

Warszawa, 22. stycznia 2020 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. Pawła Nowaka

pt.: „Tomografia wiroprowadowa elementów cylindrycznych”

Podstawa opracowania: pismo WMt.521.30.2019, z dnia 7.10.2019 r., Dziekana Wydziału
Mechatroniki Politechniki Warszawskiej, prof. dr hab. inż. Natalii Golnik.

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

Współczesnego świata nie sposób wyobrazić sobie bez systemów wyświetlających i analizujących różnego rodzaju obrazy, które są prezentacją wielkości fizycznych odbieranych przez układy sensoryczne. Obrazy, stały się nieodłącznym elementem współczesnej infrastruktury i obiektów technicznych. Układy obrazujące wykorzystuje się w życiu codziennym w prostych zadaniach marketingowych, do komunikacji użytkownika z maszyną, ale są również bezpośrednio wykorzystywane w obserwacji kosmosu, technice wojskowej, medycynie, czy ogólnie w badaniach naukowych. Wykorzystanie danego obrazu, jego potencjał, jest ściśle związane z reprezentowaną wielkością fizyczną i oczywiście sposobem jej obrazowania. Z tego punktu widzenia, szczególną grupę stanowią sposoby interpretacji wizyjnej fal elektromagnetycznych. Fale elektromagnetyczne stwarzają na wiele sposobów możliwość badania obszarów ukrytych dla oka ludzkiego. Radioastronomia wykorzystuje fale elektromagnetyczne, np. do sondowania odległych zakątków wszechświata i tym samym dostarcza wielu informacji na temat jego funkcjonowania a nawet powstania. Ponadto geofizyka poszukiwawcza wykorzystuje 'radary' penetrujące ziemię do badania jej wnętrza w takich dziedzinach jak archeologia czy górnictwo. Technologie pasywnego wykrywania fal milimetrowych znajdują zastosowanie w systemach bezpieczeństwa na lotniskach i na granicach oraz w systemach lądowania samolotów przy niskiej widzialności. Natomiast Doktorant zwrócił uwagę na dziedzinę badań nieniszczących dotyczącą produktów i materiałów. Przy ich pomocy istotne jest sprawdzanie materiału pod kątem bezpieczeństwa i niezawodności przy użyciu metod, które nie wpłyną na ich strukturę. W tym celu stosuje się różne techniki elektromagnetyczne w tym metody wycieku strumienia

magnetycznego, metodę emisji magneto-akustycznej czy prądów wirowych. Ta ostatnia jest przedmiotem recenzowanej pracy doktorskiej, która rozwija jej użyteczność do postaci magnetycznej tomografii indukcyjnej (Magnetic Induction Tomography). Jest to stosunkowo nowa technika, która z racji dokonanego w ostatnich latach postępu technologicznego jest w stanie zaproponować nową jakość w obrazowaniu właściwości magneto-elektrycznych tj. przewodnictwo elektryczne, względna przenikalność lub przenikalność magnetyczna, zarówno powierzchni jak i wnętrza materiału. Intensyfikacja prac nad nowymi technologiami lub ulepszaniem tych istniejących jest wciąż widoczna czego jednym z dowodów jest recenzowana praca mgr. inż. Nowaka. Doktorant obrał za cel opracowanie nowych rozwiązań w zakresie tomografii wiroprądowej elementów cylindrycznych dla celów badań nieniszczących. Proponowane rozwiązania są o tyle atrakcyjne, że poprzez wzięcie pod uwagę ograniczonego dostępu do specjalistycznego oprogramowania (proponycja użycia oprogramowania typu 'open source') oraz minimalizację czasu obliczeń, są ukierunkowane na praktyczne zastosowanie w przemyśle. Ponadto należy podkreślić, że zaproponowane podejście tomograficznego przekształcenia odwrotnego z wykorzystaniem modelowania trójwymiarowego rozkładu pola elektromagnetycznego oraz powiązania z nim prądów wirowych, jest nowatorskie i wpisuje dysertację w aktualnie rozwijany światowy nurt tomografii wiroprądowej. Doktorantowi więc należy się pochwała za ambitnie 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.

