

Warszawa, 4 listopada 2024

dr hab. inż. Krzysztof Siwek, profesor uczelni
Instytut Elektrotechniki Teoretycznej
i Systemów Informacyjno-Pomiarowych
Wydział Elektryczny
Politechnika Warszawska

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

Recenzja powstała na zlecenie dra hab. inż. Marcina Lorenca, JM Rektora Politechniki Opolskiej z dnia 1 października 2024.

Rozprawę, zgodnie z **art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce** stanowi praca pisemna przedstawiająca osiągnięcia uzyskane podczas pracy naukowej Doktorantki.

Ocena doboru tematyki rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska pani mgr inż. Natalii Browarskiej Waniek dotyczy zastosowania metod sztucznej inteligencji w rozpoznawaniu zarejestrowanych przez zespół Doktorantki sygnałów EEG.

W pracy znajduje się przegląd metod oraz wyniki badań własnych Doktorantki w zakresie przetwarzania sygnałów biomedycznych, skupiające się na elektroencefalografii (EEG) oraz interfejsach mózg-komputer (BCI). W przeprowadzonych badaniach Doktorantka wykorzystowała urządzenie Emotiv EPOC Flex i autorski zbiór danych zebrany podczas stymulacji audio-wideo. Doktorantka wskazała, że konsumenckie urządzenia BCI, takie jak wspomniany Emotiv EPOC Flex, mogą rejestrować dane o jakości porównywalnej do specjalizowanych urządzeń stosowanych w jednostkach naukowo-badawczych lub w szpitalach.

Teza, hipoteza i cele rozprawy

Doktorantka wymieniła następujące cele pracy:

- Prawidłowy wybór i użycie cyfrowych filtrów pozwala przeprowadzić badania z jakością zależną od jakości sprzętu BCI, ale jednocześnie umożliwia prawidłową analizę zarejestrowanych sygnałów EEG.
- Porównanie metod rozpoznawania wzorców dla sygnału EEG i opracowanie odpowiedniej metody analizy aktywności mózgu w celu wykrycia stanów psychicznych i/lub emocjonalnych. Celem jest rozróżnienie stanów psychicznych odpowiadających stanom mentalnym (koncentracja, relaks) oraz emocjonalnym (np. radość, smutek), co może posłużyć do rozwoju systemów kontroli w czasie rzeczywistym.

Teza pracy brzmi:

Inteligentne monitorowanie i cyfrowa analiza sygnałów biomedycznych mogą wspierać rozwój systemów modulujących stany psychiczne i emocjonalne.

Hipoteza pracy:

Klasyfikacja cech EEG pozwala na wybór metod nieinwazyjnej stymulacji mózgu, wspierając badania nad kontrolą stanów psychicznych i emocjonalnych w czasie rzeczywistym.

Takie sformułowanie celów, tezy i hipotezy oraz ich realizacja i udowodnienie jest bardzo cenne z punktu widzenia praktycznych zastosowań i pozwala na opracowanie nowych metod filtracji, analizy i klasyfikacji sygnałów EEG w czasie rzeczywistym.

Ocena merytoryczna rozprawy

Doktorantka przeprowadziła analizę cyfrowego przetwarzania i filtrowania zarejestrowanych sygnałów EEG oraz roli odpowiedniego przygotowania tych danych. Przeprowadziła również analizę metod sztucznej inteligencji w rozpoznawaniu wzorców sygnału EEG, obejmującą modele Deep Neural Networks (DNN), Convolutional Neural Networks (CNN), Long Short-Term Memory (LSTM), Recurrent Neural Networks (RNN), Gated Recurrent Units (GRU) i Deep CNN.

Uzyskane wyniki potwierdzają wysoką skuteczność AI w klasyfikacji stanów mentalnych, wspierając rozwój BCI (Brain-Computer Interface) i przetwarzania sygnałów EEG.

Tematyka wybrana przez Doktorantkę jest niezwykle istotna i aktualna, szczególnie w kontekście dynamicznie rozwijającej się dziedziny neurotechnologii. Interfejsy mózg-komputer (BCI), które umożliwiają bezpośrednią komunikację pomiędzy mózgiem a urządzeniami elektronicznymi, są kluczowe dla dalszego rozwoju zaawansowanych systemów wspomagających funkcjonowanie osób z różnymi formami niepełnosprawności.

