewka sondy po podłączeniu do źródła napięcia przemiennego ma impedancję  $Z_0$ . Włożenie rdzenia do cewki (rys. 3) powoduje wzrost impedancji do wartości  $Z$ . Składowa  $R_0$  impedancji  $Z$  wzrasta do wartości  $R$ .



Rys. 3. Ogólny schemat układu pomiarowego

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 pracy [10] wprowadzono pojęcie przenikalności skutecznej –  $\mu_{sk}$  – oraz założenie, że część rzeczywista  $R_0$  dla pustej cewki pomiarowej

reklama

reklama

jest pomijana. Pozostaje jedynie składowa urojona  $\omega L_0$  i składowa rzeczywista przyrostowa  $R$ :

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

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

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

oraz unormowanych składowych napięcia pomiarowego w

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

gdzie:

$\mu_r, (\mu_{rel.})$  – 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 przybliżamy do kwadratu ilorazu powierzchni:

$$\eta' = (s_p / s_s)^2 \quad (5)$$

Rozkład pola magnetycznego i prądowa wirowych po powierzchni złożonego kształtu jest złożony i wpływa na wartość mierzonych parametrów elektrycznych i magnetycznych.

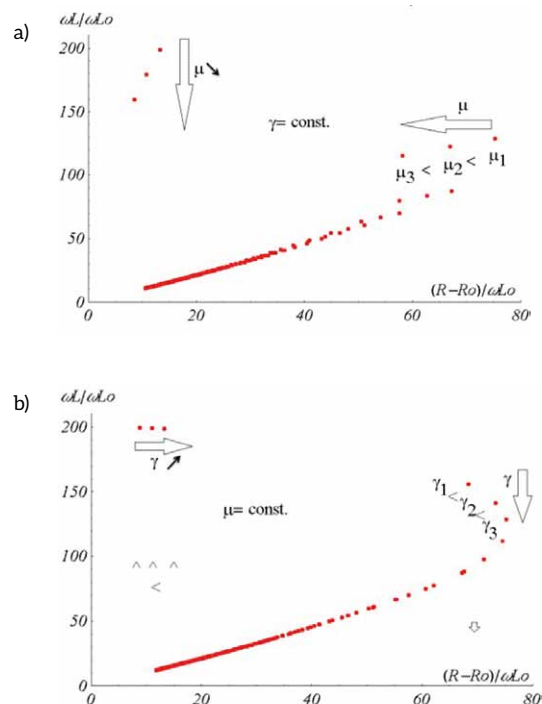
Na rysunku 4 zamieszczono teoretyczne przykłady przebiegów unormowanych składowych impedancji [10]. Wartość  $(R-R_0)$  oznacza składową czynną impedancji dla określonej częstotliwości, pomniejszoną o rzeczywistą rezystancję uzwojenia mierzoną dla prądu stałego.

Założone przekroje cewki i parobki są okrągłe. Współczynnik wypełnienia jest liczony zgodnie ze wzorem (4).

Przedstawione krzywe wywodzą się z początków badań magneto-indukcyjnych dla NDT (*Non-Destructive Testing*, pol. badania nieniszczące). Natomiast forma ich przedstawienia za pomocą programu MATHEMATIKA jest metodą opracowaną przez autorów [10] i dedykowaną dla wsparcia teoretycznego diagnostyki nieniszczącej.

### 3. Materiał badań

W najnowszych opracowaniach technicznych coraz trudniej znaleźć informacje na temat występujących uszkodzeń oraz doboru materiału na elementy turbin. Firmy produkujące turbozespoły niechętnie udostępniają dane o uszkodzeniach, podobnie jak producenci energii elektrycznej. Analizy awaryjności w energetyce prowadzone w wielu krajach wskazują, że krytycznymi elementami są łopatki wirnika, których



Rys. 4. Unormowane składowe impedancji przy stałej  $\mu$  - rys. a; przy stałej  $\gamma$  - rys. b

Tabela 1. Skład chemiczny stali łopatek

Zmodyfikowanych (norma)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V
0,18	0,10	0,30	≤	≤	11,0	0,80	0,30	0,25
0,24	0,50	0,80	0,020	0,020	12,5	1,20	0,80	0,35
		0,96			11,30	0,75	0,60	

Wymienianych (pomiar)

