Warszawa, 15 czerwca 2022

dr hab. inż. Krzysztof Siwek, profesor uczelni  
Instytut Elektrotechniki Teoretycznej   
i Systemów Informacyjno-Pomiarowych  
Wydział Elektryczny  
Politechnika Warszawska

Recenzja rozprawy doktorskiej   
**mgra** **inż. Michała Pawła Maciusowicza**sporządzonego w oparciu o cykl publikacji **pt. „Analiza zjawiska magnetycznego szumu Barkhausena na potrzeby oceny właściwości  
powierzchniowych wybranych stali ferromagnetycznych”**

(zlecenie Prorektora ds. Nauki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego   
z dnia 26 kwietnia 2022)

**Ocena doboru tematyki rozprawy**

Recenzowana rozprawa doktorska pana mgra inż. Michała Pawła Maciusowicza jest cyklem 9 jednotematycznych publikacji dotyczących analizy zjawiska Barkhausena (Magnetic Barkhausen Noise – MSB) i jego zastosowania w badaniach właściwości wybranych rodzajów stali ferromagnetycznych. Rozprawa porusza ważną i aktualną tematykę w dziedzinie badań nieniszczących, łącząc jednocześnie zadania technologiczno-projektowe z nowoczesną analizą danych pomiarowych przy użyciu zaawansowanych metod oraz ich praktyczną weryfikację.

Przedstawione do oceny artykuły naukowe napisane są w języku angielskim (8 publikacji) i polskim (1 publikacja). Zbiór publikacji poprzedzony jest polskojęzycznym 33 stronicowym autoreferatem omawiającym badany problem z odniesieniami do zbioru publikacji.

Autoreferat przedstawia kolejno wykształcenie i karierę naukową i zawodową Doktoranta, temat rozprawy doktorskiej oraz wymienione 9 pozycji cyklu publikacji, następnie pozostałe osiągnięcia naukowe (4 artykuły o tematyce związanej z elektromagnetyzmem) i wyszczególnia wystąpienia Doktoranta na konferencjach naukowych (6 krajowych i 1 zagraniczne).

Dalszy punkt Autoreferatu to wymienienie wskaźników liczbowych. Sumaryczny Impact Factor Doktoranta w chwili składania rozprawy wynosił 20,305. Następnie, w zależności od wybranej bazy danych, podane są: indeks Hirsha, który wynosi 5 i 14 pozycji cytowanych 73 razy (Google Scholar), indeks Hirsha 5, a bez autocytowań 4 i 14 pozycji cytowanych 70 razy (ResearchGate) oraz indeks Hirsha 4 i 7 pozycji cytowanych 28 razy (Web of Science) czy indeks Hirsha, który wynosi 4 ,  
a bez autocytowań 2 i 9 pozycji cytowanych 37 razy (SCOPUS).

Czasopisma, w których opublikowane zostały artykuły tworzące rozprawę należą głównie do wydawnictwa MDPI oraz biblioteki cyfrowej IEEE Xplore, Wbrew obiegowym opiniom publikacja tam nie jest prostym zadaniem, w znakomitej większości recenzenci dokładnie sprawdzają przesłane prace a proces publikacji nie musi być szybki i łatwy.

Wskaźniki te świadczą o wysokim poziomie naukowym Doktoranta, potwierdzonym dużą liczbą cytowań jego prac. Takie wartości parametrów są, moim zdaniem, bardzo dobrym wynikiem na tym szczeblu rozwoju kariery naukowej i uzasadniają celowość złożenia rozprawy doktorskiej.

W rozdziale Opis dokonań Doktorant przedstawił Tezę rozprawy brzmiącą w następujący sposób: **wieloparametryczna analiza reprezentacji czasowo-częstotliwościowej przebiegu zjawiska szumów Barkhausena umożliwia pozyskanie nowych lub uzupełniających informacji o jakości materiałów stalowych poddanych obróbce**.

Cel pracy został sformułowany następująco: *opracowanie algorytmów wieloparametrycznej analizy materiałów ferromagnetycznych poddanych obróbce wpływających na właściwości w ich warstwach wierzchnich z zastosowaniem analizy reprezentacji czasowo-częstotliwościowych*,  
w ramach którego Doktorant wymienił 5 zrealizowanych zadań.

Zadania te to:

1. budowa systemu do obserwacji zjawiska magnetycznego szumu Barkhausena umożliwiającego kontrolę warunków wzbudzenia, akwizycję i analizę danych,
2. analiza reprezentacji czasowo-częstotliwościowych w kontekście monitorowania zmian właściwości sygnałów szumu Barkhausena,
3. opracowanie metod analizy bazujących m. in. na ekstrakcji cech czy głębokim uczeniu wzorców, umożliwiających wieloparametryczne opisanie reprezentacji TF (czasowo-częstotliwościowych) sygnałów MSB,
4. ocena wpływu parametrów pomiarowych na uzyskiwane rozkłady TF i wektory cech,
5. weryfikacja opracowanych metod na bazie próbek stalowych poddanych obróbce wybranymi metodami inżynierii powierzchni.

