

Zabrze, 9.06.2023r.

dr hab. inż. Janusz Wróbel  
Sieć Badawcza Łukasiewicz -  
Krakowski Instytut Technologiczny

POLITECHNIKA ŚLĄSKA  
Biuro Rady Dyscypliny  
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika  
i Technologie Kosmiczne  
wpłynęło dnia 15.06.2023  
nr 30 zał.

## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

przedłożonej

Radzie Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne  
Politechniki Śląskiej celem uzyskania stopnia doktora w dziedzinie nauk  
inżynieryjno-technicznych w ww. dyscyplinie

Tytuł rozprawy:

"Analiza wzorców przestrzenno-czasowych aktywności mózgu dla potrzeb rozwoju interfejsów mózg-komputer."

„Analysis of the brain activity spatio-temporal patterns for development of brain-computer interfaces.”

Autor rozprawy: mgr inż. Michał Pielą

Promotor: dr hab. inż. Marian Kotas

Promotor pomocniczy: dr Sonia Helena Contreras Ortiz

Podstawa opracowania: zlecenie Przewodniczącej Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Pani dr hab. inż. Moniki Kwoka, prof. PŚ zgodnie z uchwałą 7/2023 ww. Rady Dyscypliny z dnia 28.02.2023r.

### 1. Cel, teza oraz zakres przedstawionej rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Pielą dotyczy przetwarzania sygnału encefalograficznego (EEG) stosowanego w interfejsie mózg-komputer (brain-computer interface - BCI). Celem pracy jest zastosowanie filtracji przestrzenno-czasowej (spatio-temporal filtering - STF) do przetwarzania sygnałów EEG w celu klasyfikacji odpowiedzi mózgu i poprzez odpowiedni dobór metod i ich parametry uzyskanie znacznej poprawy dokładności klasyfikacji, co pozwoli na dokładniejsze i szybsze działanie systemów BCI. Doktorant jasno sprecyzował tezę rozprawy doktorskiej, która brzmi następująco: *"Możliwe jest zastosowanie metody filtracji przestrzenno-czasowej do wzmacniania i klasyfikacji odpowiedzi mózgu, a poprzez odpowiednią modyfikację jej fazy uczenia i stosowanych reguł interpretacyjnych można uzyskać znaczący wzrost dokładności klasyfikacji"*.

W szczególności autor, w celu poprawy klasyfikacji potencjałów wywołanych (evoked potentials - EP) mózgu stosuje wstępną filtrację przestrzenno-czasową sygnałów EEG oraz zmodyfikowane reguły decyzyjne (modified decision rules - MDR). Specyfika sygnałów EEG, niski stosunek amplitudy pożądaných potencjałów wywołanych do szumu oraz występowanie zakłóceń szpilkowych o wysokiej amplitudzie, wymagało modyfikacji fazy uczenia filtru STF pod kątem maksymalnej efektywności wzmocnienia pożądaných wzorców EP. Doktorant w rozprawie przedstawił wybrane zagadnienia różnych metod poprawy filtracji przechodząc od uogólnionej przestrzenno-czasowej filtracji dopasowanej (generalized spatio-temporal matched filtering - GSTMF) do odpowiednio zmodyfikowanej filtracji (modified spatio-temporal matched filtering - MSTMF). Przeprowadził analizę klasyfikatorów interpretujących uzyskany sygnał po filtracji stosując zarówno klasyczne reguły decyzyjne (classical decision rules - CDR) jak i reguły decyzyjne odpowiednio zmodyfikowane (modified decision rules - MDR). Sprawdził również przydatność klasyfikacji z wykorzystaniem metody wektorów podtrzymujących (support vector machines - SVM). W zakresie odszumiania sygnału EEG autor zastosował metodę opartą na dyskretnej transformacji kosinusowej (discrete cosine transform based smoothing - DCTBS), a także wykorzystującą analizę składowych niezależnych (independent component analysis - ICA). Przy czym metodę ICA zastosował z zerowaniem artefaktów (ICA1) jak i z tłumieniem artefaktów (ICA2, ICA3) poprzez użycie procedury dekompozycji składowych empirycznych (empirical mode decomposition - EMD). W zastosowanych metodach odszumiania autor uwzględnił również odpowiednie ich modyfikacje wynikające z liczby analizowanych kanałów w zależności od eksperymentu numerycznego: 8 kanałów jako mała liczba kanałów – L-ICAx oraz 64 kanały jako duża liczba kanałów - H-ICAx. Po analizie rozprawy doktorskiej stwierdzam, że ma ona charakter teoretyczno-doświadczalny.