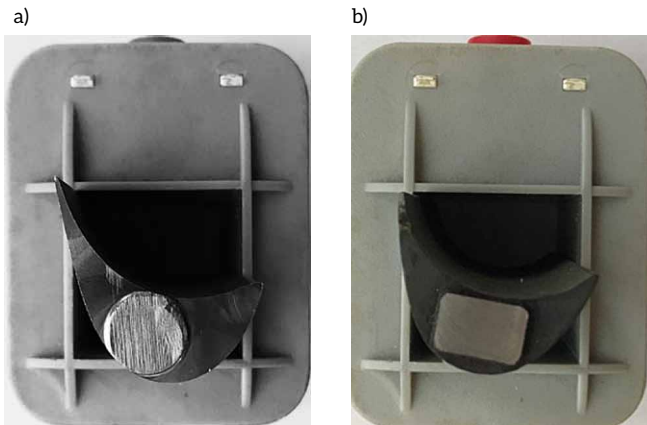
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V
		0,94			10,52	0,70	0,44	0,44

koszty naprawy stanowią 40–50% ogólnych kosztów naprawy turbin [9], dlatego też w badaniach wykorzystano zdemonstrowane łopatki z modernizowanej turbiny oraz nowe łopatki z nowego materiału X22CrMoV12-1+QT2.

Stal X22CrMoV12-1+QT2 jest stalą chromowo-molibdenowo-niklowo-wanadową stosowaną na łopatki turbin i kompresorów pracujących w temperaturach równych lub większych od 650°C. Skład chemiczny stali zamieszczono w tabeli 1.

Porównanie składu chemicznego materiału łopatek poeksploatacyjnych z nowym materiałem łopatek zmodernizowanych, wykazało ich zgodność, co z punktu widzenia prowadzonych pomiarów elektromagnetycznych pozwala nam wyeliminować jego wpływ na te pomiary.

Decyzja o ponownym dobraniu takiego, a nie innego rodzaju materiału podyktowana jest wieloletnim doświadczeniem w eksploatacji układów łopatkowych wirników turbin.



Rys. 5. Przekroje próbek zmodyfikowanych – a; i eksploatacyjnych – b

Konstrukcyjna wysokostopowa stal kotłowa X22CrMoV12 (23H12MNF), klasyfikowana jako stal żarowytrzymała, jest gatunkiem o strukturze martenzytycznej, dedykowanym na części, podzespoły oraz odkuwki łopatek i części wirników turbin parowych.

Wycinki przykładowych łopatek „6” stopnia w wersji zmodernizowanej i eksploatacyjnej umieszczone w cewkach pomiarowych zamieszczono na rysunku 5.

Na rysunku 6 przedstawiono wyniki pomiaru unormowanych składowych impedancji próbek zmodernizowanych, a na rysunku 7 wyniki pomiaru unormowanych składowych impedancji zdemontowanych próbek po eksploatacji.

Zmiany składowych impedancji dla poszczególnych częstotliwości obrazują wpływ eksploatacji na zmianę parametrów elektrycznych i magnetycznych.

Brak pełnych danych materiałowych (rzetelnego punktu odniesienia) z okresu poprzedzającego poprzedni montaż łopatek (obecne łopatki eksploatacyjne) powoduje koncentrację dalszych zadań badawczych na wpływie parametrów obciążeń poszczególnych stopni i rzędów łopatek na zmianę parametrów materiałowych.

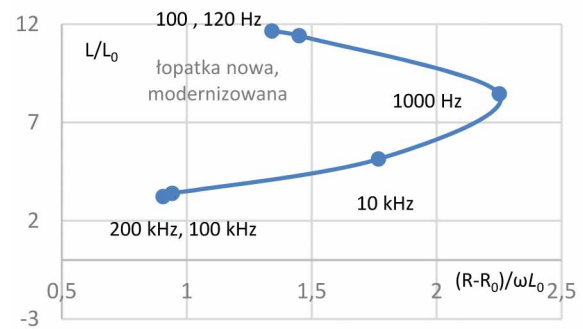
#### 4. Porównanie zmian parametrów elektrycznych i magnetycznych

Mostek pomiarowy RLC jest niedocenianym urządzeniem w zastosowaniach defektoskopowych, a szczególnie do wyznaczania zmian parametrów materiału. Na rysunku 8 podano zestawienie wyników z rysunków 6 i 7. Porównanie wsparte jest analizą teoretyczną przedstawioną na rysunku 4.