Kolejną, najobszerniejszą częścią Autoreferatu jest przewodnik po cyklu prac stanowiącym osiągnięcie naukowe czyli właściwy opis przeprowadzonych badań. We wstępie Doktorant nakreślił kontekst prowadzonych przez siebie badań naukowych. Uzasadnił potrzebę rozwijania metod badań nieniszczących materiałów w kontekście zapewnienia niezawodności i bezpieczeństwa użytkowania konstrukcji i urządzeń. Jedną z wielu metod badań nieniszczących jest rejestracja i analiza magnetycznego szumu Barkhausena. Rejestracja sygnału tego szumu oparta jest najczęściej na indukcji napięcia w przyłożonej cewce pomiarowej i zwykle nie sprawia trudności, choć niepowtarzalność i niski poziom sygnału dla szerokiego spektrum częstotliwości jest również ciekawym zadaniem badawczym. Z kolei z uwagi na silnie stochastyczny i dynamiczny charakter szumu Barkhausena wymagane są zaawansowane metody przetwarzania i analizy sygnałów.

Doktorant w pracach 1-3 zaprezentował modułowy system do pomiaru i rejestracji sygnałów analogowych. System ten umożliwia rejestrację sygnałów w kontrolowanych, stabilnych warunkach, poprawę jakości sygnałów ze zwiększoną odpornością na zakłócenia pochodzące ze środowiska zewnętrznego, pozwala ponadto na zwiększenie zakresu pasma częstotliwościowego rejestrowanych sygnałów.

Kolejnym tematem poruszonym w cyklu publikacji 1-3 było zbadanie możliwości użycia przekształcenia czasowo-częstotliwościowego, określanego w rozprawie jako TF, do analizy sygnałów MSB. Dyplomant przeanalizował wpływ różnych stanów odkształceń materiałów na uzyskane wyniki przekształcenia a ponadto zbadał możliwość wyodrębnienia cech opisujących te stany. Pokazał ponadto wpływ doboru parametrów pomiarowych i obliczeniowych (rodzaj i długość okna czy częstotliwość próbkowania) na wynik transformacji. Doktorant tutaj zestawia tzw. klasyczne cechy  
w dziedzinie czasu, określanym symbolem T, (np. minimum, maksimum, mediana, wartość średnia, liczba próbek) z „nowymi” cechami uzyskanymi ze spektrogramu (Tabela 1 z Autoreferatu: odchylenie standardowe, entropia widma itp.). Udowodnił, że „nowe” cechy TF charakteryzują się dużą zmiennością w zakresie plastycznym w porównaniu do cech T, co w znakomity sposób wzbogaca bazę informacji o procesie. Pokazuje ponadto wpływ prądu przy magnesowaniu stali ferromagnetycznej na „wygląd” i „jakość” spektrogramu (wyniku TF).

Prace 4 i 5 dotyczyły analizy warunków pomiarowych w analizie sygnałów Barkhausena. Analiza taka jest szczególnie ważna w badaniu materiałów wielofazowych. Doktorant przeprowadził szereg doświadczeń dla różnych materiałów, napięć i prądów wzbudzenia oraz przy różnych częstotliwościach. Omówił wpływ wyboru punktu i kąta pomiarowego na uzyskany spektrogram.

W artykule 6 przeanalizował możliwość rozwiązania zadania lokalizacji kilku obszarów aktywności MSB, co może mieć miejsce w przypadku blach specjalnych, anizotropowych, w których obserwuje się różne rodzaje aktywności ruchu ścian domenowych dla różnych kątów. Ważne jest, że analiza taka dotyczy całości materiału przy szesnastu ustawieniach przetwornika i dla różnych częstotliwości i rozmiarów okna.

Praca 8 prezentuje wyniki badań możliwości użycia różnych rodzajów transformacji czasowo-częstotliwościowych, zaliczanych przez Doktoranta do 3 grup: pierwsza to krótkoczasowa transformacja Fouriera (Short Time Fourier Transform – STFT), druga – transformacja falkowa (Continuos Wavelet Transform – CWT) a trzecia to wygładzony pseudo rozkład Wignera-Villa (Smoothed Pseudo Wigner-Ville Distribution – SPWVD). Każda z tych trzech grup charakteryzuje się innymi właściwościami, a co za tym idzie innymi uzyskanymi informacjami – cechami diagnostycznymi. Konieczność przeprowadzenia takiej analizy wynikała z wyciągniętych wniosków ze wcześniejszych prac Doktoranta, a mianowicie z trudnościami określenia w jednoznaczny sposób obszarów aktywności i poszukiwaniem najkorzystniejszych uwarunkowań (publikacje 6 i 7).

