

Lublin, dnia 29 stycznia 2024 r.

Prof. dr hab. inż. Oleksandra Hotra  
Katedra Elektroniki i Technik Informacyjnych  
Wydział Elektrotechniki i Informatyki  
ul. Nadbystrzycka 38 A  
20-618 Lublin  
e-mail: o.hotra@pollub.pl

**Recenzja rozprawy doktorskiej  
Pana mgr inż. Adama Łysiaka pt.:  
„Automatic Diagnosis of the Patient’s Knee Joint Using Selected Methods  
of Vibroarthrographic Signal Analysis”**

Promotor: dr hab. inż. Mirosław Szmajda  
Promotor pomocniczy: dr hab. Dawid Bączkiewicz

Recenzja została przygotowana na podstawie decyzji Komisji Awansu w sprawie nadania  
stopnia doktora mgr. inż. Adamowi Łysiakowi

***Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej***

Recenzowana rozprawa doktorska obejmuje 206 stron, streszczenia w języku polskim i angielskim, wykaz tabel, wykaz rysunków oraz wykaz stosowanych w pracy akronimów. Struktura rozprawy jest prawidłowa, praca została podzielona na 3 sekcje (Introduction; Methods; Results, Discussion and Conclusions) zawartych jest w niej 14 rozdziałów, dwa dodatki jak i spis źródeł literaturowych. Treść rozprawy jest usystematyzowana, podział rozprawy na 3 sekcje oraz 14 rozdziałów uważam za logiczny i właściwy. Odpowiedni podział pracy na poszczególne rozdziały oraz zamieszczenie wszystkich informacji niezbędnych do zrozumienia treści rozprawy znacząco usprawniło jej czytanie i właściwe zrozumienie przedstawionych wniosków. Zamieszczenie wykazu tabel, rysunków i akronimów na początku pracy oraz podsumowań na końcu Rozdziałów 9 - 14 rozprawy, dotyczących przeprowadzonych badań, analizy i klasyfikacji sygnałów VAG znacznie ułatwiło lekturę rozprawy. Rysunki i tabele są starannie przygotowane przez Doktoranta. Natomiast na końcu pracy zamieszczono dodatki: *A – Detailed results of the PSD estimation comparison* oraz *B – List of the most informative features*, które znacznie udogodniło interpretację wyników badań. Doktorant w odpowiedni sposób odwołuje się do pozycji Bibliografii.

Sekcja **I Introduction** obejmuje rozdziały 1 – 3, w których zawarte jest wprowadzenie do badań oraz wibroartrografii.

W rozdziale: **1. Introduction** przedstawiono motywację podjęcia tematu, uzasadniono aktualność tematyki rozprawy oraz opisano jej strukturę. Sformułowano również tezę pracy i

określono cele rozprawy. Dało to możliwość szybkiego zapoznanie się z tematyką całej rozprawy.

W rozdziale: **2. Description of the vibroarthrogram** zostały przedstawione podstawy anatomii i fizjologii stawu kolanowego, schorzenia stawu kolanowego, które są analizowane w niniejszej pracy oraz metody diagnostyki stawu kolanowego w tym wibroartrografia. W rozdziale również zawarto informacje na temat wibroartrogramów analizowanych w pracy oraz metodyki ich pomiarów. Liczba analizowanych sygnałów wynosiła 184, które podzielono na 5 grup: kontrolną (klasa sygnału ctrl), I-go, II-go oraz stopnie chondromalacji rzepki dla I-go stopnia (klasa sygnału cmp1), II-go stopnia (klasa sygnału cmp2), III-go stopnia (klasa sygnału cmp3), oraz choroby zwyrodnieniowej stawu kolanowego (klasa sygnału oa).

