



dr hab. inż. Mariusz Ptak, prof. uczelni
Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny
Katedra Konstrukcji Badań Maszyn i Pojazdów
ul. Łukasiewicza 7, 50-371 Wrocław

Wrocław, 24.04.2026

RECENZJA

rozprawy doktorskiej ppor. mgr inż. **Natalii Daniel** p.t.:

**Analiza wpływu czynników dynamicznych i stymulacji wirtualnej na
charakterystyki zmęczenia nerwowo-mięśniowego w cyklicznym wysiłku
fizycznym,**

której promotorem jest:

prof. dr hab. inż. Jerzy Małachowski

a

promotorem pomocniczym:

dr hab. inż. Wojciech Kaczmarek

1. PODSTAWA FORMALNA OPRACOWANIA RECENZJI

Niniejsza recenzja została sporządzona na podstawie zlecenia właściwego organu Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie, dotyczącego oceny rozprawy doktorskiej przyjętej jako cykl publikacji naukowych, złożonej przez ppor. mgr inż. Natalię Daniel w celu ubiegania się o stopień naukowy doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Recenzja obejmuje ocenę autoreferat oraz pięciu artykułów naukowych [P1]–[P5] stanowiących podstawę doktoratu, a jej treść odnosi się do wymagań określonych w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 poz. 1668 z późn. zm.).

2. PRZEDMIOT I ZAKRES ROZPRAWY

Rozprawa doktorska ppor. mgr inż. Natalii Daniel nosi tytuł: „Analiza wpływu czynników dynamicznych i stymulacji wirtualnej na charakterystyki zmęczenia nerwowo-mięśniowego w cyklicznym wysiłku fizycznym”. Rozprawa doktorska ma formę autorskiego opracowania syntetyzującego cykl 5 publikacji artykułów opublikowanych w recenzowanych czasopismach naukowych z listy JCR, ujętych na liście Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Rozprawa liczy 67 stron tekstu zasadniczego i jest zorganizowana w czytelny, logicznie spójny sposób. Układ pracy obejmuje: streszczenie w języku polskim i angielskim (str. 5-8), słownik skrótów (str. 9), podziękowania (str. 10), wykaz publikacji (str. 11), cel pracy i cele cząstkowe (str. 12-16), przegląd literatury (str. 17-23), opis badań eksperymentalnych (str. 24-37), analizę charakterystyk zmęzeniowych wraz z algorytmem DWT (str. 38-53), podsumowanie i wnioski (str. 54-55), syntezę metodyczną i perspektywy badawcze (str. 56-57), oryginalne elementy rozprawy (str. 58-59), kierunki dalszych badań (str. 60-61) oraz bibliografię (str. 62-67). Wg recenzenta struktura ta odpowiada standardom akademickim i zapewnia przejrzysty wywód naukowy.

Cykl tworzy spójną, wieloetapową ścieżkę badawczą poświęconą ilościowej ocenie zmęczenia mięśni kończyn dolnych podczas dynamicznych ćwiczeń na ergometrze wioślarskim, z wykorzystaniem autorskiego algorytmu opartego na dyskretnej transformacji falkowej (DWT) oraz immersyjnego środowiska wirtualnej rzeczywistości (VR). Praca charakteryzuje się wysoką oryginalnością, dojrzałością metodologiczną i ponadprzeciętnym, udokumentowanym wkładem własnym kandydatki (70-80% w każdej z publikacji oraz autorka wiodąca).

3. ZAKRES MERYTORYCZNY, UWAGI OGÓLNE I SZCZEGÓŁOWE

Zakres merytoryczny

Tematyka podjęta w rozprawie dotyczy ilościowej analizy zmęczenia nerwowo-mięśniowego podczas cyklicznych ćwiczeń dynamicznych, ze szczególnym uwzględnieniem sygnałów elektromiograficznych (sEMG) rejestrowanych podczas wysiłku na ergometrze wioślarskim. Problem ten, mimo szerokiego zainteresowania w biomechanice i inżynierii biomedycznej, pozostaje wciąż nierozwiązany w wymiarze metodycznym – istniejąca literatura koncentruje się w przeważającej mierze na warunkach statycznych. Doktorantka trafnie zidentyfikowała tę lukę badawczą i zaproponowała kompleksowe podejście do jej wypełnienia.

Cykl 5 publikacji tworzy spójną, wieloetapową ścieżkę badawczą: od analizy korelacji EMG–fNIRS w badaniach wstępnych [P1], przez opracowanie i weryfikację algorytmu segmentacji sygnału EMG opartego na dyskretnej transformacji falkowej (DWT) [P2], ilościową ocenę zmęczenia na grupie 8 wioślarzy z użyciem testów statystycznych [P3], pilotażowe badania wpływu środowiska wirtualnej rzeczywistości (VR) na zmęczenie mięśni [P4], aż po metodyczną syntezę wyzwań i perspektyw badawczych [P5]. Taka „architektura” dorobku odpowiada wzorcowi dojrzałego cyklu publikacji i świadczy o konsekwentnym rozwijaniu jednego problemu badawczego.

