

Warszawa, 3. czerwca 2019 r.

Dr hab. Inż. Szymon Gontarz, prof. PW  
Instytut Pojazdów  
Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych  
Politechniki Warszawskiej  
Ul. Narbutta 84  
02-524 Warszawa

## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Olega Petruka

pt.: „Metoda kompensacji niezerównoważenia hallotronów cienkowarstwowych z wykorzystaniem tomografii rezystancyjnej”

Podstawa opracowania: pismo WMt.521.6.2019, z dnia 4.03.2019 r., Prodziekana ds. Nauki Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej, prof. dr. hab. inż. Jana Kościelnego.

### 1. Ogólna charakterystyka rozprawy oraz ocena tematu i celu pracy

Współczesnego świata nie sposób wyobrazić sobie bez układów sensorycznych, które są nieodłącznym elementem urządzeń znajdujących się w otoczeniu człowieka lub bezpośrednio są przez niego wykorzystywane np. przy pracach badawczych. Szczególną grupę czujników stanowią magnetometry. Jest tak nie tylko ze względu na powszechne i bardzo szerokie ich stosowanie, ale również z powodu ich rodzajowej jak i jakościowej różnorodności. Dodatkowo wraz z rozwojem nowych technologii typu MEMS/MOEMS (microelectromechanical system) i globalnym zwiększeniem nakładów produkcji, obserwuje się trend miniaturyzacji przy jednoczesnym utrzymaniu lub nawet wzroście wydajności. Dotyczy to również rozwoju czujników pola magnetycznego. Konsekwencją wymienionych procesów jest redukcja kosztów magnetometrów co wpływa na ich powszechną dostępność, natomiast często może odbić się to negatywnie na ich właściwościach metrologicznych. Żeby dotrzymać kroku potrzebom rynku jak i współczesnych naukowców prowadzone są liczne prace badawcze nad czujnikami pola magnetycznego. Chyba żaden inny sposób pomiaru wielkości fizycznej nie przeszedł tak gwałtownej i gruntownej przemiany biorąc pod uwagę to, co potrafią współczesne magnetometry, a co potrafiły jeszcze sto lat temu. Intensyfikacja prac nad nowymi technologiami lub ulepszaniem tych istniejących jest wciąż widoczna czego jednym z dowodów jest recenzowana praca mgr. Petruka. Doktorant obrał za cel opracowanie nowych metod kompensacji niezerównoważenia sygnału wyjściowego z cienkowarstwowych sensorów Halla. Proponowane metody są o tyle atrakcyjne, że dotyczą korekcji czujników w fazie ich produkcji a co za tym idzie, na etapie ich użytkowania, nie będą wymagać procesu kompensacji. Uprości to

zarówno konstrukcję magnetometru jak i ułatwi jego użytkowanie. Ponadto należy podkreślić, że zaproponowane podejście dotyczy nowatorskich cienkowarstwowych hallotronów grafenowych co dodatkowo wpisuje rozprawę w grupę prac zajmujących się innowacyjnymi technologiami, których rezultaty mogą wnieść nową jakość w dziedzinę, której dotyczą. Doktorantowi więc, należy się pochwalić za ambitne postawienie celu, któremu towarzyszy nowatorskie podejście, za przeprowadzenie ciekawych badań naukowych oraz ich interpretację, ale również za, w znacznym stopniu samodzielne przygotowanie sobie warsztatu pracy doświadczalnej i symulacyjnej. Należy bowiem wspomnieć tu o współpracy Doktoranta z Instytutem Technologii Materiałów Elektronicznych ITME oraz Przemysłowym Instytutem Automatyki i Pomiarów PIAP. Może właśnie dzięki niej, mgr Petruk dbał o aplikacyjny potencjał badań, które otworzyły możliwość praktycznego wdrożenia opracowanych w ITME hallotronów grafenowych do produkcji przekładników prądowych oferowanych przez firmę LUMEL S.A. Jednoznacznie więc stwierdzam, że temat pracy należy uznać za aktualny i ważny, zarówno z punktu widzenia badań podstawowych jak i stosowanych. Ambitny cel oraz zakres rozprawy doktorskiej świadczą o rozległym spektrum zainteresowań naukowych i umiejętnościach Doktoranta.

