

Prof. dr hab. inż. Małgorzata Kujawińska
Instytut Mikromechaniki i Fotoniki
Politechnika Warszawska
malgorzata.kujawinska@pw.edu.pl

Warszawa, 14 luty 2026r.

Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie
komórka organizacyjna Rada Dyscypliny AEEiTK
wpłynęło dnia 26.02.2026
nr wpływu 510.9.2025
załączniki podpis 

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Adama Machyni pt. „Marker-free optical flow-based automatic crack assessment in metallic structures under periodic excitation”

1. Informacje wstępne

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Adama Machyni pt. „Marker-free optical-flow-based automatic crack assessment in metallic structures under periodic excitation”. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Ziemowit Dworakowski, prof. AGH. Przewód doktorski został wszczęty przez Radę Naukową Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, w Dziedzinie – Nauki Inżynieryjno-Techniczne. Recenzję przygotowano na podstawie zlecenia Przewodniczącego RN Dyscypliny AEEiTK Akademii Górniczo-Hutniczej zgodnie z pismem z dnia 7 listopada 2025 r.

Tematyka rozprawy doktorskiej związana jest z zagadnieniami zastosowania metod wizyjnych do oceny zdrowia mechanicznych, metalowych struktur inżynierskich (SHM : *Structural Health Monitoring*) oraz ich nieniszczących metod badań (NDT: *Nondestructive Testing*), a w szczególności monitorowania propagacji pęknięć w tych strukturach. Aplikacyjny aspekt tej tematyki związany jest bezpośrednio z dyscypliną Inżynieria Mechaniczna. Jednak w pracy Doktorant koncentruje się na modyfikacjach metod wizji komputerowej (CV: *Computer Vision*), w tym przede wszystkim metod przetwarzania gęstych danych wizyjnych w celu wizualizacji ruchu związanego z pęknięciem oraz opracowaniem metodyki i procedur automatycznej detekcji położenia wierzchołka pęknięcia. Biorąc to pod uwagę, stwierdzam, że tematyka pracy jest dobrze umiejscowiona w zakresie merytorycznym dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

Rozprawa doktorska została opublikowana w języku angielskim, w formie monografii liczącej 99 stron maszynopisu zawierającego również obszerną bibliografię obejmującą 116 pozycji literatury, z których Pan Machynia korzystał w trakcie realizacji swojej pracy i przygotowania manuskryptu. Większość prac, do których odnosi się Doktorant, to prace z okresu ostatnich kilku - kilkunastu lat. (na 116 cytowane prace, tylko 16 zostało opublikowanych w wieku XX-tym). Jest to po części zrozumiałe, gdyż początki zastosowań wizji komputerowej w mechanice eksperymentalnej, a szczególnie metoda cyfrowej korelacji obrazu i rozpatrywana w pracy metoda przepływów optycznych sięgają lat osiemdziesiątych XX wieku, jednak ich pełen rozwój (w tym pojawienie się systemów komercyjnych), to już wiek XXI.

Pan Piotr Machynia jest współautorem dwóch publikacji bezpośrednio związanych z tematyką pracy: artykułu w czasopiśmie *Mechanical Systems and Signal Processing* (opublikowany w 2023r., drugi autor, czasopismo z I decyla, 10 cytowań) oraz artykułu w czasopiśmie *Measurement* (opublikowany w 2026, pierwszy autor, czasopismo z I decyla). Fakt ten świadczy o znacznej wadze i rozpoznawalności prac naukowych realizowanych przez Doktoranta i przedstawionych w rozprawie doktorskiej.

2. Tematyka, zakres i cel rozprawy

Zagadnienia monitorowania zdrowia strukturalnego obiektów inżynierskich, począwszy od dużych struktur w inżynierii lądowej i lotnictwie poprzez wysoko odpowiedzialne elementy w przemyśle samochodowym, lotniczym, kosmicznym i energetycznym, a skończywszy na elementach MEMS/MOEMS (Mikro-Opto-Elektronicznych Systemach) i pakietach elektronicznych, są od lat obszarem

zainteresowania zarówno naukowców jak i praktyków odpowiedzialnych za projektowanie, produkcję, a zwłaszcza eksploatację tych struktur. Wśród tych zagadnień niezwykle ważnym elementem jest detekcja i monitorowanie pęknięć (w tym szczególnie pęknięć zmęczeniowych w konstrukcjach metalowych) elementów konstrukcji, które zmniejszają jej sztywność, modyfikują jej modalne własności i odpowiadają dynamiczną doprowadzając stopniowo do degradacji struktury, a nawet do jej zniszczenia. Historycznie stosowane punktowe metody pomiaru i monitorowania odkształceń nie są w tych przypadkach wystarczające i dlatego już w drugiej połowie XX wieku zaczęły się intensywnie rozwijać optyczne (bezkontaktowe), polowe metody pomiarowe wykorzystujące zarówno światło koherentne (metody interferometryczne, w tym plamkowe, holograficzne interferometrii siatkowej), jak i światło niekoherentne (metody rastrowe, w tym metoda prążków mory, fotografia plamkowa). Wraz z rozwojem matrycowych detektorów, komputerów oraz metod przetwarzania obrazu, wyżej wymienione metody optyczne uzupełnione zostały o automatyczną, komputerową analizę danych. Równocześnie rozwinęły się tzw. wizyjne metody analizy przemieszczeń i odkształceń, które często nie wymagały znacznego przygotowania powierzchni badanego obiektu i jednocześnie zmniejszały wymagania eksperymentalne i umożliwiały długotrwałe monitorowanie obiektów poddanych zarówno statycznym, jak i dynamicznym obciążeniom. Do najważniejszych metod wizyjnych, które spełniają wymagania detekcji i monitorowania propagacji pęknięć zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i polowych należą cyfrowa korelacja obrazu (CKO) i metoda przepływów optycznych (OF: *optical flow*). Obydwie metody teoretycznie dostarczają te same informacje tzn. wyznaczają pola przemieszczeń w kierunku x i y w chwili t na podstawie sekwencji obrazów, jednak mają inne podstawy matematyczne i nieco inne wymagania dot. warunków przeprowadzania pomiarów. Metoda CKO jest obecnie najczęściej stosowaną metodą zarówno w laboratoriach naukowych jak i w praktyce przemysłowej. Metoda OF jest metodą znacznie rzadziej stosowaną, ale o dużym potencjale zwłaszcza w przypadku badań drgań konstrukcji, analizie inicjacji pęknięć i wykorzystaniu obrazów o wysokiej rozdzielczości. Biorąc pod uwagę znaczne zapotrzebowanie na efektywne metody monitorowania pęknięć zmęczeniowych i potencjał metody OF wydaje się zasadnym i ważnym z punktu widzenia naukowego i praktycznego sformułowanie przez Doktoranta celu pracy jako:

Opracowanie i sprawdzenie poprawności bezznacznikowej, bazującej na widzeniu komputerowym metodyki automatycznej oceny pęknięcia zmęczeniowego w metalicznych strukturach poddanych wymuszeniu okresowemu, zaprojektowanej do integracji z praktyki badań nieniszczących lub monitorowania zdrowia struktur. (tłumaczenie przez Recenzenta celu podanego przez Doktoranta na str. 22).

W pracy nie została sformułowana teza, mimo, iż mogłaby być bez trudu wyartykułowana. Jednak Recenzent nie podnosi tej kwestii, gdyż w pracach doktorskich w dziedzinie Nauki Inżynieryjno-Technicznej jest to dopuszczalne, o ile właściwie zostanie sformułowany cel pracy co w tym przypadku ma miejsce.

Na pracę doktorską składają się: streszczenia w języku polskim i angielskim, dziesięć rozdziałów, obszerna bibliografia oraz spis rysunków. W pierwszym rozdziale Doktorant bardzo skrótowo wprowadza czytelnika w tematykę oceny zdrowia struktur inżynierskich, wagę monitorowania pęknięć z wykorzystaniem metod widzenia komputerowego oraz identyfikuje zapotrzebowanie na opracowanie nowej metodyki pomiarowej bazującej na metodzie przepływów optycznych. W tym samym rozdziale przedstawiona jest struktura pracy. Następnie (rozdział 2) omówiony jest stan techniki w odniesieniu do roli widzenia komputerowego w SHM ze szczególnym uwzględnieniem metod CV do detekcji i oceny pęknięć. Doktorant wspomina tutaj również o grupie metod, które wykorzystują zjawisko „oddychania” pęknięcia. Jednak podstawowym celem tego rozdziału jest omówienie metody OF wraz z podstawowymi opisami matematycznymi i wykorzystywanymi metodami głębokiego uczenia w OF oraz szerokiej gamy metod realizujących wzmacnianie ruchu (MM: *motion magnification*) i ich zastosowań w SHM i NDT. W podsumowaniu rozdziału 2 Adam Machynia wskazuje na liczne ograniczenia dostępnych metod w zastosowaniu do monitorowania pęknięć zmęczeniowych i identyfikuje konieczność prowadzenia badań naukowych nad usunięciem tych ograniczeń. Na tym podsumowaniu bazuje rozdział 3, w którym Doktorant przedstawił cel rozprawy oraz zadania, które muszą być zrealizowane dla osiągnięcia tego celu. W rozdziałach 4-8 zaprezentowane są kolejne etapy prac bezpośrednich związanych z opracowaniem i badaniami metody OF w zastosowaniu do automatycznej oceny pęknięcia zmęczeniowego

w metalicznych strukturach poddanych wymuszeniu okresowemu. I tak w rozdziale 4 Doktorant opisuje skrótowo trzy eksperymenty (obiekty badane: kompresor, aluminiowa belka z pęknięciem i płaski panel samolotowy ze zmęczeniowym pęknięciem), w ramach których zbierane były dane służące do opracowania, zwalidowania i zademonstrowania zaproponowanych w pracy technik. Dwa pierwsze eksperymenty zostały zaprojektowane i zrealizowane przez zespoły naukowe bez udziału Doktoranta. W pracach trzeciego zespołu eksperymentalnego uczestniczył Pan Machynia. Prezentacja eksperymentów przed przedstawieniem proponowanej metody jest nietypowym zabiegiem, który można częściowo zrozumieć dopiero po zapoznaniu się z dalszymi rozdziałami, w których dane zebrane w tych eksperymentach wykorzystywane są do ilustracji wyników kolejnych etapów opracowania końcowej ścieżki przetwarzania danych dla monitorowania i oceny pęknięcia w strukturach inżynierskich. Rozdział 5 poświęcony jest opracowaniu i walidacji procedury oceniającej spójność kierunku ruchu estymowanego z nagrań wideo. Doktorant zaproponował metodę wyznaczania map lokalnej niespójności orientacji ruchu (LOI: *Local Orientation Inconsistency*). Metryka ta pozwala na maskowanie części obiektu o niepewnej estymacji ruchu i wspomaga wybór obszaru odpowiedniego do dalszej analizy, co zostało potwierdzone na przykładach analizy wyników eksperymentów, które zostały opisane w rozdziale 4. Rozdziały 6 i 7 są kluczowymi rozdziałami w pracy. W rozdziale 6 zaprezentowana została metodyka wyznaczania amplitudowych map wizualizujących wzorzec ruchu struktury podanej wzbudzeniu o różnych amplitudach. Doktorant przeanalizował kilka strategii przetwarzania sygnału różniących się od siebie wyborem specyficznego komponentu OF i zastosowaniem lub nie procedur wzmacniania ruchu. Wszystkie strategie bazują na zasadzie przekształcenia przepływu optycznego do dziedziny częstotliwości, co pozwala na przygotowanie wzorców ruchu związanych z cyklicznym otwieraniem się i zamykaniem pęknięcia i daje możliwość automatycznego określenia położenia wierzchołka pęknięcia (PMP) w różnych stadiach jego rozwoju. Metodyka wyznaczania PMP została w dość skrótowy sposób przedstawiona w rozdziale 7. Rozdział 8 w całości poświęcony jest prezentacji implementacji zaproponowanej metodyki (w wersji z analizą kierunkowych map amplitudy OF) oraz sprawdzenia jej poprawności dla różnych strategii i parametrów przetwarzania danych w odniesieniu do najbardziej złożonego obiektu wybranego do eksperymentów tj. dla płaskiego panelu samolotowego ze zmęczeniowym pęknięciem. Jako metodę referencyjną do sprawdzenia poprawności wybrano ręczną (wizualną) metodę anotacji wierzchołka pęknięcia, a jako miarę poprawności przyjęto różnicę pomiędzy automatycznie i ręcznie wyznaczonymi pozycjami wierzchołka pęknięcia. Eksperymenty wykonano z wykorzystaniem 2 kamer pracujących z różnymi powiększeniami oraz dla czterech etapów propagacji pęknięcia. Dodatkowo dla 2 etapów propagacji pęknięcia do rejestracji wideo wykorzystano smartphone. Rozprawa doktorska podsumowana jest w rozdziale 9, w którym dwie pierwsze sekcje poświęcone są dyskusji dotyczącej 2 podstawowych nowości zaprezentowanych w pracy tzn. metody wyznaczania map lokalnej niespójności orientacji i jej znaczenia w dalszym potoku przetwarzania oraz metodyki wizualizacji i oceny PMP. W ostatniej sekcji tego rozdziału Doktorant nakreślił kierunki dalszych prac związanych z rozwojem i praktyczną implementacją zaproponowanych metod. W ostatnim, bardzo krótkim rozdziale 10, Pan Machynia podsumował najważniejsze osiągnięcia swojej pracy i podał listę publikacji bezpośrednio związanych z tematyką rozprawy.