W rozdziale: **3. Review of the vibroarthrography processing chain** są przedstawione wyniki analizy literaturowej. Zawarto się rozszerzony opis zastosowania wibroartrografii w diagnozie i klasyfikacji choroby zwyrodnieniowej stawu kolanowego oraz chondromalacji rzepki. W rozdziale zostały szeroko opisane i przeanalizowane czujniki do pozyskiwania sygnałów, częstotliwości próbkowania oraz rozmieszczenia czujników. W sposób zwięzły przedstawiono wstępne przetwarzanie sygnałów obejmujące zagadnienia takiej jak zastosowanie filtrów, odszumienie, metody dekompozycji, normalizację, segmentację sygnału. Po opisie wstępnego przetwarzania sygnałów Autor analizuje ekstrakcję i selekcję cech i redukcję wymiarowości dla VAG sygnałów. W rozdziale opisano ogólną strukturę algorytmu klasyfikacji VAG sygnału.

Sekcja **II Methods** zawiera rozdziały 4 – 8. Przedstawiona w nich treść obejmuje szczegółowy opis metod wykorzystanych w rozprawie doktorskiej na podstawie analizy źródeł literaturowych.

W rozdziale: **4. Preprocessing** zawarta jest metodyka wstępnej obróbki danych. Omówiono w nim między innymi zagadnienia poświęcone rozkładowi normalnemu i stacjonarności sygnałów pomiarowych, filtry Butterwortha i różnicowaniu. Autor w rozdziale zawarł również porównanie wybranych metod przetwarzania wstępnego.

W rozdziale: **5. Signal analysis in time domain** Autor rozprawy zawarł podstawy teoretyczne analizy cech sygnału w dziedzinie czasu. Niniejszy rozdział obejmuje opis podstawowych metod statystycznych, cech ruchomego okna, różnicowych i częstotliwościowych w dziedzinie czasu, zastosowania funkcji autokorelacji i beztrendowej analizy fluktuacyjnej oraz rekonstrukcji przestrzeni fazowej jak i zdefiniowanych na jej podstawie miar.

W rozdziale: **6. Signal analysis in frequency domain** zawarta są teoretyczne aspekty analizy sygnałów pomiarowych z dziedzinie częstotliwości. Przedstawiono podstawy estymacji widmowej gęstości mocy oraz porównanie metod estymacji w zakresie ekstrakcji cech. Omówiono zastosowanie map zakresów częstotliwości (Frequency Range Maps), zaproponowanych przez Autora, do wizualizacji wyników jako narzędzie do wizualizacji cech widmowych oraz wyboru najbardziej informatywnego zakresu częstotliwości dla każdej cechy.

W rozdziale: **7. Time-frequency analysis** Autor rozprawy przedstawił aspekty analizy czasowo-częstotliwościowej sygnału. Przedstawił zastosowanie: spektrogramu w kontekście ekstrakcji cech, analizy sygnałów fluktuacji widmowych oraz opis cech czasowych.

W rozdziale: **8. Dimensionality reduction and classification** zawarta jest redukcja wymiarowości cech i klasyfikacja sygnałów pomiarowych na podstawie cech o zmniejszonej wymiarowości. Przedstawiono metodę oceny jakości cech, metody redukcji wymiarowości tych cech: algorytm Minimalnej Redundancji – Maksymalnej Istotności (ang. Minimal Redundancy Maximal Relevance, MRMR) oraz Analiza Głównych Składowych (ang. Principal Component Analysis, PCA). Dodatkowo, przedstawiono opis algorytmów klasyfikacji, które zostały wykorzystane podczas realizacji rozprawy.

Sekcja **III Results, Discussion and Conclusions** obejmuje rozdziały 9 – 14. Zawarta są w niej wyniki analiz przeprowadzonych z wykorzystaniem metod omawianych w sekcji II.

W rozdziale: **9. Preprocessing** zostały przedstawione wyniki zastosowania metod przetwarzania wstępnego oraz przeprowadzono ich analizę porównawczą.

Rozdział: **10. Time domain features** przedstawia wyniki analizy sygnału VAG przeprowadzonej w dziedzinie czasu. Cechy sygnału rozpatrywane były w zakresie informatywności, te prezentujące się najlepiej były badane pod kątem zdolności cech do rozróżniania poszczególnych par klas. W rozdziale zawarto również wyniki i ich interpretację w zakresie korelacji cech w dziedzinie czasu. Przedstawiono podsumowanie rozdziału.