Jednoznacznie więc stwierdzam, że temat pracy należy uznać za aktualny i ważny, szczególnie z punktu widzenia badań stosowanych. Ambitny cel oraz komplementarny 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 rozwijaniem metod tomografii wiroprądowej. Taki kierunek z użyciem modelowania numerycznego oraz autorskich algorytmów tomograficznego przekształcenia prostego i odwrotnego ma na celu otrzymanie obrazu odpowiedniego dla zastosowań w badaniach nieniszczących obiektów osiowosymetrycznych. Natomiast w zamieszczonym tekście, można mieć zastrzeżenia do przedstawionej klasyfikacji takich badań. W oddzielnej grupie znalazły się badania wizualne, które są sformułowaniem ogólnym i nie pasują do konkretnych technik; również odwołanie literaturowe wystarczająco nie ujmuje tematu. W ostatnim akapicie tego rozdziału, Autor stwierdził, że: „W literaturze nie przedstawiono pełnej propozycji zastosowania

tomografii wiroprowodowej w aspekcie badań nieniszczących.”, tylko nie jest jasne czy literatura powszechna tego nie ujmuje, czy Autor nie wykorzystał wystarczającego potencjału literaturowego.

Cel i zakres pracy został opisany bardzo przejrzysto i rzeczowo. Zostały wręcz ujęte w konkretnych punktach kroki, które mają doprowadzić do osiągnięcia sukcesu w postaci wytycznych do praktycznego zastosowania tomografii wiroprowodowej z wykorzystaniem opracowanego algorytmu tomograficznego przekształcenia odwrotnego. W rozdziale, moje wątpliwości budzi jedynie niewystarczająco precyzyjnie sformułowanie tezy („... z dokładnością wymaganą do zastosowań praktycznych.”) oraz brak uwzględnienia w niej wartościowej części dysertacji, która dotyczy symulacji, pomiarów i interpretacji efektów magnetoelastycznych w stalowej próbce w kształcie tulei.

Natomiast w następnym rozdziale, dotyczącym przeglądu stanu wiedzy, możemy natrafić na rozważania zgrupowane w trzech podrozdziałach. Pierwszy traktuje ogólnie o istocie pomiarów tomograficznych, gdzie odwołując się do pozycji literaturowych, Doktorant faktycznie dotknął istoty rzeczy tomografii oraz uzasadnił znaczenie algorytmów przekształcenia prostego i odwrotnego, którymi się zajmie w rozprawie. Podrozdział dotyczący tomografii wiroprowodowej, jak na dorobek naukowców zajmujących się tą tematyką, wygląda ubogo. Może wynika to z tego, że Autor odniósł się do przykładów rozwiązań zaproponowanych do obiektów osiowosymetrycznych. Natomiast uważam, że korzystając z odpowiednich analogii można było szerzej ująć przegląd wiedzy włączając przykłady obiektów niespełniających tego warunek, ale dotyczących zagadnień modelowania trójwymiarowego i przekształcenia odwrotnego. Natomiast do trzeciego podrozdziału trudno mieć zastrzeżenia. Widać, że główny nacisk pracy będzie położony na metody numeryczne, które nie tylko pokażą swoją skuteczność w zadaniu tomograficznego przekształcenia prostego i odwrotnego, ale będą charakteryzować się niskim kosztem obliczeniowym oraz zostaną zaimplementowane z wykorzystaniem oprogramowania działającego na licencji otwartej ‘open source’. Kończąc ten rozdział, Autor pokazuje możliwość dotarcia do informacji na temat amplitudy sygnału rejestrowanego oraz przesunięcia fazowego sygnału wymuszającego i odbieranego. Niestety brak wytłumaczenia fizycznego i jego konsekwencji w zastosowaniach do badań nieniszczących.

