

Katedra Sieci Teleinformatycznych

Gdańsk, 18.01.2024

dr hab. inż. Adrian Bekasiewicz, prof. PG  
Katedra Sieci Teleinformatycznych  
Wydział Elektroniki Telekomunikacji i Informatyki  
Politechnika Gdańska  
Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

dr hab. inż. Andrzej Waindok, prof. PO  
Przewodniczący Rady Naukowej Dyscypliny (RND)  
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i  
Technologie Kosmiczne (AEEiTK)  
Politechnika Opolska  
Prószkowska 76, 45-758 Opole

### **Recenzja rozprawy doktorskiej mgra inż. Adama Łysiaka pt. *Automatic diagnosis of the patient's knee joint using selected methods of vibrathographic signal analysis***

Niniejszy dokument zawiera recenzję rozprawy doktorskiej mgra inż. Adama Łysiaka (dziedzina nauk inżyniersko-technicznych, dyscyplina: AEEiTK) pod tytułem *Automatic diagnosis of the patient's knee joint using selected methods of vibrathographic signal analysis*. Praca została zrealizowana pod opieką dr. hab. inż. Mirosława Szmajdy (promotor) oraz dr. hab. Dawida Bączkowicza (promotor pomocniczy). Umocowaniem prawnym dokumentu jest zawiadomienie nr RE00ST0037/D/2023 z dnia 28.11.2023 roku dotyczące wyznaczenia mojej osoby na recenzenta w postępowaniu o nadanie stopnia doktora zainteresowanemu, a także umowa o dzieło nr 17/AEEiTK/23 z dnia 01.12.2023 roku. Rozprawa została oceniona zgodnie z zapisami Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz. U. z 2023 r. poz. 724).

#### **1. Ocena układu rozprawy doktorskiej**

Przedstawiona do recenzji rozprawa została przygotowana w języku angielskim w formie monografii o objętości 206 stron. Dysertacja składa się z trzech części, na które składa się łącznie czternaście rozdziałów. Ponadto praca zawiera streszczenie w języku polskim i angielskim, listę tabel oraz rysunków, wykaz skrótów i oznaczeń, a także dwa dodatki oraz spis referencji.

Pierwsza część rozprawy wprowadza czytelnika w podejmowaną tematykę badawczą. Poszczególne rozdziały zawierają motywację oraz uzasadnienie prowadzonych badań, tezę rozprawy oraz jej cele, a także syntetyczne omówienie zawartości. W rozdziale drugim przeprowadzono dyskusję badania stawów kolanowych z wykorzystaniem wibroartografii (ang. *vibroarthography* – VAG). W szczególności Autor opisał anatomię stawu kolanowego, wybrane stany chorobowe (dające się zidentyfikować przy użyciu dyskutowanej metody), techniki stosowane w diagnostyce schorzeń stawów kolanowych. Ponadto Doktorant omówił zastosowanie VAG jako techniki stanowiącej uzupełnienie dla zdjęć Rentgenowskich, bądź obrazowania z wykorzystaniem rezonansu magnetycznego. Rozważania uzupełnia omówienie wibroartogramów wykorzystanych w pracy. W tym miejscu należy wskazać, że Autor nie uzupełnił opisów rysunkami przedstawiającymi anatomię stawu kolanowego, czy wpływu schorzeń na zmiany w nim zachodzące. Ograniczenie dyskusji jedynie do opisu słownego może utrudniać jednoznaczne zrozumienie natury dolegliwości dla czytelników bez wykształcenia medycznego (czy znajomości anatomii człowieka).

Biorąc pod uwagę, że praca dotyczy zastosowania metod uczenia maszynowego do klasyfikacji schorzeń, ich wizualizacja (choćby schematyczna) stanowiłaby wartość dodaną w pracy.

Trzeci rozdział zawiera obszerny przegląd literatury zorientowany na analizę stanu wiedzy na temat zastosowania VAG w diagnostyce stawów kolanowych. Dyskusję rozpoczyna wskazanie zarysu historycznego metody. Następnie, Autor omówił także ogólny schemat przetwarzania sygnałów VAG (ang. *pipeline*), którego poszczególne komponenty zostały szczegółowo opisane (i uzupełnione stosownymi tabelami). Przedyskutowane aspekty dotyczą: technik realizacji pomiarów, ekstrakcji cech (ang. *features*) z pozyskanych sygnałów diagnostycznych oraz oceny ich przydatności (w pracy określone mianem informacyjności), redukcji wymiarowości problemu (z punktu widzenia doboru najbardziej informacyjnych cech), czy ich zastosowanie do klasyfikacji. Przegląd literatury uzupełniono obszernymi podsumowaniami oraz syntetycznymi zestawieniami w postaci tabel, co ułatwia wyciągnięcie stosownych wniosków. Warto zwrócić uwagę, że rozważania w kolejnych częściach rozprawy odpowiadają schematowi przetwarzania omówionemu w Sekcji 3.1. Jest to podejście spójne i logiczne, a tym samym pożądane – zwłaszcza biorąc pod uwagę znaczną objętość pracy.