Współcześnie istnieje rosnąca potrzeba rozwoju BCI oraz ich szerokiego zastosowania, nie tylko w medycynie, gdzie mogą znacznie poprawić jakość życia, ale również w przemyśle, w celu tworzenia innowacyjnych rozwiązań technologicznych. Przykładowo, BCI mogą być używane w rehabilitacji, wspomaganiu codziennych aktywności, a także jako pomoc dla osób z ograniczoną mobilnością czy z zaburzeniami neurologicznymi. W przemyśle takie interfejsy mogą przyczynić się do automatyzacji procesów, sterowania robotami czy zarządzania urządzeniami za pomocą myśli, co ma duży potencjał komercyjny.

Praca jest interdyscyplinarna, obejmująca wiele powiązanych ze sobą zagadnień z zakresu biologii, przetwarzania sygnałów, automatyki i informatyki. Z uwagi na poruszane tematy praca bez wątpienia lokuje się w dyscyplinie **Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne**.

Ocena redakcyjna rozprawy

Praca jest napisana w języku angielskim, liczy 208 stron, z czego 159 to sama dysertacja, pozostałe to podziękowania, streszczenia w języku polskim i angielskim, bardzo (zbyt) obszerna bibliografia (35 stron) i typowe załączniki: spis rysunków, tabel, wyjaśnienie użytych skrótów oraz lista publikacji i zgłoszenia patentowego Doktorantki.

Rozprawa napisana jest w całości w poprawnym języku angielskim. Rozprawa składa się z 7 rozdziałów, z tym, że tylko rozdział 6 zawiera wyniki przeprowadzonych badań. W rozdziale 1. Introduction zapisany został cel rozprawy oraz zadania jakie przed sobą postawiła Doktorantka.

Praca zawiera dużą ilość rysunków i tabel, co zdecydowanie poprawia jej czytelność. Zarówno tytuł jak i układ rozprawy są prawidłowe i dobrze opisują jej zawartość.

Uważam, że Doktorantka zrealizowała wszystkie wymienione cele począwszy od pozyskania sygnałów EEG za pomocą taniego i popularnego urządzenia Emotiv EPOC Flex, ich przetworzenia przy użyciu filtrów, i analizy, następnie sformułowania konkretnych zadań badawczych i selekcji oraz zaprojektowania i wytworzenia odpowiednich narzędzi informatycznych do ich rozwiązania, w tym

opracowania oprogramowania, przeprowadzenia badań na danych rzeczywistych, interpretacji uzyskanych wyników oraz sformułowania wniosków. Dobrym zwyczajem przy pisaniu prac naukowych jest nakreślenie kierunków dalszych badań, co Doktorantka również uczyniła.

Zagadnienie omawiane w rozprawie jest dobrze zdefiniowane a sposób ich przedstawienia świadczy o dojrzałości naukowej Doktorantki. Uzyskane wyniki i opracowane narzędzia informatyczne posiadają dużą wartość badawczą, praktyczną i aplikacyjną, i mogą stanowić dla innych badaczy lub praktyków nieocenioną pomoc przy usprawnieniu diagnostyki medycznej. Bardzo wysoko oceniam również wkład Doktorantki w poszczególne jej publikacje naukowe.

Pytania i uwagi dyskusyjne

W tej części recenzji chciałbym postawić pytania oraz szerzej naświetlić pewne uwagi dyskusyjne, nie umniejszające jednak w istotnym stopniu osiągnięć Autorki rozprawy:

1. W pierwszych rozdziałach rozprawy razi duża ilość podstawowych i tak naprawdę niepotrzebnych tu informacji, które można znaleźć w wielu podręcznikach. Rozprawa doktorska powinna zawierać wyniki badań naukowych wnoszących nowe wartości w rozwój dyscypliny naukowej. Przytaczanie w tym miejscu wyjaśnień, jaki stosowany jest podział mózgu człowieka ze względu na jego funkcje (Fig. 2.1-2.6), przytaczanie modelu neuronu McCullocha-Pittsa (Fig. 2.7) i jego schematu blokowego (Fig. 5.1) czy też uproszczonego przebiegu impulsu elektrycznego w komórce nerwowej (Fig. 2.8) uważam za zbędne i nic nie wnoszące do tematu rozprawy. Podobnie, przytaczanie objaśnień jak zbudowany jest system 10-20 lub inne pokrewne, oraz tłumaczenie skrótów technik fMRI, NRIS lub ECoG sprawia wrażenie sztucznego zwiększania objętości rozprawy.
2. Opis badań i ich warunków jest dość skromny - rozdział 3.3. Brakuje informacji na temat np. płci, wieku osób poddanych badaniom. Czy Doktorantka rozważyła możliwość uwzględnienia tej dodatkowej wiedzy o pacjencie i wpływ tej wiedzy na wyniki klasyfikacji?
3. Doktorantka opisała plany badawcze, a w nich wykorzystanie analizy falkowej, która w dalszej analizie została ona pominięta. Na str. 149 jest mowa o czasie trwania uczenia w dziesiątkach minut, czy to był powód porzucenia tej koncepcji? Proszę o wyjaśnienie.
4. W rozdziale 3.1 (Understanding Emotions) Doktorantka zamieściła ciekawy wstęp teoretyczny, lecz rozpoznawanie emocji jako analiza nie jest rozwinięte dalej w rozprawie.
5. Po obszernym wstępie teoretycznym omawiającym opis budowy mózgu, brak jest we wnioskach jednoznacznej informacji, skąd wybór par elektrod (C3,C4), (F3,F4), (P3,P4) i czy wybór elektrod

ma wpływ na wyniki badań? Czy da się stwierdzić, że któraś z lokacji elektrod pozwala na uzyskanie lepszego wyniku niż inne?

6. Na rysunkach Fig. 5.7 do Fig. 5.12 jest niewidoczna z powodu zbyt małej czcionki. W opisie rysunków Fig. 5.10-Fig. 5.12 jest powiedziane, że prezentują miary błędów (TP, TN, FP, FN) co nie jest prawdą (str. 134).
7. Dlaczego w rozdziale 5.2.1 Signal Feature Extraction jest mowa o oknach 1 sekundowych, a przy wyborze modeli neuronowych Doktorantka sprawdza ich działanie na innych oknach (5s i 10s – str. 134), dodatkowo w tabelach (Table 5.35 – Table 5.40) okna mają długość 1, 5 i 10s.
8. Nie jest jasne dlaczego Doktorantka wybrała akurat takie sieci neuronowe do rozwiązania problemu klasyfikacji. Doktorantka opisała wiele metod i technik analizy, których finalnie nie używała w badaniach (np. BSS, ICA). Ta sama uwaga dotyczy sieci neuronowych, które są wymienione i opisane w rozprawie, a finalnie nie były używane w badaniach (np. SOM, RBF).
9. Procedura uczenia i testowania sieci neuronowych jest zbyt skąpo opisana. Brakuje również informacji o danych użytych do uczenia i testowania (wymiar, ilość i przypisane klasy), co jest szczególnie istotne w przypadku sieci głębokich. Czy w tabelach Table 5.5 – Table 5.34 podane są wyniki (Overall Accuracy, Precision, Recall) dla danych uczących czy testujących? Z przedstawionych listingów programów w Python nie da się tego rozstrzygnąć.
10. Wyniki podawane w rozprawie są w postaci Accuracy, czy ta miara błędów jest wystarczająca do realizacji postawionego zadania. Czy w pewnych zastosowaniach, szczególnie medycznych, nie warto było by obliczać inne miary?
11. Spis literatury liczy 391 pozycji i jest umieszczony na 34 stronach. Rozumiem, że w trakcie studiów III stopnia Doktorantka miała okazję zapoznać się z wieloma pracami z tematyki BSI, ale czy wszystkie warte są umieszczenia w tym rozdziale?
12. Konwencja zapisu wzorów nie jest standardowa – brak jest wyróżnień pogrubioną czcionką dla macierzy i wektorów. Wzory zapisane wyłącznie czcionką *italic* są nieprzyjemne w analizie.
13. Ponadto w treści publikacji i na rysunkach występują nieliczne, drobne błędy interpunkcyjne, literówki, powtórzenia oraz ewidentne pomyłki edytorskie, które nie wpływają na pozytywny odbiór rozprawy. W kilku miejscach brakuje odwołań do literatury, a zamiast nich są znaki zapytania, są to ewidentne błędy w Latex (np. str. 29, 6 wiersz od dołu, str.31, 8 wiersz od dołu).

