

prof. dr hab. inż. Andrzej Materka  
Politechnika Łódzka  
Instytut Elektroniki

POLITECHNIKA ŚLĄSKA  
Biuro Rady Dyscypliny  
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika  
i Technologie Kosmiczne

wpłynęło dnia .....18-05-2023  
nr .....24..... zał. ....

Łódź, 15 maja 2023 r.

## Recenzja rozprawy doktorskiej

Tytuł rozprawy: Analysis of the brain activity spatio-temporal patterns  
for development of brain-computer interfaces  
Autor rozprawy: mgr inż. Michał Piela  
Promotor: dr hab. inż. Marian Kotas  
Promotor pomocniczy: dr inż. Sonia Helena Contreras Ortiz  
Dyscyplina: automatyka, elektronika, elektrotechnika  
i technologie kosmiczne

Recenzję opracowałem na podstawie dokumentów dołączonych do pisma-zlecenia Przewodniczącej Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Śląskiej (PŚ) z 24 marca 2023 roku. Podstawę prawną recenzji stanowi ustawa z 4 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2022 r. poz. 574, ze zm.). Kryteria oceny rozpraw doktorskich zawarto w art. 187 tej ustawy. Dodatkowe informacje dotyczące podstawowych danych o kandydacie otrzymałem z biura RND PŚ.

Pan Michał Piela uzyskał tytuł zawodowy magistra inżyniera kończąc w 2011 roku studia II stopnia na kierunku inżynieria biomedyczna na Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. W przeszłości nie ubiegał się o nadanie stopnia naukowego doktora. Od roku 2012 pracuje w firmie Waters/TA Instruments na stanowisku inżyniera serwisu. Od roku 2018 jest słuchaczem studiów doktoranckich na Politechnice Śląskiej w Gliwicach.

Recenzowana dysertacja obejmuje 95 stron tekstu w języku angielskim z rysunkami i tabelami, podzielonego na 6 rozdziałów, trzy dodatki i spis literatury. Zawiera też stronę tytułową, oświadczenie dotyczące autorstwa pracy oraz listę rysunków z podpisami. Do pracy nie dołączono wymaganych streszczeń w języku polskim i angielskim (art. 187 p. 4).

Przedmiotem pracy jest poszukiwanie sposobu zwiększenia skuteczności nieinwazyjnej komunikacji człowieka z komputerem za pośrednictwem interfejsów BCI (*ang. brain-computer interface*) wykorzystujących analizę i klasyfikację sygnałów elektroencefalograficznych (EEG). Badania ograniczono do interfejsów opartych na analizie wzrokowych odpowiedzi wywołanych P300 – zafalowań sygnału EEG będących reakcją mózgu na wymuszenia wizualne. Sygnały elektryczne generowane przez mózg użytkownika są

w interfejsie klasyfikowane – na takie, które zawierają w określonym przedziale czasu odpowiedź i takie, które odpowiedzi nie zawierają. Klasyfikator pełni tu rolę detektora fal P300. Urządzenia tego typu umożliwiają przesłanie intencji użytkownika (odzworowanej w przebiegach sygnału EEG i zamienionej w interfejsie na ciąg komunikatów zero-jedynkowych) do komputera, bez pośrednictwa mięśni (poza mięśniami gałki ocznej). Ogólnie interfejsy BCI mają zastosowanie w neuronauce, medycynie i rzeczywistości wirtualnej, są np. wykorzystywane do komunikacji z osobami sparaliżowanymi lub przebywającymi w pourazowych stanach zaburzeń świadomości.

