

Prof. dr hab. inż. Jerzy Baranowski  
Profesor, AGH w Krakowie  
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,  
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej  
Katedra Automatyki i Robotyki  
[jb@agh.edu.pl](mailto:jb@agh.edu.pl), 605-439-587

Kraków, 29.10.2024

## Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Natalii Browarskiej-Waniek pt.: „Intelligent monitoring and digital analysis of biomedical signals: an application in noninvasive brain stimulation”

### Podstawa formalna opracowania recenzji

Zlecenie przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne (AEEiTK) Politechniki Opolskiej dr hab. inż. Andrzeja Waindoka, prof. uczelni, z 26 września 2024 roku (nr RWIRE00ST00/001871/2024 wydane na podstawie uchwały Rady Dyscypliny AEEiTK z 26 lipca 2023 roku w przedmiotowej sprawie.

### Dane uzupełniające o pracy

Promotor: dr hab. inż. Jarosław Zygarlicki

Promotor pomocniczy: dr hab. Inż. Aleksandra Kawala-Sterniuk

### Ocena formalna pracy

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska (licząca 208 stron) składa się z ośmiu części: siedmiu rozdziałów, zestawienia literatury i dodatku (z sześcioma podrozdziałami). Dodatkowo w pracy umieszczono spisy rysunków i tabel liczące po cztery strony każdy, rozwinięcia wykorzystanych skrótów oraz listę prac i zgłoszeń patentowych .

Pierwszy rozdział nosi tytuł „Introduction” i jak sama nazwa wskazuje jest wprowadzeniem do pracy. Rozpoczyna się on krótkiego wprowadzenia w problematykę interfejsów mózg-komputer i przechodzi płynnie w opis motywacji podjęcia działań. Stawia on jednocześnie cele dla pracy, jakimi są:

- Usprawnienie przetwarzania sygnałów EEG aby usprawnić pozyskiwanie danych z konsumenckich rozwiązań technicznych do pomiaru EEG
- Opracowanie zoptymalizowanego algorytmu do rozpoznawania stanu pacjenta.

Cele te są nieco zrelaxowane w podrozdziale „Aims and Objectives”, tak aby wynikiem była metoda zdatna do analiz wzorców w pomiarach EEG. Sformułowane w podrozdziale teza i hipoteza pracy są w zasadzie tożsame, i skupiają się na pozytywnym wpływie metod monitorowania i analizy sygnałów biomedycznych na rozwój metod stymulacji mózgu w celu wywołania pożądaných odpowiedzi. Są one ogólnie prawdziwe, więc sama rozprawa nie ma

znacznego wpływu na ich weryfikację. Rozdział kończy krótkie przedstawienie zawartości pracy, poprzez ogólne omówienie dalszych rozdziałów.

Drugi rozdział nosi tytuł „Theoretical Background” i dotyczy przede wszystkim kontekstu biomedycznego pracy. Na jego 30 stronach skonsolidowano informację na temat ludzkiego mózgu i jego działania, elektroencefalografii oraz interfejsów mózg-komputer. Ta ostatnia część zasługuje na więcej uwagi, ze względu na widoczny nakład pracy doktorantki w celu utworzenia głębokiego przeglądu literaturowego. Doktorantka dobrze rozwinęła znane prace przeglądowe uzupełniając go o pożyteczny kontekst. Omówione zostały inwazyjne i nieinwazyjne rodzaje interfejsów oraz ich zastosowania. Należy zwrócić też uwagę na dość szczegółowy przegląd istniejących rozwiązań technicznych. Jako wartościowe należy też uznać porównanie parametrów technicznych dostępnych rynkowo urządzeń EEG.