Podsumowując tą część recenzji stwierdzam, że podjęta w pracy tematyka jest aktualna i ważna zarówno naukowo jak i praktycznie, metodyka badawcza zastosowana przez Doktoranta jest poprawna, a jej implementacja doprowadziła do realizacji celu rozprawy.

3. Ocena wartości naukowej i praktycznych aspektów pracy

Jak już wspominałam wcześniej do najważniejszych metod wizyjnych, które spełniają wymagania detekcji i monitorowania pól przemieszczeń i odkształceń struktur inżynierskich (i nie tylko), a w szczególności propagacji pęknięć zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i polowych należą cyfrowa korelacja obrazu i metoda przepływów optycznych. Ta ostatnia, mimo ogromnego potencjału aplikacyjnego, jest znacznie mniej rozpowszechniona w praktyce laboratoryjnej i przemysłowej.

Uważam, że cel pracy sformułowany w rozdziale 3 rozprawy, został osiągnięty poprzez analizy i badania, w których jako **oryginalność rozwiązania problemu naukowego** uznaje:

- **zaproponowanie i implementacja metodyki wyznaczania** z serii wideo **amplitudowych map wizualizujących wzorce ruchu struktury z pęknięciem podanej wzbudzeniu** i udowodnienie przydatności tej metodyki do wizualizacji ruchu związanego z „oddychania” pęknięcia; Doktorant wykorzystuje tutaj tzw „phase based optical flow”, w którym zamiast jasności analizuje fazę sygnału w obrazie, która dzięki dobraniu odpowiedniego okna w dziedzinie częstotliwości doskonale wspomaga wizualizację dowolnego lub kierunkowego wzorca ruchu struktury;

- **zaproponowanie i implementacja procedury automatycznej lokalizacji położenia wierzchołka pęknięcia** bazującej na kierunkowych (prostopadłych do estymowanego kierunku pęknięcia) mapach amplitudowych. Procedura bazuje na ocenie różnic w średnich wartościach amplitud pomiędzy wybranymi obszarami po obu stronach pęknięcia;

- **sformułowanie i implementacja algorytmiczna metryki do oceny lokalnej niespójności orientacji ruchu struktury**. Zaproponowanie tej metryki ma duże znaczenie w odniesieniu do wstępnego etapu realizacji głównego celu pracy, gdyż pozwala wybrać właściwy do analizy obszar zainteresowania maskując obszary o niskiej wiarygodności pomiaru. Równocześnie może być ona wykorzystana w innych zastosowaniach metody OF, gdyż jest indykatorem oceny lokalnej wiarygodności wyznaczania ruchu.

Wybrane elementy tematyki opracowanej w ramach pracy doktorskiej Pana Machyni opublikowane zostały w dwóch publikacjach w renomowanych czasopismach: *Mechanical Systems and Signal Processing* (2023r., drugi autor, czasopismo z I decyla, 10 cytowań) oraz *Measurement* (2026, pierwszy autor, czasopismo z I decyla), co dodatkowo **potwierdza walory naukowe pracy**.

Do ważnych elementów związanych z przyszłymi pracami aplikacyjnymi i wdrożeniowymi zaliczam:

- **analizę wpływu metody wzmocnienia ruchu w procedurach wyznaczania map amplitudy i wizualizacji pęknięcia**. Przeprowadzenie tych analiz dało odpowiedzi na szereg pytań dotyczących zasadności wykorzystania metody MM w rozważanym zastosowaniu metod OF, upraszczając dzięki temu przyszłościowe prace aplikacyjne i wdrożeniowe;

- **przeprowadzenie obszernych prac eksperymentalnych** (m.in. różne etapy propagacji pęknięcia) z wykorzystaniem przemysłowego artefaktu (płaski panel samolotowy ze zmęczeniowym pęknięciem), które oprócz walidacji metody stanowią mogą doskonały demonstrator metody do wykorzystania w rozmowach z przemysłem;

- **prezentację implementacji metody z wykorzystaniem rejestracji wideo za pomocą smartphon’a**, co może stanowić początek prac nad opracowaniem niskokosztowej realizacji metody monitorowania propagacji pęknięć i lokalizacji wierzchołka pęknięcia dla zastosowań pozalaboratoryjnych.

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa ma znaczną wartość naukową i stanowi udokumentowanie posiadania przez Doktoranta pogłębionej wiedzy z zakresu dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne dotyczącej istoty badanych zjawisk fizycznych, ich opisu teoretycznego i badań eksperymentalnych oraz czynników mających wpływ na przebieg eksperymentu, jak i możliwości dokonywania ich praktycznej weryfikacji. Tym samym stwierdzam, że Doktorant wykazał się odpowiednią wiedzą i umiejętnościami pretendującymi Go do uzyskania stopnia doktorskiego.