Do oryginalnych i wartościowych osiągnięć naukowych pracy należy zaliczyć:

- opracowanie autorskiego algorytmu segmentacji sygnału sEMG na podstawie ciągłego monitorowania kąta zgięcia kończyny dolnej w stawie kolanowym i wyznaczenia MDF za pomocą DWT – jako obiektywnego, ilościowego wskaźnika zmęczenia mięśniowego w ruchu dynamicznym;
- dowiedzenie, że proponowana metoda jest niezależna od bezwzględnej siły mięśniowej i osiągnięć sportowych badanych, co potwierdza jej obiektywność i potencjał aplikacyjny;
- opracowanie dedykowanego, fotorealistycznego środowiska VR w silniku Unreal Engine 5 (sceneria spływu górską rzeką) i jego integrację ze stanowiskiem ergometrycznym;

- wykazanie, że immersyjne środowisko VR nie modyfikuje istotnie statystycznie fizjologicznego narastania zmęczenia u wysoko wytrenowanych sportowców ($p > 0,05$)
- kompleksową identyfikację wyzwań metodycznych związanych z pomiarami EMG w warunkach dynamicznych, w tym propozycję integracji z algorytmami AI jako kierunkiem przyszłych badań [P5].

Ocena poszczególnych publikacji cyklu (IF, punkty MNiSW, na podstawie informacji podanych przez Doktorantkę)

[P1] N. Daniel et al., Relationship between EMG and fNIRS during Dynamic Movements, Sensors 2023, IF 3,5, 100 pkt. MNiSW

Praca wstępna o charakterze metodyczno-eksploracyjnym. Wykazano pozytywną korelację sygnałów EMG i fNIRS u pięciu badanych kobiet o różnym poziomie wytrenowania oraz istotny wpływ stylu życia na stopień tej korelacji. Wkład doktorantki: 75%, obejmujący pełną koncepcję badań, analizę i przygotowanie manuskryptu.

[P2] N. Daniel, J. Małachowski, Wavelet analysis of the EMG signal..., Acta Bioeng. Biomech. 2023, IF 1,0, 100 pkt. MNiSW

Praca metodologiczna przedstawiająca pełny algorytm segmentacji sygnału EMG na podstawie zmiany kąta zgięcia kończyny dolnej i dekompozycji DWT. Poprawne wdrożenie DWT i STFT z analizą MNF i MDF, potwierdzone na danych jednego uczestnika (trzy pomiary). Wnioski wskazują jednoznacznie na przewagę DWT nad STFT w warunkach niestacjonarnych. Wkład doktorantki: 78%, w tym autorstwo algorytmu, przetwarzanie sygnałów i redakcja manuskryptu.

[P3] N. Daniel et al., Quantitative assessment of muscle fatigue..., Front. Bioeng. Biotechnol. 2024, IF 4,8, 100 pkt. MNiSW

Praca stanowiąca walidację algorytmu na grupie $N=8$ wyczynowych wioślarzy AZS WAT. Zastosowano testy m.in. ANOVA, potwierdzono brak związku między zmęczeniem mięśniowym a bezwzględną siłą czy osiągnięciami sportowymi. Wyniki wzmacniają obiektywność proponowanej metody. Wkład doktorantki: 80%.

[P4] N. Daniel et al., Research on the influence of virtual reality on muscle fatigue..., PLOS ONE 2026, IF 2,6, 100 pkt. MNiSW

Pilotażowe badanie z użyciem VR i dedykowanej scenarii UE5. Wykazano brak istotnych statystycznie różnic w dynamice zmęczenia MDF między warunkami VR i non-VR ($p > 0,05$). Wyniki są metodologicznie poprawne, choć ograniczone małą mocą testu ($N=8$, $d \approx 0,15-0,35$). Sceneria VR stanowi oryginalny wkład techniczny. Wkład doktorantki: 73%.

[P5] N. Daniel et al., Muscle Fatigue in Dynamic Movement: Limitations and Challenges..., Bioengineering 2026, IF 3,7, 20 pkt. MNiSW

Rozbudowana praca przeglądowo-metodyczna systematyzująca wyzwania pomiaru EMG w ruchu dynamicznym, omawiająca artefakty, metody WT/DWT, potencjał integracji AI i ML oraz perspektywy wielomodalnych systemów biosensorycznych. Wkład doktorantki: 70%. Stanowi wg mnie dojrzałą syntezę całego cyklu.