Trzeci rozdział nosi tytuł „Non-invasive Brain Stimulation” można podzielić na dwie zasadnicze części. Pierwsza z nich obejmuje sekcje 3.1 i 3.2 i stanowi kontynuację przeglądu literaturowego. Sekcja 3.1 zatytułowana „Understanding emotions” omawia mechanizmy rozpoznawania emocji oraz ich regulację. Autorka wskazuje na trudności związane z definiowaniem emocji i ich klasyfikacją, podając dwie główne teorie: ewolucyjną Darwina, rozwinętą przez Ekmana, oraz poznawczą koncepcję Langsa. W tej ostatniej emocje są klasyfikowane na dwuwymiarowej skali walencji (pozytywne lub negatywne) i pobudzenia (spokojne lub pobudzone), co pomaga w precyzyjnym określaniu stanu emocjonalnego. Model okrągły Russella z 1980 r. jest przywoływany jako kluczowy do strukturalizacji emocji, przypisując emocje do kombinacji zmiennych ciągłych walencji i pobudzenia. Autorka podkreśla wpływ emocji na podejmowanie decyzji i omawia hipotezę somatycznych markerów Damasio, sugerującą, że procesy emocjonalne kierują podejmowaniem decyzji poprzez „markery” emocjonalne z przeszłych doświadczeń. Sekcja 3.2 zatytułowana „Stimulation techniques” przedstawia techniki stymulacji mózgu, które są wykorzystywane w badaniach nad funkcjonowaniem mózgu i leczeniu zaburzeń neurologicznych i psychiatrycznych. Opisane są różne techniki nieinwazyjnej stymulacji, takie jak stymulacja magnetyczna przezczaszkowa (TMS) i stymulacja prądami o małym natężeniu, w tym stymulacja prądem stałym (tDCS), prądem przemiennym (tACS) oraz losowym szumem (tRNS). Autorka podaje przykłady zastosowań tych technik, np. TMS stosuje się w leczeniu depresji, a tDCS wpływa na pobudliwość neuronów, co może mieć długotrwałe efekty terapeutyczne. Wspomniana przeze mnie druga logiczna część to sekcja 3.3. „Stimulation dataset”, która niejako ukrywa wewnątrz pracy jedno z najważniejszych osiągnięć autorki czyli opracowanie zbioru danych „MUSE: Music Used in Stimulation Experiments”. Zbieranie danych do zbioru MUSE było procesem złożonym, obejmującym starannie zaplanowane eksperymenty przeprowadzane w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych. Uczestnicy, wyposażeni w słuchawki JBL oraz czapkę EEG Emotiv EPOC Flex, byli poddawani 30-minutowej sesji stymulacji audiowizualnej. Każdy eksperyment obejmował kilka scenariuszy, w których uczestnicy wykonywali zadania logiczne w różnych warunkach: bez dźwięku, z dźwiękami

rozpraszającymi oraz z dźwiękami wspomagającymi koncentrację. Przed każdym zadaniem uczestnicy słuchali uspokajających dźwięków natury, co miało na celu osiągnięcie stanu wyciszenia przed przystąpieniem do kolejnych zadań. Proces ten był kluczowy dla uzyskania miarodajnych wyników, gdyż umożliwił dokładne śledzenie zmian aktywności mózgowej w odpowiedzi na różne bodźce. Uważam, że ten zbiór danych stanowi znaczne osiągnięcie, ponieważ otwarte zasoby, takie jak MUSE, przyczyniają się do rozwoju badań nad mózgiem i są użyteczne dla naukowców na całym świecie. Otwarte zbiory danych umożliwiają replikację wyników, wspomagają przejrzystość badań i pozwalają na ich dalszą weryfikację i rozwój metod analitycznych. W kontekście tego doktoratu MUSE jest kluczowy, ponieważ zapewnia unikalne dane do analiz EEG przedstawione w dalszej części pracy.

