

**RADA NAUKOWA DYSCYPLINY
INFORMATYKA TECHNICZNA I TELEKOMUNIKACJA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

zaprasza na
OBRONĘ ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Renaty Marii Plucińskiej

która odbędzie się w dniu **21 listopada 2023 roku**, o godzinie **12:00** w trybie hybrydowym

Temat rozprawy:

„Weryfikacja tożsamości osób na podstawie analizy widma sygnału EEG i jego podpasm z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego”

Promotor: dr hab. inż. Konrad Jędrzejewski, prof. uczelni – Politechnika Warszawska

Recenzenci: prof. dr hab. inż. Khalid Saeed – Politechnika Białostocka

dr hab. inż. Piotr Szczypiński, prof. uczelni – Politechnika Łódzka

prof. dr hab. inż. Michał Choraś – Politechnika Bydgoska

Obrona odbędzie się w trybie hybrydowym na platformie MS Teams i w Sali nr 229 Gmachu Wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej, adres: ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa. Osoby zainteresowane uczestnictwem w obronie proszone są o zgłoszenie chęci uczestnictwa w formie elektronicznej na adres sekretarza komisji: dr hab. inż. Haliny Tarasiuk, – email: halina.tarasiuk@pw.edu.pl, do dnia 20 listopada 2023 r. godz. 12:00.

Z rozprawą doktorską i recenzjami można zapoznać się w Czytelni Biblioteki Głównej Politechniki Warszawskiej, Warszawa, Plac Politechniki 1.

Streszczenie rozprawy doktorskiej i recenzje są zamieszczone na stronie internetowej: <https://www.bip.pw.edu.pl/Postepowania-w-sprawie-nadania-stopnia-naukowego/Doktoraty/Wszczete-po-30-kwietnia-2019-r/Rada-Naukowa-Dyscypliny-Informatyka-Techniczna-i-Telekomunikacja/mgr-inz.-Renata-Maria-Plucinska>

Przewodniczący Rady Naukowej Dyscypliny
Informatyka Techniczna i Telekomunikacja
Politechniki Warszawskiej
dr hab. inż. Jarosław Arabas, prof. uczelni

mgr inż. Renata Plucińska
Instytut Systemów Elektronicznych
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
Politechnika Warszawska

Weryfikacja tożsamości osób na podstawie analizy widma sygnału EEG i jego podpasm z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego

Streszczenie

W niniejszej rozprawie przedstawiono wyniki badań związane z tematem weryfikacji tożsamości osób na podstawie cech biometrycznych zawartych w sygnałach elektroencefalograficznych (EEG). Jest to stosunkowo nowy obszar badań, który zaczął rozwijać się pod koniec lat 90-tych dwudziestego wieku. Zaletą sygnału EEG w tym zastosowaniu jest to, że może zostać pozyskany jedynie w nieinwazyjnym pomiarze bezpośrednim i tylko od żywej osoby, dzięki czemu wykazuje on bardzo niską podatność na fałszerstwa, kradzieże czy wyłudzenia. Jednak jest on trudny do interpretacji ze względu na złożoną i stosunkowo spontaniczną aktywność mózgu oraz towarzyszące mu zakłócenia.

W pracy opracowano metodę weryfikacji tożsamości osób na podstawie analizy widma sygnału EEG i jego podpasm z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego, która zapewnia wysokie miary oceny jakości weryfikacji, niezależne od chwilowych, dziennych lub długookresowych zmian w sygnale. Podjęto próbę zmniejszenia liczby analizowanych podpasm widma sygnału EEG, określenia minimalnego zestawu elektrod oraz minimalnej liczby sesji treningowych, które również zapewnią wysoką wartość dokładności i swoistości weryfikacji tożsamości osób.