4. Zastrzeżenia, uwagi krytyczne i dyskusyjne

W trakcie recenzowania Rozprawy recenzent sformułował zbiór niżej zamieszczonych uwag dwójakiej natury. Pierwsze z nich to uwagi merytoryczne, które zdaniem recenzenta stanowią zauważone błędy lub niedociągnięcia w pracy, drugie - to uwagi typu dyskusyjnego. Odpowiedź na tę drugą kategorię powinna być źródłem konstruktywnej dyskusji z Doktorantem w trakcie obrony publicznej.

Jednocześnie ze względu na dążenie do ograniczenia objętości recenzji, uwagi nie są poprzedzone wprowadzeniem i w konsekwencji mogą być zrozumiałe jedynie w kontekście pracy.

Uwagi merytoryczne:

- w rozdziale 4 Doktorant prezentuje trzy eksperymenty, z których dwa były zaplanowane i zrealizowane (informacja na str. 24) bez udziału Autora doktoratu. Proszę o wyjaśnienie jak Recenzent ma to interpretować. Jaka była rola Doktoranta w przeprowadzeniu eksperymentów i poszczególnych etapach analizy danych?
- w rozdziale 5 nie podano zasad doboru szerokości okna filtracji w widmie Fouriera i wpływu doboru okna na pole amplitud (ten wpływ może być znaczący) Czy parametr ten jest dobierany przez operatora oddzielnie dla każdego nowego eksperymentu? W jaki sposób można to zautomatyzować?
- jak czuła jest metoda wyznaczania położenia wierzchołka pęknięcia na zmianę kierunku propagacji pęknięcia (przyjęto założenie liczenia map amplitudy w kierunku prostopadłym do pęknięcia) ?
- rozdział 7 (Fig. 7.1) oraz rozdział 8 wzór (8.1) – na jakiej podstawie we wzorze na poziom odcięcia dodano wartość $5s_{sf}$. Czy wartość ta zależy od obiektu badanego (w tym szumów w polu amplitud)? W pracy brak uzasadnienia.
- rozdział 7 (Fig. 7.3): jak będzie przeprowadzona lokalizacja wierzchołka pęknięcia w przypadku eksperymentu z belką. Proszę o zaznaczenie, gdzie w tym przypadku będzie położona linia odcięcia i o wyjaśnienie czy ten wynik będzie miał sens fizyczny.
- w rozdziale 8.4.3 zaprezentowana została analiza błędów wyznaczania położenia wierzchołka pęknięcia w porównaniu do metody manualnej, nie podano natomiast jaka jest oczekiwana dokładność tej wielkości lub innej wielkości wynikającej z monitorowania propagacji pęknięcia, która np. będzie wystarczająca do wykorzystania w MES lub detekcji stanów awaryjnych. Czy pole amplitud daje możliwość wyznaczenia pola odkształceń w pobliżu wierzchołka pęknięcia?
- w pracy brak informacji dot. czasu przetwarzania danych w całym procesie od pobrania wideo do lokalizacji wierzchołka pęknięcia oraz indywidualnych czasów poszczególnych modułów przetwarzania m.in. czasów potrzebnych na wyznaczenie LOI, wyznaczenie map amplitudy, procedury lokalizacji wierzchołka pęknięcia. Proszę o uzupełnienia. Jakie są perspektywy przyspieszenia tych obliczeń.

Uwagi dyskusyjne:

- w podrozdziale 2.5 Doktorant stwierdza, że „DIC-based techniques enable measurement of crack growth, but require surface preparation, typically through application of speckle patterns, and therefore cannot be regarded as fully non-contact”. Jednak, jak widać z analiz przedstawionych w pracy, niska wartość LOI dla OF uzyskiwana jest w obszarach, które charakteryzują się przypadkową teksturą, natomiast CKO (jak widać z licznych doniesień literaturowych) może być realizowane na obiektach z teksturą naturalną, a więc obie metody zbliżają się wymaganiami odnośnie tekstury do siebie. Dlatego w pracy brak mi oceny porównawczej możliwości pomiarowych CKO (jako metody najczęściej obecnie stosowanej w praktyce przemysłowej) i OF. Myślę tutaj m. in. o wymaganiach sprzętowych, czasie obliczeniowym, dokładności wyznaczenia położenia wierzchołka pęknięcia (w tym nieczułości na szumy i zmienne warunki w czasie przeprowadzania eksperymentu, konieczność stabilizacji położenia kamery itd.), możliwości ilościowego wyznaczenia wartości przemieszczeń/odkształceń w próbce, w szczególności w pobliżu wierzchołka pęknięcia i inne;
- jaka modyfikacja sprzętowa i procedur byłaby potrzebna w przypadku obiektu niepłaskiego (np. rury/pręta). Jakie odstępstwa od płaskości są dopuszczane w obszarze zainteresowania?
- jakie, w Pana opinii, są perspektywy wykorzystania OF w monitorowaniu pęknięć w materiałach kompozytowych, w który często pęknięcia są podpowierzchniowe, a kierunek propagacji może być zmienny;
- jakie, w Pana opinii, są perspektywy wykorzystania OF w monitorowaniu pęknięć z wykorzystaniem UAV.

Recenzowana praca napisana została przejrzysto i przygotowana z dużą dbałością o stronę graficzną i edycyjną. Mimo to recenzent wskazuje na kilka drobnych uchybień np.:

- w rozdziale 10 (str. 87) brak pełnych danych bibliograficznych przy publikacjach;
- w literaturze brakuje mi odniesienia do monografii: Michael A. Sutton Jean-José Orteu Hubert Schreier: Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications, Springer Verlag-US 2009, która jest "biblią" metody CKO

Powyższe uwagi merytoryczne i dyskusyjne nie podważają wartości pracy, którą oceniam jednoznacznie pozytywnie.

