

doi:10.15199/48.2017.11.15

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

Streszczenie: W artykule przedstawiono metodę pomiaru zmian poeksploatacyjnych parametrów magnetycznych i elektrycznych łopatek wirnika turbiny 13K225 części wysokoprężnej (WP) ze stali X22CrMoV12-1+QT2. Zmodyfikowana metoda badań magneto-indukcyjnych opisująca zmiany parametrów fizycznych poprzez składowe impedancji układu pomiarowego pozwala na wyznaczanie czasu niezawodnej eksploatacji poprzez monitorowanie zmian degradacyjnych materiału.

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. A modified method for magnetic-induction tests, describes the changes of physical parameters through measurement of system impedance, let us to predict the reliable operation time through monitoring of material degradation changes. **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**

Słowa kluczowe: metody magneto indukcyjne, NDT, NDE

Keywords: magneto inductive method, NDT, NDE

Przedmiot badania

Badania są prowadzone na łopatkach trzech wskazanych na rysunku 1, stopni wirnika części WP turbiny klasy 200 (model: 13K250). Pierwsze wyprodukowane w tej klasie turbiny w Zakładach Mechanicznych ZAMECH w Elblągu pod koniec lat 60-tych 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

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 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 małe - cykliczne wywołane wielokrotnym quasi-statycznym 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, wszędzie tam, gdzie występują znaczne zmiany wymiarów i tzw. ostre przejścia [11, 12].

Przyczyny uszkodzeń łopatek wynikają z następujących czynników:

- obciążeń mechanicznych (własna siła odśrodkowa, zginanie siłami od przepływu gazu, drgania);
- niszczenia korozyjnego (w szczególności erozja) jak na rysunku 2;
- stosowanego materiału (jego obróbki cieplnej i stanu powierzchni);
- montażu i eksploatacji turbiny [3, 13]. 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).



Rys.2. Erozja powierzchni łopatek turbiny.

Definiowanie problemu

Awaryjność turbozespołów jest wciąż zmniejszana poprzez nowe rozwiązania projektowe, nowe materiały oraz nowe technologie. Niemniej jednak należy przyznać, że nadal najczęstszymi uszkodzeniami ulegają elementy układów przepływowych, czyli łopatki i wirniki. Bliższe poznanie rodzaju uszkodzenia i próba określenia przyczyn

jego powstania mogą ułatwić przyjęcie skutecznej metody diagnozowania.

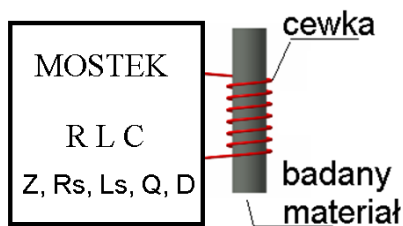
Łopatki robocze wirnika; stanowią podstawowy i jeden z najistotniejszych układów turbiny a ich liczba we współczesnych turbinach jest liczona w tysiącach sztuk. Występuje duża różnorodność kształtów, wymiarów i sposobów mocowania łopatek. W łopatkach wirnikowych energia prędkości jest zamieniona na energię 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 (9 można) korelować z przebiegiem eksploatacji. Preferowana obecnie w badaniach procesu degradacji eksploatacyjnej rozłączna analiza zmian eksploatacyjnych przenikalności magnetycznej i przewodności elektrycznej jest niewystarczająca.

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 ujednoczonej we wszystkich kierunkach) [10]. Rozdzielenie wpływu czynników magnetycznych (wpływ na przenikalność magnetyczną μ) od pozostałych (głównie termicznych, mechanicznych, strukturalnych, cyklicznych o określonej symetrii i.t.d.) 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 niepełnym jej wypełnieniu.

