

Warszawa, 10.06.2021

Dr hab. inż. Grzegorz Socha  
Sieć Badawcza Łukasiewicz  
Instytut Lotnictwa

## Recenzja rozprawy doktorskiej

Tytuł rozprawy: Diagnostyka stopnia wypracowania łopatek części wysokoprężnej wirnika turbiny 13K225 metodą magneto-indukcyjną.

Autor rozprawy: mgr inż. Tomasz Jasiński

Promotor rozprawy: dr hab. Inż. Zbigniew Hilary Żurek, prof. Politechniki Śląskiej

Promotor pomocniczy: dr inż. Iwona Bednarczyk

Dziedzina: Nauki Techniczne

Dyscyplina: Inżynieria Mechaniczna (Budowa i Eksploatacja Maszyn)

Recenzja wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej na podstawie uchwały z dnia 28 kwietnia 2021 roku.

### 1. Tematyka rozprawy

Tematyka rozprawy doktorskiej mgra inż. Tomasza Jasińskiego obejmuje zagadnienia związane z diagnostyką i wczesnym wykrywaniem uszkodzenia materiału łopatek turbiny energetycznej. Autor rozprawy jest praktykiem, wykonującym w swej pracy badania nieniszczące turbin energetycznych w ramach przeglądów okresowych tych urządzeń. Celem tych przeglądów jest wykrycie uszkodzenia materiału, z którego wykonane są podzespoły turbiny oraz ewentualne dopuszczenie ich do dalszej eksploatacji. Nie ulega wątpliwości, że podjęta tematyka jest niezwykle istotna z punktu widzenia bezpieczeństwa instalacji energetycznych: Wczesna wykrycie wywołanych eksploatacją uszkodzeń elementów turbiny pozwala na obliczenie trwałości resztkowej materiału i co za tym idzie, przedłużenie lub skrócenie ресурсu badanych urządzeń. Niezwykle istotny jest też aspekt ekonomiczny tego rodzaju działalności. Decyzja o wymianie podzespołu lub całej turbiny energetycznej pociąga za sobą ogromne koszty.

Podjęta tematyka jest trudna i wymaga opanowania szerokiego spektrum wiedzy począwszy od podstaw miernictwa wielkości elektrycznych do mechaniki ciała stałego. Dla określenia wspomnianego w tytule rozprawy „stopnia wypracowania łopatek” kluczowym zagadnieniem jest opis procesu rozwoju uszkodzeń materiałów konstrukcyjnych. Literatura dotycząca tego zagadnienia jest niezwykle obszerna, a sam opis procesu inicjacji i rozwoju uszkodzenia jest nadal dynamicznie rozwijającym się obszarem mechaniki materiałów.

Biuro Dziekana  
16 CZE 2021  
wplynęło dnia .....  
nr 90/RD/Inż/006/.....  
2010/2021

Rozwój metod badawczych, których celem jest wykrycie i pomiar uszkodzenia materiału konstrukcyjnego jest kluczowy dla poznania mechanizmów uszkodzenia wywołanego procesami związanymi z pełzaniem czy też zmęczeniem materiału oraz rozwoju mechaniki uszkodzenia materiałów. W tym zakresie mieści się tematyka pracy doktorskiej mgr inż. Tomasza Jasińskiego. Autor stara się zastosować innowacyjną technikę spektroskopii impedancji do wczesnego wykrywania uszkodzenia materiału łopatek wirnika turbiny energetycznej 13K225.

Na podkreślenie zasługuje fakt, że doktorant jako obiekt badań wybrał materiał łopatek turbiny energetycznej uszkodzony w warunkach eksploatacyjnych. Określenie stopnia uszkodzenia materiału poeksploatacyjnego jest niezwykle ambitnym celem badawczym. Realizacja tego celu pozwoliłaby na określenie trwałości resztkowej łopatek turbin i ułatwiłaby decyzję w sprawie przedłużenia lub skrócenia ich ресурсu. Większość prac publikowanych w tej tematyce dotyczy badania materiałów konstrukcyjnych, dla których proces uszkodzenia prowadzony jest w sposób kontrolowany w warunkach laboratoryjnych. W przypadku takiej procedury badawczej obliczenie parametru uszkodzenia w oparciu o znane z literatury definicje jest znacznie prostsze. Niestety w przypadku konstrukcji inżynierskich na ogół nie znamy dokładnej historii obciążenia i innych czynników (jak na przykład temperatury) i nie jesteśmy w stanie precyzyjnie wyznaczyć wartości parametru reprezentującego uszkodzenie materiału. Najbardziej celowe w tym wypadku wydaje się być poszukiwanie zależności (korelacji) pomiędzy wynikami przeprowadzonych pomiarów a parametrem uszkodzenia obliczonym na podstawie znanych z literatury i zweryfikowanych eksperymentalnie definicji.