W części drugiej omówiono wybrane techniki wstępnego przetwarzania sygnałów (ang. *preprocessing*) z uwzględnieniem aspektów dotyczących normalizacji oraz stacjonarności sygnałów. Ponadto Autor przeprowadził porównanie technik przetwarzania (filtracji i różniczkowania sygnału) do pomiarów nieprzetworzonych na podstawie wybranego sygnału VAG. W kolejnych rozdziałach przeprowadzono bardzo rozbudowaną analizę cech, które pozwalają na pozyskanie użytecznych (z punktu widzenia klasyfikacji) informacji z sygnałów VAG. W tym kontekście Autor skupił się na ekstrakcji cech sygnału reprezentowanych w trzech dziedzinach, tj., czasu, częstotliwości oraz czasowo-częstotliwościowej. Dyskusja jest niezwykle obszerna. Doktorant wyróżnił pięć głównych grup zależności pozwalających na ekstrakcję cech z dziedziny czasu (Autor zidentyfikował i omówił łącznie 62 zależności – 79 jeśli uwzględnić analizę parametryczną wybranych z nich), czterech grup w dziedzinie częstotliwości (łącznie 25 zidentyfikowanych i omówionych zależności). Natomiast w domenie czasowo-częstotliwościowej Doktorant zidentyfikował 36 zależności znajdujących zastosowanie do przeprowadzenia analiz. Ponadto, Kandydat przedyskutował problem redukcji wymiarowości problemu (poprzez dobór najbardziej informacyjnych cech) z punktu widzenia uczenia maszynowego na potrzeby klasyfikacji oraz omówił metodę jej realizacji z w oparciu o wybrane techniki.

Należy powtórzyć, że część druga rozprawy jest bardzo obszerna (jej objętość wynosi ponad 50 stron). Jednocześnie (jak wskazuje Doktorant) część zidentyfikowanych zależności jest istotnie skorelowana z pozostałymi, co wynika z ich zbliżonych definicji o ograniczonym wpływie na zmianę informacyjności (m.in., poprzez stosowanie modułów określonych wielkości, czy ich potęgowanie). W tym miejscu warto dodać, że rozbudowane opisy dyskutowanych metryk nie są kluczowe z punktu widzenia wartości poznawczej pracy. Autor mógł się ograniczyć do przeprowadzenia dokładniejszej dyskusji analiz poszczególnych grup metryk skupiając się jednocześnie na tabelarycznym zestawieniu poszczególnych zależności oraz holistycznej dyskusji ich znaczenia z punktu widzenia informacyjności. Warto także dodać, że bodaj wszystkie metryki zastosowane przez Doktoranta opierają się na literaturze. Pewnym wyjątkiem jest przeprowadzenie analizy czasowo-częstotliwościowej z wykorzystaniem okna Hamminga, które (zgodnie z przeglądem literatury) nie było stosowane do analizy rozważanych sygnałów przez innych autorów. Lektura części drugiej uwidacznia także duże rozbieżności w objętości pomiędzy dyskusją metryk oraz metod uczenia maszynowego zastosowanych do klasyfikacji. W kontekście ostatnich, Autor ograniczył się jedynie do przeprowadzenia opisu. Nie przedstawiono porównania algorytmów na uproszczonym (standaryzowanym) przykładzie, czy ich tabelarycznego podsumowania. Biorąc pod uwagę, że przeprowadzenie klasyfikacji stanowi istotny element rozprawy (w kontekście tezy – patrz poniżej), brak bardziej wyczerpującej dyskusji stanowi pewne niedociągnięcie w pracy.

Trzecia część dysertacji koncentruje się na analizie zidentyfikowanych zależności z wykorzystaniem ustandaryzowanych, odpowiednio dobranych wskaźników oraz metod wizualizacji/reprezentacji danych. Dla każdej z rozważanych zależności, wyniki zostały opatrzone wyczerpującymi opisami na podstawie których Autor wyciągnął trafne wnioski. Chociaż rozbudowane analizy i dyskusje mają istotny walor informacyjny, to wpływają też na objętość pracy (część trzecia zajmuje przeszło 80 stron). W tym kontekście, Doktorant mógł przeprowadzić wnikliwą dyskusję kilku wybranych zależności (przykładowo po jednej dla dziedziny czasu, częstotliwości oraz czasowo-częstotliwościowej). Wyniki analiz dla pozostałych metryk mogły zostać zestawione w postaci tabel i uzupełnione holistyczną dyskusją. Co więcej, dane mogły zostać zawarte w pracy pod postacią dodatku. Zaletą takiego rozwiązania byłoby skrócenie właściwej treści rozprawy, a przez to zwiększenie jej przystępności dla potencjalnych czytelników. Należy podkreślić, że

niniejszy komentarz ma charakter sugestii a nie krytyki. Warto dodać, że syntetyczne wnioski wyciągnięte na podstawie przeprowadzonych przez Doktoranta analiz są istotne z punktu widzenia zastosowania metod uczenia maszynowego w połączeniu z VAG. Z drugiej strony, (podobnie jak w części drugiej) uwagę zwraca nieproporcjonalnie mała objętość pracy przeznaczona na wyników klasyfikacji przy użyciu modeli uczenia maszynowego. Jak wspomniano wcześniej, takie podejście należy uznać za niedociągnięcie – zwłaszcza w kontekście kluczowego znaczenia modelowania dla udowodnienia tezy pracy. Podsumowanie rozprawy wskazuje najważniejsze wyniki, podkreśla nowe aspekty przeprowadzonych badań, a także wskazuje potencjalne kierunki dalszych prac.