Wybrane do badań opisanych w rozprawie interfejsy EEG są przenośne i niedrogie. Cechuje je mała rozdzielczość przestrzenna oraz niski poziom sygnału. Amplituda odpowiedzi P300 jest wielokrotnie mniejsza od zakresu zmienności składowych sygnału EEG (zakłócających pomiar fal P300), m.in. reprezentujących spontaniczną aktywność elektryczną mózgu. Podstawową techniką rekonstrukcji zafalowań P300 jest uśrednianie – wymuszenia wizualne są powtarzane, a mierzone sygnały EEG dodawane do siebie i dzielone przez liczbę powtórzeń. Przy braku spójności zakłóceń z periodyczną stymulacją ich średnie wartości dążą do zera ze wzrostem tej liczby, a składowa P300 zostaje wyeksponowana. Liczba powtórzeń nie może być nadmiernie duża - jej zwiększanie prowadzi do redukcji szybkości interfejsu, powtarzanie bodźców stymulujących wzrok wywołuje zmęczenie i zaburza koncentrację użytkownika, fale P300 zmieniają w pewnym stopniu swój kształt oraz opóźnienie względem chwili stymulacji i również zostałyby zredukowane w procesie uśredniania. Dodatkowo, sygnały EEG zawierają inne niepożądane składowe, np. artefakty mięśniowe. Istnieje potrzeba opracowania szybkich i odpornych na zakłócenia technik pomiaru, przetwarzania i klasyfikacji sygnałów EEG w interfejsach BCI. Problem ten jest przedmiotem trwających od lat i ciągle aktualnych badań naukowych.

Na str. 9-10, w sekcji 1.4, określony jest cel pracy. Jest nim znaczące udoskonalenie interfejsu BCI P300 drogą filtracji czasowo-przestrzennej wielokanałowych danych EEG przed klasyfikacją i strojenia metod [reguł detekcji] dla zwiększenia dokładności klasyfikacji. Tak ujęty cel jest ukierunkowany na zredukowania wpływu składowych zakłócających działanie interfejsu – fundamentalnego ograniczenia w projektowaniu szybkich i skutecznych urządzeń do komunikacji mózg-komputer. Jest to zadanie ważne, wiedzie do większej użyteczności interfejsów BCI. Wyniki działań potrzebnych do osiągnięcia tego celu, przedstawione w dysertacji, mają walory poznawcze.

Podstawy teoretyczne metod klasyfikacji wykorzystanych w rozprawie wywodzą się z liniowej analizy dyskryminacyjnej (*linear discriminant analysis*, LDA). Według tej (nadzorowanej) metody, wektory danych (ciągi próbek sygnału EEG) są przekształcane liniowo, aby po przekształceniu stosunek rozrzutu odległości między ich projekcjami w klasach do rozrzutu wewnątrz klas był maksymalny. W nowej przestrzeni obliczana jest skalarna funkcja dyskryminacyjna; progowanie jej wartości pozwala rozróżnić wektory klas. Jednym z podstawowych problemów jest ograniczona liczba wektorów danych dostępnych do uczenia klasyfikatora, przy znacznym rozmiarze wektora. Prowadzi to do złego uwarunkowania równań LDA. W podejściu wykorzystanym w ocenianej rozprawie

wykorzystuje się informacje zawarte w wielu sygnałach mierzonych za pomocą zestawu elektrod umieszczonych w standardowych miejscach na skórze czaszki (w tzw. kanałach). Pozwala to na kompresję zbioru danych – ekstrakcję wektorów cech o mniejszym rozmiarze, z zachowaniem informacji potrzebnych do klasyfikacji. W typowych rozwiązaniach, filtracji podlegają wycinki sygnałów w przedziałach następujących po wymuszeniu. W odróżnieniu od tego podejścia, Autor wykorzystuje ekstrakcję cech ze wszystkich zmierzonych wektorów, także segmentów zawierających wyłącznie sygnały zakłócające. Komputerowa analiza sygnałów wielokanałowych jest wykorzystywana w innych podobnych sytuacjach, np. w nieinwazyjnej detekcji składowych elektrokardiogramu (EKG) płodu w sygnale z wielu kanałów pomiarowych, za pomocą elektrod umieszczonych na skórze brzucha przyszłej matki. Oceniana rozprawa jest twórczym rozwinięciem takiej metody [61] opracowanej przez Promotora, w zastosowaniu do znacznie słabszych i silniej zakłóconych sygnałów EEG mierzonych w interfejsie P300 BCI. Zaproponowana przez Autora metoda filtracji i redukcji wpływu artefaktów pozwoliła na istotne zwiększenie trafności klasyfikacji sygnałów EEG. Dalszą poprawę dokładności osiągnął uwzględniając w regułach decyzyjnych losowe opóźnienie odpowiedzi P300 względem chwili pobudzenia wzroku.