Rozdział czwarty zatytułowany „Brain Signal Processing” ponownie ma niespójną strukturę. Najpierw w podrozdziale 4.1 mamy bardzo pobieżny opis wielu metod wykorzystywanych w przetwarzaniu sygnałów. Można mieć wrażenie, że w jednym rozdziale autorka starała się zawrzeć (na 15 stronach) cały stan wiedzy dotyczący przetwarzania sygnałów biomedycznych co jest w oczywisty sposób niemożliwe. Metody są przez autorkę w zasadzie tylko wymienione, co może nie byłoby problemem gdyby zaproponować ich jakąś krytyczną analizę, tak aby uzasadnić wybór tych a nie innych do analizy danych, które będą później wykorzystywane w interfejsach mózg-komputer. Zaproponowany podział na metody zaawansowane, hybrydowe oraz filtry cyfrowe proste i adaptacyjne budzi co najmniej wątpliwości. Zaś kryterium, wg. którego uznano niektóre metody za zaawansowane jest cokolwiek niejasne. Zaliczono do nich np. transformatę Fouriera albo analizę głównych składowych. Wymienienie w tym zakresie logiki rozmytej też jest mocno zaskakujące, bo nie napisano o niej nic co uzasadniałoby w ogóle jej rozważanie w kontekście analizy sygnałów biomedycznych. Fragment o filtracji w zasadzie sprowadza się do dyskusji filtrów wygładzających, przy czym zignorowano takie sprawy jak np. nieliniowość filtra medianowego. Rozdział przechodzi następnie w podrozdział 4.2, gdzie mamy do czynienia z faktycznymi wynikami autorki. Konkretnie dokonała ona analizy porównawczej różnych filtrów wygładzających podczas analizy zbioru danych MUSE. W ramach tej analizy doktorantka porównała pięć filtrów dla zbioru danych. Były to:

- Dwa filtry wygładzające za pomocą średniej ruchomej
- Filtr Savitzkiego-Golaya
- Filtr medianowy
- Filtr Savitzkiego-Golaya w wariacie FIR.

Jakkolwiek analiza ta wymagała na pewno bardzo dużo pracy, tak silnie brakującym jej elementem jest brak definicji mierzalnego wskaźnika jakości, który pozwoliłby porównywać filtry ze sobą. W miejsce tego mamy analizę wykresów czasowych i spektrogramów w oparciu o niezbyt przejrzyste kryteria. W konkluzji rozdziału, autorka wybiera filtr Savitzkiego-Golaya nazywając go optymalnym, bez podania kryterium optymalności.

Rozdział piąty nosi tytuł „EEG Feature Extraction and Pattern Recognition” i jest on bardzo szeroki tematycznie. Generalnie praca mogłaby zyskać na jego podzieleniu na dwa lub więcej. Ponownie jak w poprzednich dwóch rozdziałach mamy część przeglądowo teoretyczną gdzie bardzo pobieżnie omówiono kwestie uczenia sieci neuronowych. W omówieniu sieci głębokich pominięto nawet kwestię stochastycznych gradientów. Następnie przedstawiono skrótowe omówienie i porównanie najpopularniejszych schematów głębokiego uczenia maszynowego. Dalsze 31 stron rozdziału zajmują kwestie związane z faktycznymi eksperymentami poświęconymi sieciom neuronowym. Celem doktorantki było rozpoznawanie, czy dany sygnał dotyczył stanu relaksu czy też skupienia. W tym celu przeprowadzony został szeroki post-processing zbioru MUSE, począwszy od filtracji dolnoprzepustowej filtrem Butterwortha (niestety brak głębszej dyskusji filtracji dolnoprzepustowej w pracy) oraz filtrem wygładzającym. Następnie sygnały zostały poddane ekstrakcji cech, gdzie skupiono się na typowych cechach statystycznych. Następnie skupiono się na tworzeniu modelu. Pewien niedostatek stanowi fakt, że doktorantka pomimo tego, że podaje kod użyty do stworzenia modeli głębokiego uczenia, to nie podaje jakiego pakietu użyła. Po składni można domniemywać, że to Keras, jednak nie ma dyskusji dlaczego ten właśnie został użyty. Następnie przedstawiono analizę działania poszczególnych modeli (skupionych na parach elektrod). Analiza ta to głównie zestawienia tabelaryczne łączące klasyczne metryki oceny klasyfikatorów i parametry uczenia sieci. Analizowano sygnały w dziedzinie czasu i częstotliwości na różnych oknach czasowych. Analiza ma charakter głównie obserwacyjny, określający zmiany parametrów. Brak jednak próby głębszego zrozumienia działania poszczególnych modeli. Dodatkowo w kontekście analizy częstotliwościowej brak istotnych szczegółów pozwalających na zrozumienie zaproponowanego modelu (więcej w uwagach krytycznych). Podsumowanie rozdziału stanowi podrozdział 5.3 „Results”. W nim doktorantka dokonuje analizy klasycznych krzywych ROC, dla najlepszych uzyskanych modeli. Wyniki nie są spektakularne i nasuwa sugestię, że może inna struktura modelu, np. wykorzystująca więcej danych byłaby lepsza. Brak czytelnej konkluzji co do jakości modelu. Wybór akurat czasu uczenia (gdzie wszystkie czasy uczenia są na zbliżonym kilkusekundowym poziomie) jako metryki oceny jest cokolwiek dyskusyjny.