Rozdział czwarty prezentuje stanowisko badawcze wraz z przedmiotem badań, a mianowicie próbkami cylindrycznymi. Układ doświadczalny włączając w to system pomiarowy jest stanowiskiem ogólnego przeznaczenia do pomiarów elementów osiowosymetrycznych. Doktorant nie uznaje je za wystarczające dla swoich badań i ingeruje w jego konstrukcję, a nawet działanie wykorzystując nowy generator sygnału. Efektem tych prac jest bardziej precyzyjna praca układu mechanicznego oraz poprawa parametru zniekształceń harmonicznym w generowanym sygnale biorącym udział w pomiarze. To ostatnie jest o tyle ważne, gdyż w szybkim i skutecznym procesie

przekształcenia prostego nie ma miejsca na zajmowanie się składowymi harmonicznymi wyższych rzędów. Przedmiot badań stanowią cylindryczne próbki dwojakiego rodzaju. Pierwsze w postaci tulei z możliwością jej uszczelnienia w celu wytworzenia w jej wnętrzu odpowiedniego ciśnienia. Uważam to za bardzo ciekawy pomysł zadawania jednorodnych naprężeń w badanym obszarze materiału. Drugi typ próbek to walec z wycięciami o różnej szerokości. Autor, mimo deklaracji zajmowania się materiałami ferromagnetycznymi, wykonał też próbkę z miedzi, ale niestety nie wytłumaczył swojego toku myślenia. Rysunek techniczny przekroju próbki pozostawia wiele do życzenia. Na kolejnych stronach, Doktorant prezentuje wyniki wykonanych pomiarów. Pierwsze dla próbki tulejowej, której pomiar odbywa się przy naprężeniach obwodowych szacowanych na 30MPa – czyli wartości z zakresu odkształceń sprężystych, dlatego możnaby tu mówić wyłącznie o efektach magnetosprężystych. Wyniki przedstawione zostały w postaci zmian amplitudy oraz przesunięcia fazowego w przypadku próbki poddanej naprężeniom i bez nich. O ile zmiana amplitudy sygnału została wytłumaczona to nie znajdziemy takiej interpretacji odnośnie przesunięcia fazowego. Kolejne wyniki dotyczą próbek z nieciągłościami wzorcowymi. O ile interpretacja graficzna wyników pomiarów jest przejrzysta to niestety opis otrzymanych wyników niewystarczający: „Przedstawione wyniki potwierdzają wpływ nieciągłości w materiale na parametry sygnałów pomiarowych...”.

Rozdział piąty dotyczy już modelowania procesu pomiarowego z użyciem metody elementów skończonych (MES). Ich celem jest uzyskanie wyników, odpowiadających wynikom pomiarów tomograficznych zdefiniowanych obiektów. Tutaj Autor wykazał się biegłą umiejętnością korzystania zarówno z różnego oprogramowania jak i różnych kodów źródłowych. Konsekwentnie, wszystkie kolejne kroki, przybliżyły go do osiągnięcia założonego celu. Ciężko wywnioskować jaką drogę musiał przejść Doktorant by uzyskać satysfakcjonujące wyniki, aczkolwiek przedstawione w dysertacji kolejne kroki dotyczące przekształcenia prostego są rzeczowe i na miejscu. We wszelkiego rodzaju pracach symulacyjnych/modelowych niezmiernie ważną rolę odgrywa walidacja otrzymanych wyników. Doktorant nie zapomniał też o niej, lecz do tego celu użył uproszczonych, ale charakterystycznych modeli takie jak: model cewki Helmholtza oraz model cewki długiej. Uzyskane wyniki z symulacji były bardzo zbliżone do porównywanych wartości analitycznych. Natomiast Autor nie zapomniał o deklarowanym kryterium kosztu obliczeniowego idącego w parze z wystarczającą dokładnością pozyskiwanych wyników. W tym celu wprowadził wskaźnik jakości Q oraz wyraził go w funkcji rozmiaru elementu siatki elementów skończonych zarówno dla składowej rzeczywistej jak i urojonej indukcji pola magnetycznego w cewce odbiorczej. Dodatkowo możemy obejrzeć zależność wielkości elementu w siatce MES od czasu obliczeniowego pojedynczego kroku. Bazując na tych charakterystykach, Autor w sposób arbitralny wytypował optymalny rozmiar elementu siatki MES, który przyjął na 0,02mm. Jest on o rząd wielkości większy niż obejmowała to skala przedstawionych charakterystyk, choć na nich rozmiar jest wielkością