Poszczególne części rozprawy, a także rozdziały i sekcje są jednoznacznie wyróżnione. Rysunki, zależności oraz tabele, są odpowiednio ponumerowane i wskazane w tekście. Co ważne, treść pracy oraz opis uzyskanych wyników jest zgodny ze wskazanym przez Kandydata (Sekcja 3.1) schematem przetwarzania sygnałów VAG, co ułatwia czytelnikowi wyszukiwanie interesujących informacji. Podsumowując: układ pracy jest poprawny, zrozumiały, spójny i logiczny.

## 2. Wskazanie oraz ocena celu pracy kandydata do stopnia doktora

W pracy zawarto następującą tezę: „Zastosowanie metod cyfrowego przetwarzania sygnałów w analizach sygnałów VAG, w szczególności w dziedzinie czasu, częstotliwości oraz czasowo-częstotliwościowej pozwoli na ekstrakcję cech umożliwiających klasyfikację schorzeń stawu kolanowego z dokładnością większą niż dotychczas (0.69).”

Oprócz tezy zdefiniowano siedem głównych celów badawczych o następującej treści:

- Analiza cech sygnału stosowanych w VAG oraz identyfikacja cech parametrycznych, których parametry mogą być zoptymalizowane pod względem informacyjności;
- Ekstrakcja cech z sygnału w dziedzinie czasu;
- Ekstrakcja cech z sygnału w dziedzinie częstotliwości;
- Ekstrakcja cech z sygnału w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej;
- Dobór metryki do reprezentacji informacyjności cech;
- Wybór najbardziej informacyjnego zbioru cech;
- Dobór modelu uczenia maszynowego pozwalającego na klasyfikację wyekstrahowanych cech z dokładnością większą niż 0.69, uzyskaną przez Kręciszka i Bączkowicza.

Ponadto, Autor określił siedem celów pomocniczych:

- Porównanie metod przetwarzania sygnałów przed rozpoczęciem właściwych analiz z punktu widzenia ich informacyjności;
- Analiza oraz interpretacja informacyjności uzyskanych cech;
- Dla cech parametrycznych, analiza wpływu parametrów cech na ich informacyjność;
- Analiza porównawcza metod estymacji spektrum w kontekście informacyjności cech;
- Analiza porównawcza parametrów spektrogramów w kontekście informacyjności cech;
- Analiza porównawcza wybranych technik redukcji wymiarowości w kontekście dokładności klasyfikacji;
- Analiza porównawcza modeli uczenia maszynowego w kontekście dokładności klasyfikacji.

Zdefiniowane cele badawcze (zarówno główne jak i pomocnicze) znajdują bezpośrednie odzwierciedlenie w poszczególnych rozdziałach pracy. Są one w istocie doprecyzowaniem, a nawet powtórzeniem (np. w kontekście ekstrakcji cech w dziedzinach reprezentacji sygnałów, bądź dokładności klasyfikacji) przedstawionej tezy. Chociaż zdefiniowane cele są jasne i mogą być interpretowane jako szereg zadań przewidzianych do realizacji w celu udowodnienia założonej tezy, Autor mógł ograniczyć się do wskazania tezy oraz kilku najważniejszych aspektów/celów rozprawy. Tak duża liczba zdefiniowanych zadań (łącznie czternaście) wydaje się nadmiarowa.

W odniesieniu do tezy pracy – nie jest jasne dlaczego Doktorant nie zdefiniował jej w sposób bardziej ogólny. Doprecyzowanie tezy odnoszące się do konkretnej wielkości uzyskanej w jednej publikacji naukowej jako „punktu odniesienia” również budzi wątpliwości. Takie podejście wskazuje na ograniczenie potencjalnych analiz porównawczych jest nieuzasadnione. Naturalnym podejściem w pracy naukowej wydaje się porównywanie wyników na tle ogólnego stanu wiedzy zamiast wybranych pozycji literaturowych. W tym kontekście, wskazanie w tezie możliwości poprawy dokładności klasyfikacji względem literatury przedmiotu, bądź zorientowanej na spełnienie wymagań wynikających ze standardów stosowanych w diagnostyce medycznej wydaje się bardziej odpowiednie.