## 2. Treść rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Jasińskiego liczy 133 strony i jest podzielona na 7 rozdziałów i spis literatury.

Rozprawa rozpoczyna się od spisu oznaczeń, pojęć i definicji, bezpośrednio po którym następują cytaty z pierwszej w spisie pozycji literatury definiujące podstawowe pojęcia: zmęczenie materiału, naprężenia zmęczeniowe oraz zmiany strukturalne. Z nieznanymi przyczyn autor nie umieścił w tym miejscu podobnych definicji dotyczących pełzania, które jest także procesem zaobserwowanym w trakcie eksploatacji obiektów badań opisywanych w rozprawie. Po zdefiniowaniu podstawowych pojęć autor rozprawy zamieścił jej streszczenie, w którym opisał krótko cel pracy oraz uzyskane wyniki. Po streszczeniu następują kolejne rozdziały pracy.

### Wprowadzenie

Rozdział ten rozpoczyna się od sformułowania celu pracy. W dalszej części rozdziału zamieszczony jest opis konstrukcji i zasady działania turbin energetycznych ze szczególnym uwzględnieniem będącej obiektem badań turbiny parowej 13K225. W tej części pracy wymienione i po krótko omówione są także zjawiska wywołujące degradację materiału łopatek turbiny: pełzanie oraz zmęczenie. W kolejnym podrozdziale autor rozprawy przedstawia stosowaną w praktyce metodę opisu stanu materiału łopatek turbiny, a następnie przechodzi do omówienia metod magneto – indukcyjnych, w tym stosowanej w badaniach będących podstawą rozprawy metody spektroskopii impedancji.

### Cel i zakres

W tym rozdziale sformułowany został cel badawczy rozprawy. Celem tym jest wymieniona przez autora na początku rozdziału „potwierdzenie przydatności spektroskopii impedancyjnej do realizacji diagnostyki prewencyjnej, która na wczesnym etapie pozwala wykrywać zmiany degradacyjne struktury materiału”. W dalszej części rozdziału doktorant precyzuje ten cel: rozprawa ma wykazać, że stosowana w badaniach metoda spektroskopii „może zrealizować założenia tzw. diagnostyki prewencyjnej, w kierunku określenia stanu materiału elementu eksploatowanego w zakresie nieciągłości struktury (wypracowania struktury) w sposób skuteczniejszy od konwencjonalnych metod badań nieniszczących”. Aby osiągnąć ten cel doktorant zamierza znaleźć korelacje między wynikami badań unormowanych składowych impedancji z wynikami badań strukturalnych, mikrotwardości i kwadratu szerokości linii dyfrakcyjnych promieni rentgenowskich.

W kolejnych podrozdziałach doktorant opisuje obszernie zastosowaną w badaniach metodę spektroskopii impedancji. Ta część pracy jest opracowana na bardzo dobrym poziomie i zawiera wyczerpujący opis zarówno samej metody badawczej jak i sposobu opracowywania wyników badań. Opisane są dokładnie charakterystyki częstotliwościowe cewki pomiarowej z rdzeniem i bez rdzenia: amplitudowa i fazowa (charakterystyki Bodego), czy też będące podstawą prowadzonych badań zależności pomiędzy unormowanymi składowymi impedancjami (wykresy Forstera) na podstawie których doktorant wyznacza wartości właściwego przewodnictwa elektrycznego oraz przenikalności magnetycznej (parametrów, dla których poszukiwana jest korelacja ze stopniem uszkodzenia materiału).