niemianowaną. W podrozdziale 5.5 mgr. inż. Nowak prezentuje autorski algorytm dyskretnej optymalizacji liniowej, którego potrzebuje do selekcji punktów charakterystycznych. Metoda bazuje na interpolacji krzywymi wielomianowymi niskiego rzędu i wraz z przyjętymi kryteriami optymalizacyjnymi daje obiecujące wyniki. Bazując na zbudowanym modelu Autor dokonał analizy czułości w zależności od zmiany częstotliwości cewki wymuszającej w zakresie 100 – 2000Hz. Wyniki badań są analizowane zarówno dla amplitudy sygnału jak i wartości przesunięcia fazowego. Z obu wynika, że maksymalna głębokość wykrywania nieciągłości podpowierzchniowych to maksymalnie 8mm od krawędzi obiektu. Nawiązując do wzoru 3.1, zastanawiający jest fakt, że w całym zakresie zmian częstotliwości wartość 8mm się nie zmienia, a zmienia się jedynie charakterystyka czułości w tym zakresie. Dodatkowo Autor, spróbował znaleźć złoty środek, aby móc wykryć zarówno zmianę amplitudy jak i przesunięcie fazowe. Czy takie podejście jest właściwe? Może należy przyjąć chęć obserwacji amplitudy lub przesunięcia fazowego z maksymalną czułością? Może inaczej będzie w zadaniu wykrywania nieciągłości, a inaczej kiedy będziemy mieli do czynienia z efektami magnetomechanicznymi? Do powyższych wątpliwości, chciałbym żeby Doktorant odniósł się podczas publicznej obrony. Niemniej jednak, uzyskane wyniki tomograficznego przekształcenia prostego wykazują zgodność z wynikami pomiarów, choć ich porównanie wymaga normalizacji uzyskanych wyników.

W rozdziale siódmym znajdziemy propozycję dyskretnego tomograficznego przekształcenia odwrotnego. Przedstawiona metoda została już opublikowana przez Doktoranta i współautorów w renomowanym czasopiśmie naukowym. Podobnie jak w przypadku przekształcenia prostego zdefiniowano współczynnik jakości Q , który stanowił funkcję celu procesu optymalizacji. Uzyskane wyniki pokazują nieciągłości w odwzorowaniu materiału, aczkolwiek przedstawione podejście, jak słusznie Autor zauważył, nie należy uznać za porażkę, bo może służyć do określania krawędzi rekonstruowanego obiektu, co też stanowi wartościową informację. Natomiast zaletą przedstawionego algorytmu jest jego prostota i szybkość działania. Kolejne prezentowane rozwiązanie, wykorzystuje rozwiązanie z poprzedniej części, ale w ujęciu optymalizacji ciągłej, co wymagało wprowadzenia pewnych ograniczeń fizycznych. Zostały one wprowadzone za pomocą funkcji kary zewnętrznej. Przedstawiono odpowiednie algorytmy dla przypadku wyznaczenia dwóch parametrów nieciągłości (szerokość oraz głębokość) oraz a następnie czterech (głębokość, szerokość, promień obiektu, kąt początkowy nieciągłości). Algorytmy posiłkowały się wstępnym procesem wyznaczania promienia próbek oraz kąta położenia nieciągłości. Okazało się bowiem, że wielkość średnicy obiektu jak i kąt położenia nieciągłości mają wpływ na wyniki tomograficznego przekształcenia prostego. Analiza niepewności tomograficznego przekształcenia odwrotnego, bazująca na optymalizacji ciągłej, potwierdziła jego skuteczność. Również przykład zastosowania opracowanego algorytmu przekształcenia do wyznaczenia przenikalności magnetycznej próbki tulejowej dowodzi poprawności odwzorowania.