### 3. Wskazanie oraz ocena zastosowanych metod badawczych

Doktorant biegle posługuje się metodami badawczymi niezbędnymi do realizacji założonych celów pracy oraz udowodnienia przyjętej tezy. W tym miejscu należy wyróżnić (bardzo) rozbudowane analizy porównawcze zależności umożliwiających ekstrakcję cech sygnału, które stanowią punkt wyjścia do odpowiednich wizualizacji, czy interpretacji. Przeprowadzone badania odnoszą się nie tylko do porównania poszczególnych zależności, ale też oceny wpływu ich hiperparametrów na informacyjność. Co istotne, Autor wykorzystał zunifikowane (jasno uzasadnione) miary umożliwiające przeprowadzenie jednoznacznych porównań. Ponadto, liczne cechy wyekstrahowane przy użyciu zidentyfikowanych zależności zostały zredukowane z wykorzystaniem odpowiednich narzędzi. Podejście zachowuje spójność nie tylko w kontekście automatyzacji procesu (tak aby ograniczyć potencjalny wpływ czynnika ludzkiego na uzyskane rezultaty), ale też doboru odpowiednich zakresów cech w kontekście rozmiaru zbioru testowego. Bardzo ważnym aspektem jest konsekwentna realizacja badań zachowująca spójność ze schematem przetwarzania sygnałów omówionym w Sekcji 3.1.

Doktorant przeprowadził spójną analizę metryk z zorientowaną na ich jednoznaczne porównanie, a także ocenę informacyjności cech ekstrahowanych z sygnałów VAG w oparciu o współczynnik Bhattacharyya (wykorzystujący funkcje gęstości prawdopodobieństwa). Autor zademonstrował zastosowanie wspomnianej miary do oceny „nakładania się” charakterystyk należących do odrębnych klas. W kontekście ewaluacji wieloklasowej, współczynnik został zmodyfikowany jako średnia ważona wielkości dla klas binarnych. Doktorant przeprowadził także porównanie przydatności metod PCR (ang. *Principal Component Analysis*) oraz MRMR (ang. *Maximum Relevance Minimum Redundancy*) do redukcji wymiarowości problemu. Warto zwrócić uwagę, że algorytmy zostały zaimplementowane w ramach dwuetapowej procedury. Ostatnie jest uzasadnione (i pożądane) biorąc pod uwagę bardzo dużą liczbę metryk. Grupy wyekstrahowanych cech wykorzystano do trenowania modeli uczenia maszynowego na potrzeby klasyfikacji schorzeń stawu kolanowego.

Należy powtórzyć, że narzędzia i metody są konsekwentnie stosowane w pracy i uzasadnione. Bez wątplenia zastosowane podejście jest logiczne. Autor rozpoczyna badania od uzasadnienia ich motywacji poprzez rzetelną analizę stanu wiedzy oraz identyfikacji metryk o potencjalnej przydatności dla VAG. Automatyczny dobór zależności jest zrealizowany z wykorzystaniem metod nienadzorowanego uczenia maszynowego (m.in., PCA), po czym otrzymane rezultaty znajdują zastosowanie do trenowania grupy modeli w celu ustalenia najlepszego narzędzia z punktu widzenia podejmowanego problemu.

W tym miejscu należy powtórzyć, że opis algorytmów wykorzystanych do klasyfikacji, czy przedstawiona interpretacja wyników są stosunkowo skromne w porównaniu do pozostałych części pracy. Ponadto, Doktorant nie zdecydował się na przeprowadzenie analiz porównawczych opracowanych rozwiązań z wynikami z literatury (za wyjątkiem jednej publikacji wskazanej w Sekcji 1.2). W pracy zabrakło także analizy wpływu zmiany liczby próbek ze pomiarowych na dokładność klasyfikacji. Nie zademonstrowano także generalizacji modeli (choćby przez wydzielenie z danych zbioru testowego). Ostatnia wydaje się interesująca z punktu widzenia praktycznego zastosowania opracowanych modeli w diagnostyce medycznej. Nie mniej interesujące mogłoby być przeprowadzenie badań eksperymentalnych, dotyczących analizy wpływu położenia czujnika na dokładność klasyfikacji (nawet jeśli byłaby ona ograniczona jedynie do testów zdrowego stawu kolanowego – co bez wątplenia ułatwiłoby pozyskanie danych). Pominięcie wspomnianych aspektów należy uznać za pewne niedociągnięcia pracy. W rozprawie zabrakło także rekomendacji dotyczących wyboru cech umożliwiających uzyskanie dużej dokładności klasyfikacji dla sygnałów VAG. Z drugiej strony, takie podejście można uznać za zrozumiałe z punktu widzenia koncentracji Autora (choć nie wprost) na ich automatycznym doborze – zapewne zorientowanym na uniezależnienie modelowania od wpływu czynników ludzkich na jakość i obiektywność uzyskanych wyników. Bez względu na wskazanie niedociągnięcia, podejście Doktoranta do udowodnienia założonej tezy oraz realizacji celów pracy jest spójne i logiczne a tym samym odpowiednie.

### 4. Ocena części rozprawy doktorskiej dotyczącej omówienia wyników badań

Wyniki badań numerycznych zostały opisane w części trzeciej rozprawy. Ich dyskusja odpowiada ogólnemu schematowi przetwarzania przedstawionemu w Sekcji 3.1. Jak wskazano powyżej, analizy wyekstrahowanych cech są rozbudowane oraz szczegółowe, a wyciągnięte na ich podstawie wnioski są wyczerpujące i trafne.