Rozdział szósty nosi tytuł „Results and discussion” prezentuje wyniki badań, podzielone na poszczególne sekcje zgodnie z etapami analizy sygnałów EEG i klasyfikacji stanów mentalnych. Rozdział ten kompleksowo opisuje metody oceny filtracji sygnałów EEG oraz porównuje skuteczność różnych modeli klasyfikacyjnych. Każda sekcja zawiera analizę wyników, interpretując je w kontekście założeń badawczych i dostępnej literatury. Rozdział szósty można ocenić pozytywnie, zwłaszcza jeśli chodzi o jasność i systematyczność w prezentacji wyników. Autorka z powodzeniem rozdzieliła analizę na sekcje odpowiadające różnym aspektom badań, co ułatwia czytelnikowi zrozumienie szczegółów i znaczenia każdego etapu. W szczególności, sekcja dotycząca filtracji sygnałów EEG jest solidna; zastosowane filtry, takie jak filtr Savitzky'ego-Golaya, zostały dobrze omówione pod kątem ich efektywności w redukcji szumów przy jednoczesnym zachowaniu kluczowych cech sygnału. Autorka wykazuje świadomość wyzwań związanych z wyborem odpowiedniego filtra. Jednakże, rozdział ten

mógłby zostać poprawiony pod kątem szczegółowości interpretacji wyników. W kilku miejscach, jak w przypadku porównania modeli klasyfikacyjnych, analizy mogłyby być bardziej pogłębione — autorka powinna bardziej szczegółowo odnieść się do przyczyn różnic w dokładności modeli oraz implikacji tych wyników w praktycznych zastosowaniach. Brakuje również wyraźnego porównania uzyskanych wyników z istniejącymi badaniami, co mogłoby dostarczyć lepszego kontekstu i uzasadnienia dla przyjętej metodyki. Autorka prezentuje kierunki dalszych badań w oparciu o łączenie modeli, jednak mogło to być zrobione też wewnątrz pracy.

Ostatni rozdział nosi tytuł „Conclusions”

i przedstawia wnioski i ocenę osiągnięć badawczych, koncentrując się na wykorzystaniu zaawansowanych metod przetwarzania sygnałów EEG oraz sieci neuronowych w kontekście nieinwazyjnej stymulacji mózgu. Podstawową tezę autorki jest możliwość efektywnego monitorowania i analizowania sygnałów biomedycznych w celu klasyfikacji stanów mentalnych i emocjonalnych. Wnioski te potwierdzają hipotezę, że klasyfikacja cech sygnału EEG może przyczynić się do rozwoju systemów modyfikujących stan mentalny lub emocjonalny badanej osoby.

W podsumowaniu głównych osiągnięć autorka podkreśla, że wprowadzone metody przetwarzania sygnałów i modele sieci neuronowych (w tym CNN, LSTM, GRU, i RNN) umożliwiły uzyskanie wysokiej dokładności w klasyfikacji stanów mentalnych na podstawie sygnałów EEG. Jednym z istotniejszych elementów tej pracy jest zastosowanie filtru wygładzającego Savitzky'ego-Golaya, który okazał się skuteczny w poprawie jakości danych pochodzących z urządzeń klasy konsumenckiej. Autorka podkreśla również kluczowe znaczenie technik ekstrakcji cech sygnału EEG i ich wpływ na efektywność klasyfikacji. Autorka wskazuje na potencjalne zastosowania swojego podejścia w dziedzinach, takich jak interfejsy mózg-komputer (BCI), automatyzacja i systemy wspomagające osoby niepełnosprawne. Podkreśla, że wykorzystanie sieci neuronowych do analizy sygnałów EEG przyczynia się do bardziej personalizowanych rozwiązań, które mogą poprawić interakcję człowieka z maszyną. Autorka zwraca również uwagę na pewne ograniczenia, takie jak potrzeba dużej ilości danych do trenowania modeli oraz brak interpretowalności wyników w bardziej skomplikowanych modelach. W rozdziale poruszono również temat przyszłych badań, które mogłyby rozszerzyć zastosowane metody na inne rodzaje sygnałów biomedycznych oraz poszerzyć zakres wykorzystania BCI w różnych kontekstach. Autorka sugeruje także możliwość zastosowania innych filtrów wygładzających oraz technik ekstrakcji cech, co mogłoby przyczynić się do jeszcze lepszych wyników w przyszłości.