## 2. Ocena zawartości merytorycznej

We wstępie Doktorant przedstawił przekonujące motywacje do podjęcia badań nad opracowaniem metody kompensacji napięcia niezrównoważenia sygnału wyjściowego hallotyonu już w fazie jego produkcji. Takie podejście z użyciem laserowej korekty kształtu, nawet w przypadku kompensacji znacznych wartości tego napięcia, nie spowoduje zjawiska dryftu temperaturowego w czujniku. Wykorzystanie proponowanej techniki będzie możliwe dzięki autorskiej implementacji tomografii rezystancyjnej, za pomocą której będzie można wyznaczyć obszar korekcyjny. Natomiast w zamieszczonym tekście, Autor nie określił pełnego obszaru rynku gdzie wykorzystywane są hallotроны a ich popularność jest argumentowana lakonicznym stwierdzeniem „atrakcyjne parametry użytkowe” oraz kwestiami ekonomicznymi. Natomiast wraz ze skonstatowaniem ogromnej rozpiętości cen czujników hallotronowych, bez jej wytłumaczenia, Autor zaprzeczył swojej argumentacji. Następnie Doktorant, opisując trendy w rozwoju czujników Halla, posługuje się ogólnikami typu „znaczne polepszenie parametrów użytkowych” nie definiując ich. Bez tych informacji czytelnik nie jest świadom o jakich parametrach jest mowa oraz o jakich ich poziomach. Ponadto skrótowe oznaczenie „CE” w legendzie rysunku nie jest oczywiste.

Cel i zakres pracy został opisany bardzo przejrzysto i rzeczowo. Można je wręcz ująć w konkretnych punktach opisujących kroki, które mają doprowadzić do osiągnięcia sukcesu w postaci opracowania skutecznej metody kompensacji napięcia

niezrównoważenia w hallotronach wytworzonych z grafenu epitaksjalnego. Ów materiał z technologicznego punktu widzenia, będzie charakteryzował się nieciągłościami w swojej strukturze, skutkującymi asymetrią kształtu. Ta z kolei jest bezpośrednim powodem powstawania napięcia niezrównoważenia sygnału wyjściowego hallotronu. W rozdziale, moje wątpliwości budzi jedynie wybór geometrii hallotronu w kształcie krzyża, który został założony i na tym etapie nie został poparty żadnym logicznym wywodem ani nawet odniesieniem do istniejącej literatury.

Natomiast w następnym rozdziale, dotyczącym przeglądu stanu wiedzy, możemy natrafić na rozważania na temat kształtu sensorów hallotronowych, w którym dokonano przeglądu rozwiązań ze względu na kształt podając regułę ich doboru bazującą na kryterium symetrii oraz odległości konektorów. Nie wspomniano, a może Doktorant nie dotarł do literatury, gdzie wyróżnia się różnego rodzaju struktury krzyżowe i różnicuje właściwości hallotronów zbudowanych na takich rozwiązaniach. Rodzi się więc pytanie, czy biorąc pod uwagę właściwości epitaksjalnego grafenu, wybrano optymalny kształt? Pytanie tym bardziej jest donośniejsze, gdyż Autor obiecuje przeprowadzenie w rozdziale 7, analizy numerycznej hallotronów o strukturze symetrycznej – na próżno jej tam szukać. Większą część przeglądu wiedzy dotyczy zasady działania hallotronu, która zawiera opis podstawowego zjawiska Halla wraz z odpowiednim opisem charakterystycznych zależności, które prowadzą do zdefiniowania napięcia Halla. Jednakże zarówno finalny wzór 3.7 nie jest bez błędu jak i jego wyprowadzenie budzi wątpliwości. Również w tej, szczegółowej części rozprawy można znaleźć lakoniczne stwierdzenia typu: „Hallotrony znalazły szerokie zastosowanie w technice i przemyśle ze względu na stosunkowo prostą budowę, atrakcyjne parametry oraz niezawodność”, które nie dość, że nie wnoszą nic do rozpatrywanego problemu, to nie mają konkretnego uzasadnienia w tekście. Dodatkowo, jeśli już struktura krzyżowa została wybrana a priori, to dobrze by zamieścić ów podstawowy opis fizyczny odnosząc się właśnie do niej. W dalszej części zdefiniowano już parametry użytkowe hallotronów tj.: czułość, rezystancję wejściową i wyjściową, liniowość oraz charakterystyki szumowe. W tej części, kształt struktury, poniekąd został uwzględniony w postaci bezwymiarowego współczynnika kształtu. Ponadto wspomniano też o prądzie zasilania jako parametrze użytkowym, lecz w tekście nie można znaleźć rozwinięcia tego wątku. W opisie błędu liniowości wspomniano o rezystancji obciążenia jako czynniku ją warunkującym, natomiast nie można doszukać się jego definicji lub wytłumaczenia zależności. Rozdział 3 jest bardzo rozbudowany i w dalszej jego części Doktorant w wystarczającym stopniu szczegółowości opisuje znane technologie wytwarzania hallotronów. Tymczasem przy opisie technologii epitaksjalnej nie odnosi się bezpośrednio do wykorzystania grafenu. Natomiast, chyba w charakterze ciekawostki, możemy przeczytać na temat hallotronów do pomiaru trójosiowego. Dopiero w podrozdziale 3.5 można przeczytać rzeczową część opracowania, która dotyczy omówienia podstawowych przyczyn powstawania napięcia niezrównoważenia w sygnale wyjściowym hallotronu.