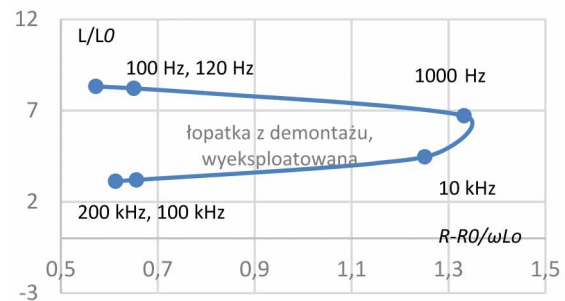
Wraz z zauważalnym spadkiem wartości przenikalności skutecznej, szczególnie w zakresie do 1000 Hz, obserwujemy znaczny wzrost przewodności elektrycznej skutecznej, który jest charakterystyczny dla obciążeń zmęczeniowych mechanicznych, a zwłaszcza elementów pracujących w wysokich temperaturach.

Kierunki zmian przedstawiono na rysunku 9.

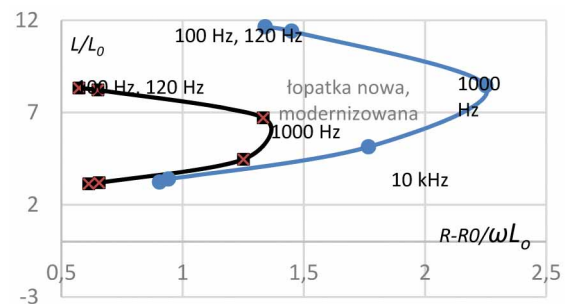
Częstotliwości do 1000 Hz charakteryzują materiał elementu. Częstotliwości 100 kHz – wyższe stany jego powierzchni. W tym celu wykonano dwie serie pomiarów wycinków 6 próbek eksploatacyjnych i nowych, zachowując jednakowy



Rys. 6. Wyniki unormowanych składowych impedancji próbek zmodernizowanych w zakresach częstotliwości pracy mostka RLC



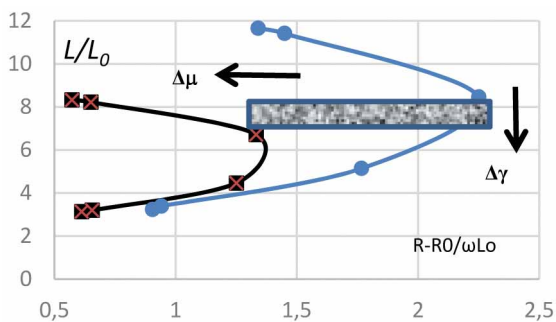
Rys. 7. Wyniki unormowanych składowych impedancji próbek po eksploatacji w zakresach częstotliwości pracy mostka RLC



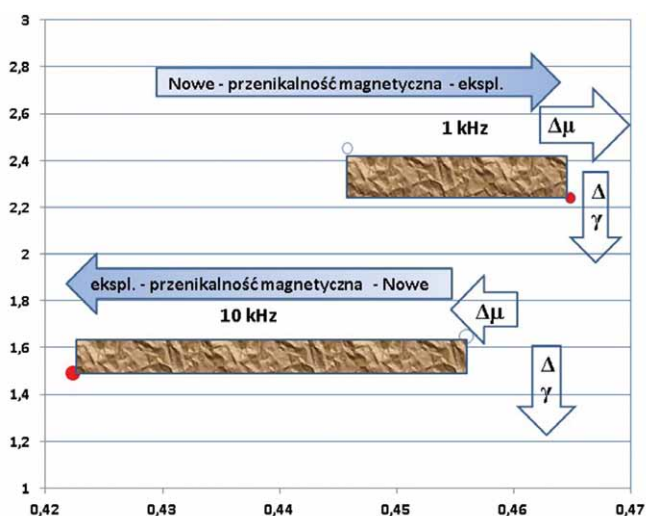
Rys. 8. Wynik porównania wpływu eksploatacji

wymiar długości (minimalizując wpływ zmian odmagnesowania). Główny cel porównania skierowany został na ocenę stanu powierzchni próbek (10 kHz) i stan zmian parametrów materiału w ich wnętrzu pod powierzchnią (1 kHz), to jest dla częstotliwości umożliwiających badanie ferromagnetyków. Wyniki porównania przedstawiono na rysunku 10.

Wykazane różnice w zmianach przenikalności magnetycznej i przewodności magnetycznej warstwy wierzchniej i wnętrza materiału są zgodne z obserwowanym stanem powierzchni badanych próbek. Dokonane porównanie odchyłek



Rys. 9. Przedstawienie kierunku zmian parametrów elektrycznych i magnetycznych w wyniku eksploatacji



Rys. 10. Kierunki zmian przenikalności magnetycznej i przewodności elektrycznej próbek eksploatowanych i nowych wprowadzone z wartości średnich z wyników pomiarów

standardowych wykazało istotność wyników pomiaru dla identyfikacji i oceny procesu zmian eksploatacyjnych.