Spis literatury liczy 391 pozycji obejmuje podręczniki, artykuły w czasopismach, referaty konferencyjne, rozdziały w książkach i odniesienia do stron internetowych. Przegląd literatury jest bardzo wyczerpujący i zawiera zarówno prace ugruntowane jak też i te z bieżącego roku.

Pomimo tego rozbudowania spis literatury jest przygotowany niestarannie. Mamy np. pięć prac z autorem „Unknown” i sporo bez linków do zasobów z sieci www.

Pracę kończy spis publikacji i zgłoszeń patentowych opracowanych przy udziale autorki (w tym cztery prace samodzielne). Liczy on 14 publikacji, w większości konferencyjnych lub o charakterze lokalnym. Na podkreślenie zasługują dwie prace w czasopiśmie Brain Sciences, z IF 2.7. Prace te są bardzo wysoko cytowane, i choć opracowane w dużym zespole doktorantka jest ich pierwszą lub drugą autorką. Autorka jest również współwynałazcą wynalazku „Elektroda EEG”, na który został przyznany patent krajowy o nr zgłoszenia P.436702. Warto również podkreślić, że doktorantka może się pochwalić dobrymi wskaźnikami cytowań i h-indeksiem 4.

Przedstawiony układ pracy doktorskiej jest generalnie logiczny, i w większości zgodny z zasadą hierarchizacji treści oraz przejrzysty. Zastrzeżenia budzą jednak rozdziały 4 i 5, gdzie wyniki są istotnie wymieszane z częścią teoretyczną. Utrudnia to więc łatwe zapoznanie się z wynikami. Rozprawa jednak świadczy o kompetencji badawczej mgr Natalii Browarskiej-Waniek oraz umiejętności redagowania opracowań naukowo-technicznych.

Ogólny układ pracy, a także jej poszczególne rozdziały są przemyślane, ale nie w pełni dopracowane, co wskazałem je w ich szczegółowym opisie. Jakość wykonanych ilustracji (wykresów) jest w większości akceptowalna, jednak ich czytelność pozostawia sporo do życzenia. Dotyczy to zwłaszcza prezentacji działania filtrów oraz analizy modeli neuronowych w dziedzinie częstotliwości. Opisy rezultatów też pozostawiają wiele do życzenia.

Na podstawie rozprawy można uznać, że doktorantka posiada wiedzę teoretyczną, niezbędną do poprawnego prowadzenia badań i wnioskowania badawczego.

### Ocena merytoryczna pracy

Tematyka i zakres wykonanej pracy lokują ją w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne w obszarze na styku elektroniki i automatyki. W szczególności dotyczy to zagadnień przetwarzania sygnałów oraz klasyfikacji sygnałów reprezentowanych szeregami czasowymi. Interfejsy mózg-komputer stanowią interesującą ścieżkę rozwoju systemów sterowania w nadchodzącej przyszłości. Przykładem jest np. rozwój firmy Neuralink, będącej własnością Elona Muska, który inwestuje w tą technologię ogromne środki. W nadchodzących latach automatyka i elektronika będą mogły bardzo dobrze skorzystać z rozwiązań opracowanych w tej pracy.

Należy stwierdzić, że doktorantka zdołała zweryfikować postawione przez siebie tezę i hipotezę. Zaproponowane przez nią metody przetwarzania sygnałów EEG pozwalają na efektywne analizowanie rzeczywistych danych, które również sama pozyskała tworząc zbiór danych MUSE. Przeprowadzona przez nią analiza modeli neuronowych pozwoliła potwierdzić ich (umiarkowaną) skuteczność i w ten sposób wspiera rozwój interfejsów mózg-

komputer. Należy więc uznać, że cele pracy zostały przynajmniej częściowo zrealizowane. Wybór optymalnego modelu neuronowego nie był możliwy ze względu na brak zdefiniowania kryteriów oceny, jednak można uznać, że wybrano model akceptowalny.