Rozdział 1 jest wprowadzeniem do przedmiotu rozprawy, charakteryzuje motywację Autora do badań, problemy praktyczne i naukowe, znane metody automatycznej analizy sygnałów w EEG BCI, cel pracy i założoną tezę. Czterostronicowy rozdział 2 krótko ilustruje działanie interfejsu P300 BCI i zawiera informację o upublicznionych bazach danych, które wykorzystano w badaniach (2019 IFMBE Scientific Challenge [88] oraz BCI Competition III Challenge 2004 [9]). Sygnały dostępne w tych bazach odpowiadają wyborowi jednego z ośmiu obiektów graficznych wyświetlanych na ekranie monitora komputerowego (aplikacja typu "smart home") oraz jednego z trzydziestu sześciu symboli – wielkich liter alfabetu i cyfr – (edycja tekstu). Część zapisanych sygnałów zawiera etykiety, przydatne do nadzorowanego uczenia modułów przetwarzania i klasyfikacji danych. W rozdziale 3 omówiono opracowane metody filtracji czasowo-przestrzennej sygnałów EEG, wywodzące się z idei filtru dopasowanego, a w rozdziale 4 – zaaplikowane metody detekcji i redukcji artefaktów, oparte na filtracji w dziedzinie przekształcenia kosinusowego (DCT), analizie składowych niezależnych (ICA) i rozkładzie na mody empiryczne (EMD). Rozdział 5 jest opisem przeprowadzonych eksperymentów numerycznych i zawiera wyniki pozwalające ocenić skuteczność opracowanych metod analizy i klasyfikacji sygnałów EEG w badanych interfejsach BCI. Jak wynika z Tab. VI, wybrane warianty metod opracowanych przez mgra Pielę cechuje znacznie większa dokładność klasyfikacji w porównaniu z najlepszymi wynikami konkursów BCI Competition III Challenge 2004. Rozdział 6 jest podsumowaniem badań; zawiera też listę osiągnięć Autora. W dodatkach zamieszczono podstawowe założenia i definicje wykorzystywanych metod wstępnego przetwarzania sygnałów – wygładzania za pomocą dyskretnego przekształcenia kosinusowego oraz dekompozycji według składowych niezależnych i modów empirycznych. Wykaz literatury kończy rozprawę. Praca jest zwięzła, została zredagowana i napisana bardzo starannie. Jej układ odpowiada oczekiwanej strukturze opracowań naukowych.

Wprowadzenie do tematyki rozprawy i analiza stanu wiedzy zostały przygotowane na podstawie literatury – artykułów anglojęzycznych ostatnich dziesięcioleci. Całkowita liczba cytowanych źródeł wynosi 110. Prace te są reprezentatywne dla poszczególnych wątków badawczych, do których rozprawa nawiązuje. Autor ze swobodą i wnikliwością korzysta z zawartych w nich informacji. Przegląd literatury jest krytyczny i szczegółowy, zarówno w zakresie podstaw teoretycznych jak i efektów automatycznej analizy i klasyfikacji sygnałów EEG znanymi metodami. Dobór źródeł oraz przeprowadzona przez mgra Pielę dyskusja ich zawartości świadczą o tym, że posiada on wiedzę niezbędną do prowadzenia badań naukowych mieszczących się w zakresie dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

Zastosowana metoda badawcza polega na krytycznej analizie własności znanych metod klasyfikacji sygnałów EEG w urządzeniach BCI (rozdział 1), sformułowaniu hipotezy o możliwości ich udoskonalenia (1.5), zaplanowaniu doświadczeń numerycznych ukierunkowanych na udowodnienie prawdziwości tezy (rozdział 2), sprecyzowaniu i wstępnej ocenie własności proponowanych metod filtracji przestrzennej i klasyfikacji (rozdział 3) oraz wstępnego przetwarzania (rozdział 4), przeprowadzeniu zaplanowanych doświadczeń i analizie ich wyników (rozdział 5). Struktura tak obmyślanych badań jest wzorcowa.

