

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

Łódź, 18 kwietnia 2023 r.

Recenzja poprawionej rozprawy doktorskiej

Tytuł rozprawy:	Interfejsy mózg-komputer i zaburzenia świadomości
Autor rozprawy:	mgr Marian Dovgialo
Promotor:	prof. dr hab. Piotr Durka
Promotor pomocniczy:	dr Anna Duszyk-Bogorodzka
Dyscyplina:	nauki fizyczne

Recenzję opracowałem odpowiadając na prośbę kierownika Sekcji Obsługi Rad Naukowych Dyscyplin w Dziedzinie Nauk Ścisłych i Przyrodniczych Uniwersytetu Warszawskiego, wysłaną pocztą elektroniczną 24 lutego 2023 r., z załącznikami. Jednym z nich była kopia poprawionej rozprawy w postaci pliku PDF. Kryteria jej oceny są sformułowane w załączniku nr 1 do uchwały nr 157 Senatu Uniwersytetu Warszawskiego z 29 czerwca 2022 roku.

W poprawionej wersji dysertacja obejmuje 129 stron tekstu (w tym sześć stron pustych) z rysunkami i tabelami, podzielonego na siedem rozdziałów i spis literatury. Zawiera też stronę tytułową, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz glosariusz. W nowej wersji słownik pojęć i skrótów używanych w tekście rozprawy zawiera 42 hasła. Dodano do niego dziesięć terminów. Prawie dwukrotnie zwiększono liczbę prac cytowanych w tekście i wymienionych w wykazie literatury składającym się obecnie z 78 pozycji. Część treści wstępu wersji pierwotnej przeniesiono do rozdziału 2 wersji poprawionej i uzupełniono komentarzem ściślej definiującym problem "analfabetyzmu BCI". Dodano brakującą analizę badań naukowych w zakresie interfejsów EEG-BCI; zapisano ją na ok. szesnastu stronach nowego rozdziału 3. To oczekiwane uzupełnienie zawiera pewne nieudokumentowane opinie (akapit "W tej sytuacji ... krajowej produkcji." na stronie 28), których sedno wykracza poza merytoryczny zakres rozprawy. Wątki te zostaną pominięte w niniejszej recenzji. Rozdział 4 ("Implementacja interfejsu mózg-komputer") jest poprawioną wersją rozdziału 2 ("Interfejs mózg-komputer") pracy z 2022 roku. Poprawiono czytelność rysunków oraz tabel, skorygowano większość niejasnych i niepoprawnych terminów oraz zwrotów w tekście. Objętość tego rozdziału powiększono o około trzy strony. Rozdział 5 jest rozdziałem 3 uzupełnionym kilkoma wierszami tekstu. Objętość rozdziału 4 powiększono o około dwie strony tekstu i nadano mu numer 6. Rozdział ten zawiera analizę wybranych prac, które ukazały się po opublikowaniu przez Autora artykułu [10]; brakowało takiej analizy w poprzedniej wersji rozprawy. Rozdział 7 przedstawia podsumowanie z dodanym

AMaterka

uściśleniem opisu osiągnięć naukowych Autora, zwiększającym liczbę stron tej części dysertacji prawie dwukrotnie.

Przedmiotem pracy jest badanie możliwości komunikacji z dziećmi w stanie śpiączki i wybudzonych ze śpiączki za pomocą interfejsu mózg-komputer (*ang. brain-computer interface, BCI*). Brak czytelnej reakcji osób w takich stanach na zewnętrzne bodźce utrudnia diagnozę medyczną i ocenę postępów leczenia oraz rehabilitacji. W pracy studiowano możliwości rozwiązania tego problemu za pomocą interfejsów mózg-komputer wykorzystujących analizę i klasyfikację sygnałów elektroencefalograficznych (EEG) pacjenta. Ogólnie urządzenia tego typu umożliwiają przekazanie intencji pacjenta (użytkownika), naturalnie odwzorowanej w przebiegach sygnału EEG i zamienionej w interfejsie na ciąg komunikatów zero-jedynkowych wprowadzanych do komputera, bez pośrednictwa mięśni.

Na str. 19 określony jest cel pracy (skonstruowanie systemu BCI, jego weryfikacja z udziałem zdrowych ochotników oraz adaptacja do wspomagania diagnostyki neurologicznej) i zostają wyliczone główne (zdaniem Autora) wartości dysertacji. Wstęp kończą informacje o dwóch jego zasadniczych osiągnięciach. Opis drugiego z nich (str. 20), choć zawile sformułowany, jest przekonujący.