Dobór parametrów filtracji dla przetwarzania wstępnego (zakres częstotliwości od 10 Hz do 1000 Hz) został zaczerpnięty z literatury. Uzyskane wyniki wskazują natomiast potencjał do ograniczenia pasma do

pasma od 10 Hz do 350 Hz, co wskazuje na potencjał do obniżenia częstotliwości próbkowania sygnału VAG (a przez to kosztu sprzętu pomiarowego). Należy pokreślić, że ten aspekt został dostrzeżony przez Doktoranta i opisany w pracy. W tym miejscu należy też dodać, że opieranie badań na wynikach uzyskanych przez innych autorów (choćby poprzez zaczerpnięcie parametrów filtracji z literatury) jest jak najbardziej zrozumiałe i uzasadnione, w szczególności w kontekście złożoności podejmowanego problemu badawczego.

W kontekście redukcji wymiarowości problemu, Autor zdecydował się na zastosowanie PCA oraz MRMR. Chociaż sam dobór technik nie budzi wątpliwości to w pracy zabrakło choćby krótkiego uzasadnienia dla zastosowania wspomnianych metod. Jest to o tyle istotne, że nie są to jedyne dostępne techniki nienadzorowanego uczenia, które mogą zostać wykorzystane do redukcji liczby wymiarów. Z drugiej strony, Autor dokonał rzetelnego porównania obu metod uzupełnionego trafnymi obserwacjami oraz stosowną interpretacją wyników. Ponadto, maksymalna liczba wybranych cech została dobrana w taki sposób aby nie przekroczyć dostępnej liczby pomiarów (tj. od 1 do 183, gdzie liczba pozyskanych próbek wynosi 184). W efekcie liczba cech nie stanowi nadreprezentacji danych wejściowych.

Przeprowadzona klasyfikacja z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego wskazała jednoznacznie, że zastosowanie odpowiedniej kombinacji wyekstrahowanych cech oraz narzędzi uczenia maszynowego pozwala na uzyskanie dokładności na poziomie nawet 80% a zatem o 11% lepiej względem wskazanej referencji. Z drugiej strony, brak bardziej szczegółowych analiz porównawczych (w kontekście odniesienia do innych metod klasyfikacji niż wskazana w tezie), czy weryfikacji generalizacji modelu stanowi pewne niedociągnięcie. Można je oczywiście tłumaczyć bardzo szczegółowo zdefiniowaną tezą oraz koncentracją Autora na jej udowodnieniu. Niemniej (jak wspomniano wcześniej) zaniechanie holistycznej dyskusji opracowanych rozwiązań względem technik z literatury oraz ograniczenie porównania do jednej pracy jest niezrozumiałe – zwłaszcza biorąc pod uwagę wskazanie przez Doktoranta pozycji, w których zastosowanie uczenia maszynowego do klasyfikacji względem kilku klas jest rozważane (Tabela 3.1).

Bez względu na powyższe uwagi, opis wyników badań jest wyczerpujący i odpowiedni. Wspomniane niedociągnięcia można traktować jako wskazówki zorientowane na uwypuklenie znaczenia przeprowadzonych analiz (np. na potrzeby przyszłych publikacji naukowych). Nie ulega wątpliwości, że Doktorant podszedł do przygotowania pracy jak również opisu uzyskanych wyników w sposób rzetelny i skrupulatny. W tym miejscu warto podkreślić, pośrednim celem wyczerpujących dyskusji jest udowodnienie tezy oraz poszczególnych celów pracy. Co ważne, mnogość przeprowadzonych analiz, ich gruntowna dyskusja oraz trafne wnioski mają istotne znaczenie praktyczne dla diagnostyki schorzeń stawów kolanowych i mogą stanowić istotny przyczynek do eliminacji czynnika ludzkiego z procesu analizy danych pomiarowych.

## 5. Ocena zastosowanego piśmiennictwa oraz składu pracy

Rozprawa została sporządzona w języku angielskim. Zastosowane piśmiennictwo jest odpowiednie dla pracy badawczej. Co ważne, lektura dysertacji jasno wskazuje, że podjęta tematyka jest w pełni zrozumiała dla Doktoranta. Treść pracy jest dobrze przemyślana i odpowiednio uporządkowana. Zastosowany język jest prosty (co w tym kontekście stanowi bezsprzeczną zaletę) a przez to zrozumiały dla czytelnika, a terminologia jest właściwa dla podjętego tematu. Skróty i oznaczenia są stosowane konsekwentnie. Ponadto, Autor zawarł je w spisie na początku pracy, który stanowi bardzo przydatny punkt odniesienia dla potencjalnego czytelnika. Do stylu piśmiennictwa także nie można mieć zarzutów. Oczywiście Autor nie uniknął „literówek”, czy drobnych błędów językowych, jak nieodpowiednie użycie (czy pominięcie) przedimków „a” oraz „the”. Wszystkie wspomniane niedociągnięcia mają jednak charakter incydentalny.