#### Charakterystyka i opis materiału badawczego

W kolejnym, trzecim rozdziale doktorant opisuje procedurę doboru i przygotowania próbek, które mają podlegać badaniom. Opisana jest część wysokoprężna turbiny parowej 13k225. Obiektami badań opisywanych w rozprawie są łopatki drugiego, szóstego i dwunastego stopnia tej turbiny. Podane są warunki pracy turbiny (temperatura i ciśnienie pary przepływającej przez turbinę) skład chemiczny materiału łopatek oraz sposób przygotowania łopatek do wykonania pomiaru. Niestety nie jest wyznaczony stan naprężenia w łopatkach a co za tym idzie nie znamy historii obciążenia materiału. Opisana jest ogólnie konstrukcja turbiny i warunki jej eksploatacji (praca nieustalona i ustalona). Niestety nie jest dostępny materiał łopatek w stanie przed eksploatacją oraz łopatek które uległy zniszczeniu w trakcie eksploatacji, co utrudnia prowadzoną analizę. Przygotowanie łopatek do badań polegało na odcięciu ich od bandaża i przycięciu na wymiar pozwalający na umieszczenie całej objętości materiału w cewce badawczej. Niestety operacja ta nie zapewnia podobieństwa kształtu łopatek pochodzących z różnych stopni turbiny. W celu uwzględnienia różnic w wymiarach i kształcie łopatek pochodzących z różnych stopni turbiny obliczany jest współczynnik wypełnienia cewki przez łopatkę turbiny. W dalszej części rozdziału opisana jest po krótko procedura przygotowania próbek do badań metalograficznych.

#### Stosowana aparatura badawcza

W rozdziale czwartym autor rozprawy opisuje stanowisko do badań materiału łopatek turbiny metodą magneto-indukcyjną. Stanowisko to składa się z analizatora impedancji i cewki pomiarowej, wewnątrz której umieszczane są próbki materiału. W dalszej części rozdziału zamieszczony jest dokładny opis i parametry używanego do pomiarów analizatora impedancji oraz miernika impedancji i rezystancji cewek indukcyjnych. Wykonywany na opisanym stanowisku badawczym pomiar parametrów charakteryzujących stopień uszkodzenia materiału jest pomiarem globalnym a otrzymana wartość danego parametru jest wartością średnią dla całej objętości próbki materiału.

Niestety, uszkodzenie materiału jest procesem lokalnym co może mieć negatywny wpływ na czułość zastosowanej techniki pomiarowej.

#### Wyniki badań

W rozdziale piątym przedstawione są w pierwszej kolejności wyniki pomiarów mikrotwardości materiału łopatek turbiny po eksploatacji oraz wynik pomiaru dla materiału o podobnym składzie chemicznym w stanie przed eksploatacyjnym (materiał nie uszkodzony). Według teorii mechaniki uszkodzenia ośrodków ciągłych (J. Lemaitre, *A course on Damage Mechanics*, Springer, 1996) pomiar twardości może być podstawą określenia stopnia uszkodzenia (parametru uszkodzenia).

Kolejny podrozdział opisuje wyniki uzyskane w statycznej próbie ściskania, której poddano próbki cylindryczne wycięte z łopatek turbiny oraz materiału nieuszkodzonego. Uzyskane wyniki przedstawione zostały w postaci tabelarycznej. Z powodu wysokiej ciągliwości materiału, nie udało się doprowadzić próbek do zniszczenia. Autor rozprawy uznał, że jedynym miarodajnym parametrem jaki udało się wyznaczyć w wyniku tych prób jest umowna granica plastyczności przy ściskaniu.

W dalszej części rozdziału opisana jest procedura przygotowania oraz wyniki badań zglądów metalograficznych materiału łopatek turbiny. Opisane są wywołane warunkami eksploatacji zmiany struktury materiału oraz skład chemiczny obserwowanych na zglądach faz. Pośród zaobserwowanych zmian najważniejsze to: wydzielenia węglików na granicach ziaren pierwotnego austenitu oraz rozpad martenzytu. Doktorant zaobserwował także pustki wewnątrz pierwotnego austenitu, co wskazuje na pełzanie wysokotemperaturowe jako główny mechanizm uszkodzenia materiału. Obserwowane na zglądach metalograficznych zmiany niestety nie pozwalają na określenie ilościowe stopnia uszkodzenia materiału, a co za tym idzie oszacowanie trwałości resztkowej materiału.