Z załączonych oświadczeń współautorów wynika, że Natalia Daniel była głównym autorem wszystkich pięciu publikacji cyklu, z udziałem wynoszącym od 70% do 80%. Kandydatka odpowiadała za: koncepcję badań, planowanie i realizację eksperymentów, przetwarzanie sygnałów, analizy statystyczne, opracowanie algorytmów obliczeniowych, wizualizację danych oraz redakcję manuskryptów. Warto podkreślić, że doktorantka podjęła się zadania technicznie wymagającego: zaprojektowała stanowisko pomiarowe integrujące wielokanałowy system EMG, analizę kinematyczną ruchu oraz immersyjne środowisko VR w UE5, co wymagało zarówno kompetencji inżynierskich, jak i doświadczenia eksperymentalnego. Badania eksperymentalne przeprowadzono po uzyskaniu pozytywnej opinii Komisji Etyki Badań z Udziałem Ludzi przy SGGW (decyzja nr 19/2022 z dnia 21.03.2022),

Zakres edytorski

Pod względem edytorskim praca prezentuje się poprawnie. Ilustracje i rysunki są czytelne i właściwie opisane. Język pracy jest precyzyjny i utrzymany na wysokim

poziomie naukowym, choć recenzent zwraca uwagę na kilka kwestii formalnych wymagających korekty w przyszłych pracach:

- słownik skrótów (str. 9) zawiera pozycje nienumerowane według kolejności alfabetycznej, co wg mnie, należałoby poprawić;
- w pracy nie zawsze konsekwentnie stosowane jest rozróżnienie między dywizem (łącznikiem) a myślnikiem – wymaga ujednolicenia;
- zdania nie powinny rozpoczynać się od skrótowców (np. str. 38 w odniesieniu do skrótu WT);
- sporadycznie pojawia się terminologia potoczna, np. „kostka” zamiast „staw skokowy”;
- w niektórych rysunkach brakuje opisu osi na wykresach (np. rys. 13);
- na stronie 56 sformułowanie „jak wskazano w literaturze przeglądowej” powinno być opatrzone konkretnym odniesieniem bibliograficznym;
- w bibliografii brakuje odwołań do własnych publikacji [P1]-[P5] doktorantki jako pozycji bibliograficznych cytowanych w tekście monografii.

Opisane uchybienia mają charakter redakcyjny i nie wpływają na merytoryczną wartość pracy.

Uwagi szczegółowe:

Poniżej recenzent przedstawia uwagi krytyczne dotyczące zarówno kwestii merytorycznych, jak i wybranych zagadnień metodycznych i formalnych.

1. Jedną z istotnych słabości przedstawionego cyklu jest mała liczebność uczestników. Walidacja algorytmu [P2] opiera się na danych pojedynczego badanego, a badania główne [P3, P4] objęły osiem osób. Wpływa to na ograniczoną moc statystyczną testów ($d \approx 0,15-0,35$ w badaniu VR) oraz utrudnia wnioskowanie generalizujące. Autorka jest świadoma tego ograniczenia i wprost je sygnalizuje, jednak wskazane byłoby mocniejsze

zaakcentowanie pilotażowego charakteru niektórych wniosków, zwłaszcza dotyczących wpływu VR na zmęczenie.

2. Wszystkie badania eksperymentalne przeprowadzono wyłącznie na młodych, zdrowych mężczyznach o wysokim poziomie wytrenowania wioślarskiego. Brak porównania z osobami nieaktywnymi, populacjami klinicznymi lub innymi dyscyplinami sportowymi ogranicza zakres aplikacyjny proponowanych metod. Ograniczenie to zasadniczo rzutuje na stopień uogólnialności wyników. Wymaga wyjaśnienia, dlaczego w badaniach wstępnych [P1] dobrano do badań kobiety (po jednej reprezentantce każdej grupy wytrenowania), natomiast w badaniach głównych uczestniczyli wyłącznie mężczyźni – brak jest jednoznacznego uzasadnienia tej decyzji metodycznej.
3. Choć Doktorantka słusznie identyfikuje artefakty ruchowe jako główne wyzwanie pomiaru EMG w warunkach dynamicznych, brak jest ilościowego oszacowania wpływu przesunięć elektrod i perspiracji na stabilność obliczanych wartości MDF/MNF. Interpretacja lokalnie dodatnich nachyleń regresji w niektórych próbach wymaga pogłębionej dyskusji fizjologicznej – czy są one wynikiem adaptacji mięśniowej, czy artefaktu pomiarowego.
4. Sposób synchronizacji EMG i fNIRS W rozprawie i publikacji [P1] nie opisano wystarczająco precyzyjnie procedury synchronizacji systemu EMG (Noraxon) i fNIRS. Synchronizacja dwóch niezależnych systemów pomiarowych obciążona jest ryzykiem rozbieżności czasowej. Zagadnienie to wymagałoby doprecyzowania w opisie metodyki.
5. Zmienne obciążenie ergometru realizowano poprzez manualne przestawianie przesłony ergometru wioślarskiego (zakres 4-1). Nie wskazano jednoznacznie, czy ta procedura zapewniała dokładne i powtarzalne ustawienie obciążenia u wszystkich uczestników, ani czy rozważano zastąpienie jej bardziej precyzyjną metodą.
6. Estymacja kąta zgięcia w stawie kolanowym jest realizowana pośrednio, na podstawie odległości między markerami na biodrze i stawie skokowym. Recenzent zwraca uwagę, że przemieszczenia nóg w osi wzdłużnej względem kamery rejestrującej 2D mogą wprowadzać błąd pomiaru wynikający z perspektywy. Nie wykazano, że markery pozostawały w tej samej