Spośród niedociągnięć językowych można wymienić częste powtórzenia słowa „joint” w Sekcji 2.2.2, czy wykorzystanie w większości pracy małych liter w skrócie „oa” odnoszącym się do zapalenia kostnowstawowego (ang. *osteoarthritis*). Chociaż konsekwencja stosowania ostatniego (zarówno w tekście jak również na rysunkach, czy w wykazie oznaczeń) może stanowić o celowym użyciu, to na stronie 17 Autor odnosi się do jednostki chorobowej zarówno stosując oznaczenie OA jak również „oa” (w tym samym akapicie). Prawdopodobnie zastosowanie „oa” wynika z chęci zachowania spójności z oznaczeniami innych schorzeń stawów kolanowych (wskazanych, m.in., w Tabeli 2.1). Niemniej konsekwentne użycie wielkich liter do wszystkich skrótów z Tabeli wydawałoby się bardziej odpowiednie z punktu widzenia przejrzystości. Inne (przykładowe) niedociągnięcia językowe:

- Sekcja 3.4.3: “that satisfy” => “that satisfies”
- Sekcja 3.4.5: “experimental protocol” => “experimental setup”

- Sekcja 3.6: "are also another" => "are also other"; "most informative features is" => "feature is"
- Sekcja 3.7: "vibroarthrography filed" => "field"

Bez względu na wymienione przykłady błędów ich znaczenie w kontekście (bardzo wysokiej językowo) jakości pracy jest pomijalne.

Skład pracy jest odpowiedni. Jedynym niedociągnięciem (wynikającym zapewne ze stosowania edytora LaTeX do przygotowania pracy) jest brak grupowania tabel/rysunków na górze/dole stron. W następstwie są one nagminnie rozmieszczone na środku (np. na stronach 45 i 46), bądź oddzielone krótkimi fragmentami tekstu (np. strony 99, czy 118). W szczególności taki skład budzi zastrzeżenia np. na stronie 99, gdzie po rysunku jest sześćo-liniowy akapit, kolejny rysunek, po którym występuje jedna linijka tekstu. Oczywiście wspomniane niedociągnięcia nie mają większego znaczenia dla (w ogólności) starannie opracowanego składu. Stąd są warte wspomnienia jedynie z punktu widzenia nakładów pracy, które Doktorant włożył w przygotowanie rozprawy. Drobną modyfikacją kodu LaTeX mogłaby zostać wykorzystana do automatycznego grupowania rysunków w sposób zwiększający przejrzystość. Należy podkreślić, że w wszystkie tabele i rysunki są jednoznacznie (i właściwie) wskazane w tekście.

## 6. Informacje o ewentualnych nieprawidłowościach, które pojawiły się w ocenianej rozprawie doktorskiej

Jakość przedstawionej do recenzji rozprawy jest bardzo wysoka. Niemniej, można doszukać się w niej pewnych nieprawidłowości (skądinąd wskazanych powyżej). Do najpoważniejszych należy dobór bardzo ścisłej tezy. Bardziej naturalnym podejściem w pracy naukowej wydaje się formułowanie stosunkowo ogólnych tez/hipotez, co zapewnia Autorowi swego rodzaju elastyczność z punktu widzenia ich udowodnienia. Bardziej ogólne tezy pozwalają także na potencjalne generalizowanie uzyskanych wyników. Po lekturze pracy można odnieść wrażenie, że precyzyjnie określona teza stanowi dla Doktoranta ograniczenie. Wskazuje na to choćby zredukowanie porównania opracowanych modeli klasyfikatorów do jednej pracy zamiast jego bardziej ogólnego omówienia na tle wyników (czy metod analizy) z literatury. Ostatnie jest typowym podejściem w przypadku opracowywania nowych technik modelowania, optymalizacji, czy innych narzędzi algorytmicznych. Przeprowadzanie testów porównawczych zaproponowanego rozwiązania do grupy metod referencyjnych i/lub zbioru przypadków testowych pozwala wyciągnąć bardziej ogólne wnioski. W pracy, Doktorant ograniczył się do stwierdzenia, że opracowane rozwiązania zapewniają lepszą dokładność klasyfikacji (względem przyjętej pracy). Oczywiście prowadzi to do udowodnienia tezy, jednak pozostawia swoisty niedosyt z punktu widzenia nadania odpowiedniego kontekstu dla znaczenia wyników przeprowadzonych badań.

