

Radom, 30 grudnia 2019

dr hab. Tadeusz Szumiata, prof. nadzw. UTH Radom
Katedra Fizyki, Wydział Mechaniczny
Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny
im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu

Recenzja pracy doktorskiej

Zastosowanie zjawiska gigantycznej magnetoimpedancji w taśmach ze stopów amorficznych w budowie sensorów pola magnetycznego

Autor: mgr inż. Piotr Gazda
Promotor: Prof. dr hab. inż. Roman Szewczyk,
Promotor pomocniczy: dr inż. Michał Nowicki

prowadzonej na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej

1. Wstęp

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Piotra Gazdy została wykonana na zlecenie Dziekana Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej z dnia 30.09.2019.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy, ocena tematu i celu pracy

Recenzowana praca doktorska posiada cechy interdyscyplinarności. Obejmuje zarówno zagadnienia z zakresu budowy maszyn, fizyki magnetyzmu i materiałów magnetycznych, inżynierii materiałowej, miernictwa wielkości magnetycznych oraz elektroniki, przetwarzania sygnałów i sterowania mikroprocesorowego.

Biorąc pod uwagę konstrukcyjny efekt końcowy pracy i możliwe aplikacje można jednoznacznie stwierdzić, że tematyka rozprawy mieści się w dyscyplinie naukowej „Budowa i eksploatacja maszyn” (wskazanej podczas otwierania przewodu doktorskiego) oraz w dyscyplinie „Inżynieria mechaniczna” (wg. nowej klasyfikacji).

Głównym tematem pracy rozprawy było wykorzystanie efektu gigantycznej magnetoimpedancji (GMI) w taśmach stopów amorficznych do skonstruowania czujników pola magnetycznego. Zjawisko GMI, polega na wyraźnej zmianie impedancji przewodnika o miękkich właściwościach ferromagnetycznych pod wpływem stałego pola magnetycznego. Skala zmian impedancji bywa w takich materiałach na tyle duża, że stwarza nowe możliwości pomiarów pola magnetycznego. Doktorant w pierwszej części swojego doktoratu wnikliwie przebadął właściwości magnetyczne i charakterystyki GMI wybranych materiałów amorficznych (przed i po obróbce cieplnej) oraz rozbudował istniejące modele analityczne zjawiska GMI. Efektem końcowym pracy było skonstruowanie w pełni funkcjonalnego prototypu (demonstratora) czujnika pola magnetycznego (zakres 700 A/m, niepewność 5 A/m) w oparciu o materiał wykazujący efekt GMI i realizującego kompensacyjny algorytm pomiarowy dzięki sterowaniu mikroprocesorowemu. Stanowi to rozwiązanie dotąd nieprezentowane literaturze. Ogromnym atutem pracy jest fakt, że do testowania sensora jak i do badania użytych materiałów Autor przygotował samodzielnie wiele niestandardowych układów pomiarowych wraz z oprogramowaniem. Znaczący dorobek publikacyjny Doktoranta, wszechstronność zrealizowanych zadań i potencjał aplikacyjny finalnej konstrukcji świadczy o dużych umiejętnościach badawczych i inżynierskich, jak również o wszechstronności Jego zainteresowań.

3. Merytoryczna ocena pracy

Przygotowane streszczenie (o wielkości jednej strony w wersji polskiej i angielskiej) oraz słowa kluczowe zwięźle zarysowują tematykę pracy i specyfikują zakres wykonanych zadań w ramach rozprawy doktorskiej. Odczuwa się jednak pewien brak wskazania zasadniczego celu i tezy pracy w samym streszczeniu.

We wstępie Doktorant zamieścił bardzo ciekawy rys historyczny metrologii magnetyzmu, omówił zakresy pól magnetycznych wraz z przykładami oraz dokonał przeglądu czujników pola magnetycznego. Ponadto w pracy została zawarta krótka informacja o zjawisku gigantycznej magnetoimpedancji (GMI) oraz sugestia dotycząca możliwości wykorzystania efektu GMI w amorficznych stopach magnetycznych do konstrukcji nowej generacji sensorów pola magnetycznego.

Cel pracy oraz wykaz wykonanych zadań jest jasny i kompletny. Sformułowano również tezę, że możliwe jest zbudowanie sterowanego cyfrowo, kompensacyjnego sensora pola magnetycznego, wykorzystującego zjawisko gigantycznej magnetoimpedancji w taśmach ze stopów amorficznych. Nie doprecyzowano jednak, czy parametry wspomnianego sensora mają być konkurencyjne wobec dotychczasowych rozwiązań.