Kolejny podrozdział zawiera wyniki pomiaru kwadratu szerokości linii dyfrakcyjnych oraz parametrów sieciowych roztworu żelaza z chromem. Jakkolwiek z literatury znany jest fakt, że parametr ten jest związany z gęstością dyslokacji, nie jest jasne w jaki sposób doktorant ma zamiar powiązać wyniki pomiarów z uszkodzeniem materiału (parametrem uszkodzenia).

W kolejnym podrozdziale doktorant przechodzi do zaprezentowania wyników pomiarów magnetoindukcyjnych wykonanych na próbkach materiału przygotowanych według podanej wcześniej procedury. W postaci wykresów przedstawione są i omówione charakterystyki częstotliwościowe indukcyjności i rezystancji szeregowej dla łopatek drugiego, szóstego oraz dwunastego stopnia turbiny. Na dalszych wykresach przedstawione są charakterystyki częstotliwościowe fazy mierzonego sygnału oraz zależność modułu impedancji od fazy mierzonego sygnału.

#### Analiza wyników pomiarów

W kolejnym, szóstym rozdziale doktorant przechodzi do analizy otrzymanych wyników pomiarów. Na początku omówiona jest procedura obliczania współczynnika wypełnienia przekroju cewki materiałem próbki. Jest to ważny element procedury badawczej ponieważ jak już zostało wspomniane wcześniej, łopatki turbiny mają zmienne pole przekroju i nie jest zachowane podobieństwo geometryczne pomiędzy łopatkami kolejnych stopni turbiny. W dalszej części rozdziału przedstawione są i omówione wykresy względne zmian unormowanych składowych impedancji, zmian składowych impedancji oraz kąta fazowego.

Kolejny podrozdział zawiera analizę względnych zmian unormowanych składowych impedancji. Na kolejnych rysunkach przedstawiono te zmiany dla kolejnych par próbek pochodzących z turbiny po eksploatacji oraz wykresy zbiorcze. Autor rozprawy w podsumowaniu tych wyników stwierdza, że zmiany kąta przesunięcia fazowego ujawniają zmiany własności fizycznych materiału a

przeprowadzona analiza zmian składowych impedancji wskazuje na zróżnicowanie procesu degradacji struktury w poszczególnych testowanych grupach. Jest to uwidocznione w istotnych zmianach przenikalności magnetycznej oraz przewodności elektrycznej.

W kolejnym podrozdziale autor rozprawy próbuje powiązać wyniki badań magneto - indukcyjnych ze zmianami parametrów fizycznych materiału. W tej części pracy zacytowany jest wykres zmian wybranych parametrów fizycznych (twardość, przenikalność magnetyczna, konduktywność, kwadrat szerokości połówkowej linii dyfrakcyjnych) w funkcji odkształcenia wzdłużnego. Nie są to jednak badania doktoranta, i nie jest jasne jakiego materiału dotyczą. Dla materiału badanego zilustrowany został mechanizm uszkodzenia struktury w wyniku pełzania. Nie wiadomo czy jest to też mechanizm degradacji dla materiału, dla którego wyniki zmian parametrów fizycznych pokazano na wspomnianym wykresie.

W kolejnym podrozdziale doktorant analizuje zmiany parametru uszkodzenia  $D$  obliczonego zgodnie z definicją zawartą we wspomnianej już monografii (J. Lemaitre, *A course on Damage Mechanics*, Springer, 1996). Parametr ten jest obliczany na podstawie badań twardości i odkształceń wzdłużnych odpowiadających granicy plastyczności przy ściskaniu. Analiza zmian parametru uszkodzenia jest niezwykle istotna, gdyż na jej podstawie można określić pozostały resurs dla badanych elementów turbiny. Wyniki obliczeń pokazano w postaci wykresów, z których wynika że najmniejszemu uszkodzeniu uległy łopatki 6 stopnia turbiny. Niestety brak jest przekonującej interpretacji uzyskanego wyniku.

#### Wnioski końcowe

We wnioskach doktorant przechodzi do zasadniczego celu rozprawy: znalezienia korelacji wyników badań magneto-indukcyjnych z parametrami fizycznymi materiału, wśród których brane są pod uwagę odkształcenie, twardość, kwadrat szerokości linii dyfrakcyjnych promieni rentgenowskich oraz parametry struktury materiału obserwowanej na zglądach metalograficznych. Autor użył korelacji Pearsona, a więc zakłada liniowy związek między mierzonymi wielkościami. Niestety nie jest wyznaczona korelacja mierzonych parametrów z parametrem uszkodzenia materiału  $D$ . Pozostałe wnioski dotyczą użyteczności zastosowanej metody magnetyczno-indukcyjnej do pomiaru stopnia degradacji materiału i określenia resursu maszyn i urządzeń stosowanych w energetyce.