Opracowanie metody weryfikacji poprzedzono stworzeniem unikalnego w tej dziedzinie zbioru sygnałów EEG, zarejestrowanych w trakcie dwudziestu sesji pomiarowych dla każdej z 29 osób w ciągu kilku miesięcy. Badanie efektywności systemu weryfikacji tożsamości osób na podstawie sygnału EEG w wielokrotnie skorelowanych czasowo sesjach pomiarowych rejestrowanych w różnych dniach jest rzadko spotykane. W analizach wykorzystano również dodatkowy zbiór pojedynczych rejestracji pochodzących od 23 osób, który został użyty do sprawdzenia odporności metody na symulację ataku intruzów.

Zaproponowana w rozprawie metoda weryfikacji tożsamości osób opiera się na wykorzystaniu cech spektralnych sygnału EEG, w szczególności współczynników gęstości widmowej mocy wyrażonych w skali decybelowej i ich klasyfikacji za pomocą głosowania

większościowego z użyciem sztucznych sieci neuronowych. Osiągnięto średnią dokładność weryfikacji tożsamości osób równą $97,8 \pm 1,0$ %, a współczynnik fałszywych akceptacji dla symulowanego ataku intruzów wyniósł $2,1 \pm 2,1$ %.

Autorka ma nadzieję, że zaprezentowana metoda weryfikacji tożsamości osób na podstawie sygnału EEG oraz przeprowadzone w rozprawie analizy będą stanowić wartościowy wkład w dalszy rozwój biometrii opartej na analizie widmowej sygnału EEG, a także ułatwi komercyjne wdrożenie systemu biometrycznego wykorzystującego sygnały EEG do weryfikacji tożsamości.

Słowa kluczowe: *biometria, weryfikacja, porównywanie cech, ekstrakcja cech, elektroencefalografia, EEG, widmo gęstości mocy, uczenie maszynowe, sztuczna sieć neuronowa, uczenie zespołowe*

Łódź, 6 września 2023 roku

dr hab. inż. Piotr M. Szczypiński
Instytut Elektroniki Politechniki Łódzkiej
Al. Politechniki 10, 93-590 Łódź

Rada Naukowa Dyscypliny
INFORMATYKA TECHNICZNA
I TELEKOMUNIKACJA
Sekretariat
Data wpływu... **8.09.2023r.**
Numer.....

Recenzja rozprawy doktorskiej

Weryfikacja tożsamości osób na podstawie analizy widma sygnału EEG i jego podpasm z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego

Rozprawa autorstwa mgr inż. Renaty Marii Plucińskiej

przygotowana pod opieką dr. hab. inż. Konrada Jędrzejewskiego, prof. uczelni

Recenzja została przygotowana na prośbę dr. hab. inż. Jarosława Arabasa, prof. uczelni,
Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja
Politechniki Warszawskiej, na podstawie pisma z 1. sierpnia 2023 roku.

Struktura pracy

Recenzowana rozprawa napisana jest po polsku, liczy 144 strony, obejmuje streszczenia w języku polskim i angielskim, spis treści, wykazy skrótów i symboli, sześć rozdziałów, listę 119 źródeł bibliograficznych, w tym 8 publikacji własnych lub współautorskich, oraz cztery załączniki. Pierwszy rozdział prezentuje problem badawczy, definiuje cel pracy i przedstawia tezy. Rozdziały 2. i 3. stanowią przegląd aktualnego stanu wiedzy w zakresie pomiarów encefalograficznych oraz ich zastosowań, w tym zastosowań w biometrycznej weryfikacji tożsamości. Rozdział 4. prezentuje metody przetwarzania sygnałów EEG i uczenia maszynowego. Rozdział 5. opisuje eksperymenty badawcze oraz uzyskane wyniki. Rozdział 6. przedstawia podsumowanie i wnioski końcowe. Kolejność prezentowanych treści jest właściwa, przejrzysta i zgodna ze strukturą IMRAD.