Rozdział: **11. Frequency domain features** przedstawia wyniki analizy sygnału VAG przeprowadzonej w dziedzinie częstotliwości. W rozdziale zawarto i przeanalizowano wyniki dla wybranych metod estymacji widma oraz mapy zakresów częstotliwości pod kątem informatywności wybranych zakresów częstotliwości. Zawarto również informatywność cech częstotliwościowych nieodpowiadających metodologii map zakresów częstotliwości. Dodatkowo, jak w rozdziale 10, cechy sygnału rozpatrywane były w zakresie informatywności, te które były najbardziej informatywne zostały przeanalizowane pod kątem zdolności cech do rozróżniania poszczególnych par klas. W rozdziale przedstawiono wyniki i ich analizę w zakresie korelacji cech w dziedzinie częstotliwości. Dokonano analizy zakresów częstotliwości pod kątem najwyższej informatywności. Przedstawiono podsumowanie rozdziału.

Rozdział: **12. Time-frequency domain features** zawiera wyniki analizy cech sygnału VAG przeprowadzonej w dziedzinie czasowo - częstotliwościowej. Jako pierwsze zostały zaprezentowane wyniki z zakresu analizy częstotliwościowej a następnie czasowej. Podobnie jak w rozdziałach 10 i 11 cechy sygnału rozpatrywane były w zakresie informatywności. Cechy najbardziej informatywne zostały wykorzystane do rozróżniania poszczególnych par klas. Zawarto analizę wpływu parametrów spektrogramu na informatywność cech. Przedstawiono podsumowanie rozdziału.

Rozdział: **13. Dimensionality reduction and classification** zawiera wyniki analizy w zakresie redukcji wymiarowości i klasyfikacji. Przeprowadzono analizę redukcji wymiarowości i porównano algorytm Minimalnej Redundancji – Maksymalnej Istotności (ang. Minimal Redundancy Maximal Relevance, MRMR) oraz Analizę Głównych Składowych (ang. Principal Component Analysis, PCA). Autor rozprawy w rozdziale przedstawił wyniki klasyfikacji sygnału VAG przy użyciu zredukowanego zestawu cech. W końcowej części rozdziału podsumowano wyniki przeprowadzonych badań.

W rozdziale: **14. Summary and conclusions** przedstawiono podsumowanie wszystkich przeprowadzonych badań i określone na ich podstawie wnioski. Autor omówił wkład niniejszej rozprawy w dziedzinę wibroartrografii i omówił ograniczenia przeprowadzonych badań.

Przedstawione zostały kierunki dalszych badań, które warto zrealizować w tematyce, poruszonej w rozprawie.

Pracę kończy zawierająca 186 pozycji bibliografia. Dobór źródeł literaturowych jest właściwy. W spisie źródeł literaturowych umieszczone są następujące prace, w których współautorem jest Autor rozprawy:

[115] A. Łysiak, A. Froń, D. Bączkiewicz, and M. Szmajda. The new descriptor in processing of vibroacoustic signal of knee joint. *IFAC-PapersOnLine*, 52(27):335–340, 2019.

[116] A. Łysiak, A. Froń, D. Bączkiewicz, and M. Szmajda. Vibroarthrographic Signal Spectral Features in 5-Class Knee Joint Classification. *Sensors*, 20(17):5015, 2020.

[133] A. Łysiak and M. Szmajda. Empirical Comparison of the Feature Evaluation Methods Based on Statistical Measures. *IEEE Access*, 9:27868–27883, 2021.

[168] A. Łysiak, T. Marciniak, and D. Bączkiewicz. Repeatability of the Vibroarthrogram in the Temporomandibular Joints. *Sensors*, 22(23):9542, 2022.