Niezmiernie istotnym elementem ocenianej rozprawy doktorskiej jest bardzo starannie przygotowany opis dotychczasowego stanu wiedzy na temat efektu i zastosowań GMI (Rozdział 3). Na początku Doktorant bardzo trafnie przywołał fakty historyczne, które świadczyły m.in. że przez pewien czas efekt GMI wiązano błędnie ze zjawiskiem GMR, by dopiero później znaleźć właściwe wytłumaczenie poprzez związek z efektem naskórkowości. W kolejnych podrozdziałach Autor podał podstawowe wiadomości na temat impedancji przewodnika z materiału ferromagnetycznego, zakresy częstotliwościowe w zjawisku GMI oraz modele teoretyczne zjawiska GMI, jak również przedstawił typowe kształty krzywej GMI. Bazą dla wymienionych modeli impedancji w opisie zjawiska GMI są równania Maxwella, elektryczne i magnetyczne równania materiałowe oraz równanie Landau-Lifshitza dla ruchu momentu pędu powiązane z momentem magnetycznym. Został również sporządzony przegląd różnego rodzaju czujników pól magnetycznych wraz z zakresami pól i obszarami ich zastosowań. Ponadto przedstawione zostały prototypowe konstrukcje czujników pola magnetycznego wykorzystujące zjawisko GMI. Omówiono również nowoczesne materiały magnetyczne, w których występuje zjawisko GMI – w tym magnetyki amorficzne (taśmy i mikrodruty) – oraz procesy ich obróbki (relaksacji) termicznej.

W obszernym opisie stanu wiedzy Doktorant nie ustrzegł się błędów – głównie o charakterze typograficznym we wzorach i ich omówieniach. I tak np. wzory 3.4 i 3.5, definiujące impedancję elementu ferromagnetycznego magnetycznego ze spodziewanym efektem naskórkowości powinny być lepiej uzasadnione pod względem fizycznym. Ponadto prawdopodobnie bardziej adekwatny byłby tu opis przy użyciu impedancji różniczkowej za względu na nieliniową zależność namagnesowania materiału od pola magnetycznego, albo jawne rozpisanie szeregu z wyższymi harmonicznymi. Ponadto nie podano sensu fizycznego poszczególnych składowych tensora impedancji ζ . Zwłaszcza wzór 3.5 powinien być podczas obrony pracy wyprowadzony od podstaw. Ponadto we wzorach 3.14 i 3.17 występuje niezdefiniowany symbol „t” a nigdzie nie figuruje zapowiadany w tekście symbol „a” grubość taśmy. Należy to wyjaśnić i przeprowadzić rachunek jednostek, zwłaszcza że we wzorze (3.16) głębokość wnikania nie wychodzi w metrach. Ponadto pod wzorem 3.12 znajduje się niedokończona referencja literaturowa [cyt badań nad efektem naskórkowości], co utrudnia lekturę tego fragmentu. W podrozdziale dotyczącym quasi-statycznego modelu GMI we wzorze (3.21) na gęstość energii domen magnetycznych jeden z członów wyraża się w nieprawidłowych jednostkach. W dalszej części rozdziału sformułowanie „Model

oddziaływań wymiany - przewodności – model ten uwzględnia warunki wymiany przy wyznaczaniu wartości efektywnego pola magnesującego H'' jest niejasne. Nie wiadomo, co to są „warunki wymiany” oraz jaką faktycznie rolę pełnią w przyjętym modelu oddziaływania wymienne, które przy rezonansie ferromagnetycznym zaczynają być istotne dopiero wtedy, kiedy wzbudzone są fale spinowe.

W krótkim rozdziale 4 Autor wymienił warunki jakie musi spełniać materiał, by mógł być wykorzystany do konstrukcji efektywnego czujnika pola magnetycznego, wykorzystującego efekt GMI. Podano również informację, że do badań zdecydowano się wybrać stopy amorficzne na bazie kobaltu o różnym składzie chemicznym, oraz stop żelaza i niklu o stosunkowo dużej dodatniej magnetostrykcji. Większość próbek stanowiły paski o wymiarach 60 mm na 1 mm.

Na początku rozdział 5. dotyczącym metodyki badań Doktorant zaprezentował schemat blokowy oraz zdjęcie skonstruowanego układu do badania właściwości magnetycznych materiałów. Stanowisko pomiarowe składało się m.in. z następujących elementów: komputera PC, strumieniomierza, przetwornika napięcie-prąd, cewek Helmholtza 3D do kompensacji wpływu zewnętrznych pól magnetycznych, cewki długiej do magnesowania badanej próbki, magnetometru (strumieniomierza) i zasilaczy laboratoryjnych zasilających cewki kompensacyjne.

