

Warszawa dnia 17.01.2022 r.

Dr hab. inż. Marek Kuchta, prof. WAT

Tel: 607403851

ORCID: 0000-0002-1330-7146,

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. **Karola Kuczyńskiego**

pt.: **„Ocena parametrów eksploatacyjnych sensora magnetoelektrycznego z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji”**

wykonanej na Wydziale Transportu, Elektrotechniki i Informatyki
Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego
w Radomiu

pod kierunkiem dra hab. inż. Jerzego Szymańskiego, prof. UTH Radom

1. Podstawa formalno-prawna opracowania recenzji

Podstawę formalno-prawną opracowania niniejszej recenzji rozprawy doktorskiej mgr inż. Karola Kuczyńskiego na temat: **„Ocena parametrów eksploatacyjnych sensora magnetoelektrycznego z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji”** stanowi pismo nr PK-042/52/84-2/dr-r/21 z dnia 9.12.2021 roku od Rektora Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego w Radomiu

2. Ocena rozprawy doktorskiej

2.1. Ocena merytoryczna zawartości pracy

W związku z rozwojem nowych materiałów magnetycznych i piezoelektrycznych możliwa jest budowa sensorów do pomiaru stałych pól magnetycznych. Zasada działania tego typu sensora polega na oddziaływaniu mechanicznym elementu magnetostrykcyjnego (wywołanego polem magnetycznym) na zespolony z nim piezoelektryk. Oddziaływanie to w literaturze opisane jest jako efekt magnetoelektryczny (w skrócie ME). Efekt ten polega na zmianach polaryzacji dielektrycznej (P) piezoelektryka wywołanych odkształceniem magnetostrykcyjnym współpracującego z nim magnetyka, po przyłożeniu do niego pola magnetycznego (H). Nowością opracowywanego sensora jest zastosowanie elementu magnetycznego o zamkniętym magnetowodzie. Taka konstrukcja przyczynia się do zmniejszenia wpływu zakłóceń na sygnał użyteczny, co zostało wykazane przez Doktoranta.

Dzięki tej koncepcji możliwe jest uzyskanie większej czułości tego typu sensorów, niż ma to miejsce w przypadku sensorów z rdzeniami o otwartym magnetowodzie, np. paskowymi.

SEKRETARIAT WTE i I

Wpłynęło dnia 24.01.22 (28.01.)

L.dz. 6

Przedmiotem badań Doktoranta były rdzenie pierścieniowe zwijane z taśm z wybranych stopów amorficznych na bazie żelaza. Wybrane do badań stopy są materiałami szeroko stosowanymi w przemysłowych urządzeniach energetycznych i sprzęcie elektronicznym.

Realizacja pracy w aspekcie poznawczym przyczyniła się do rozszerzenia stanu wiedzy w zakresie zjawiska magnetoelektrycznego i jego interpretacji fizycznej w odniesieniu do rdzeni zwijanych z taśm, wykonanych ze stopów amorficznych. W aspekcie użytkowym - praktycznym, na podstawie uzyskanych wyników badań, wybrany został stop magnetyka, charakteryzujący się dużymi odkształceniami magnetostrykcyjnymi, ze względu na możliwości zastosowania go w nowego typu sensorze pola magnetycznego o zamkniętym magnetowodzie. W oparciu o uzyskane wyniki analizy teoretycznej oraz badania pętli histerezy magnetycznej opracowany został prototyp magnetoelektrycznego sensora pola magnetycznego w kształcie pierścienia oraz zostały przeprowadzone podstawowe badania jego właściwości użytkowych. Opracowany w pracy prototyp może znaleźć zastosowanie przy budowie układów odzysku energii z otoczenia (energy harvesting) oraz zasilania urządzeń bezpieczeństwa i transmisji danych. W przyszłości przewidywane jest również zastosowanie sensora w badaniach nieniszczących do pomiaru pola magnetycznego w zakresie słabych pól. Metoda ta polega na detekcji pola rozproszenia, występującego w miejscach obecności powierzchniowych i podpowierzchniowych nieciągłości materiałowych obiektów ferromagnetycznych.

Rozprawa doktorska jest przedstawiona w języku polskim i zawiera 125 stron.

Rozdział 1 i 2: Wstęp ze zdefiniowaniem celu, tezy i zakresu pracy. Autor przedstawił również analizę stanu wiedzy przedmiotu rozprawy. Przeanalizowana literatura obejmuje publikacje od lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku aż do najnowszych publikacji z 2020 r.