Pozytywna ocena tych publikacji przez niezależnych recenzentów czasopism naukowych potwierdza, że podjęta tematyka jest aktualna, wybrane metody są właściwe, badania przeprowadzone prawidłowo, a wnioski są uzasadnione. W tych pracach Doktorant jest pierwszym i korespondencyjnym Autorem, co oceniam pozytywnie. Znaczący wkład Autora jako pierwszego autora w opracowanie publikacji polegał na określeniu conceptualizacji badań, doborze metod badawczych, opracowaniu metodyki, oprogramowania, przeprowadzeniu analizy formalnej, udziale w prowadzeniu badań, zarządzanie danymi, przygotowaniu manuskryptów oraz ich edycji, wizualizacji, kierowaniu badaniami.

Publikacje naukowe Doktoranta powiązane tematycznie z niniejszą rozprawą doktorską są wielokrotnie cytowane. Ogólna liczba cytowań (80 cytowań, 70 bez autocytowań) 11 publikacji, których współautorem jest Autor rozprawy oraz jego Indeks Hirsha wynoszący 4 wskazują na podejmowanie przez Doktoranta aktualnej tematyki badawczej. Wyniki prowadzonych badań z zakresu tematyki rozprawy doktorskiej były również prezentowane na konferencjach naukowych.

Rozprawa jest przygotowana bardzo starannie, świadczy o dogłębnej wiedzy z zakresu podjętej tematyki badań, umiejętności przeprowadzenia analizy otrzymanych wyników oraz wyciągania właściwych wniosków. Należy podkreślić kompleksowość, wysoką jakość i szeroki zakres przeprowadzonych analiz oraz badań, przedstawionych w rozprawie oraz publikacjach z zakresu rozprawy.

Recenzowana rozprawa doktorska prezentuje bardzo dobry poziom naukowy. Należy podkreślić wyjątkową znajomość podjętej tematyki oraz rzetelność badawczą Autora, co przyczyniło się do powstania dobrze zaplanowanej i solidnie zrealizowanej pracy, która wyróżnia się doskonałą redakcją. Doktorant wykazał się dobrym przygotowaniem w zakresie metod przetwarzania sygnałów, cech ekstrahowanych z sygnałów VAG oraz ich analizy, wybrał właściwe narzędzia i metody, które pozwoliły na automatyczną klasyfikację choroby zwyrodnieniowej stawu kolanowego oraz chondromalacji rzepki. Na podstawie powyższego z pewnością można stwierdzić że Autor jest wnikliwym oraz dojrzałym naukowcem.

## ***Teza, cele i motywacja podjęcia tematu***

Kolano ze względu na złożoną budowę jest jednym z najczęściej uszkodzanych części ciała oraz podatnym na występowanie różnych schorzeń. Często występującymi schorzeniami są choroba zwyrodnieniowa stawu kolanowego oraz chondromalacja rzepki. Niezwykle istotnym jest opracowanie oraz udoskonalenie metod diagnostycznych pozwalających wykryć zmiany patologiczne w kolanie we wczesnym stadium. Wibroartrografia stawu kolanowego zapewnia zrozumienie jego wewnętrznych mechanizmów oraz pozwala na wykrywanie i ocenę zmian patologicznych stawu kolanowego oraz ich dynamiki, co prowadzi do coraz częstszego jej wykorzystania. Metoda ta jest nieinwazyjna, tania, szybka i stanowi alternatywę dla obecnie stosowanych metod diagnostycznych takich jak artroskopia, RTG czy rezonansu magnetycznego, przy zastosowaniu których, na przykład, nie można scharakteryzować funkcjonalności chrząstki stawowej podczas dynamicznych ruchów stawu kolanowego.

Niniejsza rozprawa doktorska dotyczy automatycznej klasyfikacji choroby stawu kolanowego oraz chondromalacji rzepki przy zastosowaniu analizy sygnałów wibroartrograficznych. Opracowane przez Autora podejście prowadzi do zwiększenia dokładności klasyfikacji schorzeń przez co umożliwia wczesne wykrycie uszkodzeń chrząstki co jest kluczowym dla wczesnej optymalizacji leczenia, postępowania klinicznego i opóźnienia postępu zwyrodnienia stawów.

