

Łódź, 20 sierpnia 2022 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne
Uniwersytetu Warszawskiego z 23 czerwca 2022 r.

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

Recenzowana dysertacja obejmuje 87 stron tekstu z rysunkami i tabelami, podzielonego na 5 rozdziałów i spis literatury. Zawiera też stronę tytułową, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz listę skrótów. Wskazane w w/w zleceniu kryteria jej oceny są sformułowane w Załączniku nr 1 do uchwały nr 481 Senatu Uniwersytetu Warszawskiego z 16 października 2019 roku.

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.

We Wstępie Autor zwraca uwagę na ważny aspekt zastosowania takich interfejsów w diagnostyce, przywołując niefortunne, nieprecyzyjne pojęcie „analfabetyzmu BCI” [2]. Odnosi się ono do hipotezy, iż ok. 20% populacji użytkowników BCI nie jest w stanie nauczyć się ich obsługi w określonym czasie. Koncepcja ta, w oczywisty sposób upraszczająca złożony proces nabywania umiejętności komunikacji za pomocą niedoskonałych w końcu urządzeń technicznych rodzi kwestie etyczne i jest krytykowana, np. w [R1]. Autor nie nawiązuje do tej dyskusji i anonsuje „kompleksowe rozwiązanie tego problemu”, nie uściślając jego sedna i nie precyzując na czym polega kompleksowość rozwiązania. Brak odwołań do prac opublikowanych w ostatnich latach występuje również w innych fragmentach ocenianego dzieła.

Dalej, na str. 2 określony jest niebudzący wątpliwości cel pracy (skonstruowanie systemu BCI, jego weryfikacja przy pomocy 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. 3), 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’”). Twierdzenie to ma wynikać z przesłanki sformułowanej na str. 80 dysertacji: „System przetestowano na zdrowej populacji. Wykazano, że *każdy* przetestowany ochotnik potrafi komunikować się za pośrednictwem systemu BCI, co podważa ogólnie przyjętą tezę o istnieniu ‘analfabetyzmu BCI’.”. Teza o istnieniu tego zjawiska nie została „podważona” wynikami opisanych w rozprawie badań, ten wniosek Autora nie jest uzasadniony. System BCI nie został przetestowany „na zdrowej populacji” tylko na małej liczbie 30 osób zdrowych i jednej wybudzonej ze śpiączki [3]. Pomyślnie wyniki tych doświadczeń nie wykluczają sytuacji, w której testy komunikacji z udziałem innej grupy osób byłyby negatywne. Ponadto, cytowana teza nie jest „ogólnie przyjęta” [R1]. Bardziej przekonująca interpretacja tego zagadnienia jest zawarta we Wstępie artykułu [3], którego mgr Dovgialo jest współautorem. W Dyskusji tego artykułu zwrócono uwagę na potrzebę starannego dopasowania konstrukcji interfejsu oraz procedur jego wykorzystania do możliwości, preferencji i cech psychofizycznych użytkownika. W Konkluzji [3] podkreślono też, że wszyscy uczestnicy przeprowadzonych testów mogli komunikować się efektywnie z komputerem pod warunkiem uzyskania dostępu do interfejsów BCI różnych paradygmatów i modalności.

Zawartość dysertacji została skrótowo przedstawiona w rozdziale 1.1 na str. 3-4. Napisano tam między innymi, że „niepowodzenia części [osób] badanych, określane wcześniej mianem ‘analfabetyzm BCI’ sugerującym, że jest to wynik neurobiologicznych lub fizjologicznych ograniczeń uczestników, były najprawdopodobniej wynikiem niedostatków technicznych i metodologicznych wcześniejszych eksperymentów.”. Jest to słuszny wniosek, ale niespójny z wyżej omawianymi stwierdzeniami Autora. Rozprawa nie powinna zawierać tego rodzaju niekonsekwencji, albo powinny one zostać wyjaśnione.

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 Dovgalo w tej zbiorowej pracy, który deklaruje, że był autorem „algorytmów organizacji danych, detekcji artefaktów, przetwarzania sygnałów EEG [...] oraz oceny statystycznej istotności wystąpienia świadomej reakcji na bodziec [...]” (str. 4).