W opisie działania układu pomiarowego wkrađło się niejasne pojęcie „indukcji magnetycznej powietrza”. Podczas obrony należy wyjaśnić tą kwestię. Ponadto zbrakło też zwięzłego uzasadnienia, dlaczego zdecydowano się na zakres bardzo małych częstości od 0.5 Hz – 13 kHz, wiedząc, że wówczas głębokość wnikania jest wtedy bardzo duża.

Doktorant przygotował również samodzielnie stanowisko do obróbki cieplnej metodą wyżarzania joulowskiego, trochę myląc nazwane „stanowiskiem do indukowania anizotropii materiału”, ponieważ anizotropia wprowadzana przez pole magnetyczne wytworzone przez prąd płynący w próbce, to nie jedyny efekt wygrzewania. Na szczególne uznanie zasługuje fakt, że układ zapewniał prowadzenie procesu obróbki cieplnej w atmosferze ochronnej argonu i umożliwił bieżącą kontrolę efektów wygrzewa poprzez pomiar rezystancji taśmy. Przeprowadzono serię procesów wygrzewania próbek dla różnych wartości natężenia prądów wyżarzania w celu znalezienia jego optymalnej wartości pod kątem optymalnego efektu zmiany właściwości magnetycznych taśm amorficznych.

Najważniejszym układem eksperymentalnym było opracowane przez Doktoranta stanowisko do pomiaru efektu GMI w badanych materiałach. Zawarty w pracy opis, schemat i zdjęcie jasno informują o zasadzie działania układu. Najważniejszymi elementami układu były: cewki Helmholtza do kompensacji i zadawania pola magnetycznego, amperomierz, zasilacze laboratoryjne, komputer PC, i wysokoczęstotliwościowy mostek RLC. Odpowiedni dobór parametrów zasilacza i cewek Helmholtza wymuszających efekt GMI zapewniała wyjątkowo dużą rozdzielczość zadawania zewnętrznego pola magnetycznego na poziomie 0,5 A/m, co jest niewątpliwym osiągnięciem konstrukcyjnym Doktoranta. Kluczowym przyrządem układu doświadczalnego był wysokoczęstotliwościowy mostek RLC Microtest 6630E pozwalający na jednoczesny pomiar modułu impedancji, rezystancji stałoprądowej, indukcyjności i kąta przesunięcia fazowego w zakresie częstości 10 Hz – 10 MHz. Mostek pracujący w konfiguracji czteropunktowej zapewniał kompensację rezystancji, indukcyjności i pojemności uchwytu oraz doprowadzeń, dzięki czemu mierzone były rzeczywistości wartości GMI badanego materiału. Zadbano również o to, by uchwyt próbki nie wprowadzał zewnętrznych naprężeń, które poprzez zjawisko magnetostrykcji mogłyby zmienić stan namagnesowania próbek.

Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że wszystkie układy pomiarowe Doktorant opracował i skonstruował samodzielnie i dokonał ich pełnej automatyzacji dzięki sterowaniu komputerowemu poprzez aplikację w środowisku LabVIEW.

W rozdziale 6 poświęconym prezentacji wyników badań w pierwszej kolejności Doktorant przedstawił serię pętli magnesowania dla kilku rodzajów taśm amorficznych poddanych procesowi wygrzewania joulowskiego o różnych wartościach prądów wyżarzania. Efekty obróbki cieplnej miały zróżnicowany wpływ w zależności od rodzaju wyjściowego stopu amorficznego. Doktorant wykazał jednak, że dla wszystkich próbek zbyt duży prąd wyżarzania prowadzi do rekrytalizacji materiału i drastycznego pogorszenia właściwości magnetycznych. Ponadto dla większości badanych materiałów wygrzewanie z pośrednimi wartościami prądów prowadziło do zwiększenia koercji, ale również do zwiększenia namagnesowania nasycenia.

Na wszystkich wykresach pętli histerezy magnetycznej oś pionowa reprezentowała wielkość względną stosunku B/B_0 , gdzie B – to mierzona wartość indukcji pola magnetycznego w danej próbce, a B_0 – to – najprawdopodobniej – wartość indukcji pola magnetycznego odpowiadającego stanowi nasycenia w próbce wyjściowej (przed wygrzewaniem). Podczas obrony, proszę o wyjaśnienie, czy układ pomiarowy umożliwiał wyznaczanie bezwzględnych wartości indukcji magnetycznej w próbce – a najlepiej – wartości namagnesowania. Należy również podać, dla jakiej częstotliwości mierzone były pętle histerezy magnetycznej i jaki mógł być wpływ zmiany częstotliwości na wyniki. Tych informacji zabrakło w tekście rozprawy. Wskazany byłby również komentarz, dlaczego wygrzewanie prowadziło zazwyczaj do zwiększania się koercji i do dwufazowej charakterystyki magnesowania. Można by się raczej spodziewać, że umiarkowane wartości prądów wyżarzania powinny sprzyjać nanokrytalizacji, która skutkowałaby zmniejszaniem się (i tak już małej) koercji wyjściowego materiału amorficznego ze względu na sprzężenie wymienne między spinami nanoziaren poprzez matrycę amorficzną i uśrednianie się prawie do zera anizotropii magnetokrystalicznej (tzw. „random anizotropy effect”). Czy były podejmowane próby oszacowania rozmiarów ziaren po wygrzewaniu (XRD, TEM) i czy była mierzona temperatura próbki podczas wygrzewania?