Tytuł rozprawy „Automatic Diagnosis of the Patient's Knee Joint Using Selected Methods of Vibroarthrographic Signal Analysis” odpowiada jej treści i określa rozważany w niej problem i zakres badań. Główne zagadnienia naukowe zaprezentowane przez Autora w rozprawie doktorskiej dotyczą analizy możliwości zastosowania wibroartrografii (VAG) do automatycznej diagnozy schorzeń stawu kolanowego na przykładzie choroby zwyrodnieniowej stawu kolanowego oraz chondromalacji rzepki. W mojej opinii podjęcie takiej tematyki badawczej jest bardzo aktualne i przydatne zarówno z punktu widzenia naukowego, jak i praktycznego, ze względu na występowanie różnych schorzeń stawu kolanowego, w tym spowodowanych na przykład przez przeciążenia, siedzący tryb życia i inne czynniki, które mogą powodować ból oraz prowadzić do degradacji chrząstki i redukcji ilości i jakości płynu stawowego.

**Teza pracy** została sformułowana następująco:

*Zastosowanie metod cyfrowego przetwarzania sygnałów w analizie sygnału wibroartrograficznego, szczególnie w dziedzinie czasu, częstotliwości i czasowo-częstotliwościowej, umożliwia ekstrakcję cech pozwalających na klasyfikację schorzeń stawu kolanowego z wyższą niż obecnie (0,69) dokładnością.*

Teza postawiona w rozprawie jest w sposób właściwy i jest tezą naukową, odpowiada ona celowi pracy, a wykazanie jej słuszności ma aspekt poznawczy oraz duże znaczenie praktyczne. Przedstawione w rozprawie metody i przyjęte założenia uważam za uzasadnione. Autor udowadniając tezę rozwiązał problemy badawcze w niej zawarte. Doktorant wykazał się głęboką wiedzą, dotyczącą przede wszystkim metod badania sygnałów AVG, ich przetwarzania, ekstrakcji cech sygnałów oraz algorytmów stosowanych do klasyfikacji schorzeń stawu kolanowego. Autor udowodnił, że potrafi analizować i oceniać uzyskane rezultaty oraz formułować poprawne wnioski.

**Cele pracy** zostały jasno sprecyzowane i brzmią następująco:

Głównymi celami pracy są:

1. Analiza cech sygnałów stosowanych w obszarze VAG i identyfikacja cech parametrycznych, których parametry można optymalizować pod kątem informatywności.
2. Ekstrakcja cech sygnału w dziedzinie czasu.
3. Ekstrakcja cech sygnału w dziedzinie częstotliwości.
4. Ekstrakcja cech sygnału w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej.
5. Wybór miary informacyjności cechy.
6. Wybór najbardziej informatywnego zestawu cech.
7. Wybór modelu uczenia maszynowego pozwalającego na klasyfikację ekstrahowanych cech z dokładnością większą niż 0,69 uzyskaną przez Kręcisz i Bączkowicza [5].

Dodatkowymi celami pracy są:

1. Porównanie wybranych metod wstępnego przetwarzania w kontekście informatywności cech.
2. Analiza i interpretacja informatywności uzyskanych cech.
3. Analiza wpływu parametrów cech na ich informatywność.
4. Analiza porównawcza metod estymacji widma w kontekście informatywności cech.
5. Analiza porównawcza parametrów spektrogramu w kontekście informatywności cech.
6. Analiza porównawcza wybranych metod redukcji wymiarowości w kontekście dokładności klasyfikacji.
7. Analiza porównawcza modeli uczenia maszynowego w kontekście dokładności klasyfikacji.

Doktorant analizuje również ograniczenia realizowanych w rozprawie badań, które dotyczą zastosowania stosunkowo prostych technik przetwarzania wstępnego sygnałów, braku uwzględnienia określonych par klas oraz selekcji cech czasowo-częstotliwościowych w całym widmie sygnałów AVG, a nie w informatywnych zakresach częstotliwości. Dodatkowo, Autor zwraca uwagę na brak wyraźnych informacji dotyczących synchronizacji między sygnałem VAG a fazą ruchu stawu kolanowego. Uwzględnienie w dalszych badaniach aspektów, na które zwraca uwagę Autor rozprawy, może poprawić wyniki klasyfikacji. W mojej opinii wskazane przez Autora ograniczenia nie umniejszają jej wartości naukowej.