Pierwsze z wymienionych osiągnięć polega na opracowaniu programów komputerowych umożliwiających przeprowadzenie zaplanowanych doświadczeń. Zostało ono zaopatrzone w komentarz mający, jak myślę, podkreślić znaczenie tego opracowania („dzięki któremu poddano w wątpliwość istnienie zjawiska ‘analfabetyzmu BCI’”). To sformułowanie zostało przeniesione do wersji poprawionej w niezmienionej postaci (podobnie jak opinia zapisana w ostatnim zdaniu na str. 77). Jest ono niezgodne z treścią nowego akapitu na str. 19 ("Niniejsza rozprawa proponuje kompleksowe rozwiązanie projektowania, implementacji i monitorowania działania systemu BCI w celu wyeliminowania technicznej strony problemu 'analfabetyzmu BCI'."), z której wynika, że Autor słusznie dopuszcza istnienie problemu. Przeprowadzone w opisywanej pracy doświadczenia, z udziałem ograniczonej liczby ochotników nie dowodzą jednak wyeliminowania sytuacji, w której inni użytkownicy opisanego w rozprawie, lub inaczej zbudowanego systemu BCI nie będą mogli się komunikować z komputerem. Pojęcie "analfabetyzmu BCI" jest niefortunne i nieprecyzyjne, raczej potoczne, a nie ściśle zdefiniowane. W dyskusji zawartej w artykule [9], którego współautorem jest mgr Dvgialo, zwrócono uwagę na potrzebę starannego dopasowania konstrukcji interfejsu oraz procedur jego wykorzystania do możliwości, preferencji i cech psychofizycznych użytkownika. W konkluzji tego doniesienia podkreślono też, że wszyscy uczestnicy przeprowadzonych testów mogli komunikować się efektywnie z komputerem pod warunkiem uzyskania dostępu do interfejsów BCI różnych paradygmatów i modalności. Z tego, że każdy uczestnik testu w grupie kontrolnej potrafił komunikować się z komputerem za pomocą zbudowanego na potrzeby opisywanych badań systemu EEG-BCI wynika, że system ten został właściwie zaprojektowany i skonstruowany, a jego użytkownicy odpowiednio przygotowani i poinstruowani przez osoby nadzorujące badania. W szczególności należy docenić znaczący udział mgra Dvgialo w tej zbiorowej pracy, który deklaruje, że był autorem „algorytmów organizacji danych, detekcji artefaktów,

AM

przetwarzania sygnałów EEG [...] oraz oceny statystycznej istotności wystąpienia świadomej reakcji na bodziec [...]” (str. 21). Niekonsekwencje w opisie wniosków z przeprowadzonych badań utrudniają ocenę znaczenia opisywanych badań.

W rozdziale 2 Autor omawia działanie interfejsów BCI. Wybór interfejsu EEG spośród innych rodzajów BCI został skwitowany zdawkowo, trzema zdaniami na str. 25 rozprawy. Ta zwięzłość jest nieoczekiwana w nawiązaniu do bardzo ogólnie sformułowanego tytułu dysertacji („Interfejsy mózg-komputer i zaburzenia świadomości”). Tytuł taki zapowiada raczej monografię traktującą o BCI wszystkich rodzajów i o zaburzeniach świadomości. Druga część takiego zestawienia obszernych działów wiedzy nie mieści się w dyscyplinie naukowej uprawianej przez Autora.

Pomysł zastosowania interfejsów mózg-komputer do nieinwazyjnej oceny zdolności postrzegania, reagowania na polecenia zewnętrzne i komunikacji z osobami w pourazowych stanach „zaburzonej świadomości” jest znany od ponad 15 lat. Wybrane do badań opisanych w rozprawie interfejsy EEG, charakteryzują się niską ceną i przenośnością. Cechuje je mała rozdzielczość przestrzenna, niski poziom sygnału i, w konsekwencji, wrażliwość na zakłócenia losowe towarzyszące pomiarom sygnałów EEG (kompensowana długim czasem pomiaru, co z kolei spowalnia komunikację). Ostatnio rozważa się coraz częściej możliwości wykorzystania interfejsów fNIRS (*ang. functional near-infrared spectroscopy*), które mają lepszą rozdzielczość przestrzenną i są odporniejsze na zakłócenia. W literaturze można znaleźć doniesienia o skutecznej komunikacji za pomocą laboratoryjnego interfejsu fNIRS z pacjentami w klinicznie zdiagnozowanych stanach zaburzenia świadomości, bez uprzedniego treningu. Szybki rozwój optoelektroniki oraz metod analizy sygnałów pozwala zakładać, że interfejsy fNIRS mogą być alternatywą dla EEG BCI lub ich istotnym wsparciem w omawianym zastosowaniu. Pominięcie w przeglądzie literatury zagadnienia rozwoju/udoskonalenia postulowanej metody komunikacji obniża ocenę rozprawy, której tytuł obejmuje nie tylko interfejsy EEG.