## 2. Charakterystyka poszczególnych części składowych rozprawy doktorskiej.

Rozprawa doktorska składa się z 6 rozdziałów (75 stron), bibliografii oraz 3 dodatków. W rozdziale pierwszym doktorant świetnie przedstawił krótki wstęp informacyjny o interfejsach BCI i sposobie ich działania, a także nakreślił stan dziedziny. Przedstawił uzasadnienie podjęcia tematu rozprawy doktorskiej oraz problemy, która mają zostać dzięki niej rozwiązane. Następnie zwięźle opisał cel pracy oraz postawioną tezę badawczą. W rozdziale drugim w sposób wyczerpujący opisał użyte w pracy ogólnodostępne bazy danych do oceny proponowanych przez siebie rozwiązań, m.in. opisy eksperymentów przeprowadzonych przez badaczy wykorzystanych do stworzenia tych baz. Wybranie odpowiednich baz umożliwiło autorowi porównanie bezpośrednio uzyskanych wyników z wieloma autorami.

W rozdziale trzecim autor w sposób jasny zamieścił szczegółowe opisy opracowanych metod do analizy sygnału EEG mających na celu wzmocnienia wzorców przestrzenno-czasowych EP. Metody te obejmowały uogólnioną i zmodyfikowaną dopasowaną filtrację przestrzenno-czasową (GSTMF / MSTMF) oraz zmodyfikowane reguły decyzyjne (MDR). Cały rozdział czwarty poświęcony jest problemowi zakłóceń w rejestrowanym sygnale EEG, ze szczególnym uwzględnieniem, specyficznych dla tego sygnału, rodzajów artefaktów szumowych. W sposób systematyczny autor przedstawił proponowane algorytmy mające na celu detekcję i wytłumienie artefaktów super-Gaussowskich; kolejno: DCTBS, ICA i EMD oraz wprowadzone przez autora modyfikacje między innymi uwzględniające liczbę kanałów.

Rozdział piąty zawiera wyniki badań i ich omówienie. Doktorant przedstawił uzyskane wyniki wybranych metod dla baz z obu eksperymentów. Dokonał porównania wyników z innymi badaczami a w szczególności z wynikami uzyskanymi w ramach IFMBE Scientific Challenge 2019 oraz BCI Competition III Challenge. Autor przedstawił też wpływ zmiany wybranych parametrów w metodach na dokładność klasyfikacji i szybkość działania algorytmów.

Na koniec rozdział 6 obejmuje podsumowania rozprawy, przedstawia ocenę realizacji postawionej tezy rozprawy doktorskiej oraz najważniejsze osiągnięcia w pracy, świadcząc tym samym o dojrzałości naukowej doktoranta.

### 3. Ocena zastosowanych metod badawczych oraz przedstawionych wniosków.

Analizując metody badawcze zastosowane przez doktoranta w jego rozprawie doktorskiej można zauważyć dwa osobne wątki. Pierwszym wątkiem było opracowanie filtru do wzmocnienia pożądaných wzorców przestrzenno-czasowych EP (rozd.3). Autor wskazał, że rozwiązania należy szukać wśród metod filtracji dopasowanej. Przeanalizował przydatność kolejnych metod wskazując na ich niedoskonałości w rozwiązaniu powyższego zagadnienia. Autor analizę rozpoczął od filtracji dopasowanej (matched filtering - MF), ze względu na spadek jej wydajności w przypadku gdy szum nie jest biały przeszedł do uogólnionej filtracji dopasowanej (generalized matched filtering - GMF). Metody MF i GMF są przydatne do wzmocnienia pożądanęj składowej w pojedynczym kanale. Jednakże w przypadku rejestracji wielokanałowej (gdzie kanały są różnymi kombinacjami liniowymi), zasadne było zastosowanie bardziej złożonej filtracji przestrzenno-czasowej (STF), ze szczególnym uwzględnieniem problemu doboru parametrów  $\delta$  i  $\Delta$ . Następnie autor przedstawił uogólnioną dopasowaną filtrację przestrzenno-czasową (GSTMF) powstałą w wyniku zmiany funkcji celu dla STF uzyskując zmniejszenie niepożądanego wzmocnienia szumu. W kolejnym kroku zaproponowano zmodyfikowaną przestrzenno-czasową filtrację dopasowaną (MSTMF), która powstała przez włączenie analizy odpowiedzi niecelowych w konstrukcję filtra. Jeśli chodzi o interpretację wyjścia filtra to autor użył klasycznych