### Podsumowanie

Diagnostyka elementów turbin, takich jak łopatki wykonane ze stali X22CrMoV12-1+QT2, pracujących w wysokich temperaturach i pod dużym ciśnieniem, jest tematem bardzo ważnym. Istota diagnostyki technicznej takich maszyn, jak wirniki turbin, polega na określaniu ich stanu bez demontażu, na podstawie określonych sygnałów oraz ich porównania z wartościami pochodzącymi z elementów niez użytymi [11]. Ciągłe poszukiwanie się metod diagnostycznych wiarygodnych oraz nieniszczących i możliwie prostych w realizacji. W artykule przedstawiono metodę spektroskopii impedancji realizowaną prostym i tanim sposobem cewki pomiarowej (sondy) i pomiaru mostkiem RLC. Badania są porównywane w stosunku do nieobciążanej próbki wzorcowej „0” wykonanej z tego samego materiału. Wyniki badań wykonane na grupie próbek o różnym stopniu wyeksploatowania i porównane z wynikami wykonanymi na próbce „0” potwierdziły użyteczność zaprezentowanej metody

diagnostycznej. Serię pomiarów diagnostycznych przedstawioną w artykule należy uważać za wstępną, rokującą jednak nadzieję na szerokie jej wdrożenie do badań diagnostycznych oceniających stopień zużycia eksploatacyjnego materiału. Badania należy kontynuować w celu porównania zmian przenikalności magnetycznej i przewodności elektrycznej ze stopniem zużycia eksploatacyjnego materiału dobrze zidentyfikowanego, co niejednokrotnie jest poważnie utrudnione wpływem czasu i brakiem danych materiałowych. Czułości pomiaru prowadzonego mostkiem pomiarowym RLC dla zastosowań materiałowych są porównywalne ze współczesnymi rozwiązaniami defektoskopów.

### Literatura

- [1] PN-EN 10088-1:2014-12. Stale odporne na korozję – Część 1: Wykaz stali odpornych na korozję.
- [2] PN-75/H-84024, EN 10302 i EN 10269
- [3] JASIŃSKI T.: *Problematyka uszkodzeń układu łopatkowego turbin parowych*. Materiały Konferencyjne IMMiT, Katowice 2002.
- [4] DEMBIŃSKI K.: *Energetyka 1.28*. IV Konferencja ZRE, Katowice 3–5 kwietnia 2017.
- [5] ZERGOU G. M., KAMEL G., BOUCHEROU N.: *Mechanical Stress Analysis By Eddy Current Method*. „The Journal of American Science” 4(4)/2008.
- [6] ANDRÉ YASHAN: *Über die Wirbelstromprüfung und magnetische Streuflussprüfung mittels GMR-Sensoren*. Dissertation zur Erlangung des Grades des Doktors der Ingenieurwissenschaften Universität des Saarlandes, 2008.
- [7] PETER B. NAGY: *Electromagnetic NDE*. University of Cincinnati, Ohio 45221, USA and UK Research Centre in NDE Imperial College London, SW7 2AZ, UK, March 2011.
- [8] PENG XU: *Eddy Current Testing Probe Composed of Double Uneven Step Distributing Coils for Crack Detection*. A dissertation, By M. E., Harbin Institute of Technology, China, 2005 B. E., Harbin Institute of Technology, China, 2003, September 2008.
- [9] ŻUREK Z.H., DOBMAN G., ROCKSTROH B., KUKLA D.: *Examination of service life of power system components made of p91 steel (X10CrMoVNb9-1) using impedance magnetic resonance technique*. WCNDT Non-Destructive Testing 2016 Munch Germany.
- [10] ŻUREK Z.H., DUKA P.: *RLC circuits for material testing and NDT*. Institute of Electrical Drives and Machines KOMEL, Katowice 2015.
- [11] Orłowski Z.: *Diagnostyka w życiu turbin parowych*. WNT, Warszawa 2001.
- [12] DOBOSIEWICZ J.: *Badania diagnostyczne urządzeń cieplno-mechanicznych. Część 1*. Biuro Gamma, Warszawa 1998.
- [13] MUCHACZOW J.: *Uszkodzenia łopatek turbiny energetycznej – wybrane zagadnienia materiałowe, Materiały i technologie XXI wieku*. Katowice, 9 maja 2002.

Zbigniew Hilary Żurek – Politechnika Śląska Wydział Transportu  
 e-mail: zbigniew.zurek@polsl.pl;  
 Tomasz Jasiński – EthosEnergy Poland SA  
 e-mail: tomasz.jasinski@ethosenergygroup.pl

artykuł recenzowany