Wyszczególniono tam dwa źródła: napięcie wynikające z rezystancji asymetrii hallotronu oraz napięcie termoelektryczne. Natomiast istnieje pewien błąd konsekwencji, gdyż po zdefiniowaniu  $U_n$  jako napięcia niezrównoważenia, niespodziewanie pojawia się napięcie ohmowe  $U_{Ohm}$ , które ciężko odnieść do uprzednio zdefiniowanego napięcia. Tym bardziej jest to istotne, gdyż pojawienie napięcia ohmowego może być spowodowane wieloma czynnikami, które należy wziąć pod uwagę konstruując hallotron. We wzorach 3.16 i 3.17 pojawiają się pewne współczynniki, które nie zostały dokładnie zdefiniowane, przez co budzi wątpliwości choćby rachunek na jednostkach w tychże wzorach. W tym samym podrozdziale omówiono także podstawowe metody kompensacji napięcia niezrównoważenia. I tutaj należy się pochwalić, gdyż Autor w tych rozważaniach uwzględnił założoną strukturę krzyżową. Jako ostatnie rozwiązanie problemu niezrównoważenia napięcia hallotronu zostały opisane złożone przetworniki scalone, tym samym pokazując jak bardzo trzeba rozbudować układ pomiarowy, kiedy mamy do czynienia z niedoskonałym elementem hallotronowym.

Rozdział 4 traktuje o grafenie, jego właściwościach oraz potencjalnych korzyściach w zastosowaniach do budowy hallotronów. Autor przekonał mnie bezwzględnie, odnośnie potrzeby rozwijania czujników Halla zbudowanych z grafenu epitaksjalnego. Wskazał również podstawowe problemy, jakie należy rozwiązać, aby technologia hallotronów grafenowych mogła stać się powszechnie obowiązującą. Jako że jednorodność jego struktury stanowi poważną barierę, jeśli chodzi o aplikacyjność, to tym bardziej rysunek 4.3 wydaje się być bardzo interesujący. Niestety skala różni się o rzędy wielkości, uniemożliwia bezpośrednie porównanie struktury grafenu wytworzonego na folii miedzianej i na węglu krzemu.

Rozdział 5, podobnie jak i 4, stanowi przegląd stanu wiedzy, lecz w tym przypadku dotyczy technik tomograficznych. Właśnie w tej metodzie, a dokładnie w tomografii rezystancyjnej, Doktorant upatruje rozwiązania zdefiniowanego problemu badawczego. Jest to bardzo ciekawa koncepcja wiążąca się w najprostszym przypadku do zmierzenia się z efektem skali, bo właśnie ta technika wykorzystywana jest przez geofizyków do badania gruntu powierzchniowo rozległych na setki metrów kwadratowych. Co ciekawsze, wynik tej dziedziny nauki pokazują możliwość pozyskiwania obrazów 2-wymiarowych jak i 3-wymiarowych gruntów a w innych dziedzinach tj. chemia czy medycyna do obrazowania przepływów wielofazowych. Rozwiązaniem tomografii rezystancyjnej w zastosowaniu do hallotronów jest znalezienie odpowiedniego przekształcenia prostego i odwrotnego, które Autor postanowił znaleźć z wykorzystaniem metody elementów skończonych – czyli metody, która akurat w przypadku badań gruntów nie jest w stanie dać zadawalającego wyniku. Wyprowadzając odpowiednią postać tensora przewodności do parametrów modelu jako przewodność, Autor wykazał możliwość zamodelowania zjawiska Halla w hallotronie za pomocą metody elementów skończonych. Następnie zdefiniował równanie różniczkowe rozkładu mocy wydzielanej w powierzchni hallotronu, dla