5. Podsumowanie

W podsumowaniu niniejszym stwierdzam, iż przedłożona rozprawa doktorska mgr inż. Adama Machyni spełnia wymogi w świetle obowiązującej *Ustawy - Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce z 20.07.2018r* (tj. Dz.U. z 2024r. poz.1571 z późniejszymi zmianami) zarówno co do wymaganego dorobku naukowego (dwa artykuły w czasopismach JCR z I decyla) , zaprezentowania przez Doktoranta ogólnej wiedzy teoretycznej w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne i umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, a przede wszystkim jako oryginalnego rozwiązania problemu naukowego. **Stawiam więc wniosek o jej przyjęcie jako rozprawy doktorskiej oraz dopuszczenie do publicznej obrony.**



RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Adama Machyni pt. „Marker-free optical flow-based automatic crack assessment in metallic structures under periodic excitation”

1. Informacje wstępne

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Adama Machyni pt. „Marker-free optical-flow-based automatic crack assessment in metallic structures under periodic excitation”. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Ziemowit Dworakowski, prof. AGH. Przewód doktorski został wszczęty przez Radę Naukową Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, w Dziedzinie – Nauki Inżynieryjno-Techniczne. Recenzję przygotowano na podstawie zlecenia Przewodniczącego RN Dyscypliny AEEiTK Akademii Górniczo-Hutniczej zgodnie z pismem z dnia 7 listopada 2025 r.

Tematyka rozprawy doktorskiej związana jest z zagadnieniami zastosowania metod wizyjnych do oceny zdrowia mechanicznych, metalowych struktur inżynierskich (SHM : *Structural Health Monitoring*) oraz ich nieniszczących metod badań (NDT: *Nondestructive Testing*), a w szczególności monitorowania propagacji pęknięć w tych strukturach. Aplikacyjny aspekt tej tematyki związany jest bezpośrednio z dyscypliną Inżynieria Mechaniczna. Jednak w pracy Doktorant koncentruje się na modyfikacjach metod wizji komputerowej (CV: *Computer Vision*), w tym przede wszystkim metod przetwarzania gęstych danych wizyjnych w celu wizualizacji ruchu związanego z pęknięciem oraz opracowaniem metodyki i procedur automatycznej detekcji położenia wierzchołka pęknięcia. Biorąc to pod uwagę, stwierdzam, że tematyka pracy jest dobrze umiejscowiona w zakresie merytorycznym dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

Rozprawa doktorska została opublikowana w języku angielskim, w formie monografii liczącej 99 stron maszynopisu zawierającego również obszerną bibliografię obejmującą 116 pozycji literatury, z których Pan Machynia korzystał w trakcie realizacji swojej pracy i przygotowania manuskryptu. Większość prac, do których odnosi się Doktorant, to prace z okresu ostatnich kilku - kilkunastu lat. (na 116 cytowane prace, tylko 16 zostało opublikowanych w wieku XX-tym). Jest to po części zrozumiałe, gdyż początki zastosowań wizji komputerowej w mechanice eksperymentalnej, a szczególnie metoda cyfrowej korelacji obrazu i rozpatrywana w pracy metoda przepływów optycznych sięgają lat osiemdziesiątych XX wieku, jednak ich pełen rozwój (w tym pojawienie się systemów komercyjnych), to już wiek XXI.

Pan Piotr Machynia jest współautorem dwóch publikacji bezpośrednio związanych z tematyką pracy: artykułu w czasopiśmie *Mechanical Systems and Signal Processing* (opublikowany w 2023r., drugi autor, czasopismo z I decyla, 10 cytowań) oraz artykułu w czasopiśmie *Measurement* (opublikowany w 2026, pierwszy autor, czasopismo z I decyla). Fakt ten świadczy o znacznej wadze i rozpoznawalności prac naukowych realizowanych przez Doktoranta i przedstawionych w rozprawie doktorskiej.

2. Tematyka, zakres i cel rozprawy

Zagadnienia monitorowania zdrowia strukturalnego obiektów inżynierskich, począwszy od dużych struktur w inżynierii lądowej i lotnictwie poprzez wysoko odpowiedzialne elementy w przemyśle samochodowym, lotniczym, kosmicznym i energetycznym, a skończywszy na elementach MEMS/MOEMS (Mikro-Opto-Elektronicznych Systemach) i pakietach elektronicznych, są od lat obszarem

zainteresowania zarówno naukowców jak i praktyków odpowiedzialnych za projektowanie, produkcję, a zwłaszcza eksploatację tych struktur. Wśród tych zagadnień niezwykle ważnym elementem jest detekcja i monitorowanie pęknięć (w tym szczególnie pęknięć zmęczeniowych w konstrukcjach metalowych) elementów konstrukcji, które zmniejszają jej sztywność, modyfikują jej modalne własności i odpowiadają dynamiczną doprowadzając stopniowo do degradacji struktury, a nawet do jej zniszczenia. Historycznie stosowane punktowe metody pomiaru i monitorowania odkształceń nie są w tych przypadkach wystarczające i dlatego już w drugiej połowie XX wieku zaczęły się intensywnie rozwijać optyczne (bezkontaktowe), polowe metody pomiarowe wykorzystujące zarówno światło koherentne (metody interferometryczne, w tym plamkowe, holograficzne interferometrii siatkowej), jak i światło niekoherentne (metody rastrowe, w tym metoda prążków mory, fotografia plamkowa). Wraz z rozwojem matrycowych detektorów, komputerów oraz metod przetwarzania obrazu, wyżej wymienione metody optyczne uzupełnione zostały o automatyczną, komputerową analizę danych. Równocześnie rozwinęły się tzw. wizyjne metody analizy przemieszczeń i odkształceń, które często nie wymagały znacznego przygotowania powierzchni badanego obiektu i jednocześnie zmniejszały wymagania eksperymentalne i umożliwiały długotrwałe monitorowanie obiektów poddanych zarówno statycznym, jak i dynamicznym obciążeniom. Do najważniejszych metod wizyjnych, które spełniają wymagania detekcji i monitorowania propagacji pęknięć zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i polowych należą cyfrowa korelacja obrazu (CKO) i metoda przepływów optycznych (OF: *optical flow*). Obydwie metody teoretycznie dostarczają te same informacje tzn. wyznaczają pola przemieszczeń w kierunku x i y w chwili t na podstawie sekwencji obrazów, jednak mają inne podstawy matematyczne i nieco inne wymagania dot. warunków przeprowadzania pomiarów. Metoda CKO jest obecnie najczęściej stosowaną metodą zarówno w laboratoriach naukowych jak i w praktyce przemysłowej. Metoda OF jest metodą znacznie rzadziej stosowaną, ale o dużym potencjale zwłaszcza w przypadku badań drgań konstrukcji, analizie inicjacji pęknięć i wykorzystaniu obrazów o wysokiej rozdzielczości. Biorąc pod uwagę znaczne zapotrzebowanie na efektywne metody monitorowania pęknięć zmęczeniowych i potencjał metody OF wydaje się zasadnym i ważnym z punktu widzenia naukowego i praktycznego sformułowanie przez Doktoranta celu pracy jako:

Opracowanie i sprawdzenie poprawności bezznacznikowej, bazującej na widzeniu komputerowym metodyki automatycznej oceny pęknięcia zmęczeniowego w metalicznych strukturach poddanych wymuszeniu okresowemu, zaprojektowanej do integracji z praktyki badań nieniszczących lub monitorowania zdrowia struktur. (tłumaczenie przez Recenzenta celu podanego przez Doktoranta na str. 22).