Rozdziały 3, 4 i 5 to główne rozdziały rozprawy.

Rozdział 3: Analiza zjawisk występujących w sensorze magnetoelektrycznym.

W pracy znaleźć można opis i analizę zjawisk występujących w sensorze magnetoelektrycznym (zjawisko piezoelektryczne, zjawisko magnetostrykcyjne oraz efekt magnetoelektryczny).

Rozdział 4: Model matematyczny dla sensora pierścieniowego.

W pracy zastosowany został zmodyfikowany model matematyczny opisany przez prof. Mingsen Guo i Shuxing Dong w 2010r. Pierwotny model opisuje sensor magnetoelektryczny złożony z warstwowo połączonych pierścieni piezoelektryka i magnetyka. Natomiast w zbudowanym przez Doktoranta pierścieniowym sensorze pola magnetycznego cylindryczny pierścień wykonany jest z piezoelektryka, który pokryty jest warstwą magnetostrykcyjną w postaci taśmy amorficznej przyklejonej do powierzchni zewnętrznej materiału piezoelektrycznego. Jest to autorski model analityczny sensora pierścieniowego.

Rozdział 5: Sztuczna inteligencja

Kolejnym istotnym elementem pracy jest próba mariażu klasycznych metod matematycznych służących do modelowania sensorów pola magnetycznego z mechanizmami

współczesnej sztucznej inteligencji, tj. wielowarstwowa sieć neuronowa z perceptronową funkcją aktywacji (ang. Multilayer Perceptron Neural Network), maszyna wektorów podtrzymujących (ang. Support Vector Machine) w trybie regresji, proces regresyjny Gaussa (ang. Gaussian Process Regression) oraz drzewo klasyfikacyjne i regresyjne typu CART (ang. Classification and Regression Tree). Zastosowanie powyższych metod algorytmicznych pozwala w automatyczny i skuteczny sposób zidentyfikować parametry badanego sensora w oparciu o mierzalne rzeczywiste sygnały.

Rozdział 6 i 7: Zakres badań i wyniki eksperymentalne.

Opisane zostały elementy wybrane do badań. Doktorant przedstawił budowę prototypowego sensora magnetoelektrycznego oraz stanowisko na którym wykonywał pomiary. Przedstawił najistotniejsze pomiary, które zostały wykonane podczas przygotowania pracy: pomiary parametrów sensora magnetoelektrycznego oraz pomiary charakterystyk w trójosiowej cewce Helmholtza.

Rozdział 8 i 9: Analiza wyników badań i podsumowanie.

Doktorant wykonał pomiary dla czterech prototypowych magnetoelektrycznych sensorów w zależności od zastosowanych materiałów i porównał je z modelem matematycznym. Następnie przeprowadził proces dopasowania przebiegów pomiarowych z zastosowaniem wybranych sieci neuronowych w oprogramowaniu Python z zastosowaniem biblioteki Scikit-Learn: wielowarstwowej sieci perceptronowej z algorytmem gradientowym Levenbergha-Marquardta oraz sieci SVM typu regresyjnego (SVR). Doktorant stosując wielowarstwową sieć perceptronową ograniczył się w eksperymentach jedynie do dwóch warstw ukrytych. Z uwagi na małą liczbę próbek otrzymanych z pomiarów zastosował walidację krzyżową: metody leave one out, random sub-sampling przy podziale 70/30 (70% próbek uczących i 30% próbek testowych) oraz podziale 80/20. Dokonał sprawdzenia miar błędu MSE oraz współczynnika R^2 . Pokazał również zastosowanie drzew regresyjnych (CART) oraz procesów regresyjnych Gaussa (GPR).

Rozprawa doktorska zawiera spis literatury zawierający 135 pozycji, w tym 4 pozycje, w których Doktorant jest autorem lub współautorem.

2.2. Wybór tematu i poprawność jego sformułowania

Biorąc pod uwagę znaczenie przedstawionego wyżej problemu badawczego, wybór tematu recenzowanej rozprawy doktorskiej jest trafny i aktualny. Poruszone zagadnienie jest istotne nie tylko ze względów naukowych, ale przede wszystkim ze względów praktycznych. Temat rozprawy jest sformułowany jasno i precyzyjnie. Przeprowadzone przez Doktoranta badania w ramach przewodu doktorskiego, wskazują na oryginalne podejście do sposobu zastosowania uczenia maszynowego do przewidywania parametrów użytkowych magnetoelektrycznych sensorów pola magnetycznego.