płaszczyźnie pomiarowej przez cały czas trwania testu – jest to potencjalne, niekontrolowane źródło błędu systematycznego. Może lepiej byłoby przeprowadzać dodatkowo pomiar przemieszczenia siedziska ergometru?

7. W opisie metodyki [P3] wskazano, że test kończono przy wartości 20 w skali Borga (maksymalny wysiłek). Skala ta jest jednak skalą subiektywną, oceniającą nie tylko zmęczenie mięśniowe, lecz również stopień duszności i ogólne odczucia wysiłkowe. Recenzent pyta, czy przekroczenie wartości granicznej oceny 20 nie rodziło ryzyka utraty przytomności lub innych zdarzeń niepożądanych, a jeśli tak – jak było to kontrolowane w protokole.
8. Niewystarczający opis walidacji klinicznej lub porównawczej. Proponowane metody nie zostały skonfrontowane z metodami referencyjnymi (np. biopsja mięśniowa, VO_2) ani z innymi algorytmami analizy zmęczenia opisanymi w literaturze.
9. W kilku miejscach pracy liczba cyfr znaczących podawanych w odchyleniach standardowych i parametrach statystycznych przewyższa precyzję stosowanych metod pomiarowych. Zalecana jest konsekwentna zgodność liczby miejsc znaczących z rzeczywistą dokładnością pomiaru.

Wymienione zastrzeżenia mają przede wszystkim charakter metodyczny lub formalny. Większość z nich jest wpisana w naturę pionierskich badań pilotażowych. Nie podważają one zasadniczej wartości naukowej dysertacji, lecz wyznaczają obszary wymagające pogłębienia w kolejnych pracach badawczych. Recenzent oczekuje, że kandydatka odniesie się do istotnych zastrzeżeń podczas publicznej obrony rozprawy.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSEK KOŃCOWY

Rozprawa doktorska ppor. mgr inż. Natalii Daniel stanowi wartościowe, oryginalne i kompletne opracowanie naukowe w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Doktorantka w sposób konsekwentny i metodycznie dojrzały zrealizowała złożony, wieloetapowy projekt badawczy, obejmujący:

- opracowanie i walidację autorskiego algorytmu wyznaczania zmęczenia mięśni w ruchu dynamicznym w oparciu o dyskretną transformatę falkową;
- przeprowadzenie wieloetapowych eksperymentów z użyciem zaawansowanej, zintegrowanej aparatury pomiarowej;
- opracowanie dedykowanej aplikacji VR i jej integrację ze stanowiskiem ergometrycznym;
- opublikowanie pięciu artykułów naukowych w czasopismach z listy JSR (Sensors, Acta Bioeng. Biomech., Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, PLOS ONE, Bioengineering);
- syntezę metodyczną wskazującą kierunki dalszych badań, w tym integrację z algorytmami sztucznej inteligencji.

Cykl publikacji tworzą spójną ścieżkę naukową łączącą analizę sygnałów biologicznych, inżynierię mechaniczną, mechatronikę i technologie immersyjne. Dorobek jest oryginalny, wnosi mierzalny wkład do metod ilościowej analizy zmęczenia mięśni w ruchu dynamicznym i otwiera perspektywiczne kierunki badań. Kandydatka wykazała się samodzielnością badawczą, dojrzałością metodologiczną i zdolnością do syntezy wyników złożonych eksperymentów.

Biorąc pod uwagę całość dorobku naukowego przedstawionego w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej, recenzent wnosi o **wyróżnienie pracy**, głównie ze względu na fakt, że praca wyróżnia się na tle typowych dysertacji z obszaru inżynierii mechanicznej.

Mając na względzie powyższe, stwierdzam, że przedstawiony dorobek naukowy ppor. mgr inż. Natalii Daniel spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

Wnoszę o dopuszczenie ppor. mgr inż. Natalii Daniel do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia naukowego doktora.

dr hab. inż. Mariusz Ptak, prof. uczelni