reguł decyzyjnych CDR, a następnie ich modyfikacji MDR uwzględniających spadek ich skuteczności gdy potencjały wywołane są nieco przesunięte w czasie.

Drugie zagadnienie (rozdz. 4) dotyczy metod tłumienia artefaktów z sygnału EEG, a w szczególności zakłóceń o rozkładach supergaussowskich. Autor przedstawił zastosowanie dyskretnej transformaty kosinusowej (DCTBS) a następnie metodę opartą o analizę składowych niezależnych (ICA). Ze względu na ograniczenia metody ICA, mogące prowadzić do zniekształceń widma mocy związanego z aktywnością mózgu, autor zaproponował dołączenie metody dekompozycji empirycznych składowych EMD. W pierwszej kolejności przedstawił metodę detekcji artefaktów, którą wykorzystał w finalnych wersjach algorytmów zarówno dla niskiej jak i wysokiej liczby kanałów. Wprowadził dwa algorytmy mające zastosowanie tylko dla baz danych z niską liczbą kanałów: L-ICA1 oraz L-ICA2. W drugim wersji algorytmu zastępowanie wartością zerową artefaktów zmieniono na tłumienie artefaktów za pomocą EMD. Trzy kolejne algorytmy dedykowano dla dużej liczby dostępnych kanałów (np. 64): H-ICA1, H-ICA2 (analogicznie jak powyżej) oraz H-ICA3 gdzie w przeciwieństwie do H-ICA1 i H-ICA2 modyfikowane są tylko próbki należące do wykrytych artefaktów.

Autor wykazał się znajomością i umiejętnością zastosowań różnych metod badawczych i metod analizy sygnałów, w tym metod filtracji przestrzenno-czasowej, adekwatnych do danego problemu naukowego. Udowodnił prawdziwość postawionej na początku rozprawy doktorskiej tezy, wykazując skuteczność proponowanych rozwiązań dla potrzeb klasyfikacji potencjałów wywołanych w systemach BCI. Potwierdzeniem są wyniki własnych eksperymentów numerycznych odniesione do wyników innych autorów.

Do głównych osiągnięć autora można zaliczyć:

- Wykazanie, że liniowa metoda oparta na filtracji przestrzenno-czasowej jest konkurencyjna lub bardziej skuteczna od większości znanych obecnie klasyfikatorów stosowanych w systemach komunikacji człowiek-komputer.
- Rozwiązanie problemu małej liczby danych uczących bez stosowania dodatkowych technik regularyzacji.
- Poprawa dokładności detekcji wzrokowych potencjałów wywołanych, poprzez opracowanie i zastosowanie skutecznych metod tłumienia zakłóceń o rozkładach supergaussowskich.
- Wprowadzenie zmodyfikowanych reguł decyzyjnych ograniczających wpływ zmienności latencji potencjałów wywołanych, które mogą zostać zastosowane w większości istniejących klasyfikatorów, przyczyniając się do zwiększenia ich dokładności klasyfikacji.
- Opracowanie nowego, bardzo skutecznego narzędzia do analizy sygnałów EEG w systemach BCI.