Za szczególnie znaczące aspekty rozprawy uważam następujące osiągnięcia:

- **Wprowadzenie i zastosowanie własnego zbioru danych (MUSE) do badań nad nieinwazyjną stymulacją mózgu, przyczyniającego się do standaryzacji pozyskiwania danych EEG** Autorka zaprojektowała i zgromadziła niestandardowy zbiór danych MUSE, który jest wykorzystywany do badań nad stymulacją mózgu z zastosowaniem dźwięków i obrazów. Zbiór ten obejmuje dane EEG zebrane podczas sesji stymulacyjnych z różnymi bodźcami sensorycznymi, umożliwiając analizę wpływu takich bodźców na stan mentalny uczestników. Zastosowanie tego zbioru w badaniach wprowadza nowe standardy pozyskiwania i strukturyzowania danych EEG w kontekście nieinwazyjnych metod badania aktywności mózgu. Dzięki dostępowi do zbioru danych o wysokiej jakości, inne zespoły badawcze mogą replikować i rozwijać analizy autorki, co jest kluczowe dla dalszych postępów w badaniach nad stymulacją mózgu oraz zastosowaniami EEG w monitorowaniu stanów mentalnych.
- **Opracowanie nowatorskiej metody analizy sygnałów EEG z wykorzystaniem cyfrowego przetwarzania sygnałów, ze szczególnym uwzględnieniem poprawy jakości sygnału dla urządzeń klasy konsumenckiej.** W pracy doktorskiej autorka skupiła się na opracowaniu innowacyjnej metody poprawiającej jakość sygnałów EEG uzyskiwanych z urządzeń dostępnych na rynku konsumenckim. Takie urządzenia, mimo że są tańsze i bardziej dostępne niż sprzęt kliniczny, często charakteryzują się niższą jakością sygnału ze względu na ograniczenia techniczne, co utrudnia ich wykorzystanie w precyzyjnych badaniach. Dzięki zastosowaniu zaawansowanych technik cyfrowego przetwarzania sygnałów, takich jak zaawansowane filtrowanie i wygładzanie, autorka opracowała rozwiązania pozwalające na redukcję szumów oraz zwiększenie czytelności istotnych cech sygnału EEG. To podejście nie tylko podnosi jakość danych z urządzeń konsumenckich, ale także zwiększa ich użyteczność w badaniach naukowych i potencjalnych aplikacjach komercyjnych.
- **Kompleksowe porównanie wielu modeli sieci neuronowych do rozpoznawania wzorców w danych EEG, identyfikacja najskuteczniejszych modeli do klasyfikacji stanów mentalnych** W pracy doktorskiej przeprowadzono szeroko zakrojone porównanie różnych modeli sieci neuronowych pod kątem ich efektywności w rozpoznawaniu wzorców w sygnałach EEG. Badanie obejmowało różnorodne struktury sieci, takie jak sieci CNN, RNN, GRU oraz DNN, co pozwoliło na analizę ich przydatności do różnych typów zadań klasyfikacyjnych związanych z EEG. Autorka oceniała modele na podstawie parametrów takich jak dokładność, czas trenowania, efektywność obliczeniowa oraz zdolność do generalizacji wyników na nowych danych. Dzięki temu porównaniu zidentyfikowano modele, które najlepiej nadają się do klasyfikacji stanów

mentalnych, co umożliwi dalsze usprawnienia w zakresie zastosowań komercyjnych i klinicznych.

Praca ma pewne niedociągnięcia. Dotyczą one przede wszystkim układu. Praca byłaby zdecydowanie bardziej przejrzysta, jakby doktorantka zastosowała klasyczny podział na metody i rezultaty. Wymieszanie własnych wyników eksperymentalnych z opisem teorii ukrywa ich znaczenie. Zbiór danych MUSE też mógłby być lepiej opisany. Dodatkowo praca ma mnóstwo tabel i wykresów, ale mało rzetelnej ich dyskusji. Brak próby zrozumienia generalnej nieefektywności zastosowanych metod oraz brak rzetelnego omówienia źródeł tych niepowodzeń. Podpisy pod rysunkami są szczątkowe i miejscami niepoprawne.

### Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Praca jest interesująca i dotyczy ważnych problemów, są jednak pewne zagadnienia, w stosunku do których oczekiwałbym głębszego wyjaśnienia podczas publicznej obrony.

1. Jak zadbano podczas tworzenia zbioru danych MUSE o powtarzalność i dokładność przy użyciu komercyjnie dostępnych urządzeń.
2. Proszę o szersze wyjaśnienie sposobu selekcji, planowania eksperymentu i przebiegu zbioru danych MUSE. Proszę też o omówienie i zilustrowanie przykładami jak wyglądało etykietowanie zbioru danych, w szczególności pod względem stymulacji.
3. Analiza porównawcza filtrów przedstawiona w rozdziale 4 jest mocno nieprecyzyjna. Bardzo proszę o próbę sformułowania kryterium jakości w formie numerycznej (może być to problem wielokryterialny), który prowadziłby do wyboru rozwiązania optymalnego, lub chociaż o określenie listy cech, które filtr wygładzający musi posiadać, tak aby można było określić jednoznacznie, który filtr jest odpowiedni.
4. Na stronie 98 rozprawy doktorantka omawia pewne charakterystyczne dla urządzenia Emotiv problemy techniczne, w szczególności pojawianie się ostrych stanów przejściowych („spikes”). Bardzo proszę o omówienie źródła tego problemu oraz zilustrowanie przykładami.
5. W tabelach 5.3 i 5.4 podano (zgodnie z opisem) cechy statystyczne dla różnych pasm częstotliwości, jednak w tabeli są wymienione różne elektrody i brak informacji o pasmach. Proszę o wyjaśnienie zawartości tabeli.
6. Na stronie 112 rozprawy wskazano, że wartości średnie sygnałów są wyższe podczas relaksu zaś wariancja, skośność i kurtoza są niskie podczas skupienia. Proszę o zbadanie skuteczności zwykłego klasyfikatora progowego, który będzie charakteryzował stan w oparciu o te obserwacje i porównanie ich z klasyfikatorami neuronowymi.
7. Analizowano modele dla par elektrod, dlaczego nie przeanalizowano modelu wykorzystującego wszystkie 6 elektrod jednocześnie?



8. Proszę o wyjaśnienie w jaki sposób dokładnie wykorzystano odpowiedzi częstotliwościowe sygnałów w uczeniu sieci neuronowych. Czy wyliczono cechy w dziedzinie częstotliwości? Jeśli tak to jakie?
9. Proszę o podanie dokładnego opisu środowiska obliczeniowego jakie zostało wykorzystane, w tym szczegółowo które pakiety do głębokiego uczenia.
10. Dlaczego w pracy nie wykorzystano bardziej klasycznych metod uczenia maszynowego? Nawet w charakterze porównawczym.

Mam również pewne uwagi o charakterze redakcyjnym:

Oto przetłumaczona lista najważniejszych kwestii stylistycznych i typograficznych znalezionych w rozprawie:

1. Niekonsekwentne używanie terminologii: Terminy takie jak „EEG signals”, „brain signals”, „neural networks” i „classification models” są stosowane zamiennie lub niekonsekwentnie, co może wprowadzać czytelnika w błąd.
2. Nadmierne użycie strony biernej: Konstrukcje bierne, takie jak „was conducted to test effectiveness” oraz „is considered the most complicated computer” utrudniają czytanie dokumentu i jest generalnie niezgodne z dobrymi praktykami pisania tekstów po angielsku.
3. Powtórzenia: Terminy takie jak „brain-computer interfaces”, „important findings”, „classification accuracy” czy „model performance” są często powtarzane, co utrudnia czytanie całej pracy.
4. Zbyt zwarte bloki informacji: Niektóre akapity zawierają duże ilości skomplikowanej informacji, szczególnie w sekcjach technicznych. Zasada pisania jedno zdanie - jedna myśl, jeden akapit - jeden temat znacząco poprawiłyby pracę.
5. Niejednoznaczne sformułowania: Słowa i frazy takie jak „relaxation state”, „transmission all over the body” i „neuroscience applications” są niejasne bez dodatkowego kontekstu.
6. Niekonsekwentne użycie rodzajników: Brak rodzajników takich jak „the” czy „a” w frazach (np. „transmission all over body”) wpływa na płynność i czytelność tekstu.
7. Żargon techniczny bez wyjaśnień: Terminy takie jak „sulci”, „frequency domain analysis” oraz „neurobiological basis” są czasem wprowadzane bez definicji.
8. Niekonsekwentne użycie wielkich liter: Terminy takie jak „Brain-Computer Interface” i „transcranial magnetic stimulation” mają różną wielkość liter.
9. Tautologie: Terminy takie jak „very complex” i „most complicated” są redundantne, a ich częste użycie osłabia efekt.
10. Niejasne odniesienia do ilustracji i przypisów: Ilustracje są przywoływane bez wystarczającego opisu, a niektóre wyjaśnienia są lakoniczne. Dodanie rozszerzonych opisów do ilustracji ułatwiłoby odbiór. Szczególnie widać to w porównaniu filtrów, gdzie jest seria ilustracji na których filtry są charakteryzowane tylko ich numerem i brak wyjaśnień dlaczego.

11. Brak spójności w listach: Listy metod lub technik czasem są niespójne pod względem formatowania.
12. Przełączanie się między czasami: Niektóre sekcje przechodzą między czasem teraźniejszym a przeszłym bez wyraźnych powodów.
13. Nieprecyzyjne terminy w kontekście technicznym: Opisy takie jak „the brain as a computer” mogą uprościć lub wprowadzić w błąd w kontekście technicznym.
14. Niekonsekwentna interpunkcja w listach: Listy elementów czasami mają brakującą lub niespójną interpunkcję
15. Niewystarczające definicje terminów: Terminy takie jak „feature extraction” i „adaptive smoothing” są wprowadzane bez kontekstu lub definicji.
16. Niekonsekwentne formatowanie terminów naukowych: Terminy takie jak „EEG data” i „EEG signals” różnią się w formatowaniu, co wpływa na spójność dokumentu.
17. Odwołania do wzorów: Niektóre odwołania są nieudane.
18. Spis literatury: Brak autorów lub linków przy niektórych pracach.

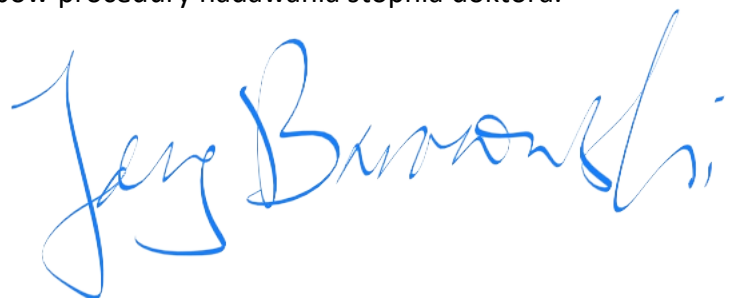
Poprawienie tych kwestii znacząco poprawiłoby czytelność i profesjonalny wygląd rozprawy. Uwagi te nie wpływają na końcową ocenę pracy.

#### Wniosek końcowy

Przedłożoną do oceny pracę doktorską pod względem formalnym i merytorycznym, pomimo uwag krytycznych i dyskusyjnych, oceniam pozytywnie.

Uważam, że rozprawa doktorska mieści się w dyscyplinie naukowej „Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne” oraz spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim, zgodnie art. 14 ust. 2 pkt 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2017 r., poz. 1789, z późn. zm.), w związku z art. 179 ust. 1 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. — Przepisy wprowadzające ustawę — Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1669, z późn. zm.) bowiem prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną autorki w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej oraz jest oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego.

W związku z powyższym wnioskuję do Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Opolskiej o dopuszczenie rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Natalii Browarskiej-Waniek, pt. „Intelligent monitoring and digital analysis of biomedical signals: an application in noninvasive brain stimulation” do publicznej obrony oraz procedowania dalszych etapów procedury nadawania stopnia doktora.

A handwritten signature in blue ink, reading "Język Bronowski". The signature is written in a cursive, flowing style.