Skuteczność opracowanych metod przetwarzania i klasyfikacji sygnałów EEG oceniono aplikując je do sygnałów zapisanych w dwóch bazach danych [9] i [88], upublicznionych dla umożliwienia porównań z wynikami prac innych zespołów międzynarodowej społeczności badaczy. Pozwoliło to na bezpośrednią ocenę znaczenia przeprowadzonych badań i wkładu do wiedzy w zakresie metod udoskonalania wzrokowych interfejsów BCI P300. Wkład ten jest istotny. Omówienie i dyskusja wyników badań (rozdziały 5 i 6) odnoszą się do wielu wariantów opracowanych przez Autora metod. Aplikując zmodyfikowaną metodę filtracji przestrzennej w połączeniu z klasycznymi regułami detekcji, regułami zmodyfikowanymi, algorytmami tłumienia artefaktów i klasyfikatorem typu SVM osiągnano różną dokładność klasyfikacji sygnałów z baz danych. Wyniki te zestawione w tabelach I-VI. To skrupulatne zestawienie daje możliwość oceny istotności wprowadzonych modyfikacji. Omówienie wyników nawiązuje do wielu znanych prac, eksponuje osiągnięcia Autora i jest szczegółowe.

Wyniki pracy mogą znaleźć zastosowanie praktyczne, lecz ani analiza możliwości aplikacji, ani badania rozwojowe nie mieszczą się w jej zakresie.

Na tle znanych mi dysertacji doktorskich, rozprawę mgra Pielei oceniam bardzo dobrze, jej lektura nie przyniosła merytorycznie istotnych uwag krytycznych. Myślę, że zamieszczenie wykazu użytych akronimów mogłoby ułatwić czytelnikom korzystanie z tekstu rozprawy. W przyszłych publikacjach anglojęzycznych Autora warto zwrócić uwagę na korektę składni, przypominającej w niektórych miejscach tekstu konstrukcje języka polskiego (np. "For  $J=0$ , obtained is the original vector..." zamiast "For  $J=0$ , the original vector is obtained..." na str. 18), rozróżnienie liczby mnogiej i pojedynczej (np. "reactions to a various external stimulation" zamiast "reactions to various external stimulations" na str. 1), czy formy gramatyczne wyrazów (np. "are called as evoked potentials" zamiast "are called evoked

potentials" na str. 2). Informacja o wartości parametru  $\delta = 20\text{ms}$  jest powielana w każdym wierszu tab. II (str. 60); powinna zostać podana raz, w nagłówku. Podobna uwaga dotyczy tab. IV (str. 69).

Autor dysertacji rozwiązał samodzielnie, pod opieką Promotorów, istotny problem naukowy o potencjalnie dużym znaczeniu społecznym, udoskonalając metody klasyfikacji sygnałów EEG w interfejsie P300 ze stymulacją wizualną. Opracowane rozwiązanie jest oryginalne – jest twórczym rozwinięciem liniowej analizy dyskryminacyjnej wspomaganej filtracją przestrzenną, w połączeniu z zaawansowanymi metodami numerycznego przetwarzania wyników filtracji. Część tych metod opublikował w renomowanym czasopiśmie naukowym [60]. Zawartość i struktura rozprawy doktorskiej prezentują ogólną wiedzę teoretyczną mgra Pieli w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Oceniana dysertacja spełnia wymagania ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

*Andrzej Materka*

Wybrane pozycje literatury cytowane w rozprawie  
(numeracja oryginalna)

- [9] B. Blankertz. "BCI Competition 2003 results (web page)". In: (2020).  
URL: <http://www.bbci.de/competition/iii/results>.
- [60] M. Kotas, M. Piel, and S. H. Contreras-Ortiz. "Modified Spatio-Temporal Matched Filtering for Brain Responses Classification". In: IEEE Transactions on Human-Machine Systems 52.4 (2022), pp. 677–686.
- [61] M. Kotas et al. "Application of spatio-temporal filtering to fetal electrocardiogram enhancement". Computer Methods and Programs in Biomedicine 104 (Jan. 2010), pp. 1–9.
- [88] M. Simões et al. "BCIAUT-P300: A multi-session and multi-subject benchmark dataset on autism for P300-based brain-computer-interfaces". In: Frontiers in Neuroscience 14 (2020), p. 568104.