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 ε_0 , a po włożeniu próbki ε zmienia się proporcjonalnie do impedancji Z . W rozważaniu analitycznym zaproponowanym przez Förstera i zastosowaniach opisanych w pracy [10] wprowadzono pojęcie przenikalności skutecznej - μ_{sk} , oraz założenie że część rzeczywista R_0 dla pustej cewki pomiarowej jest pomijana. Pozostaje jedynie składowa urojona ωL_0 i składowa rzeczywista przyrostowa R :

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

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

$$(2) \quad \frac{\text{Re } \varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{R}{\omega L_0} = \eta \mu_r (-\text{Im } \mu_{sk}),$$

Oraz unormowanych składowych napięcia pomiarowego w

$$(3) \quad \frac{\text{Im } \varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\omega L}{\omega L_0} = 1 - \eta + \eta \mu_r (\text{Re } \mu_{sk}).$$

Gdzie: $\mu_r(\mu_{rel.})$ - przenikalność magnetyczna względna, η - współczynnik wypełnienia cewki definiowany, jako stosunek średnic próbki D_p i cewki D_s

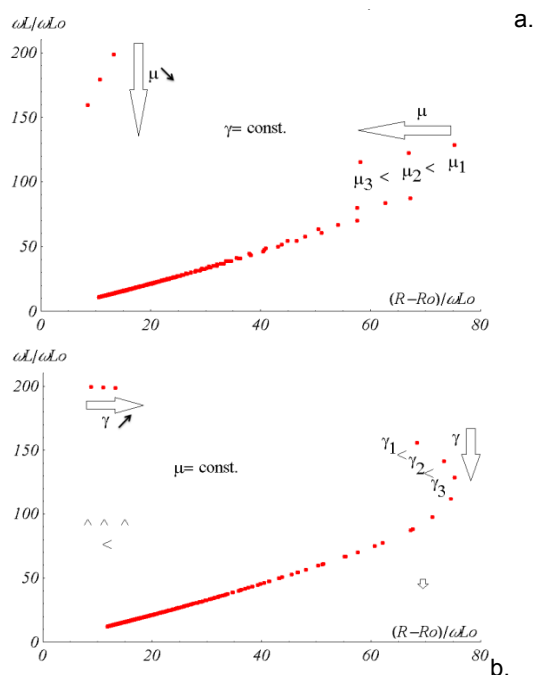
$$(4) \quad \eta = (D_p / D_s)^2$$

Dla przekroju prostokątnego otworu cewki i złożonego kształtu współczynnik wypełnienia przybliżamy do kwadratu ilorazu powierzchni:

$$(5) \quad \eta' = (S_p / S_s)$$

Wpływ przekroju dla kształtu odbiegającego od okrągłego pręta jest złożony i wpływa poprzez η' i współczynnik od magnesowania na wartość mierzonych parametrów elektrycznych oraz magnetycznych i wymaga szczególnej uwagi. 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 próbki są okrągłe. Współczynnik wypełnienia jest liczony zgodnie ze wzorem (4)



Rys. 4. Unormowane składowe impedancji przy stałym μ – rys. a , przy stałym γ – rys. b

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 od dydaktyki po badania naukowe.

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 koszty naprawy stanowią 40 ÷ 50% ogólnych kosztów naprawy turbin [9], dlatego też w badaniach wykorzystano zdemontowane 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 450°C. Skład chemiczny stali zamieszczono w tabeli 1.

Tab. 1. Skład chemiczny stali łopatek Zmodyfikowanych (norma)

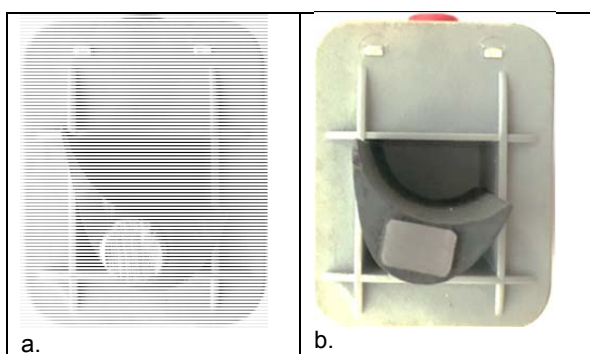
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V
0,1	0,1	0,3	≤	≤	11,0	0,80	0,30	0,25
8	0	0						
-	-	-	0,020	0,020	12,5	1,20	0,80	0,35
0,2	0,5	0,8						
4	0	0						
		0,9			11,30	0,75	0,60	
		6						