#### Literatura

Literatura cytowana w treści rozprawy obejmuje 126 pozycji. Większość z tych pozycji dotyczy tematyki badań nieniszczących, inspekcji instalacji energetycznych, miernictwa wielkości elektrycznych oraz degradacji struktury materiałów konstrukcyjnych pod wpływem czynników eksploatacyjnych.

### 3. Uwagi ogólne

Materiał próbek pozyskany jest z trzech stopni turbiny. Przy założeniu, że łopatki z jednego stopnia turbiny mają taką samą historię obciążenia i stopień degradacji (uszkodzenia), mamy do dyspozycji trzy punkty pomiarowe na podstawie których będziemy poszukiwać korelacji pomiędzy mierzonymi wielkościami fizycznymi. Znalezienie wspomnianej korelacji dodatkowo utrudnia fakt, że nie znamy wartości początkowych (materiał w stanie dostawy) i wartości końcowych (odpowiadających np.

pęknięciu rozdzielczemu) mierzonych parametrów i nie wiemy w jakiej części zakresu ich zmienności się poruszamy. Łopatki z materiału o podobnym składzie chemicznym i nie znanych parametrach obróbki cieplnej nie mogą być traktowane jako wykonane z tego samego materiału co badany w pracy.

Nie jest znana także historia obciążenia materiału łopatek turbiny, co utrudnia znacznie analizę wyników badań. Podany w pracy wykres zmian temperatury i ciśnienia pary świeżej nie pozwala na określenie historii naprężenia i odkształcenia, która decyduje o stopniu uszkodzenia materiału.

Przygotowanie próbek do badań, polegające na odcięciu łopatek od bandaża i przycięciu na równy wymiar nie zapewnia uzyskania tego samego kształtu próbek dla wszystkich stopni turbiny. Jakkolwiek problem ten jest częściowo rozwiązany przez wprowadzenie współczynnika wypełnienia, to nadal łopatki z różnych stopni turbiny nie zachowują podobieństwa geometrycznego, co musi mieć wpływ na wynik pomiarów. Nie jest też znany wpływ dokładności pozycjonowania łopatki w cewce na wynik pomiaru.

W części pracy dotyczącej analizy otrzymanych wyników doktorant poszukuje korelacji pomiędzy mierzonymi za pomocą spektroskopii impedancji parametrami (przenikalności magnetycznej i przewodności właściwej materiału) a wielkościami fizycznymi zmierzonymi innymi metodami (mikrotwardość, kwadrat szerokości linii dyfrakcyjnych, parametry sieciowe). Znalezienie takiej korelacji na podstawie trzech punktów pomiarowych budzi wątpliwości.

Określenie stopnia uszkodzenia poprzez wyznaczenie wartości parametru uszkodzenie w oparciu o definicje zamieszczone w cytowanej już pozycji literatury (J. Lemaitre, *A course on Damage Mechanics*, Springer, 1996) pozwala na wyznaczenie trwałości rezydualnej materiału łopatek turbiny (pozostałego rewersu). Niestety autor rozprawy nie pokusił się o próbę obliczenia tego rewersu. Brak jest też przekonującej interpretacji uzyskanego wyniku – najmniejszego stopnia uszkodzenia łopatek 6 stopnia turbiny.

Opisane w ramach analizy wyników badań zmiany struktury i składu chemicznego poszczególnych faz materiału, jakkolwiek dostarczają ważnych informacji na temat mechanizmu jego degradacji (uszkodzenia), to nie określają ilościowo stopnia uszkodzenia i nie umożliwiają obliczenia trwałości rezydualnej materiału.

Autor rozprawy nie może też się zdecydować co do dominującego mechanizmu uszkodzenia i zniszczenia materiału łopatek turbiny. Na początku rozprawy podane są podstawowe definicje dotyczące zmęczenia materiałów konstrukcyjnych, a w rozdziale 6 (analiza wyników pomiarów) zamieszczony jest schemat degradacji badanego materiału w warunkach pełzania). W rzeczywistości oba wspomniane mechanizmy uszkodzenia są obecne w trakcie eksploatacji turbiny.