którego wyliczenie potencjału elektrycznego było możliwe po zdefiniowaniu warunku brzegowego w postaci warunku Dirichleta lub Neumanna. Metoda analityczna teoretycznie pozwala na rozwiązanie tak zdefiniowanego zagadnienia, lecz w przypadku złożonej geometrii takiej jak struktura krzyżowa, zdecydowanie lepiej jest wykorzystać rachunek metody elementów skończonych. Warta podkreślenia jest strategia Doktoranta, która zakłada korzystanie z narzędzi typu 'open source'. W tym celu musiał On skorzystać aż z czterech programów, w których tworzył modele geometryczne układów hallotronowych, dokonywał dyskretyzacji stworzonych modeli, formułował warunki brzegowe, nadawał wartości parametrom, wprowadzał opis zjawisk fizycznych za pośrednictwem równań różniczkowych oraz znajdował ich rozwiązania a wreszcie wizualizował i analizował otrzymywane wyniki. Została wykonana tutaj lwią część pracy, która była niezbędna dla dalszych etapów pracy.

Rozdział szósty to jedynie jedna strona opisująca koncepcję metody kompensacji napięcia niezerównoważenia hallotronu. Zaproponowano rozwiązanie umożliwiające realizację pomiarów tomograficznych przestrzennego rozkładu rezystancji hallotronu przez cykl pomiarów z użyciem specjalnie zaprojektowanego układu elektrod grzebieniowych. W tak przyjętym rozwiązaniu rodzi się pytanie, czy zmodyfikowanie konektorów nie wpłynie na parametry użytkowe hallotronu, a jeśli tak to czy zmiany będą na tyle duże, że należy wziąć je pod uwagę? Rozdział kończy odwołanie do tezy, która nie została postawiona w dysertacji.

Rozdział siódmy dokładnie opisuje przedmiot badań a mianowicie hallotron cienkowarstwowy wykonany z grafenu epitaksjalnego uzyskany na węglíku krzemu w postaci warstwy pojedynczej jak i quasi swobodnej warstwy podwójnej. Tabel 9.1 zestawia parametry opracowanych w ITME hallotronów grafenowych – zestawienie jest wynikiem badań w ramach projektu GRAF-TECH finansowanego przez NCBiR co jawnie wykazał Doktorant. Przedstawione wyniki badań dowodzą wcześniejszych analiz teoretycznych jak również prowadzą do zdefiniowania specjalnego układu hallotronu do realizacji zaproponowanej kompensacji napięcia niezerównoważenia z zastosowaniem metody komutacyjnej.

Rozdział ósmy dotyczy modelowania hallotronu z użyciem metody elementów skończonych (MES). Biorąc pod uwagę zmniejszenie wpływu lokalnego nagrzewania się oraz odpowiednie kształtowanie profilu ze względu na rozkład gęstości prądu, zaproponowano 6 różnych struktur krzyżowych, które zostały zamodelowane. Wyniki badań symulacyjnych zostały przejrzyci zaprezentowane i zestawione w postaci trzech wykresów. Pierwszy ilustruje rozkład wartości prądu w przekroju wzdłuż osi X w punkcie o największej emisji energii cieplnej. Kolejny przedstawia postaci charakterystyk zależności napięcia Halla od natężenia zewnętrznego pola magnetycznego, oczywiście przedstawione dla każdej struktury. Natomiast ostatnie zestawienie reprezentuje zmianę wydzielanej mocy w funkcji napięcia zasilania dla rozpatrywanych struktur. Porównanie otrzymanych wyników widać jednak najlepiej w tabeli 8.1, gdzie zaznaczono strukturę krzyża równoramiennego z promieniem

zaokrąglenia równym długości krawędzi ramienia jako strukturę optymalną. Dla tych wyników symulacji nie przeprowadzono weryfikacji eksperymentalnej.