W pracy nie została sformułowana teza, mimo, iż mogłaby być bez trudu wyartykułowana. Jednak Recenzent nie podnosi tej kwestii, gdyż w pracach doktorskich w dziedzinie Nauki Inżynierijsko-Technicznej jest to dopuszczalne, o ile właściwie zostanie sformułowany cel pracy co w tym przypadku ma miejsce.

Na pracę doktorską składają się: streszczenia w języku polskim i angielskim, dziesięć rozdziałów, obszerna bibliografia oraz spis rysunków. W pierwszym rozdziale Doktorant bardzo skrótowo wprowadza czytelnika w tematykę oceny zdrowia struktur inżynierskich, wagę monitorowania pęknięć z wykorzystaniem metod widzenia komputerowego oraz identyfikuje zapotrzebowanie na opracowanie nowej metodyki pomiarowej bazującej na metodzie przepływów optycznych. W tym samym rozdziale przedstawiona jest struktura pracy. Następnie (rozdział 2) omówiony jest stan techniki w odniesieniu do roli widzenia komputerowego w SHM ze szczególnym uwzględnieniem metod CV do detekcji i oceny pęknięć. Doktorant wspomina tutaj również o grupie metod, które wykorzystują zjawisko „oddychania” pęknięcia. Jednak podstawowym celem tego rozdziału jest omówienie metody OF wraz z podstawowymi opisami matematycznymi i wykorzystywanymi metodami głębokiego uczenia w OF oraz szerokiej gamy metod realizujących wzmacnianie ruchu (MM: *motion magnification*) i ich zastosowań w SHM i NDT. W podsumowaniu rozdziału 2 Adam Machynia wskazuje na liczne ograniczenia dostępnych metod w zastosowaniu do monitorowania pęknięć zmęczeniowych i identyfikuje konieczność prowadzenia badań naukowych nad usunięciem tych ograniczeń. Na tym podsumowaniu bazuje rozdział 3, w którym Doktorant przedstawił cel rozprawy oraz zadania, które muszą być zrealizowane dla osiągnięcia tego celu. W rozdziałach 4-8 zaprezentowane są kolejne etapy prac bezpośrednio związanych z opracowaniem i badaniami metody OF w zastosowaniu do automatycznej oceny pęknięcia zmęczeniowego

w metalicznych strukturach poddanych wymuszeniu okresowemu. I tak w rozdziale 4 Doktorant opisuje skrótowo trzy eksperymenty (obiekty badane: kompresor, aluminiowa belka z pęknięciem i płaski panel samolotowy ze zmęczeniowym pęknięciem), w ramach których zbierane były dane służące do opracowania, zwalidowania i zademonstrowania zaproponowanych w pracy technik. Dwa pierwsze eksperymenty zostały zaprojektowane i zrealizowane przez zespoły naukowe bez udziału Doktoranta. W pracach trzeciego zespołu eksperymentalnego uczestniczył Pan Machynia. Prezentacja eksperymentów przed przedstawieniem proponowanej metody jest nietypowym zabiegiem, który można częściowo zrozumieć dopiero po zapoznaniu się z dalszymi rozdziałami, w których dane zebrane w tych eksperymentach wykorzystywane są do ilustracji wyników kolejnych etapów opracowania końcowej ścieżki przetwarzania danych dla monitorowania i oceny pęknięcia w strukturach inżynierskich. Rozdział 5 poświęcony jest opracowaniu i walidacji procedury oceniającej spójność kierunku ruchu estymowanego z nagrań wideo. Doktorant zaproponował metodę wyznaczania map lokalnej niespójności orientacji ruchu (LOI: *Local Orientation Inconsistency*). Metryka ta pozwala na maskowanie części obiektu o niepewnej estymacji ruchu i wspomaga wybór obszaru odpowiedniego do dalszej analizy, co zostało potwierdzone na przykładach analizy wyników eksperymentów, które zostały opisane w rozdziale 4. Rozdziały 6 i 7 są kluczowymi rozdziałami w pracy. W rozdziale 6 zaprezentowana została metodyka wyznaczania amplitudowych map wizualizujących wzorzec ruchu struktury podanej wzbudzeniu o różnych amplitudach. Doktorant przeanalizował kilka strategii przetwarzania sygnału różniących się od siebie wyborem specyficznego komponentu OF i zastosowaniem lub nie procedur wzmacniania ruchu. Wszystkie strategie bazują na zasadzie przekształcenia przepływu optycznego do dziedziny częstotliwości, co pozwala na przygotowanie wzorców ruchu związanych z cyklicznym otwieraniem się i zamykaniem pęknięcia i daje możliwość automatycznego określenia położenia wierzchołka pęknięcia (PMP) w różnych stadiach jego rozwoju. Metodyka wyznaczania PMP została w dość skrótowy sposób przedstawiona w rozdziale 7. Rozdział 8 w całości poświęcony jest prezentacji implementacji zaproponowanej metodyki (w wersji z analizą kierunkowych map amplitudy OF) oraz sprawdzenia jej poprawności dla różnych strategii i parametrów przetwarzania danych w odniesieniu do najbardziej złożonego obiektu wybranego do eksperymentów tj. dla płaskiego panelu samolotowego ze zmęczeniowym pęknięciem. Jako metodę referencyjną do sprawdzenia poprawności wybrano ręczną (wizualną) metodę anotacji wierzchołka pęknięcia, a jako miarę poprawności przyjęto różnicę pomiędzy automatycznie i ręcznie wyznaczonymi pozycjami wierzchołka pęknięcia. Eksperymenty wykonano z wykorzystaniem 2 kamer pracujących z różnymi powiększeniami oraz dla czterech etapów propagacji pęknięcia. Dodatkowo dla 2 etapów propagacji pęknięcia do rejestracji wideo wykorzystano smartphone. Rozprawa doktorska podsumowana jest w rozdziale 9, w którym dwie pierwsze sekcje poświęcone są dyskusji dotyczącej 2 podstawowych nowości zaprezentowanych w pracy tzn. metody wyznaczania map lokalnej niespójności orientacji i jej znaczenia w dalszym potoku przetwarzania oraz metodyki wizualizacji i oceny PMP. W ostatniej sekcji tego rozdziału Doktorant nakreślił kierunki dalszych prac związanych z rozwojem i praktyczną implementacją zaproponowanych metod. W ostatnim, bardzo krótkim rozdziale 10, Pan Machynia podsumował najważniejsze osiągnięcia swojej pracy i podał listę publikacji bezpośrednio związanych z tematyką rozprawy.