2.3. Określenie celów i ich realizacja

Recenzowana rozprawa doktorska ma charakter naukowy i aplikacyjny. Doktorant zbudował cztery prototypy różniące się wielkością rurki piezoelektrycznej oraz materiału piezoelektrycznego i magnetostrykcyjnego. Posłużyły one do uczenia sieci perceptronowej

i innych metod regresyjnych: SVM w trybie regresji, drzew regresyjnych (CART) oraz procesu regresyjnego Gaussa (GPR).

Swoje badania Doktorat prowadził wykorzystując zbudowane stanowisko pomiarowe. Zbadane zostały: reakcja na zwrot pola magnetycznego oraz wpływ oddziaływania pola ziemskiego na sensor. Omówione zostały podstawowe parametry eksploatacyjne, które będą wykorzystywane w przyszłości do budowy inteligentnych sensorów. Przeprowadzone badania z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji (uczenia maszynowego) wykazują, że postawiony w rozprawie cel został osiągnięty. Doktorant wykazał, że zastosowanie sztucznej inteligencji - uczenia maszynowego pozwala zminimalizować błędy w stosunku do klasycznych modeli analitycznych. W dalszej przyszłości planowane jest zbudowanie inteligentnego sensora magnetoelektrycznego umożliwiającego pomiar stałych pól magnetycznych.

2.4. Oryginalny dorobek Autora rozprawy

Zastosowanie odpowiednio uformowanego magnetycznie materiału amorficznego umożliwiło uzyskanie czterech prototypów, które następnie zostały przebadane, a otrzymane wyniki posłużyły do uczenia maszynowego zastosowanego w pracy. Autor przedstawił swoje osiągnięcia w pięciu recenzowanych publikacjach polskich i zagranicznych. Autor posiada również inne publikacje z zakresu elektrotechniki niewymienione w literaturze. Należy w tym miejscu podkreślić, że opracowany przez Doktoranta sensor magnetoelektryczny został zgłoszony i uzyskał prawo ochronne - wzór użytkowy PL 067861 „Czujnik pola magnetycznego”.

2.5. Ocena poziomu naukowego rozprawy oraz uwagi dyskusyjne

Wysoko oceniam wykonanie przez doktoranta prototypy sensorów magnetoelektrycznych oraz stanowisko badawcze złożone z zastosowaniem zaawansowanej technicznie aparatury, w tym generatora arbitralnego i zasilacza bipolarnego (przetwornika napięcie-prąd). Pozwoliło to na uzyskanie unikalnych wyników pomiarowych, które zostały zastosowane do uczenia maszynowego.

Przygotowując recenzję przedmiotowej rozprawy uznałem, że istnieje potrzeba dodatkowego wyjaśniania części problemów badawczych realizowanych w pracy, dlatego poprosiłem Doktoranta o przesłanie mi pisemnych odpowiedzi na poniższe pytania:

1. Jakie były kryteria wyboru materiałów piezoelektrycznych i amorficznych do badań?
2. Dlaczego nie zaprezentowano zastosowania metody elementów skończonych do modelowania?
3. Czym różnią się prototypy P2 i P3 oraz dlaczego przebieg napięcia wyjściowego z prototypu P1 zawiera dodatkowo przebieg o wyższej częstotliwości?
4. Jaki stosowano podczas pomiarów wzmacniacz z detekcją zmiany fazy?
5. Czy wykonano inne pomiary, np. napięcia wyjściowego w zależności od stałego pola magnetycznego?
6. Moim zdaniem wadą pracy jest niewielka ilość sensorów, w oparciu o które dokonano analizy z zastosowaniem uczenia maszynowego. Uniemożliwia to dokonania w pełni

analizy parametrycznej oraz określenia faktycznej skuteczności zastosowanej metody uczenia maszynowego.

7. Dlaczego ograniczono się w pracy tylko do czterech metod regresji i aproksymacji?
8. Co wynika z weryfikacji wyników pomiarów? Czy istnieje możliwość przedstawienia błędów MSE w jednostkach wartości mierzonej (np. MSE 0057, to dużo, czy mało?)
9. Czym był podyktowany brak analizy niepewności pomiarowej odniesionej zarówno do metody badań, układu pomiarowego, jak też otrzymywanych rezultatów?