Dla wszystkich serii wygrzewanych próbek zmierzono krzywe GMI, jako zależności zmiany impedancji (w stosunku do impedancji w zerowym polu) od przyłożonego pola magnetycznego. Podobnie jak w przypadku pętli histerezy zaprezentowano wykresy zarówno w szerokim zakresie pól (do 8000 A/m) jak i dla małych pól (do 1000 A/m). Większość próbek w stanie wyjściowym (amorficznym) charakteryzowało się jednoszczytową GMI, natomiast wszystkie stopy na bazie kobaltu po wygrzaniu wykazywały dwuszczytową krzywą GMI. Na podstawie uzyskanych krzywych Doktorant sporządził tabelaryczne zestawienie próbek z każdej serii, które odznaczały się maksymalnym współczynnikiem GMI (definiowany jako względna zmiana impedancji odniesiona do stanu maksymalnego namagnesowania). Największą zmianę (ponad 500%) zarejestrowano dla materiału $\text{Co}_{70}\text{Fe}_5\text{Ni}_2\text{Mo}_5\text{B}_3\text{Si}_{15}$ wyżarzane go prądem 800 mA, charakteryzującego się stosunkowo dużą koercją (ponad 120 A/m).

Niestety w podrozdziale 6.1 nie podano fundamentalnej informacji, dla jakiej częstotliwości były mierzone krzywe GMI i czy była to ta sama częstotliwość, dla której zmierzono pętle histerezy magnetycznej. Podczas prezentacji wyników w trakcie obrony pracy doktorskiej należy uzupełnić ten brak.

W podrozdziale 6.2 Doktorant zajął się systematycznym badaniem wpływu częstotliwości na wielkość efektu GMI. Pomiary przeprowadzono dla kilku częstotliwości z zakresu od 100 kHz do 10 MHz. Przedmiotem badań były wyłącznie te próbki z każdej serii, dla których w podrozdziale 6.1 stwierdzono maksymalną zmianę GMI. Doktorant podsumował otrzymane wyniki obserwacją, że dla najniższej z wybranych częstotliwości

efekt GMI jest pomijalnie mały, natomiast największa zmiana GMI występuje dla największej z zastosowanych częstotliwości, czyli 10 MHz.

Biorąc pod uwagę przedstawione w podrozdziale 6.2 zależności efektu GMI od częstotliwości można wydedukować, że krzywe GMI dla wszystkich próbek przedstawione w podrozdziale 6.1 były najprawdopodobniej mierzone dla częstotliwości 10 MHz, ale podczas obrony trzeba tę informację potwierdzić. Należy również wyjaśnić, czy następujące stwierdzenie z podrozdziału 6.2 „Dla wszystkich próbek o charakterystyce dwuszczytowej zwiększanie częstotliwości powodowały zwiększenie wartości pola anizotropii H_k oraz zwiększenie wartości pól magnesujących H dla których dana próbka była nasycona magnetycznie” sformułowane na podstawie krzywych GMI, czy też krzywych magnesowania $B(H)$, dla których nie zaprezentowano w rozprawie zależności częstotliwościowych.

W rozdziale 7 Doktorant wybrał model ilościowy, który najlepiej opisywałby krzywe GMI otrzymane z przeprowadzonych pomiarów dla badanych próbek taśm magnetycznych. Najpierw podany został prosty wzór na impedancję w ramach modelu opracowanego przez Machado, Rezendę i Rahmana, który uwzględniał zjawisko blokowania ruchu ścian domenowych przez prądy wirowe poprzez relację wiążącą podatność magnetyczną z pulsacją sygnału wymuszającego i czasem domenowej relaksacji magnetycznej. Bardziej rozwinięta wersja tego modelu zakłada ponadto zależność czasu relaksacji od częstotliwości i pola magnesującego.