### ***Ocena oryginalności rozprawy***

Przedstawione przez Autora w dysertacji podejście dotyczy szczegółowej analizy wyodrębnionych cech sygnału, optymalizacji cech parametrycznych oraz wyboru najbardziej informatywnego zestawu cech sygnału w celu diagnostyki schorzeń stawu kolanowego. Najdokładniejszym klasyfikatorem okazała się Liniowa Maszyna Wektorów Nośnych uczona z wykorzystaniem 110 cech, osiągając dokładność klasyfikacji na poziomie 0.80.

Jako metodę wizualizacji ekstrakcji cech częstotliwości zaproponowano mapy zakresów częstotliwości, co pozwoliło na lepszą wizualizację charakterystyk widmowych sygnałów AVG.

Za najważniejsze aspekty oryginalności pracy uważam:

- kompleksowe badania cech (z uwzględnieniem ich informatywności) sygnału VAG przeprowadzone w dziedzinach czasu, częstotliwości i czasowo – częstotliwościowej;

- obliczenie informatywności cech, co pozwoliło na przeprowadzenie analizy skupionej na kontekście klasyfikacji;
- analiza metod przetwarzania sygnałów i danych obejmująca między innym: różne podejścia do wstępnego przetwarzania sygnałów VAG, metody estymacji widma, algorytmy redukcji wymiarów oraz klasyfikacji, która jest przydatna w przetwarzaniu sygnałów biomedycznych;
- optymalizacja parametrów na podstawie przeprowadzonej przez Autora analizy cech parametrycznych oparta o otrzymane wyniki badań wpływu parametrów na informatywność cech;
- redukcja wymiarowości przestrzeni cech oraz wyższa niż obecnie (0,69) dokładność klasyfikacji.

Reasumując, rozprawa doktorska jest aktualna do stanu wiedzy i rozwija dziedzinę automatycznej klasyfikacji diagnozy stawu kolanowego na podstawie analizy sygnałów VAG.

### ***Uwagi krytyczne, pytania***

Rozprawa doktorska nie zawiera istotnych uchybień i błędów. Przedstawione poniżej uwagi nie obniżają mojej pozytywnej oceny rozprawy doktorskiej.

Uwagi:

1. W rozdziale 1.2 Autor rozprawy zaproponował tezę pracy oraz jej cele: 7 głównych oraz 7 mniej istotnych. Sama teza odnosi się do konkretnej wartości dokładności klasyfikacji, która została osiągnięta przez jeden z zespołów publikujących w tej tematyce – 0.69. Interesujące jest, aby Doktorant zaprezentował jakie wartości tego parametru osiągane są przez inne zespoły naukowe i dlaczego został wybrany akurat ten zespół, jako swoistą referencję. Ponadto, ze względu na mnogość celów, które Doktorant zobowiązał się osiągnąć, istotne jest na uwypuklenie które z nich są najistotniejsze oraz dlaczego.
2. W rozdziale 6 Doktorant, w celu estymacji widma sygnałów VAG zastosował metody nieparametryczne: periodogram, metoda Welch'a oraz metodę Multitaper. W metodzie Welch'a wybrano okno Hamminga oraz nakładanie się okien 50%. Dlaczego wybrano takie okno oraz współczynnik nakładania się okien? Czy Doktorant rozważał również zastosowanie metod parametrycznych, np.: AR, MA, ARMA lub metod podprzestrzeni np. Pisarenki?
3. W rozdziale 7 mowa jest o analizach czasowo-częstotliwościowych, umożliwiających obserwację fluktuację widma przebiegu w czasie. Podstawowym narzędziem z tej grupy metod jest spektrogram, który zresztą został zaproponowany przez Doktoranta. Jego głównymi parametrami są: kształt okna czasowego, jego szerokość oraz współczynnik nakładania się okien. Parametry te zostały dobrane na podstawie przytoczonego przeglądu literaturowego. Współczynnik nakładania się okien – 50%, często stosowany w literaturze, wprowadza pewne uśrednienia czasowe poszczególnych widm. Czy Doktorant rozważał jaki wpływ mógłby mieć ten współczynnik na osiągnięte rezultaty badań?