Natomiast postawiony przez Doktoranta wniosek, że otrzymane wyniki potwierdzają możliwość zastosowania tomografii wiroprowadowej w badaniach nieniszczących jest zbyt ogólnie określony, więc nie sposób się do niego odnieść. W niektórych przypadkach może okazać się wystarczający, a w niektórych nie.

Cenne wskazówki dotyczące budowy systemów tomograficznych na potrzeby badań nieniszczących zostały przedstawione w rozdziale ósmym. Bazując na stanowisku badawczym, które wykorzystywał Doktorant oraz na jego analizach, trudno zgodzić się z zalecaną wartością częstotliwości pola magnesyjnego.

Rozdział dziewiąty w sposób rzeczowy podsumowuje rozprawę. Znajdziemy tutaj odpowiednie wnioski, aczkolwiek zabrakło mi bardziej krytycznego spojrzenia określającego ograniczenia opracowanych rozwiązań. Ten brak poniekąd uzupełnia ostatni, krótki, rozdział dziesiąty. Możemy tutaj zapoznać się z planem Doktoranta na dalszy kierunek prac zmierzający do rozwoju tomografii wiroprowadowej, umożliwiający coraz śmielszą aplikację metody w badaniach nieniszczących.

3. Ocena redakcyjnej strony rozprawy.

Przedstawiona do recenzji rozprawa podzielona jest na 10 rozdziałów oraz zestawienie literatury. Większość rozdziałów posiada swoje podrozdziały. Monografia została zawarta na 105 stronach, gdzie znajdziemy 88 ilustracji i wykresów oraz 7 tabel. Spis literatury obejmuje 113 pozycji, w tym aż 12, w których Doktorant jest autorem/współautorem. Pracę poprzedzają podziękowania oraz streszczenia w języku polskim jak i angielskim, jak 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 na początku, czytając spis treści odnajdziemy w nim (w przewodzie) równoważniki zdań, ale również i pełne zdania. Dodatkowo warto rozważyć zasadność użycia przydawek typu 'uzyskane' czy 'zastosowana'. Doradzam ujednoczenie konwencji takiego spisu. Ponadto Doktorant zastosował w swojej pracy podział badań ze względu na rodzaj badanych próbek (próbki tulejowe, próbki z nieciągłościami wzorcowymi). Jakkolwiek takie rozróżnienie wydaje się naturalne, to w przypadku czytelnika, który zapoznaje się z kolejnymi tytułami rozdziałów i podrozdziałów rozprawy, jest mało prawdopodobne, że domyśli się, że będzie mógł przeczytać o efekcie magnetoelastycznym. Uważam, że jest to bardzo ciekawa część pracy (dowodem jest publikacja tej tematyki przez Doktoranta w renomowanym czasopiśmie 'Materials') i powinna być wyeksponowana, a przynajmniej nie ukrywana.

Część teoretyczna i przeglądowa pracy zajmuje niespełna 20 stron i można go odnaleźć w rozdziale 3 oraz częściowo w rozdziale 4 i 5. Natomiast pozostała część pracy, zajmująca zdecydowanie większą objętość, stanowi autorskie badania i analizy. Na pierwszy więc rzut oka, świadczy to o stosunkowo obszernym materiale badawczym w stosunku do zakresu przeprowadzonych badań literaturowych. Jednakże po wnikliwej analizie, pewien niedosyt budzi zamieszczony w dysertacji

przeгляд stanu wiedzy, którego efektem są zbyt śmiałe stwierdzenia Doktoranta typu: „do tej pory w literaturze nie przedstawiono algorytmu tomograficznego przekształcenia odwrotnego z wykorzystaniem modelowania trójwymiarowego...”

Wszystkie rozdziały pracy zawierają bogaty materiał ilustracyjny (88 pozycji), który szczególnie jest obecny w części badawczej. Jednakże przy takiej ilości ilustracji, ich spis byłby bardzo użyteczny.