Rozdział dziewiąty stanowi realną implementację tomografii rezystancyjnej do korekcji hallotronu. W tym celu Autor opracował i zestawił stanowisko pomiarowe tomografu rezystancyjnego, który finalnie mógł pracować w trybie rezystancyjnym jak i napięciowym. Schematy trybów pomiaru zostały dobrze zilustrowane w raz z odpowiednimi tworzącymi się pomiarowymi macierzami wynikowymi. Bazując na otrzymanych z pomiarów zaprojektowanym układem wynikach, Autor przedstawia przekształcenie odwrotne tomografii rezystancyjnej w celu wyznaczenia obszarów korekcji. Przekształcenie bazuje na metodzie optymalizacji iteracyjnej, w której w kolejnych krokach przekształcenia wyznaczane są parametry opisujące wadę zastępczą. Doktorant definiuje funkcję celu i przedstawia algorytm zaimplementowanego przekształcenia odwrotnego. Na tym jednak cały proces się nie kończy, gdyż w dalszej części możemy przeczytać i zobaczyć wyniki modelowania nieciągłości w hallotronie, który generuje niejednorodny rozkład napięcia w hallotronie. Dla każdego z pięciu modeli opisujących różnego rodzaju nieciągłości, Autor wyznaczył wady równoważne dla których oszacował poziom redukcji napięcia niezrównoważenia. Wyniki właściwości użytkowych hallotronu po usunięciu obszaru korekcyjnego zostały zestawione w tabeli 9.1 i jednoznacznie dowodzą modelowej skuteczności zastosowanej metody, ale nie w przypadku wad rozproszonych. Rozdział kończy analiza dokładności odwzorowania nieciągłości struktury wyniku przekształcenia odwrotnego oraz sformułowanie wniosków w postaci opisu zmian czułości przekształcenia tomograficznego.

Praktyczna weryfikacja skuteczności wykorzystania informacji o zdefiniowanej wadzie korekcyjnej została wykonana na eksperymentalnej linii produkcyjnej w Instytucie Technologii Materiałów Elektrycznych ITME. Do tego celu wykorzystano hallotron z zaimplementowanymi elektrodami grzebieniowymi. Na podstawie wyznaczonej wady korekcyjnej, następował dobór połączeń elektrod pomiarowych, dla których różnica potencjałów była minimalna. Dla najlepszego wyniku połączenia elektrody zostały wykonane. Wyniki takiego procesu kompensacji dla 7 hallotronów zostały zestawione w tabeli 10.1 i dowodzą skutecznej redukcji napięcia do mniej niż 10% wartości początkowej napięcia niezrównoważenia. Weryfikacją skuteczności metody komutacyjnej jest również badanie wpływu temperatury na napięcie niezrównoważenia hallotronów, które zostało zredukowane w szerokim zakresie zmian temperatury. Opisana weryfikacja dowodzić ma tezy, która nie została jawnie zdefiniowana. Praktyczne zweryfikowanie metody kompensacji za pomocą hallotronu z połączeniami grzebieniowymi jest sposobem błyskotliwym, aczkolwiek z powodu złożoności technologicznej raczej nie aplikowalny w rzeczywistych realiach przemysłowych. Aczkolwiek taka weryfikacja udowodniła równoległy wpływ różnych czynników na napięcie niezrównoważenia i wzajemne ich oddziaływanie. W tym

przypadku, pokazane zależności ponownie potwierdziły skuteczność zaproponowanej metody.

Cenne wskazówki dotyczące przemysłowego zastosowania metod kompensacji napięcia niezrównoważenia zostały zawarte w rozdziale jedenastym. Znajdziemy tu odpowiednie wytyczne technologiczne jak i krytyczne spojrzenie określające ograniczenia opracowanych rozwiązań.

Natomiast przemysłowa implementacja zaproponowanej kompensacji w hallotronie została zrealizowana przez firmę Lumel w przekładniku prądowym typu GTC1-100P0 wykorzystującym hallotron grafenowy. Doktorant nie zamieszcza wielu szczegółów na ten temat, aczkolwiek zapewnia o sukcesie i opisuje płynące korzyści zdefiniowane jako uatrakcyjnione parametry użytkowe.