Podsumowując tą część recenzji stwierdzam, że podjęta w pracy tematyka jest aktualna i ważna zarówno naukowo jak i praktycznie, metodyka badawcza zastosowana przez Doktoranta jest poprawna, a jej implementacja doprowadziła do realizacji celu rozprawy.

3. Ocena wartości naukowej i praktycznych aspektów pracy

Jak już wspominałam wcześniej do najważniejszych metod wizyjnych, które spełniają wymagania detekcji i monitorowania pól przemieszczeń i odkształceń struktur inżynierskich (i nie tylko), a w szczególności propagacji pęknięć zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i polowych należą cyfrowa korelacja obrazu i metoda przepływów optycznych. Ta ostatnia, mimo ogromnego potencjału aplikacyjnego, jest znacznie mniej rozpowszechniona w praktyce laboratoryjnej i przemysłowej.

Uważam, że cel pracy sformułowany w rozdziale 3 rozprawy, został osiągnięty poprzez analizy i badania, w których jako **oryginalność rozwiązania problemu naukowego** uznają:

- **zaproponowanie i implementacja metodyki wyznaczania** z serii wideo **amplitudowych map wizualizujących wzorce ruchu struktury z pęknięciem podanej wzbudzeniu** i udowodnienie przydatności tej metodyki do wizualizacji ruchu związanego z „oddychania” pęknięcia; Doktorant wykorzystuje tutaj tzw „phase based optical flow”, w którym zamiast jasności analizuje fazę sygnału w obrazie, która dzięki dobraniu odpowiedniego okna w dziedzinie częstotliwości doskonale wspomaga wizualizację dowolnego lub kierunkowego wzorca ruchu struktury;

- **zaproponowanie i implementacja procedury automatycznej lokalizacji położenia wierzchołka pęknięcia** bazującej na kierunkowych (prostopadłych do estymowanego kierunku pęknięcia) mapach amplitudowych. Procedura bazuje na ocenie różnic w średnich wartościach amplitud pomiędzy wybranymi obszarami po obu stronach pęknięcia;

- **sformułowanie i implementacja algorytmiczna metryki do oceny lokalnej niespójności orientacji ruchu struktury**. Zaproponowanie tej metryki ma duże znaczenie w odniesieniu do wstępnego etapu realizacji głównego celu pracy, gdyż pozwala wybrać właściwy do analizy obszar zainteresowania maskując obszary o niskiej wiarygodności pomiaru. Równocześnie może być ona wykorzystana w innych zastosowaniach metody OF, gdyż jest indykatorem oceny lokalnej wiarygodności wyznaczania ruchu.

Wybrane elementy tematyki opracowanej w ramach pracy doktorskiej Pana Machyni opublikowane zostały w dwóch publikacjach w renomowanych czasopismach: *Mechanical Systems and Signal Processing* (2023r., drugi autor, czasopismo z I decyla, 10 cytowań) oraz *Measurement* (2026, pierwszy autor, czasopismo z I decyla), co dodatkowo **potwierdza walory naukowe pracy**.

Do ważnych elementów związanych z przyszłymi pracami aplikacyjnymi i wdrożeniowymi zaliczam:

- **analizę wpływu metody wzmocnienia ruchu w procedurach wyznaczania map amplitudy i wizualizacji pęknięcia**. Przeprowadzenie tych analiz dało odpowiedzi na szereg pytań dotyczących zasadności wykorzystania metody MM w rozważanym zastosowaniu metod OF, upraszczając dzięki temu przyszłościowe prace aplikacyjne i wdrożeniowe;

- **przeprowadzenie obszernych prac eksperymentalnych** (m.in. różne etapy propagacji pęknięcia) z wykorzystaniem przemysłowego artefaktu (płaski panel samolotowy ze zmęczeniowym pęknięciem), które oprócz walidacji metody stanowią doskonały demonstrator metody do wykorzystania w rozmowach z przemysłem;

- **prezentację implementacji metody z wykorzystaniem rejestracji wideo za pomocą smartphone’a**, co może stanowić zaczątek prac nad opracowaniem niskokosztowej realizacji metody monitorowania propagacji pęknięć i lokalizacji wierzchołka pęknięcia dla zastosowań pozalaboratoryjnych.

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa ma znaczną wartość naukową i stanowi udokumentowanie posiadania przez Doktoranta pogłębionej wiedzy z zakresu dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne dotyczącej istoty badanych zjawisk fizycznych, ich opisu teoretycznego i badań eksperymentalnych oraz czynników mających wpływ na przebieg eksperymentu, jak i możliwości dokonywania ich praktycznej weryfikacji. Tym samym stwierdzam, że Doktorant wykazał się odpowiednią wiedzą i umiejętnościami pretendującymi Go do uzyskania stopnia doktorskiego.

4. Zastrzeżenia, uwagi krytyczne i dyskusyjne

W trakcie recenzowania Rozprawy recenzent sformułował zbiór niżej zamieszczonych uwag dwójakiej natury. Pierwsze z nich to uwagi merytoryczne, które zdaniem recenzenta stanowią zauważone błędy lub niedociągnięcia w pracy, drugie - to uwagi typu dyskusyjnego. Odpowiedź na tę drugą kategorię powinna być źródłem konstruktywnej dyskusji z Doktorantem w trakcie obrony publicznej.