Wymienianych (poeksploatacyjnych) (pomiar)

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

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

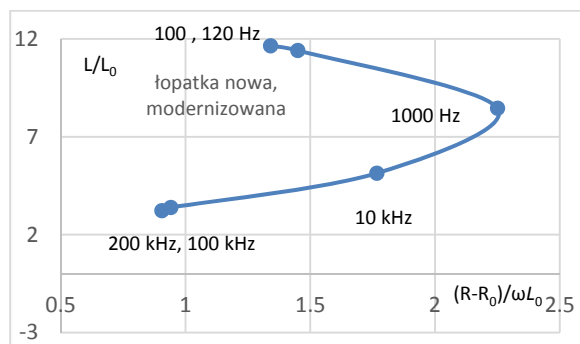
Decyzja o ponownym dobraniu takiego a nie innego rodzaju materiału podyktowana jest wieloletnim doświadczeniem w eksploatacji układów łopatkowych wirników turbin.



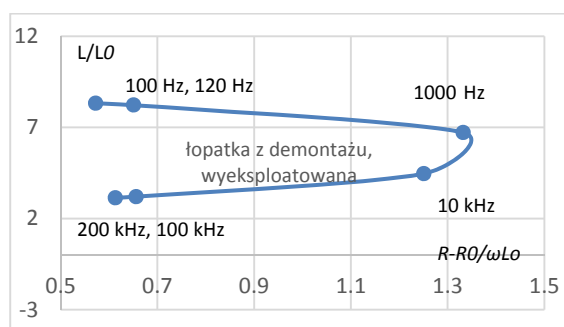
Rys. 5. Przekroje próbek zmodyfikowanych - a, i eksploatowanych - b

Konstrukcyjna wysokostopowa stal kołowa 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 eksploatowanej 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



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

Zmiany składowych impedancji dla poszczególnych częstotliwości obrazują wpływ eksploatacji na zmianę parametrów elektrycznych i magnetycznych. Są one następnie korygowane ze względu na współczynnik wypełnienia i odmagnesowanie.

Brak pełnych danych materiałowych jako rzetelnego punktu odniesienia z okresu poprzedzającego eksploatację demontowanych łopatek powoduje koncentrację dalszych zadań badawczych na wpływie parametrów obciążeń poszczególnych stopni łopatek na zmiany parametrów materiałowych

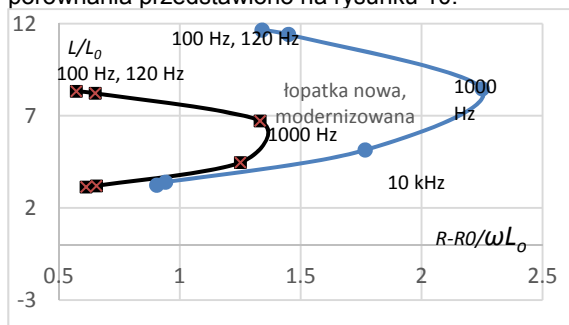
4. Porównanie zmian parametrów elektrycznych i magnetycznych

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.

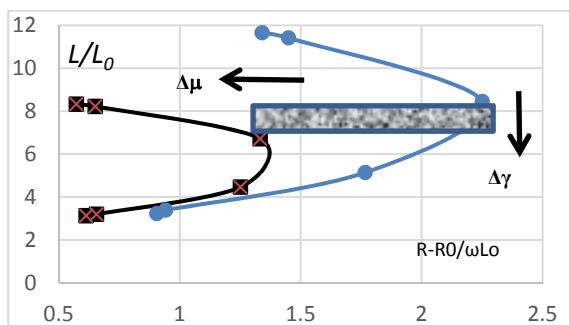
Wraz z zauważalnym spadkiem wartości przenikalności skutecznej szczególnie w zakresie do 1000 Hz, obserwujemy znaczny wzrost przewodności elektrycznej skutecznej, który jest charakterystyczny dla obciążeń zmęczeniowych mechanicznych a szczególnie elementów pracujących w wysokich temperaturach.