W rozdziale 2.1 Autor omawia działanie interfejsów BCI. Wybór interfejsu EEG spośród innych rodzajów BCI został skwitowany zdawkowo, trzema zdaniami na str. 7 rozprawy. Ta zwięzłość jest nieoczekiwana w nawiązaniu do bardzo ogólnie sformułowanego tytułu dysertacji („Interfejsy mózg-komputer i zaburzenia świadomości”). Tytuł taki zapowiada raczej monografię (podręcznik?) traktującą o BCI wszystkich rodzajów i o zaburzeniach świadomości. Druga część takiego zestawienia obszernych działów wiedzy nie mieści się raczej w dyscyplinie naukowej uprawianej przez Autora.

Rozdział 2.2 zawiera charakterystykę modułów oprogramowania interfejsu BCI wykorzystanego do realizacji celu projektu doktorskiego. Interfejs jest sterowany systemem informatycznym czasu „prawie rzeczywistego”, opracowanym z udziałem Autora. Znaczenie czasu prawie rzeczywistego w tym przypadku nie zostało wyjaśnione. Opis jest powierzchowny, rysunki na str. 9 zawierają nie zdefiniowane pojęcia, np. „oceny”, „oceny klas”, „Jednostronny IIR filter online”. W opisie na str. 10 nie określono znaczenia terminu „zdarzenie”; występuje ono wcześniej tylko w odniesieniu do niewykorzystywanego w badaniach przypadku komunikacji za pośrednictwem wyobrażenia ruchu. Na rys. 2.3 pojawia się kolejny nieznany termin: „Oceny zdarzeń”. Nie wiadomo też jak zdefiniowano „stabilność oceny”, „moc oceny” i „pewność oceny”. W rozdziale 2.2 nie ma odniesień do literatury na temat znanych zasad konstruowania interfejsów BCI rozważanej kategorii. Jest to robocza notatka, a nie część rozprawy naukowej. Nie wyjaśnia ona budowy interfejsu, nie zawiera informacji niezbędnych do odtworzenia jego konstrukcji, np. w celu replikacji opisywanych badań naukowych przez inne zespoły.

W podobnie niedbałym stylu jest napisany rozdział 2.3, poświęcony interfejsom paradygmatu P300. W części 2.3.1 podjęto próbę uzasadnienia wyboru klasyfikatora dla tego BCI. Nie wiadomo w jakim celu niektóre z liczb w tab. 2.2 wyróżniono pogrubioną czcionką, ani jakie jest znaczenie etykiety „Best minus currently used (1)” na rys. 2.5. W tabelach występują niewyjaśnione terminy, prawdopodobnie nazwy funkcji dostępnych w bibliotece SciPy, która zawiera programy implementujące przydatne w analizie sygnałów algorytmy przetwarzania danych. Jest to jednak szczególna, w pewnym sensie ulotna, implementacja. Konstruktorzy BCI mogą korzystać z innych zapisów realizacji obliczeń, np. dostępnych w środowisku MATLAB, czy z własnych programów. Wykorzystanie modułu SciPy nie jest, jak przypuszczam, konieczne do przeprowadzenia badań opisanych w rozprawie. Publikacje naukowe, które służą archiwizowaniu postępów w zdobywaniu wiedzy, powinny odwoływać się do bardziej uniwersalnych i trwalszych pojęć – algorytmów, metod numerycznych. Informację o wybranej do obliczeń implementacji, z numerem wersji biblioteki i zestawem parametrów użytych funkcji, np. domyślnym, też powinny oczywiście zawierać. Uwaga ta dotyczy także używania nazw handlowych zastosowanych urządzeń. Istotne w badaniach naukowych jest użycie urządzenia o określonej funkcjonalności, którą należy zdefiniować. Wybór konkretnego urządzenia powinien wynikać z analizy dostępności potrzebnej aparatury. Nieprzestrzeganie przez Autora nakreślonych w niniejszym akapicie recenzji zasad ujemnie wpływa na ocenę jego przygotowania do samodzielnego prowadzenia i dokumentowania badań naukowych.