Należy wskazać, że liczba próbek wykorzystana do ekstrakcji cech oraz trenowania modeli uczenia maszynowego jest stosunkowo mała. Oczywiście można ją tłumaczyć trudnościami z „pozyskaniem” odpowiedniej grupy pacjentów do badań. W tym kontekście istotne jest zwrócenie uwagi na problem nadmiernego dopasowania modeli (ang. *overfitting*). Chociaż Autor podjął starania zorientowane na ograniczenie problemu poprzez zastosowanie techniki walidacji krzyżowej (ang. *cross-validation* – CV), nie jest jasne czy podjęto odpowiednie działania zabezpieczające przez zjawiskiem tzw. wycieku danych (ang. *data leakage*), które może prowadzić do wyciągnięcia niewłaściwych wniosków na temat dokładności uzyskanych modeli. Podobnie aspekty dotyczące generalizacji opracowanych modeli zostały pominięte w pracy. Biorąc pod uwagę potencjalne zastosowanie opracowanych rozwiązań do diagnostyki stawów kolanowych demonstracja generalizacji, czy choćby przeprowadzenie testów modeli z wykorzystaniem informacji spoza zbioru zastosowanego do identyfikacji modeli wydają się istotne. Choć trudności z pozyskaniem odpowiednich danych do testów są zrozumiałe (ostatecznie należy zbadać stany kolanowe żywych ludzi, którzy cierpią na określone schorzenia), to potencjalnym rozwiązaniem dla oceny generalizacji modelu bez pozyskiwania nowych danych mogłoby być ich podzielenie na podzbiory stosowane do trenowania walidacji (w tym przypadku Autor mógł pozostać przy rozwiązaniu leave-one-out CV) oraz testów. Ostatni mógłby zostać zastosowany do oceny (choć w ograniczonym zakresie) dokładności modeli, czy demonstracji ich generalizacji. Warto także zwrócić uwagę, że Autor pominął zagadnienia dotyczące zawartości próbek testowych. Dane zestawione w Tabeli 2.1 wskazują, że grupa kontrolna jest nad reprezentowana (od 1.8- do 2.5-krotnie w stosunku do badanych schorzeń). Nie jest jasne, czy jest to działanie zamierzone. Ponadto w pracy nie przeprowadzono analiz znaczenia balansowania próbek na jakość klasyfikacji.

Pewnym problemem (choć mniejszej wagi) jest tendencja Doktoranta do stosowania nazbyt długich opisów. Chociaż w treści dotyczącej analizy wyników, dyskusje ostatecznie prowadzą do trafnych i przydatnych dla czytelnika wniosków, to w niektórych fragmentach rozprawy stosowane opisy są nie tylko

zbyt długie ale też niepotrzebne. Odnosi się to choćby do Sekcji 1.3 gdzie Autor poświęcił 2 strony na dyskusję zawartości poszczególnych rozdziałów, która jest następnie ponownie streszczana na początku każdego z nich. Z drugiej strony, w niektórych sekcjach pominięto objaśnienia zagadnień niezrozumiałych dla czytelników, którzy nie są ortopedami czy specjalistami w dziedzinie inżynierii biomedycznej. Przykładowo, w dysertacji zabrakło choćby zdania wyjaśnienia czym jest artroskopia oraz wskazania, że jest to metoda inwazyjna. Oczywiście uwagę należy postrzegać raczej w kategorii niedociągnięcia niż błędu. Niemniej, biorąc pod uwagę objętość pracy można oczekiwać od Autora zawarcia objaśnień (choćby krótkich) pojęć wykraczających poza jej główny nurt.

Na koniec należy zwrócić uwagę na brak oznaczeń na Rys. 12.22 oraz 12.23. Autor nie tylko zaniedbał opisanie osi X oraz Y ale też wskazania skali przypisującej wartości liczbowe do barw poszczególnych komórek. W efekcie, rysunki są bezużyteczne z punktu interpretacji analizowanych metryk. W tym miejscu należy podkreślić, że stosowanie odpowiednich opisów na rysunkach jest kluczowe dla właściwej oceny prezentowanych danych w pracach badawczych o charakterze inżynierskim.

## 7. Ocena czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego

Autor zdefiniował jedną tezę, która została doprecyzowana przez łącznie czternaście celów badawczych (siedem głównych oraz siedem pomocniczych). Wszystkie przyjęte założenia zostały osiągnięte poprzez zastosowanie spójnej metodologii badawczej opartej na rzetelnej analizie literatury, doborze odpowiednich metryk pozwalających na jednoznaczną, obiektywną ocenę wyekstrahowanych cech sygnałów VAG oraz rzetelnych i wnikliwie zinterpretowanych testów numerycznych, które ostatecznie udowodniły tezę. Do niektórych oryginalnych rozwiązań zaproponowanych przez doktoranta (wskazanych w podsumowaniu dysertacji) należą:

- Przeprowadzenie kompleksowej analizy metryk sygnałów VAG w dziedzinach czasu, częstotliwości oraz czasowo-częstotliwościowej;
- Bezpośrednia analiza informacyjności zastosowanych metryk z wykorzystaniem wieloklasowego współczynnika Battacharyya;
- Kompleksowa analiza metryk parametrycznych, czy wieloaspektowe porównanie wybranych technik przetwarzania wstępnego z punktu widzenia ich przydatności dla przetwarzania sygnałów na potrzeby inżynierii biomedycznej.

Nie ma wątpliwości, że przedstawione przez Doktoranta wyniki oraz wyciągnięte na ich podstawie wnioski stanowią oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego.