Kierunki zmian przedstawiono na rysunku 9. Częstotliwości do 1000 Hz charakteryzują materiał elementu. Częstotliwości 100 kHz - wyższe stan jego powierzchni. W tym celu wykonano dwie serie pomiarów wycinków 6 próbek eksploatowanych i nowych zachowując jednakowy wymiar długości (minimalizując dodatkowy wpływ zmian odmagnesowania). Główny cel porównania skierowany został na ocenę stanu powierzchni próbek (10 kHz) i stan zmian parametrów materiału w ich wnętrzu pod

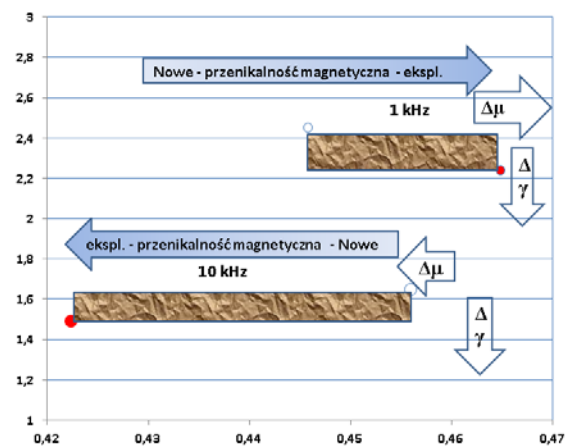
powierzchnią (1 kHz) to jest dla częstotliwości umożliwiających badane ferromagnetyków. Wyniki porównania przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 8. Wynik porównania wpływu eksploatacji



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



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

Wykazane różnice w zmianach przenikalności magnetycznej i przewodności magnetycznej warstwy wierzchniej i wnętrza materiału jest zgodne z obserwowanym stanem powierzchni badanych próbek. Dokonane porównanie odchyłek standardowych wykazało istotność wyników pomiaru dla identyfikacji i oceny procesu zmian eksploatacyjnych.

Podsumowanie

Diagnostyka elementów turbin, pracujących w wysokich temperaturach i pod dużym ciśnieniu, takich jak łopatki wykonane ze stali X22CrMoV12 1+QT2, jest tematem bardzo ważnym. Istota diagnostyki technicznej (stanu

elementu) takich maszyn jak wirniki turbin polega na pomiarze parametrów diagnostycznych na wale turbiny (bez demontażu łopatek) oraz porównania ich z wartościami pochodzącymi z elementów nieużytych (wzorców) [11]. Przedstawiana metoda spektroskopii impedancji jest prostym i tanim sposobem uzupełnienia badań NDT. Wyniki badań wykonywane na grupie próbek o różnym stopniu wyeksploatowania i porównane z wynikami wykonanymi na próbce „0”, potwierdza użyteczność zastosowanej 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 upływem czasu i brakiem wyjściowych danych materiałowych. Czułości pomiaru prowadzonego mostkiem pomiarowym RLC dla zastosowań materiałowych są porównywalne z możliwościami detekcyjnymi współczesnych defektoskopów.

Autorzy: Dr hab. inż. Zbigniew Hilary Żurek, prof. nadzw. PŚ. Politechnika Śląska Wydział Transportu, zbigniew.zurek@polsl.pl
Mgr inż. Tomasz Jasiński, EthosEnergy Poland S.A. tomasz.jasinski@ethosenergygroup.pl

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 J. Problematyka uszkodzeń układu łopatkowego turbin parowych” – Materiały Konferencyjne IMMiT Katowice 2002
- [4] Dembiński K., “Energetyka 1.28” IV Konferencja ZRE Katowice 3-5 kwiecień 2017
- [5] M. Zergoug, G. Kamel, N. Boucherou.: “Mechanical Stress Analysis By Eddy Current Method”, The Journal of American Science, 4(4), 2008, ISSN 1545-1003 (zmiana impedancji)
- [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, Dobmann 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, PL ISBN 978-83-931909-8-0,
- [11] Orłowski Z. Diagnostyka w życiu turbin parowych” WNT Warszawa 2001
- [12] Dobosiewicz J. „Badania diagnostyczne urządzeń ciepłno – 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.