Część 2.3.2 powiela w zasadzie tytuł rozdziału 2.3. Jej krótka treść mogłaby być połączona z tekstem rozpoczynającym rozdział 2.3 na str. 11, po odpowiedniej korekcie. Między innymi forma czasowników powinna być ujednolicona - w kilku zdaniach pojawiają się orzeczenia w liczbie mnogiej. Dotyczy to również wielu innych partii tekstu rozprawy. Słowo „opcja”, szeroko nakreślone na str. 11/12 jest używane w trudnych do odgadnięcia znaczeniach, np. „Każda możliwa opcja ma do wyboru dwa sposoby...”. Kto/co ma do wyboru sposoby: użytkownik, osoba nadzorująca, czy sama opcja?

Część 2.3.3 informuje o metodach wstępnego przetwarzania i ekstrakcji cech sygnału EEG w P300-BCI. Nie uzasadniono w niej wyboru wartości stopnia decymacji sygnału cyfrowego EEG, górnej częstotliwości granicznej filtra przed decymacją i rzędu filtra. Czy usuwanie trendu w sygnale realizowano graficznie (odejmowano „linię prostą”)?

W częściach 2.3.4-2.3.7 rozprawy opisano metody analizy sygnału oraz procedury odnoszące się do kalibracji P300-BCI i komunikacji za pomocą tego interfejsu. Choć fragmenty te też wymagają korekty językowej, intencji Autora można się domyśleć, z kilkoma wyjątkami. Co oznacza termin „kalibracja online”? Czym jest „liniowa część unormowanej funkcji” (2.1)? Wzór ten opisuje funkcję nieliniową argumentu df . Czy wartości df ograniczono w pewnych przedziałach? W podpisach pod rys. 2.6 i 2.7 jest mowa o „dobrze skalibrowanych użytkownikach BCI”. Czy użytkownicy rzeczywiście byli kalibrowani? Jaka była intencja wyświetlania 16 cyfr części ułamkowej wartości AUC na rys. 2.6 (oraz 2.4)?

W rozdziale 2.4 scharakteryzowano generację bodźców wzrokowych, metody przetwarzania i analizy sygnału EEG oraz komunikację za pomocą interfejsu wywodzącego się z paradygmatu SSVEP. Analizę „oparto na algorytmie zaproponowanym w [31]”. Nie określono i nie uzasadniono różnic między wersją Autora i źródłową [31]. Model analizowanych odcinków sygnału powinien zostać zdefiniowany wzorami matematycznymi, ze ścisłym wyjaśnieniem terminów takich jak „macierz sygnałów wzorcowych” i „waga częstości”. Jaki wzór matematyczny opisuje „traktowanie współczynników modelu LASSO jako funkcji dyskryminującej”? Czy współczynniki modelu LASSO przyjmowały wartości dodatnie czy także ujemne? Funkcje sinus i cosinus, wywodzące się z pojęć geometrycznych, są wielkościami bezwymiarowymi i nie mają długości wyrażonej w sekundach. Skrót „vs” nie występuje w języku polskim. Termin „jedna duża dioda” oznacza pewnie „jedno źródło światła o większej powierzchni”? I tak dalej...

Rozdział 3 jest szkicem implementacji interfejsu P300-BCI i realizacji badań opisanych w artykule [3]. Anonsowane w tytule rozdziału zagadnienie „badania ‘analfabetyzmu BCI’” w ogóle nie jest podjęte w treści tego rozdziału! Wyniki opisanych w [3] eksperymentów 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 takie, obejmujące grupę 15 pacjentów kliniki dla dzieci z ciężkimi urazami mózgu i dwie grupy kontrolne osób zdrowych – 10 dorosłych i 10 dzieci, opisano w artykule [4] którego tłumaczenie, wzbogacone o wizualizacje i fotografie zbudowanego stanowiska badawczego, jest treścią rozdziału 4 rozprawy.

Ocenianą dysertację kończy podsumowanie w rozdziale 5, zawierające długą listę opracowanych przez Autora rozwiązań, które składają się na jego wkład do wspólnych badań zespołu opisanych m.in. w [3] i [4]. Nie wszystkie elementy tej listy zostały należycie scharakteryzowane w rozprawie. Na przykład, jak rozumieć deklarację, że wkładem Autora były „systemy prezentacji bodźców”? Zaprojektował takie systemy, skonstruował, skompletował z dostępnych elementów? Istniały te systemy wcześniej? Jakie parametry konstrukcyjne i funkcjonalne powinny je cechować? Jeśli specyfikacja taka istniała, to z czego wynikała konieczność jej ewentualnej modyfikacji? Jak zweryfikowano efekty modyfikacji?