Niestety w podawanych wzorach na impedancję wyniki nie wychodzą w prawidłowych jednostkach rezystancji. Wynika to z jednej strony z pomyleniem względnej przenikalności magnetycznej z przenikalnością bezwzględną oraz z przemieszaniem układu jednostek SI z układem CGS. Podczas obrony wskazane byłoby podanie poprawionych wzorów na impedancję. W rzeczywistości problem z jednostkami we wzorach na impedancję wynika z błędnie zapisanego wzoru na głębokość wnikania.

Opisany model analityczny GMI przyjmuje stałą wartość podatności magnetycznej materiału, co w przypadku materiałów miękkich magnetycznie jest całkowicie nieuzasadnione nawet dla małych pól magnesujących. W związku z tym Doktorant zaproponował w swojej pracy powiązanie wartości podatności magnetycznej z działającym na próbkę polem magnesującym, co niewątpliwie stanowi element nowości w badaniach zjawiska GMI. Autor zastosował analityczne przybliżenie ahisterezowego przebiegu krzywej magnesowania za pomocą funkcji typu eksponencjalnego (a nie „ekspotencjalnego” – jak napisano w tekście pracy). Następnie podzielił wartość namagnesowania przez wartość pola magnesującego i otrzymał analityczną zależność podatności od pola.

W tym miejscu warto by się jednak zastanowić, czy nie lepszym przybliżeniem podatności magnetycznej mogłaby tu być raczej pochodna namagnesowania względem pola. Byłoby to o tyle uzasadnione podejście, że we wzorach na impedancję chodzi o podatność niskopółową – a więc „różniczkową”, przy czym „punkt pracy” na krzywej magnesowania wyznaczany jest przez przyłożone stałe pole magnetyczne. Przy okazji podczas obrony należałoby podać oszacowanie amplitudy pól magnetycznych wytwarzanych przez prądy płynące w próbce, zwłaszcza że w pracy nie podano parametrów prądowych mostka RLC. Wtedy byłoby wiadomo, jak się mają wartości natężeń pól wewnętrznych w próbce do wartości przykładanego pola. Ponadto stałoby się jasne, czy w ogóle przy opisie impedancji w tak silnie nieliniowych materiałach magnetycznych można używać do opisu wzory z podatnością magnetyczną, czy też należałoby od podstaw wyprowadzić wzór na impedancję zakładając, że podczas jednego okresu prądowego AC układ jest przemagnesowywany według określonej zależności namagnesowania od pola magnetycznego (AC). Zapewne odpowiedź na to pytanie mogłaby dać zamiana układu mostka RLC (który jest swego rodzaju „czarną skrzynką”), na układ z generatorem przebiegu sinusoidalnego i oscyloskopem, który uwidoczniłby ewentualne nieliniowości odpowiedzi (np. jako wyższe harmoniczne). Warto tę

kwestię przedyskutować podczas obrony, zwłaszcza, że może ona tłumaczyć rozbieżności między modelem a danymi eksperymentalnymi dla zakresu niskich pól zewnętrznych, a więc w obszarze spodziewanej histerezy (np. Rys. 7.3 b). Wskazane by również było oszacowanie wartości głębokości wnikania i podanie informacji, jaki procent powierzchni przekroju taśmy bierze udział w przewodnictwie dla $f = 10$ MHz. A jak zmieniał się kąt przesunięcia fazowego wraz z częstotliwością? Można też zadać pytanie, czy skoro największy efekt GMI zmierzono właśnie dla tej największej dostępnej częstotliwości, to czy dla jeszcze większych częstotliwości należy oczekiwać wyraźnie większych wartości efektu GMI. Czy przyjęty model analityczny impedancji przewiduje jakieś maksimum GMI w funkcji częstotliwości? Podczas obrony warto też uzasadnić (przytaczając informacje z literatury) przyjętą postać zależności czasu domenowej relaksacji magnetycznej od częstotliwości i pola magnetycznego oraz wytłumaczyć, od jakich właściwości materiałowych mogą być uzależnione parametry c_0 , c_1 , c_2 , i c_3 wyznaczone z dopasowania modelu do danych doświadczalnych. Bardzo wskazany byłby też przykładowy wykres dotyczący zależności czasu relaksacji do pola – analogiczny do wykresu 7.2 dla podatności.

Należy podkreślić z całą mocą, że mimo pewnych niedoskonałości i niejasności, opracowany przez Doktoranta model odtwarza prawie idealnie dane eksperymentalne GMI w zakresie dostatecznie dużych pól magnetycznych (co widać np. na Rys. 7.3 a).