Rozdział 13 zawiera syntetyczne podsumowanie osiągnięć przedstawionych w rozprawie mgr. Petruka, zaś wnioski z nich płynące nie zostały zdefiniowane zbyt głęboko. Natomiast w króciutkim rozdziale 14, precyzyjnie podano dalszy kierunek prac. Mają one zmierzać w stronę zbudowania stanowiska do automatycznej korekcji laserowej hallotronów oraz weryfikacji doświadczalne metody dla hallotronów grubowarstwowych.

### 3. Ocena redakcyjnej strony rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa podzielona jest na 14 rozdziałów oraz zestawienie literatury. Wiele rozdziałów posiada swoje podrozdziały. Monografia została zawarta na 113 stronach, gdzie znajdziemy 71 ilustracji i wykresów oraz 5 tabel. Spis literatury obejmuje 147 pozycji w tym 5, w których Doktorant jest współautorem. Pracę poprzedzają podziękowania oraz streszczenia w języku polski jak i angielskim, ale również spis treści oraz spis najważniejszych oznaczeń użytych w rozprawie. Tak ogólnie rysujący się układ monografii jest klasyczny i tym samym poprawny, jednakże bliższe spojrzenie ujawniło kilka mankamentów.

Już we wstępie należałoby zamieścić więcej słów kluczowych. Idea ich stosowania jest oczywista, bo ułatwia powiązanie zainteresowań merytorycznych potencjalnego czytelnika z dziełem danego autora. Zakres rozprawy jest bogaty szczególnie w środki i konkretne rozwiązania technologiczne, dlatego tym bardziej należałoby wskazać dodatkowe słowa kluczowe je identyfikujące.

Czytając spis treści odnajdziemy w nim w przewadze równoważniki zdać, ale również i pełne zdania. Doradzam ujednolicenie konwencji takiego spisu. Dodatkowo tytuł podrozdziału 9.3: 'Funkcja celu', jest przypisana do zagadnień optymalizacji, natomiast z nazw poszczególnych rozdziałów ciężko się domyśleć, że będziemy mieli z takimi do czynienia.

Część teoretyczna i przeglądowa pracy zajmuje około połowy rozprawy i 5 rozdziałów. Natomiast kolejne 9 rozdziałów zajmuje podobną objętość co w ogólności

świadczy o stosunkowo niezbyt obszernym materiale badawczym w stosunku do zakresu przeprowadzonych prac, które zostały zrealizowane. Szczęśliwie, kolejne rozdziały odkrywają bogaty materiał ilustracyjny dysertacji (71 pozycji), szczególnie w części badawczej. Jednakże przy takiej ilości ilustracji, ich spis byłby bardzo użyteczny.

Jak już wspomniałem, główny nurt pracy układa się klasycznie, ze wstępem, zdefiniowanym celem i zakresem pracy, przeglądem stanu wiedzy, określeniem przedmiotu badań i proponowanej metodyki, przedstawieniem wyników i analiz z symulacji modelowych jak i eksperymentów. Jednakże czytając kolejne rozdziały, trzeba często domyślać się bezpośredniego jego powiązania z następującym kolejno. Myślę, że wprowadzenie podsumowań każdego z rozdziałów wraz z częścią wprowadzającą do kolejnego, zdecydowanie ułatwiłoby percepcję całej rozprawy.

Analizując pracę można zauważyć, że Autor nie zdecydował się sformułować jawnie tezy lub hipotezy rozprawy. Pisząc wstęp oraz definiując cel i zakres pracy skupił się na utylitarnym celu badań. W pracach o charakterze aplikacyjnym, często trudno zaproponować rzeczową i nietrywialną tezę badawczą, dlatego jak najbardziej taka formuła jest do zaakceptowania. Natomiast wymaga ona konsekwencji. Doktorant zaś dwukrotnie odwołał się do tezy (strona 55 i 97), której tak naprawdę nie zdefiniował. Uznaję to za błąd i nie czynię dalszych wywodów oceniając jej postać.

Zmierzając ku końcowi tej części recenzji chciałbym zwrócić uwagę na bardzo bogaty spis literatury, do której odniósł się Doktorant. Jego wykorzystanie nie budzi zastrzeżeń, natomiast pewien niedosyt pozostawia fakt, że mimo zgłoszenia patentowego, występują tam tylko 4 pozycje mgr. Petruka w tym jedna opublikowana w czasopiśmie z listy A. Doktorant powinien dołożyć więcej starań, żeby o Jego osiągnięciach można było przeczytać szerzej w renomowanych czasopismach.