Następny element wspomnianej listy to „dobór bodźców i sposobów ich prezentacji, maksymalizujący odpowiedź elektrofizjologiczną na podstawie aktualnego stanu wiedzy z zakresu psychofizyki oraz badań własnych”. W rozdziałach 3.2.1-3.2.5, których tytuły rozpoczynają się od słowa „Bodźce”, nie ma żadnego odniesienia do literatury – stan wiedzy ani nie został przedstawiony ani przeanalizowany. Zakres badań własnych też nie został scharakteryzowany.

W rozdziałach 3.2.1-3.2.5, a także w całym tekście rozprawy nie jest respektowana zasada łącznego pisania rzeczowników z partykułą negacji (z wyjątkiem rzeczowników własnych, ale takie sytuacje w rozprawie nie występują).

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 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 realną alternatywą dla EEG BCI lub ich istotnym wsparciem w omawianym zastosowaniu. Nawet gdyby tytuł rozprawy został uściślony (powiedzmy „Interfejsy EEG-BCI do ...”), to i tak pominięcie w przeglądzie literatury zagadnienia rozwoju/udoskonalenia postulowanej metody komunikacji oraz porównania z konstrukcjami interfejsów opracowanych do podobnych badań przez inne zespoły (np. Center of Brain Computer Interfaces and Brain Information Processing, South China University of Technology, Guangzhou w Chinach) obniża ocenę rozprawy.

Autor dysertacji rozwiązał wraz z zespołem współpracowników istotny problem naukowy, o dużym znaczeniu społecznym, dokonując oceny możliwości komunikacji z osobami przebywającymi w stanach zaburzeń świadomości. Posłużył się w tym celu interfejsami mózg-

komputer, w których aktywność mózgu jest klasyfikowana na podstawie mierzonych sygnałów EEG. Osiągnięcie to jest opisane klarownie w artykułach [3] i [4]. Magister Dvgialo jest pierwszym autorem pracy [4] i drugim w [3]. Oprogramowanie interfejsu oraz algorytmy przetwarzania, analizy i klasyfikacji sygnałów zostały opracowane z istotnym, wydaje się wiodącym, jego udziałem.

Rozprawa nie zawiera odniesień do literatury opublikowanej po upowszechnieniu artykułów [3] i [4] w latach 2018-19. Nie pozwala to czytelnikowi na szczegółową ocenę oryginalności osiągnięć Autora na podstawie ocenianej dysertacji. Niepełny przegląd literatury budzi też wątpliwości odnośnie do umiejętności samodzielnego prowadzenia (w tym dokumentowania) pracy naukowej przez jej Autora.

W odniesieniu do uchwały nr 481 Senatu Uniwersytetu Warszawskiego, konkluzja mojej recenzji jest warunkowa. Tekst rozprawy powinien zostać uzupełniony tak, żeby zawierał krytyczną i kreatywną analizę stanu wiedzy w obszarach odpowiadających deklarowanym osiągnięciom naukowym Autora. Niezbędna jest też korekta językowa i redakcyjna ocenianej pracy doktorskiej.

Andrzej Materka

Wybrane pozycje literatury cytowane w rozprawie (numeracja oryginalna)

- [2] B. Z. Allison, C. Neuper. Could anyone use a BCI? In D. S. Tan and N. Anton, editors, *Brain-computer interfaces*, pages 35–54. Springer, 2010.
- [3] A. Chabuda, M. Dvgialo, 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.
- [4] M. Dvgialo, A. Chabuda, A. Duszyk, M. Zieleniewska, M. Pietrzak, P. Różański, and P. Durka. Assessment of statistically significant commandfollowing 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.
- [31] S. Ajami, A. Mahnam, and V. Abootalebi. Development of a practical high frequency brain-computer interface based on steady-state visual evoked potentials using a single channel of EEG. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 38(1):106–114, 2018.

Artykuł cytowany w recenzji, nieuwzględniony w rozprawie

- [R1] M. C. Thompson, Critiquing the Concept of BCI illiteracy, *Science and Engineering Ethics*, 2019, 25:1217-1233.