W rozdziale 8 Doktorant przedstawił nowatorską koncepcję prototypu sensora pola magnetycznego opartego na efekcie GMI. Istotą tej koncepcji było wykorzystanie właściwości krzywej dwuszczytowej GMI (posiadającej lokalne minimum impedancji dla zerowego pola magnesującego) i zastosowanie kompensacji wpływu zewnętrznego (mierzonego) pola magnetycznego poprzez wygenerowanie pola kompensującego o takim samym natężeniu i przeciwnym zwrocie. Dzięki temu silna nieliniowość i niemonotoniczność krzywej GMI przestaje być problemem a staje się atutem metody pomiarowej pola magnetycznego. Jednakże takie rozwiązanie wymaga zastosowania uzwojenia kompensującego oraz bardzo złożonego przetwarzania sygnałów ze sprzężeniem zwrotnym. W istniejących do niedawna systemach analogowych nie dałoby się zrealizować takich założeń. Doktorant wykorzystał jednak współczesne możliwości obróbki sygnałów i sterowania przy użyciu układów mikroprocesorowych. Pierwszy etap algorytmu polegał na pomiarze impedancji elementu czynnego GMI dla kolejnych wartości pola kompensacyjnego zmienianego ze stosunkowo dużym krokiem 5 A/m. Następnie w celu wyznaczenia minimum impedancji na dwuszczytowej krzywej GMI znajdowana była interpolacyjna krzywa drugiego stopnia na podstawie takich trzech punktów, z których środkowy reprezentuje mniejszą wartość impedancji od dwóch pozostałych. W końcowym etapie algorytmu zastosowano 10-krotnie mniejszy krok prądowy (0,5 A/m) poczynając od wstępnie obliczonego minimum na podstawie krzywej interpolacyjnej. Ostateczna wartość mierzonego pola zewnętrznego jest wybierana wtedy, gdy okaże się że każda kolejna zmiana odpowiadającego mu pola kompensacyjnego, w górę lub w dół, daje większe od uzyskanego wstępnie minimum wyniki impedancji. Taki algorytm znajdowania minimum to tzw. optymalizacja metodą newtonowską.

Do konstrukcji docelowego sensora Autor wybrał materiał, który nie odznaczał się maksymalnym współczynnikiem GMI, lecz taki, dla którego największy jest stosunek wartości impedancji w maksimum charakterystyki GMI do wartości w minimum lokalnym odpowiadającym zerowemu polu magnetycznemu. Autor przyjął, że stosunek większy niż 2 zapewnia jednoznaczne i odporne na potencjalne zakłócenia działanie realizowanego algorytmu pomiarowego. Stosując powyższe kryterium Doktorant wykazał, że najlepszym materiałem będzie stop amorficzny $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ni}_1\text{Si}_{15}\text{B}_{14}$ wyżarzany prądem 575 mA.

Konieczne jest jednak zweryfikowanie, czy w Tabeli 8.1 względne zmiany impedancji faktycznie podane są w omach, czy też reprezentują wielkości bezwymiarowe. Warto by też

podczas obrony zobaczyć dla kilku stopów zależności połowe GMI nie jako zmiany względem $H=0$ lub H_{max} , ale jako krzywe $Z(H)$ reprezentujące wartości „całego” modułu impedancji w omach.

Niezmiernie istotnym osiągnięciem Doktoranta było samodzielne skonstruowanie dwóch układów elektronicznych: układu do pomiaru impedancji oraz układu przetwornika źródła prądowego sterowanego napięciowo (do zasilania cewek kompensacyjnych). Pozwoliło to zminiaturyzować cały system pomiarowy i uniezależnić się m.in. od laboratoryjnego mostka RLC. Do budowy wspomnianych układów zastosowano najnowsze rozwiązania elektroniki analogowo-cyfrowej zapewniające poprawne działanie dla dużych częstotliwości (powyżej 1 MHz). Prawdliwość pracy układów została przetestowana przy użyciu platformy symulacyjnej LTSPICE. W następnej kolejności Doktorant zaprojektował i zamontował miniaturowe cewki kompensujące. Jednostką sterującą opracowywanego sensora była mikroprocesorowa platforma myRIO (Reconfigurable Input/Output) firmy National Instruments, przeznaczona do realizacji wbudowanych systemów sterujących. Układ sterujący umożliwiał nie tylko realizację założonego algorytmu pomiarowego, ale również mógł wykonywać autotest, w wyniku którego można było mierzyć charakterystykę GMI użytej próbki ze stopu magnetoimpedancyjnego. Dokonane porównania wykazały dużą zgodność wyników z rezultatami wcześniejszych pomiarów przy użyciu profesjonalnego mostka RLC.