#### 4. Uwagi szczegółowe

Niestety, autor rozprawy nie ustrzegł się błędów edycyjnych i nieprecyzyjnych sformułowań. Poniżej kilka przykładów.

Spis ważniejszych oznaczeń, pojęć i definicji jest sporządzony niekonsekwentnie. Przy niektórych wielkościach fizycznych możemy znaleźć jednostki, przy niektórych ich brak.

Str. 9 „... można przyjąć związki liniowe pomiędzy degradacją struktury od pełzania wysokotemperaturowego a pomierzoną twardością, ponieważ zniekształcenia te są wielokrotnie

niższe [%] od odkształceń ...". Aby znaleźć związek liniowy, musimy przyjąć miarę degradacji. Czy „zniekształcenia” to deformacja wywołana odkształceniem pełzania?

Str. 9 „ ... wyznaczono parametr podobieństwa Poissona ...”. Czy chodzi o współczynnik podobieństwa Pearsona?

Str. 17 Pełzanie także wywołuje uszkodzenie materiału łopatek (inicjacja i wzrost pustek).

Str. 31 Na czym polega „uwzględnienie geometrycznej struktury badanego obiektu”?

Str. 36 „Wczesna analiza materiału wykonanego ze stali ...” tym materiałem jest stal.

Str. 36 „... odniesienie się do korelacji między stanem materiału a jego parametrami fizycznymi.” Korelacje możemy wyznaczyć pomiędzy wielkościami mierzalnymi (np. parametrami fizycznymi).

Str.37 Jak jest definicja „stopnia wypracowania łopatek”?

Str. 42 „ Przez  $R_c$  oznaczono rezystancję uzwojenia cewki ...” na rys 2.2 nie ma takiego oznaczenia.

Str. 69 „... wykrywają jedynie defekty stanowiące nieciągłości materiału w skali nano.” Jakie to są defekty?

Str. 72 „... posłużyły także do badań ściskających”. Zapewne chodzi o statyczną próbę ściskania.

Str. 111 „Dla małych zakresów odkształceń ...”. Jak definiujemy „mały zakres odkształcenia”.

Str. 115 „... twardości w Brinellach” Raczej „ twardość wg skali Brinella”.

Str. 119 „Wyniki badań [105] dowodzą liniowej zależności pomiędzy mikro twardością a granicą plastyczności”. To jest prawdziwe tylko dla materiału wykazującego izotropię granicy plastyczności. Jeśli chodzi o granicę plastyczności przy ściskaniu w kierunku, w którym porusza się wgłębnik, to jest to oczywiste.

Str. 122 „ W niskich i średnich zmianach odkształcenia ...”. Ponownie: jaka jest definicja niskich i średnich odkształceń?

Str. 123 „Dzięki tej metodzie można zrezygnować z badań powierzchniowych i objętościowych.” Czy rzeczywiście? Proponowana metoda metodą objętościową.

## 5. Wniosek końcowy

Pomimo wszystkich wymienionych w tej recenzji uwag rozprawa jest ambitną próbą wprowadzenia do praktyki inżynierskiej nowej techniki diagnostycznej. Wielką zaletą przeprowadzonych badań jest fakt, że zostały one wykonane na materiale turbiny parowej po okresie eksploatacyjnym. Większość badań, które można znaleźć w literaturze jest wykonywana na materiale uszkodzonym w sposób kontrolowany w warunkach laboratoryjnych co ogranicza możliwość ich zastosowania w warunkach eksploatacji urządzeń energetycznych.

Jak każda nowa technika badawcza spektroskopia impedancyjna w formie zaproponowanej w rozprawie wymaga udoskonalenia i dalszych badań potwierdzających jej skuteczność. Nie jest to

jednak wadą rozprawy, gdyż jak wynika z doświadczenia recenzenta każda metoda badawcza wymaga doskonalenia i weryfikacji przed jej wprowadzeniem do praktyki inżynierskiej.

Podsumowując, stwierdzam że przedstawiona rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wnosi istotny wkład w rozwój metod diagnostyki technicznej turbin energetycznych i innych urządzeń oraz instalacji stosowanych w energetyce.

Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska spełnia wszystkie wymagania stawiane przez odpowiednią ustawę i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

C. Soder