Jednocześnie ze względu na dążenie do ograniczenia objętości recenzji, uwagi nie są poprzedzone wprowadzeniem i w konsekwencji mogą być zrozumiałe jedynie w kontekście pracy.

Uwagi merytoryczne:

-w rozdziale 4 Doktorant prezentuje trzy eksperymenty, z których dwa były zaplanowane i zrealizowane (informacja na str. 24) bez udziału Autora doktoratu. Proszę o wyjaśnienie jak Recenzent ma to interpretować. Jaka była rola Doktoranta w przeprowadzeniu eksperymentów i poszczególnych etapach analizy danych?

- w rozdziale 5 nie podano zasad doboru szerokości okna filtracji w widmie Fouriera i wpływu doboru okna na pole amplitud (ten wpływ może być znaczący) Czy parametr ten jest dobierany przez operatora oddzielnie dla każdego nowego eksperymentu? W jaki sposób można to zautomatyzować?

- jak czuła jest metoda wyznaczania położenia wierzchołka pęknięcia na zmianę kierunku propagacji pęknięcia (przyjęto założenie liczenia map amplitudy w kierunku prostopadłym do pęknięcia) ?

- rozdział 7 (Fig. 7.1) oraz rozdział 8 wzór (8.1) – na jakiej podstawie we wzorze na poziom odcięcia dodano wartość $5s_{sr}$. Czy wartość ta zależy od obiektu badanego (w tym szumów w polu amplitud)? W pracy brak uzasadnienia.

- rozdział 7 (Fig.7.3): jak będzie przeprowadzona lokalizacja wierzchołka pęknięcia w przypadku eksperymentu z belką. Proszę o zaznaczenie, gdzie w tym przypadku będzie położona linia odcięcia i o wyjaśnienie czy ten wynik będzie miał sens fizyczny.

- w rozdziale 8.4.3 zaprezentowana została analiza błędów wyznaczania położenia wierzchołka pęknięcia w porównaniu do metody manualnej, nie podano natomiast jaka jest oczekiwana dokładność tej wielkości lub innej wielkości wynikającej z monitorowania propagacji pęknięcia, która np. będzie wystarczająca do wykorzystania w MES lub detekcji stanów awaryjnych. Czy pole amplitud daje możliwość wyznaczenia pola odkształceń w pobliżu wierzchołka pęknięcia?

- w pracy brak informacji dot. czasu przetwarzania danych w całym procesie od pobrania wideo do lokalizacji wierzchołka pęknięcia oraz indywidualnych czasów poszczególnych modułów przetwarzania m.in. czasów potrzebnych na wyznaczenie LOI, wyznaczenie map amplitudy, procedury lokalizacji wierzchołka pęknięcia. Proszę o uzupełnienia. Jakie są perspektywy przyspieszenia tych obliczeń.

Uwagi dyskusyjne:

-- w podrozdziale 2.5 Doktorant stwierdza, że „DIC-based techniques enable measurement of crack growth, but require surface preparation, typically through application of speckle patterns, and therefore cannot be regarded as fully non-contact”. Jednak, jak widać z analiz przedstawionych w pracy, niska wartość LOI dla OF uzyskiwana jest w obszarach, które charakteryzują się przypadkową teksturą, natomiast CKO (jak widać z licznych doniesień literaturowych) może być realizowane na obiektach z teksturą naturalną, a więc obie metody zbliżają się wymaganiami odnośnie tekstury do siebie. Dlatego w pracy brak mi oceny porównawczej możliwości pomiarowych CKO (jako metody najczęściej obecnie stosowanej w praktyce przemysłowej) i OF. Myślę tutaj m. in. o wymaganiach sprzętowych, czasie obliczeniowym, dokładności wyznaczenia położenia wierzchołka pęknięcia (w tym nieczułości na szumy i zmienne warunki w czasie przeprowadzania eksperymentu, konieczność stabilizacji położenia kamery itd.), możliwości ilościowego wyznaczenia wartości przemieszczeń/odkształceń w próbce, w szczególności w pobliżu wierzchołka pęknięcia i inne;

- jaka modyfikacja sprzętowa i procedur byłaby potrzebna w przypadku obiektu niepłaskiego (np. rury/pręta). Jakie odstępstwa od płaskości są dopuszczane w obszarze zainteresowania?

- jakie, w Pana opinii, są perspektywy wykorzystania OF w monitorowaniu pęknięć w materiałach kompozytowych, w który często pęknięcia są podpowierzchniowe, a kierunek propagacji może być zmienny;

- jakie, w Pana opinii, są perspektywy wykorzystania OF w monitorowaniu pęknięć z wykorzystaniem UAV.

Recenzowana praca napisana została przejrzysto i przygotowana z dużą dbałością o stronę graficzną i edycyjną. Mimo to recenzent wskazuje na kilka drobnych uchybień np.:

- w rozdziale 10 (str. 87) brak pełnych danych bibliograficznych przy publikacjach;
- w literaturze brakuje mi odniesienia do monografii: Michael A. Sutton Jean-José Orteu Hubert Schreier: Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications, Springer Verlag-US 2009, która jest "biblią" metody CKO

Powyższe uwagi merytoryczne i dyskusyjne nie podważają wartości pracy, którą oceniam jednoznacznie pozytywnie.

5. Podsumowanie

W podsumowaniu niniejszym stwierdzam, iż przedłożona rozprawa doktorska mgr inż. Adama Machyni spełnia wymogi w świetle obowiązującej *Ustawy - Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce z 20.07.2018r* (tj. Dz.U. z 2024r. poz.1571 z późniejszymi zmianami) zarówno co do wymaganego dorobku naukowego (dwa artykuły w czasopismach JCR z I decyla) , zaprezentowania przez Doktoranta ogólnej wiedzy teoretycznej w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne i umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, a przede wszystkim jako oryginalnego rozwiązania problemu naukowego. **Stawiam więc wniosek o jej przyjęcie jako rozprawy doktorskiej oraz dopuszczenie do publicznej obrony.**