Oryginalne rezultaty uzyskane w rozprawie

Do oryginalnych osiągnięć autorki rozprawy należy zaliczyć opracowanie systemu monitorowania i analizy sygnałów biomedycznych za pomocą zaawansowanych metod przetwarzania sygnałów i sieci neuronowych. Opracowana metoda może pomóc w zaprojektowaniu efektywnych metod nieinwazyjnej stymulacji mózgu. Doktorantka dowiodła, że takie techniki umożliwiają klasyfikację stanów mentalnych na podstawie sygnałów EEG, co może wspierać modulację stanów psychicznych i emocjonalnych.

Hipoteza zakłada, że inteligentna klasyfikacja cech sygnału EEG pozwala na dobór odpowiednich metod stymulacji, co znacząco ułatwia badania nad regulacją stanów psychicznych i emocjonalnych oraz ma potencjalne zastosowanie w systemach czasu rzeczywistego. Badania te mogą mieć wpływ na rozwój interfejsów mózg-komputer, przetwarzanie sygnałów oraz systemy kontroli, przyczyniając się do bardziej efektywnych systemów BCI. Zastosowanie sieci neuronowych, szczególnie modeli głębokiego uczenia, poprawiło precyzję klasyfikacji stanów mentalnych, co może prowadzić do bardziej zaawansowanych, spersonalizowanych interfejsów.

Pomimo wysokiej skuteczności, sieci neuronowe mają też pewne ograniczenia, takie jak potrzeba dużej ilości danych do treningu i trudność interpretacji wyników oraz brak wyjaśnialności działania, szczególnie w przypadku sieci głębokich.

Wyniki zamieszczone w rozprawie mogą być istotnym wsparciem w rozwoju nowych technologii BCI, oferując wskazówki dla tworzenia bardziej przyjaznych i wydajnych systemów, szczególnie w kontekście wzrostu wykorzystania BCI w codziennym życiu, m.in. w opiece zdrowotnej, edukacji i rozrywce. Fakt, że praca opiera się na konkretnym typie urządzenia EEG i określonych metodach przetwarzania sygnału, może ale nie musi oznaczać ograniczenie możliwości uogólnienia wyników na inne urządzenia, metody filtracji i modele sieci neuronowych, ale również na inne sygnały biomedyczne.

Podsumowując rozprawa stanowi istotny wkład w analizę sygnałów EEG i rozwój interfejsów mózg-komputer, umożliwiając opracowanie bardziej responsywnych systemów automatyzacji opartych na monitorowaniu stanów mentalnych w czasie rzeczywistym.

Należy podkreślić, że Doktorantka w rozprawie doktorskiej wykazała, że posiadała wiedzę i umiejętności samodzielnej pracy naukowej wymagane na tym stopniu rozwoju naukowca. Wykazała się ponadto w biegłości projektowania eksperymentów z dziedziny BCI.

Poprzez zaproponowanie i opracowanie nowych metod filtracji sygnałów EEG, w tym metod sztucznej inteligencji oraz ich dogłębne przetestowanie Doktorantka **wniosła wkład w rozwój dyscypliny naukowej**, co jest podstawą do wystąpienia o stopień doktora nauk inżyniersko-technicznych w dyscyplinie **Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne**. W

mojej ocenie przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, co wyczerpuje wymagania stawiane przez właściwą Ustawę.

Uważam, że cele założone w pracy zostały spełnione a hipoteza potwierdzona.

Sformułowane w recenzji uwagi mają w większości charakter dyskusyjny i nie umniejszają w żaden sposób wartości opracowanych metod ani wysokiemu poziomowi badawczemu rozprawy.

Wniosek końcowy

Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa mgr. inż. Natalii Browarskiej-Waniek pt. *„Intelligent monitoring and digital analysis of biomedical signals: an application in noninvasive brain stimulation”* spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Wnoszę o dopuszczenie jej Autorki do publicznej obrony.

dr hab. inż. Krzysztof Siwek, prof. uczelni