Zwieńczeniem prac nad prototypem sensora był pomiar jego najważniejszych właściwości metrologicznych. W tym celu przygotowano układ testująco-kalibracyjny, z cewkami Helmholtza (do kompensacji pól zewnętrznych i zadawania pola wzorcującego) i magnetometrem rezystancyjnym. Zasadnicze elementy tego układu wykorzystywane były już w przy badaniach właściwości magnetycznych materiałów i wielkości efektu GMI (rozdział 5 pracy). Dołożona zostały tylko automatyczna procedura akwizycji i porównywania danych z sensora i układu kalibrującego. Potwierdzono wysoką liniową korelację wyników ($R^2 = 0,9999$) i wyznaczono bezwzględny błąd kalibracji na poziomie 5 A/m. Doktorant dokonał również sprawdzenia długoczasowego dryftu sensora przygotowując odpowiedni układ testujący przeznaczony do pracy w komercyjnej komorze izolowanej magnetycznie. Warto dryftu po jednej godzinie była ponad dwukrotnie mniejsza niż niepewność kalibracji, a więc w praktyce była do pominięcia. Autor wykonał jeszcze weryfikację dryftu temperaturowego w dedykowanym, komercyjnym kriostacie w zakresie temperatur -10 do 70°C i uznany został za pomijalny.

Podczas obrony warto skonkretyzować stwierdzenie, że „Zmierzony dryft temperaturowy jest znacząco mniejszy od oszacowanej niepewności wskazań”. Należy też doprecyzować, czy przyjęty zakres kalibracji +/- 700 A/m, to nieprzekraczalna granica możliwości sensora. Istotne jest też wiedzieć, jak długo skonstruowany czujnik pola może obyć się bez zewnętrznej kalibracji i czy można poprawić w przyszłości kalibrację tak, by jej błąd długookresowy był niewiele większy niż rozdzielczość odczytowa sensora (0.5 A/m). W pracy nie ma też jednoznacznej informacji, czy w docelowym prototypie sensora częstotliwość prądu AC płynącego przez stop GMI miała jedną ustaloną wartość $f=10$ MHz oraz czy prąd o tak dużej częstotliwości nie był źródłem zakłóceń dla innych urządzeń i czujników. Wreszcie, warto zadać pytanie, jaka była maksymalna szybkość pracy sensora. Chodzi przede wszystkim o to, czy sensor nadaje się tylko do pomiarów wolnozmiennych pól magnetycznych (DC), czy też można nim mierzyć również pola AC – a jeśli tak, to o jakiej maksymalnej częstotliwości.

W rozdziale 8 Doktorant zwięźle i treściwie podsumował efekty swojej pracy. Zamieszczenie takiego podsumowania jest całkowicie uzasadnione wobec obszerności i wielowątkowości rozprawy. Odczuwa się jednak pewien brak wyraźnego podkreślenia zasadniczych wniosków. Faktem jest jednak, że recenzowany doktorat to „rozprawa z tezą”.

której prawdziwości udało się dowieść Doktorantowi. Faktycznie, „możliwa jest budowa sterowanego cyfrowo, kompensacyjnego sensora pola magnetycznego, wykorzystującego zjawisko gigantycznej magnetoimpedancji w taśmach ze stopów amorficznych”.

W podsumowaniu zabrakło dyskusji o charakterze „rynkowo-porównawczym”. Chodziłoby o to, na ile realna jest możliwość przejścia od „demonstratora sensora” do komercyjnego wdrożenia i jakie cechy użytkowe lub ekonomiczne nowego typu sensora mogłyby uczynić go konkurencyjnym wobec istniejących rozwiązań. Być może krótka analiza tego zagadnienia będzie miała miejsce podczas obrony.

W ostatnim rozdziale 10 pracy wskazał kilka obszarów działań, które mogłyby poprawić parametry użytkowe sensora GMI, m.in.: zastosowanie miękkich magnetyków najnowszej generacji (o większej przenikalności a mniejszej koercji), wykorzystanie efektu AGMI (Asymmetric Giant Magnetoimpedance) oraz koncentratorów strumienia magnetycznego, dalsza miniaturyzacja układu jak również lepsze powiązanie parametrów modelu sensora z parametrami fizycznymi próbki. Moim zdaniem, jak to już było wspomniane, wskazana byłaby też analiza strategiczno-wdrożeniowa oraz poszukiwanie docelowych odbiorców i aplikacji.

4. Ocena redakcyjnej strony rozprawy

Wydruk pracy obejmuje 119 stron, przy czym wolumen podzielony został na rozdziały w sposób przemyślany i logiczny. Dzięki temu rozprawa posiada strukturę, która porządkuje bardzo różnorodną i obszerną treść.

Polszczyzna, którą posłużył się Autor pracy, jest generalnie poprawna. Niekiedy zrozumienie tekstu utrudnione było poprzez użycie żargonu specjalistycznego i nadmiernych skrótów myślowych (kilka przykładów wymieniono wcześniej w merytorycznym opisie pracy).