4. Ponadto, czy Doktorant brał pod uwagę również inne analizy czasowo-częstotliwościowe np.: transformacja falkowa, dystrubucja Wignera-Ville'a. Wydaje się, że szczególnie pierwsza z nich mogłaby dostarczyć interesujących informacji, z punktu widzenia specyfiki sygnałów VAG.
5. W rozdziale 8 Doktorant przeprowadził redukcję wymiarowości pozyskanych cech (która osiągnęła liczbę 8 429 331). W tym celu zastosował dwie metody MRMR (Maximum Relevance Minimum Redundancy) oraz PCA (Principal Component Analysis). Dlaczego akurat takie metody redukcji zostały zastosowane?
6. W pracy rozpatrywano klasyfikację trzech stopni chondromalacji rzepki, a wyróżnia się cztery stopnie. Dlaczego nie był brany pod uwagę IV stopień chondromalacji rzepki? Do której klasy byłby zaliczony w proponowanym algorytmie IV stopień chondromalacji rzepki?
7. Nazwa rozdziału 2 nie oddaje w pełni treści w nim zawartych. Dlatego, że zawiera podstawy anatomii i fizjologii stawu kolanowego, metody diagnostyki stawu kolanowego, w tym wibroartroografię. Wibroartrogramy nie zostały opisane szczegółowo i nie stanowią główną część rozdziału.
8. Nazewnictwo rozdziałów jest identyczne: rozdział 4 nazywa się tak samo jak rozdział 9, rozdział 8 nazywa się tak samo jak rozdział 13.

### ***Wnioski końcowe***

Podsumowując stwierdzam, że praca wyróżnia się oryginalnością zastosowanych metod i narzędzi badawczych, uzyskane w pracy wyniki są oryginalne i zawierają elementy nowości naukowej. Oryginalne osiągnięcia Autora rozprawy takie jak odpowiedni dobór algorytmu największej informatywnych cech (Maximum Relevance Minimum Redundancy) oraz odpowiedniej metody klasyfikacji (Linear Support Learning Machine) pozwoliły na zwiększenie dokładności klasyfikacji sygnałów VAG do 0,8, co przyczynia się do udoskonalenia diagnostyki schorzeń stawu kolanowego.

Przedstawiony w rozprawie cel został osiągnięty, a teza potwierdzona. Zagadnienia poruszane w rozprawie mają aspekt praktyczny. Doktorant wykazał się odpowiednią wiedzą z zakresu znajomości aktualnej i istotnej tematyki podjętej w pracy, umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz sprawnością w zakresie formułowania wniosków. Przeprowadzone badania oraz otrzymane wyniki stanowią solidną podstawę do kontynuacji podjętej tematyki badawczej.

**Uważam, że rozprawa doktorska mieści się w dyscyplinie naukowej „Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne” oraz z nadmiarem spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim przez ustawę o tytule naukowym i stopniach naukowych oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, zgodnie z Ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U z 2023 r. poz. 742). Na podstawie powyżej przedstawionej argumentacji, stawiam wniosek do Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Opolskiej o przyjęcie ocenianej pracy oraz dopuszczenie Pana mgr inż. Adama Łysiaka do dalszych etapów procesu doktoryzowania.**

**Biorąc pod uwagę aktualność problematyki pracy, oryginalność zastosowanych metod i wyników badań zaprezentowanych w rozprawie doktorskiej oraz umiejętności Autora do prowadzenia pracy naukowej wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Adama Łysiaka.**

*Oleksandra Hoła*