## 8. Ocena czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata do stopnia doktora oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

O bardzo dobrym opanowaniu materii omówionej w rozprawie stanowią przedstawione przez Doktoranta wyniki badań, a także ich analizy i porównania. Jak wskazano w recenzji, rezultaty zostały nie tylko rzetelnie omówione, ale też wykorzystane do sformułowania trafnych wniosków. O poziomie ogólnej wiedzy świadczy także bogata, odpowiednio dobrana i aktualna bibliografia, na którą składa się łącznie 186 pozycji literaturowych (94 z cytowanych prac zostało opublikowanych w ciągu ostatniej dekady). Co więcej, Doktorant jest współautorem czterech spośród artykułów zacytowanych w rozprawie (w tym trzech publikacji z listy A za 100 PKT MNiSW każda, oraz jednej pracy konferencyjnej – we wszystkich jako pierwszy Autor). Publikacja wyników jest oczywiście kluczowa z punktu widzenia ich upowszechnienia w środowisku naukowym. Analiza wskaźników biblio-metrycznych wskazuje także, że Doktorant opublikował także 10 innych prac (w tym trzy jako jedyny autor). Zgodnie z bazą Scopus index-H Kandydata wynosi 5, a jego prace były cytowane łącznie ponad 80 razy (bez autocytowań). Biorąc pod uwagę etap rozwoju kariery jest to wynik, który jest bez wątpienia warty uznania. Na szczególną uwagę zasługuje samodzielne opublikowanie trzech prac konferencyjnych, co jest niespotykane na tym etapie rozwoju kariery (tj. przed obroną rozprawy doktorskiej).

W mojej ocenie wkład pracy Autora do stanu wiedzy jest znaczący, a uzyskane wyniki i zastosowane podejście badawcze świadczą o umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Potwierdzają to nie tylko wyniki zawarte w rozprawie, ale też (bądź zwłaszcza) pozostałe prace badawcze opublikowane w czasopiśmie i na konferencjach o zasięgu międzynarodowym.

## 9. Podsumowanie

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Adama Łysiaka pod tytułem *Automatic diagnosis of the patient's knee joint using selected methods of vibrathographic signal analysis* stanowi spójne podejście do problemu automatycznego doboru odpowiednich cech oraz uczenia maszynowego zorientowanego na zwiększenie dokładności diagnostyki schorzeń stawów kolanowych z wykorzystaniem techniki VAG. Bardzo obszerny przegląd literatury, dobór zróżnicowanych zależności pozwalających na ekstrakcję cech, a także identyfikacja odpowiednich współczynników do ich ewaluacji, czy wnikliwe i wszechstronne analizy zawarte w pracy wskazują jasno, że Doktorant nie tylko doskonale rozumie podjętą tematykę ale też posiada wiedzę i umiejętności niezbędne do prowadzenia pracy badawczej. O wysokiej jakości uzyskanych wyników świadczy także ich publikacja w czasopiśmie z listy A oraz na konferencji o zasięgu międzynarodowym. Na uwagę zasługują także pozostałe publikacje Doktoranta (w szczególności samodzielne), które wychodzą poza zakres dyskutowanej rozprawy. Należy podkreślić, że wyciągnięcie wniosków przedstawionych w pracy, a także udowodnienie przyjętej tezy wymagało wygenerowania oraz interpretacji ogromnej ilości danych.

Nie można pominąć logicznego i zrozumiałego uporządkowania rozprawy, a także zastosowanie odpowiedniego (i co ważne poprawnego gramatycznie) języka. Choć praca jest w mojej ocenie zbyt długa a teza zbyt szczegółowa, to swobodne „poruszanie się” Autora w ramach podjętej tematyki, a także wnikliwe analizy i trafne wnioski nie budzą wątpliwości, co do spełnienia przyjętych założeń z nadmiarem. Po lekturze pracy jasnym jest, że Autor poświęcił bardzo dużo czasu nie tylko na przegląd literatury, ale też opracowanie spójnej metodologii analizy metryk, czy wykonanie stosownych testów porównawczych. Choć w przedłożonej do oceny pracy można doszukać się niedociągnięć, nie wpływają one na moją pozytywną opinię dotyczącą jej jakości. Na koniec należy wskazać, że podjęta tematyka jest bardzo aktualna. Oczekuje się, że narzędzia uczenia maszynowego pozwolą na eliminację czynnika ludzkiego w problemach diagnostyki schorzeń skręcając tym samym czas leczenia, koszty oraz minimalizując ryzyko błędów.

Mając na względzie powyższe stwierdzam, że przedstawiona do recenzji praca spełnia wymagania określone w art. 187 ust. 1-4 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz. U. z 2023 r. poz. 724). Dlatego **wnioskuje o dopuszczenie rozprawy mgr inż. Adama Łysiaka do publicznej obrony**. Mając na względzie wysoką jakość przeprowadzonych analiz, wnikliwe wnioski wyciągnięte na ich podstawie, a także ponadprzeciętną liczbę prac opublikowanych przez Doktoranta (także spoza zakresu dysertacji) **wnoszę o wyróżnienie przedmiotowej rozprawy**.

Adrian Bekasiewicz