#### 4. Ocena doboru źródeł bibliograficznych

Bibliografia prezentowanej rozprawy doktorskiej obejmuje 110 pozycji (108 po usunięciu zdublowanych) tematycznie mocno związanych z rozprawą doktorską. Większość stanowią publikacje z ostatnich kilku lat, które pochodzą z liczących się czasopism i z konferencji międzynarodowych. Są to publikacje zarówno dotyczące systemów BCI (ok. 20%), analizy sygnałów EEG (ok. 30%) jak i metod filtracji i klasyfikacji sygnałów. Należy jednak zauważyć, że w wykazie widnieje tylko jedna publikacja, której doktorant jest współautorem. Jednakże jest to obszerna publikacja (11 stron) w znaczącym czasopiśmie (IEEE Transactions on Human-Machine Systems, IF=4,1) ściśle powiązana z osiągnięciami zawartymi w rozprawie doktorskiej.

#### 5. Analiza możliwego zastosowania praktycznego przedstawionych wyników badań

Analizując wyniki badań przedstawione w rozprawie doktorskiej można zauważyć przewagę proponowanych przez autora metod do wzmacniania i klasyfikacji odpowiedzi mózgu w systemach komunikacji człowiek-komputer. W szczególności można stwierdzić, że liniowy algorytm oparty na metodzie filtracji przestrzenno-czasowej jest konkurencyjny lub lepszy od większości znanych obecnie klasyfikatorów stosowanych w systemach BCI. Nowe, bardziej skuteczne narzędzie do analizy sygnałów EEG zwiększy dostępność tych systemów w zastosowaniach konsumenckich. Należy podkreślić istotne dla społeczeństwa zastosowanie BCI w medycynie, gdzie komunikacja z urządzeniami może w znacznym stopniu poprawić jakość życia osób z różnymi niepełnosprawnościami. Dotyczy to zwłaszcza osób z chorobami nerwowo-mięśniowymi, które nie mogą używać typowych środków komunikowania się, jak mięśnie kończyn czy głos. Dedykowane systemy BCI mogą również wspomagać rehabilitację niepełnosprawności ruchowej pacjenta, a także wspierać diagnostykę stanu pacjentów z zaburzeniami świadomości. Kolejnym zastosowaniem systemów BCI może być trening uwagi lub samokontroli emocji i myśli, oparty na neurofeedbacku. W życiu codziennym systemy komunikacji człowiek-komputer mogą być stosowane do komunikacji i sterowania w ramach inteligentnego domu oraz w aplikacjach wykorzystujących wirtualną rzeczywistość.

#### 6. Analiza spostrzeżeń i niejasności w rozprawie doktorskiej


- w wykazie publikacji występują zdublowane pozycje 58 i 59, oraz pozycje 82 i 83
- w tabelach V i VI brak wartości SEM oraz w tab VI wartości dokładności metody SVM prawdopodobnie są błędne,
- na rys. 4.14-17 w celu dokładnego porównania sygnału po i przed filtracją powinny być w takiej samej skali,
- brakuje wykazu użytych skrótów, w szczególności nazw metod, fragmentaryczne zestawienie w rozdz. 3.7 jest niewystarczające.

## 7. Analiza ogólna przedstawionej rozprawy doktorskiej

Przedstawiona rozprawa doktorska wskazuje, że doktorant wykazał się znajomością i umiejętnością stosowania różnych metod badawczych i metod analizy sygnałów, w tym filtracji przestrzenno-czasowej, adekwatnych do rozwiązanego problemu naukowego. Udowodnił prawdziwość postawionej na początku rozprawy doktorskiej tezy, wykazując skuteczność proponowanych rozwiązań w klasyfikacji potencjałów wywołanych w systemach komunikacji człowiek-komputer. Autor wykazał się wiedzą z dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych, samodzielnie rozwiązał istotne zadanie naukowe z reprezentowanej dyscypliny naukowej.

Analiza wyników badań eksperymentalnych zamieszczonych w rozprawie doktorskiej pozwala wnioskować o dużej dojrzałości naukowej doktoranta. Rozprawa wnosi nowe wartości w dyscyplinie reprezentowanej przez doktoranta, a także wskazuje na jej potencjał wdrożeniowy. Przedłożoną do oceny rozprawę doktorską mgr inż. Michała Piela oceniam pozytywnie.

Stwierdzam, że przedłożona do zaopiniowania rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Michała Piela spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określonym w artykule 187 ust. 1 i ust. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz.U. z 2018 poz. 1668 z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



.....  
dr hab. inż. Janusz Wróbel