2.6. Ocena doboru literatury

Zakres literatury jest dostatecznie szeroki, zawiera 135 pozycji i odpowiada tematyce podjętych badań. Dobór i wykorzystanie źródeł jest prawidłowy i obejmuje okres od lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku do najnowszych z 2021r. 73% udział aktualnych pozycji obcojęzycznych świadczy o dobrej znajomości literatury zagranicznej i krajowej Doktoranta w tej dziedzinie. Liczba pozycji bibliograficznych wydanych po 2015 r. to 53. Recenzowana rozprawa doktorska porządkuje i poszerza aktualny stan wiedzy oraz wskazuje kierunki dalszych prac rozwojowych sensorów magnetoelektrycznych.

2.7. Ocena układu pracy i jej strony edytorskiej

Struktura i układ pracy jest zbliżony do powszechnie przyjętego w rozprawach doktorskich i obejmuje: wstęp, przegląd literatury, cel rozprawy, tezę naukową i założenia do tezy, materiały i metody badań, wyniki badań, wnioski i podsumowanie końcowe oraz spis literatury.

Układ pracy jest logiczny i nie jest nadmiernie rozbudowany. Kolejność rozdziałów merytorycznych (3, 4, 5, 6) jest właściwa. Praca napisana starannie choć autor nie ustrzegł się szeregu błędów edytorskich, które jednak nie wpływają na obniżenie wartości merytorycznej pracy. Kilka przykładowych niedociągnięć edytorskich, których moim zadaniem należy w tego typu opracowaniach unikać, pozwolę sobie przytoczyć:

- Na stronie 60 pierwsze zdanie ma obcięty początek.
- Zamiennie używane jest pojęcie pole sterujące i pole wzbudzające choć powinno być przyjęte w całej pracy jedno określenie.
- Różne wielkości czcionek w spisie literatury.
- Dowolny zapis wartości wielkości fizycznej, np. 500Hz, lub 500 Hz.
- Niezrozumiały zapis na str. 71 – wzmacnienie $G = 2$ czyli + 6dB.
- Mało precyzyjne pojęcie – charakterystyka przetwarzania, które autor używa opisując układy pomiarowe własnej konstrukcji,
- Str. 69 – brak rys. 4.7, 4.0, które autor przywołuje w tekście rozprawy
- Str 69 – niejednoznaczne przywołanie rozdziału 7.3, w opisie kompensacji składowych pola ziemskiego oraz zależności 6.6.
- Niepoprawny zapis zależności 6.8 i 6.9.
- Str. 76 – pomiary przeprowadzono na stanowisku ...rys. 6.5 i 6.6. Przywołane rysunki przedstawiają budowę sensora przeznaczonego do badań a nie stanowiska.
- Pomiary wykonano na stanowisku eksperymentalnym opisanym w rozdziale 4.3. Brak w pracy takiego rozdziału.

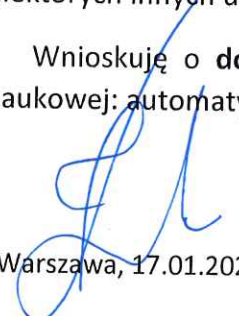
- Str. 76 – wykonano pomiary odkształcenia na próbce nr P2, ... z przedstawionego wykresu wynika, .., rys.7.1. Pod rysunkiem jest przywołana P3.
- Zapis – uzyskiwana moc (str. 83) .. wynosiła około 5 μ W amplitudy, jest niepoprawny

3. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska pt.: „Ocena parametrów eksploatacyjnych sensora magnetoelektrycznego z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji” stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i badawczego. Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy dyscypliny naukowej „automatyka, elektronika i elektrotechnika” i świadczy dobrze o ogólnej wiedzy teoretycznej Doktoranta, a także o umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w tej dyscyplinie.

Uwzględniając znaczenie podjętych badań, ich nowatorski charakter, kompleksowość, wartości poznawcze i aplikacyjne pracy oraz dobrą znajomość podjętej problematyki badawczej przez Doktoranta oraz umiejętności prawidłowego wyciągania wniosków, stwierdzam, że rozprawa doktorska pt.: „Ocena parametrów eksploatacyjnych sensora magnetoelektrycznego z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji” mgr inż. Karola Kuczyńskiego spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim określonym w ustawie z dnia 18 marca 2011r. o zmianie ustawy – prawo o szkolnictwie wyższym, ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki oraz o zmianie niektórych innych ustaw (Dz. U. 2011 nr 84, poz. 455).

Wnioskuje o **dopuszczenie** rozprawy doktorskiej do publicznej obrony w dyscyplinie naukowej: automatyka, elektronika i elektrotechnika.



Warszawa, 17.01.2022 r.