Praca ogólnie napisana jest na dobrym poziomie edytorskim, a jej duży atut to przejrzystość i staranność, szczególnie odnosi się to do graficznego materiału rozprawy. Natomiast na 10 stronach, które wskazuje: 16, 19, 21, 27, 30, 32, 37, 64, 93, 98, można znaleźć chochliki drukarskie i błędy językowe, wymagające poprawienia.

#### 4. Wnioski końcowe

Podsumowując całość przedstawionej dysertacji trzeba podkreślić wagę problemu postawionego w pracy i metody użyte do jego analizy oraz zaproponowane nowatorskie rozwiązania. Ponadto stwierdzam, że:

- Zagadnienie naukowe, którego rozwiązania podjął się Doktorant, zostało wybrane i sformułowane prawidłowo.
- Wyznaczony główny cel pracy został osiągnięty. Realizacja wszystkich, założonych celów szczegółowych pracy doktorskiej stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w zakresie rozpatrywanej dyscypliny naukowej: mechaniki i budowy maszyn.



- Do rozwiązania zdefiniowanego problemu Doktorant umiejętnie skorzystał ze współczesnego dorobku naukowo-technicznego w zakresie mechaniki i budowy maszyn, mechatroniki, symulacji komputerowych jak również fizyki materiałów magnetycznych i miernictwa magnetycznego.
- Realizując pracę, Doktorant wykazał się samodzielnością oraz umiejętnością organizowania badań doświadczalnych oraz symulacyjnych, a także wiedzą o charakterze interdyscyplinarnym.
- Wyniki rozprawy poszerzają wiedzę dotyczącą możliwości wykorzystania modeli typu „multiphysics” wraz z tomografią rezystancyjną do kompensacji niezerównoważenia cienkowarstwowych hallotronów, w tym również wykonanych z grafenu.

Opiniowana praca posiada więc oryginalne autorskie cechy nowości jak również znaczące walory użytkowe. Natomiast przedstawione w recenzji uwagi nie umniejszają zasadniczej wartości merytorycznej pracy, ponieważ dotyczą one przede wszystkim niedoskonałości samego opisu metodyki oraz prezentacji wyników. Jako najważniejsze rezultaty mgr. Petruka trzeba tu wymienić:

- opracowanie koncepcji wykorzystania tomografii rezystancyjnej do dwóch metod kompensacji napięcia niezerównoważenia hallotyonu,
- opracowanie stanowiska pomiarowego tomografu rezystancyjnego,
- zaprojektowanie i wykonanie nowego układu hallotyonu, kompatybilnego z opracowaną metodą kompensacji napięcia niezerównoważenia,
- opracowanie algorytmów umożliwiającymi tomograficzne wyznaczenia wady równoważnej do korekty struktury hallotyonu,
- modelowa optymalizacja kształtu powierzchni hallotyonu ze względu na minimalizację występowania lokalnych obszarów nagrzewania,
- implementacja opracowanej metody kompensacji w hallotronie do przekładnika prądu stałego.

Te dokonania pracy oceniam bardzo wysoko i uważam, że praca spełnia wymogi przewidziane w: „Ustawie o stopniach naukowych oraz stopniach i tytułach w zakresie sztuki” z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr 65, poz. 595 z dalszymi zmianami). Pozwala to sformułować wniosek o dopuszczenie Autora pracy do publicznej jej obrony. Dodatkowo, ze względu na szerokie ujęcie zagadnienia, błyskotliwe rozwiązanie niebanalnego problemu oraz istotny potencjał aplikacyjny opracowanych w ramach rozprawy doktorskiej rozwiązań technicznych, wnoszę o ewentualne wyróżnienie rozprawy doktorskiej przez Radę Wydziału Mechatroniki. Wnioskując o to, należy podkreślić, że część badań wykonanych zostało w ramach grantu NCBiR zatytułowanego: „Grafenowe czujniki pola magnetycznego do zastosowań przemysłowych”. Jest to potwierdzeniem osadzenia tematyki i rezultatów rozprawy w konkretnych realiach aplikacyjnych, czego przejawem była ścisła współpraca Doktoranta z takimi instytucjami jak Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów (PIAP), Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych (ITME) oraz firmą LUMEL S.A.