Rozdział 4.1 zawiera charakterystykę modułów oprogramowania interfejsu BCI, opracowanego i zbudowanego z udziałem Autora i wykorzystanego do realizacji celu projektu doktorskiego. Metody analizy sygnałów EEG, kalibracji interfejsu oraz komunikacji za jego pomocą, z wykorzystaniem fal P300 i składowych okresowych stanu quasi-ustalonego mierzonych dla odpowiednich pobudeń, opisano odpowiednio w rozdziałach 4.2 i 4.3. Wprowadzone zmiany znacznie poprawiły przejrzystość opisu implementacji interfejsu użytego do badań. Jest on zadowalający, choć nadal opis ten zawiera usterki językowe (np. forma bezosobowa wyrażen jest zmieszana z formą osobową, rzeczownik „ilość” jest używany w znaczeniu „liczba”, słowo „dioda” w dopełniaczu liczby mnogiej przyjmuje niepoprawną formę „diód” zamiast „diod”), zwroty żargonowe (np. „... filtrów [...] wycinających [...] 200 Hz.”, „odejmowano dopasowaną linię prostą” w znaczeniu odejmowania doopasowanej liniowej funkcji czasu) i niejasności (np. słowo „opcja” używane w wielu znaczeniach, „próbka sygnału” w odniesieniu do wielkości skalarnych oraz wektorów).

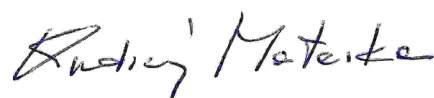


Rozdział 5 zawiera opis i wyniki badań [9], które dowodzą, że wielomodalne (wzrokowe, słuchowe i dotykowe) interfejsy P300 oraz interfejsy SSVEP ze stymulacją wzrokową mogą być użyte w badaniach komunikacji z pacjentami klinik. Studia tego rodzaju, obejmujące grupę 15 pacjentów kliniki dla dzieci z ciężkimi urazami mózgu i dwie grupy kontrolne osób zdrowych – dziesięć dorosłych i dziesięcioro dzieci – opisano w artykule [10], którego tłumaczenie wzbogacone o wizualizacje i fotografie zbudowanego stanowiska badawczego jest treścią rozdziału 6 rozprawy.

Ocenianą dysertację kończy podsumowanie w rozdziale 7, zawierające długą listę opracowanych przez Autora rozwiązań, które składają się na jego wkład do wspólnych badań zespołu opisanych m.in. w [9] i [10].

Autor dysertacji rozwiązał wraz z zespołem współpracowników istotny problem naukowy, o dużym znaczeniu społecznym, oceniając możliwości komunikacji z osobami przebywającymi w stanach zaburzeń świadomości. Posłużył się w tym celu oryginalnymi konstrukcjami interfejsów mózg-komputer, w których aktywność mózgu jest klasyfikowana na podstawie mierzonych sygnałów EEG. Osiągnięcie to jest opisane klarownie w artykułach [9] i [10]. Oprogramowanie interfejsów oraz algorytmy przetwarzania, analizy i klasyfikacji sygnałów zostały opracowane z istotnym, wydaje się wiodącym, jego udziałem. Zawartość i struktura poprawionej wersji rozprawy doktorskiej (w szczególności wykorzystane w dysertacji modele zjawisk fizycznych, metody pomiaru, przetwarzania i analizy sygnałów, metody numeryczne, samodzielnie opracowane i uruchomione programy komputerowe oraz zaplanowane i przeprowadzone eksperymenty) prezentują ogólną wiedzę teoretyczną mgra Dovgialo w dyscyplinie nauki fizyczne oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

W związku z treścią uchwały nr 157 Senatu Uniwersytetu Warszawskiego, konkluzja niniejszej recenzji, odnoszącej się do poprawionej pracy doktorskiej mgra Mariana Dovgialo, jest pozytywna.



Wybrane pozycje literatury cytowane w rozprawie

(numeracja oryginalna)

[9] A. Chabuda, **M. Dovgialo**, A. Duszyk, A. Stróż, M. Pawlisz, and P. Durka. Successful BCI communication via high-frequency SSVEP or visual, audio or tactile P300 in 30 tested volunteers. *Acta Neurobiol Exp*, 79:421–431, 2019.

[10] **M. Dovgialo**, A. Chabuda, A. Duszyk, M. Zieleniewska, M. Pietrzak, P. Różański, and P. Durka. Assessment of statistically significant command following in pediatric patients with disorders of consciousness, based on visual, auditory and tactile event-related potentials. *International Journal of Neural Systems*, 29(03):1850048, 2019.