Pewnym podsumowaniem prac było zaprojektowanie, wytrenowanie i testowanie głębokiej sieci neuronowej typu CNN (Convolutional Neural Network) do klasyfikacji obrazów spektrogramów uzyskanych z analizy szumów Barkhausena. Doktorant operuje zamiennie pojęciem identyfikacji w sensie rozróżniania typów materiałów blachy stalowej i klasyfikacji w sensie zadania numerycznego sieci neuronowej. Warto jednak pamiętać, że pojęcia te nie są tożsame. Doktorant właściwie podzielił posiadaną bazę danych pomiarowych na dane uczące, walidacyjne i testujące, przeprowadził wybór architektury sieci i algorytmu uczącego, wykonał przeszukanie przestrzeni parametrów  
i zaprezentował uzyskane wyniki dla najlepszych z około 9000 sieci.

W podsumowaniu autoreferatu Doktorant streścił uzyskane rezultaty swoich prac badawczych i opisał pokrótce zrealizowane zadania. Uznał, że uzyskane rezultaty potwierdzają tezę pracy i wobec tego będzie kontynuował badania w tej tematyce. Nakreślił plany badań przy użyciu metod kwantyfikacji informacji i budowania wiedzy o stanie i właściwościach materiałów, w szczególności w stanach występujących w następstwie złożonych procesów obróbki materiałowej.

Autoreferat wieńczy krótkie, jednostronicowe streszczenie w języku polskim i angielskim.

Przedstawione do oceny publikacje naukowe były wcześniej recenzowane i rzeczywiście nie zawierają rażących błędów merytorycznych i językowych. Recenzent rozprawy doktorskiej może jedynie wskazać obszary, w których badania Doktoranta lub sposób prezentacji wyników w artykułach można uzupełnić lub przedstawić w inny sposób.

Całość rozprawy, rozumianej jako zbiór artykułów naukowych, ma charakter wybitnie interdyscyplinarny łączący automatykę, inżynierię materiałową i informatykę. Moim zdaniem rozprawa bez wątpienia plasuje się w dyscyplinie **Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika**.

Przedstawione artykuły tworzą logiczny ciąg badań naukowych obejmujących pomiary, przetwarzanie i analizę danych pomiarowych oraz wykorzystanie obliczonych parametrów (obrazów STFT, spektrogramów i parametrów z dziedziny czasu) do klasyfikacji stali ferromagnetycznych.

Omawiane zagadnienia są bardzo aktualne i ważne. Badania nieniszczące są uznaną formą diagnostyczną zarówno materiałów w skali makro jak i mikro. Przedstawione w rozprawie metody pozwalają na uzyskanie większej liczby parametrów diagnostycznych, i co ważne, a co zostało w rozprawie udowodnione, parametrów o lepszej jakości.

Dodatkowym atutem jest wykonanie przez Doktoranta modelu głębokiej sieci neuronowej, wytrenowanie go i zastosowanie do badanego problemu. Ta część pracy w znaczny sposób wzbogaca badania o aspekt informatyczny.

Zagadnienie omawiane w rozprawie jest dobrze zdefiniowane a sposób ich przedstawienia świadczy o dojrzałości naukowej Autora. Uzyskane wyniki badań posiadają dużą wartość praktyczną i aplikacyjną, mogą stanowić dla innych badaczy lub praktyków nieocenioną pomoc przy nieniszczącym badaniu stali ferromagnetycznych.

**Pytania i uwagi dyskusyjne**

W tej części recenzji chciałbym postawić pytania oraz szerzej naświetlić pewne uwagi dyskusyjne, nie umniejszające jednak w istotnym stopniu osiągnięć autora rozprawy:

1. Jak sam Doktorant wykazuje w pracy, charakter przebiegu zjawiska Barkhausena dla badanego materiału znajdującego się w danym stanie zależy również od warunków magnesowania. W pracy stosowana jest pewna procedura wstępnego badania umożliwiająca określenie odpowiednich uwarunkowań do prowadzenia danego badania, które to są następnie użyte do realizacji ostatecznego eksperymentu. Niemniej jednak, wydaje się, że zastosowanie wielu warunków umożliwić może pozyskanie odmiennych informacji  
   o badanym materiale. Czy w zrealizowanych pracach rozważano tego typu podejście i jakie może mieć ono znaczenie w ocenie badanych materiałów?
2. Doktorant utożsamia pojęcie identyfikacja i klasyfikacja w kontekście wyników działania sieci neuronowej. Uważam, że w tym przypadku właściwym byłoby klasyfikacja, jako zadanie  
   w dziedzinie eksploracji danych. Proszę Doktoranta o komentarz czy identyfikacja stanu badanego materiału jest pojęciem ścisłym i w tym zastosowaniu prawidłowym?
3. Stwierdzenie Doktoranta, że ‘…przy zastosowaniu głębokiego uczenia maszynowego sieć „sama” uczy się…’ jest nieprawidłowe. Proszę o korektę tego zdania (str. 30 Autoreferatu).
4. W artykule 9 zabrakło dokładnego opisu danych uczących użytych w uczeniu głębokich sieci neuronowych. Proszę o podanie liczby klas, liczby wzorców uczących i odniesienie się przy tym do stwierdzenia ze str. 31 Autoreferatu „wyuczono około 9000 sieci”, co jest olbrzymią liczbą zważywszy na to, że każda sieć posiada 12 warstw i prawdopodobnie liczbę parametrów liczoną w setkach tysięcy. Ile czasu trwało uczenie jednej sieci.
5. Czy zastosowanie głębokich sieci neuronowych jest uzasadnione w tym zadaniu? Czy przeprowadzono porównania z sieciami tradycyjnymi tzw. płytkimi (shallow)? Czy i na jaką poprawę wyników klasyfikacji można liczyć bazując na obrazach powstałych z przekształceń czasowo-częstotliwościowych względem sieci bazujących jedynie na wektorze cech powstałych z analizy sygnałów czasowych lub częstotliwościowych?
6. Ponadto w treści publikacji i na rysunkach występują drobne błędy interpunkcyjne, literówki, powtórzenia oraz ewidentne pomyłki edytorskie, które nie wpływają na pozytywny odbiór rozprawy.

**Oryginalne rezultaty uzyskane w rozprawie**

Do oryginalnych osiągnięć autora rozprawy należy zaliczyć:

1. Zbudowanie systemu pomiarowego z torem przetwarzania sygnału analogowego, układem pozycjonującym oraz dedykowanym oprogramowaniem kontrolno-sterującym umożliwiającego kontrolę warunków wzbudzenia oraz akwizycję i analizę danych.
2. Wykonanie wszechstronnej analizy pozyskanych danych w reprezentacji czasowej i czasowo-częstotliwościowych w kontekście monitorowania zmian właściwości sygnałów szumu Barkhausena.
3. Opracowanie metod analizy bazujących na ekstrakcji cech T i TF, umożliwiających wieloparametryczne opisanie reprezentacji czasowo-częstotliwościowych sygnałów MSB.
4. Analiza i ocena wpływu parametrów pomiarowych (częstotliwości próbkowania, rodzaj  
   i szerokość okna, parametry wzbudzenia, kąt pomiaru) na uzyskiwane wzorce rozkładów czasowo-częstotliwościowych i wektory cech.
5. Zaprojektowanie (dobór struktury, algorytmu uczącego i parametrów) głębokiej sieci neuronowej typu CNN, wytrenowanie jej i przetestowanie na rzeczywistych danych pomiarowych.
6. Weryfikacja opracowanych metod na bazie próbek stalowych poddanych obróbce wybranymi metodami inżynierii powierzchni.

Należy podkreślić, że Doktorant w rozprawie doktorskiej wykazał, że posiadł wiedzę  
i umiejętności samodzielnej pracy naukowej wymagane na tym stopniu rozwoju naukowca. Poprzez zaproponowanie i opracowanie nowych metod oraz ich dogłębne przetestowanie Autor wniósł istotny wkład w rozwój dyscypliny naukowej, co jest podstawą do wystąpienia o stopień doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie **Automatyka, elektronika i elektrotechnika**. W mojej ocenie przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, co wyczerpuje wymagania stawiane przez właściwą Ustawę.

**Uważam, że cele założone w pracy zostały spełnione a teza potwierdzona.**

Sformułowane w recenzji uwagi mają w większości charakter dyskusyjny i nie umniejszają  
w żaden sposób wartości opracowanej metody ani wysokiemu poziomowi badawczemu rozprawy.

**Wniosek końcowy**

Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa mgra inż. Michała Pawła Maciusowicza pt. „*Analiza zjawiska magnetycznego szumu Barkhausena na potrzeby oceny właściwości powierzchniowych wybranych stali ferromagnetycznych*” **spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w art. 187 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tekst jednolity: Dz. U. z 2020 r. poz. 85 z późn. zm.) oraz w art. 14 ust. 2 pkt. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule  
w zakresie sztuki (D. U. z 2017 r. poz 1789). Wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.**

dr hab. inż. Krzysztof Siwek, prof. uczelni