Analizując pracę można zauważyć, że Autor zdecydował się sformułować jawnie tezę rozprawy (strona 15-ta rozprawy). Pisząc wstęp oraz definiując cel i zakres pracy, Doktorant określił utylitarny cel badań umiejscawiając go w badaniach nieniszczących. Brakuje natomiast szczegółowych informacji tego celu. Może dlatego w tezie istnieje enigmatyczne stwierdzenie: „... określenie parametrów obiektu odwzorowujących nieciągłość rzeczywistą z dokładnością wymaganą do zastosowań praktycznych”. Ponadto teza odwołuje się jedynie do przekształcenia odwrotnego w zadaniu odwzorowania nieciągłości i pomija jakże ciekawą część pracy dotyczącą efektów magnetoelastycznych. W związku z powyższymi, uważam, że teza rozprawy powinna być bardziej przemyślana i inaczej zdefiniowana.

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 na szczególnie wyróżnienie zasługuje fakt, że występuje tam aż 12 pozycji gdzie możemy odnaleźć Pana mgr. inż. Nowaka. Świadczy to jednoznacznie o systematycznej aktywności Doktoranta i o sukcesach w postaci zdobywania przychylnych głosów kolejnych recenzentów Jego prac.

Praca ogólnie napisana jest na dobrym poziomie edytorskim, a jej duży atut to przejrzystość i staranność, szczególnie odnosi się to graficznego materiału rozprawy. Natomiast na 11 stronach, które wskazuję: 5, 19, 31, 64, 67, 74, 76, 77, 81, 96, 118 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, które oprócz żmudnej pracy Doktoranta nie wymagały dużych nakładów finansowych, które zwykle towarzyszą w osiągnięciu tak postawionym zadaniom. Ponadto stwierdzam, że:

- zagadnienie naukowe, którego rozwiązania podjął się Doktorant, zostało wybrane i sformułowano prawidłowo (pomijając słabo sformułowaną tezę rozprawy);
- wyznaczony główny cel pracy został osiągnięty. Realizacja wszystkich, założonych celów szczegółowych pracy doktorskiej stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w zakresie rozpatrywanej dyscypliny naukowej: budowa i eksploatacji maszyn (wg starej klasyfikacji) oraz inżynierii mechanicznej (wg. nowej klasyfikacji);

- 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;
- wyniki rozprawy poszerzają wiedzę dotyczącą możliwości wykorzystania modelowania trójwymiarowego w algorytmie tomograficznego przekształcenia odwrotnego, co stanowi oryginalny wkład w rozwój tomografii wiropądowej.

Opiniowana praca posiada więc oryginalne autorskie cechy nowości jak również 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. inż. Nowaka trzeba tu wymienić:

- wykorzystanie oprogramowania typu 'open source' w skutecznej realizacji tomograficznego przekształcenia prostego,
- zweryfikowane doświadczalnie wykorzystanie metody MES w modelowaniu trójwymiarowego rozkładu pola magnetycznego dla celów odtworzenia zaproponowanej procedury pomiarowej,
- przeprowadzenie licznych optymalizacji mających na celu przyspieszenie czasu obliczeń bez utraty cennych informacji,
- opracowanie algorytmów tomograficznego przekształcenia odwrotnego,
- opracowanie propozycji wykorzystania przedstawionej koncepcji tomografii wiropądowej w badaniach nieniszczących wraz z podaniem konkretnych dalszych kroków w jej rozwoju.

Te dokonania pracy oceniam wysoko i podkreślając dość szerokie ujęcie zagadnienia, konsekwencję w dążeniu do rozwiązania niebanalnego problemu oraz potencjał aplikacyjny opracowanych w ramach rozprawy doktorskiej rozwiązań uważam, że praca spełnia aktualne wymogi przewidziane odpowiednich ustawach. Pozwala to sformułować wniosek o dopuszczenie Autora pracy do publicznej jej obrony.