Angielskojęzyczna wersja streszczenia oddaje wiernie informacje zawarte w wersji polskiej, jednak miejscami stanowi zbyt „mechaniczne” tłumaczenie tekstu polskiego.

W całym tekście rozprawy można się dopatrzeć się dość dużej liczby literówek, ale błędy te nie utrudniają w istotnym stopniu lektury rozprawy.

Formuły matematyczne są w większości przypadków czytelne, choć czasem brakuje opisu niektórych symboli. Zdarzają się też drobne błędy w formułach i błędne opisy symboli oraz pewne niekonsekwencje w konwencji użytego układu jednostek (SI /CGS). Kwestia ta była szczegółowo wskazana w merytorycznej ocenie pracy.

Obok tekstu niezmiernie istotnym elementem pracy były liczne wykresy – głównie typu 2D, ale bardzo estetyczne, z różnymi kolorami dla poszczególnych linii. Na uwagę zasługują też kolorowe zdjęcia układów doświadczalnych oraz liczne, bardzo złożone schematy blokowe i diagramy, ilustrujące algorytmy sterowania poszczególnymi urządzeniami i elementami.

Wykaz referencji literaturowych jest bardzo wyczerpujący (150 pozycji) i dobrze dobrany pod względem tematycznym. Są wśród nich zarówno historyczne prace z pierwszej połowy XIX w. (dotyczące pionierskich badań nad elektromagnetyzmem), jak również najnowsze artykuły i rozprawy doktorskie merytorycznie powiązane z tematyką doktoratu (do których dostęp zbiegł się z ukończeniem niniejszej rozprawy). Oprócz prac autorstwa wielu grup badawczych na świecie są publikacje powstałe na rodzimym Wydziale Doktoranta – w tym artykuły, których jest współautorem.

5. Wniosek końcowy

Dokonując podsumowania szczegółowej części opinii o rozprawie pana mgr inż. Piotra Gazdy stwierdzam, że:

- Zagadnienie naukowe, którego rozwiązania podjął się Doktorant, zostało wybrane i sformułowane prawidłowo.
- Cel główny pracy został przez Doktoranta osiągnięty. Realizacja wszystkich, założonych celów szczegółowych pracy doktorskiej stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w zakresie dyscypliny naukowej „Budowa i Eksploatacja Maszyn” oraz w dyscyplinie „Inżynieria mechaniczna” (wg. nowej klasyfikacji).
- Do rozwiązania wybranego zagadnienia badawczego Doktorant innowacyjnie skorzystał z aktualnego dorobku naukowo-technicznego w zakresie budowy maszyn, fizyki magnetyzmu, inżynierii materiałowej, elektroniki, przetwarzania sygnałów i technik mikroprocesorowych, modelowania zjawisk jak również z metrologii wielkości elektromagnetycznych.
- W czasie realizacji pracy Doktorant udowodnił, że posiada duże umiejętności (w znacznym stopniu stopniu samodzielnego) prowadzenia badań doświadczalnych i teoretycznych, imponującym doświadczeniem w konstruowaniu doświadczalnych układów pomiarowych oraz wszechstronną wiedzą o charakterze interdyscyplinarnym.
- Wyniki badań uzyskane dzięki realizacji niniejszej pracy doktorskiej znacząco rozszerzają wiedzę dotyczącą możliwości konstrukcji czujników pola magnetycznego w oparciu o efekt gigantycznej magnetoimpedancji (GMI) w ferromagnetycznych stopach amorficznych i wskazują na ich potencjał aplikacyjny.

Stwierdzam, iż rozprawa mgr inż. Piotra Gazdy spełnia warunki uprzedniej Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki jak również obecnej Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Ustawa 2.0) oraz stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Oczekuję, że podczas obrony Doktorant odniesienie się do zapisanych w recenzji uwag krytycznych i komentarzy. Należy podkreślić, że większość z nich w istotnym stopniu nie wpływa negatywnie na ogólną wartość merytoryczną pracy doktorskiej, gdyż dotyczą one głównie sposobu opisu wyników badań.

Biorąc pod uwagę wszechstronność wykonanych zadań wykraczającą ponad typowe standardy doktoratu, jak również interdyscyplinarny i aplikacyjny charakter pracy, wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Piotra Gazdy.

Silnym uzasadnieniem wniosku o wyróżnienie pracy jest dorobek publikacyjny Doktoranta, który jest współautorem 8 publikacji naukowych, powiązanych tematycznie z rozprawą doktorską. Większość artykułów została opublikowana w czasopiśmie z listy JCR - w tym dwa z najwyższej kategorii punktowej wg. nowej klasyfikacji.