Problem badawczy i cel rozprawy

Podjęty w pracy problem badawczy dotyczy zastosowania analizy sygnałów elektroencefalograficznych (EEG) w celu weryfikacji tożsamości. Autorka rozprawy na podstawie przeglądu aktualnego stanu wiedzy wykazała niedostatki dotychczasowych badań w tym zakresie. Wskazała ona na brak danych umożliwiających **długookresową analizę zmienności** takich sygnałów, oraz brak metody weryfikacji odpornej na zmiany cech sygnału EEG w czasie pod wpływem czynników zewnętrznych oddziałujących na badaną osobę oraz stanu psychofizycznego tej osoby (str. 16). Ponadto w rozprawie wykazano, że potrzebne jest przeprowadzenie badań dotyczących **liczby rozdzielnych sesji akwizycji** sygnału EEG wykorzystywanych do uczenia systemu i wpływu tej liczby na jakość weryfikacji tożsamości. W rozprawie **skrytykowano podejścia wykorzystujące dane uczące gromadzone podczas jednej lub nielicznych sesji, i wskazano, że prowadzi to do fałszywego zawyżania dokładności** (str. 18). Kolejnym zagadnieniem, które dotychczas nie było zbadane w sposób wyczerpujący jest **optymalizacja liczby i rozmieszczenia elektrod pomiarowych**, co również stało się przedmiotem badań w ramach doktoratu. Podjęty problem badawczy ma istotne znaczenie dla biometrycznych systemów weryfikacji i identyfikacji osób, szczególnie systemów wymagających zwiększonego poziomu bezpieczeństwa lub weryfikacji tożsamości w sposób ciągły. W rozprawie wskazano, że sygnał EEG niesie potrzebne do tego informacje biometryczne, jego pozyskanie jest tanie i nieinwazyjne, a jednocześnie nie można go pozyskać od osoby zmarłej, trudno jest go

pozyskać na odległość oraz bez wiedzy osoby zainteresowanej. Podjęte badania mają więc charakter utylitarny, a wybór sygnałów EEG jako przedmiotu zainteresowania rozprawy został w pełni uzasadniony. Należy więc stwierdzić, że **zarówno zagadnienie badawcze, jak i motywacja podjętych badań stanowią istotne atuty rozprawy.**

Głównym celem wskazanym w rozprawie (str. 18) było **opracowanie metody weryfikacji tożsamości na podstawie analizy widmowej sygnału EEG i uczenia maszynowego**. Należy zauważyć, że osiągnięcie tego celu wymagało zgromadzenia bazy sygnałów EEG umożliwiających analizę długookresowych zmian zachodzących w takich sygnałach. Ponadto, w pracy zbadano wpływ podziału danych na zbiór uczący i testowy na wynik klasyfikacji, dokonano porównania algorytmów przetwarzania sygnałów i klasyfikacji, oraz wyboru układu elektrod pomiarowych. Każde z tych zagadnień wymagało przeprowadzenia odrębnego eksperymentu, a każdy z nich należy uznać za znaczące osiągnięcie rozprawy.

Poszczególne eksperymenty i wynikające z nich wnioski przedstawiono w rozdziale 5. W podrozdziale 5.1 rozważano dwa podejścia do podziału danych na zbiory uczący i testowy. Wykazano, że losowy podział wektorów cech pozwala uzyskać zawyżone wartości miar jakości klasyfikacji, jednak nie odpowiada on rzeczywistej sytuacji, a właściwym podejściem jest podział międzysesyjny. W podrozdziale 5.2 przeprowadzono porównanie metod skalowania cech wskazując na przewagę cech, których wartości wyrażono w skali decybelowej. W kolejnym podrozdziale porównano działanie pięciu wybranych klasyfikatorów, w wyniku czego uznano klasyfikator neuronowy za najdokładniejszy. Kolejny eksperyment polegał na próbie zmniejszenia liczby cech poprzez ograniczenie liczby analizowanych podpasów sygnału EEG. Wykazano, że ograniczenie takie jest możliwe bez istotnej utraty jakości klasyfikacji. W podrozdziale 5.5 rozważono również możliwość ograniczenia liczby elektrod pomiarowych i sposób ich rozmieszczenia.

Wyniki eksperymentów pozwoliły autorce przedstawić zalecenia dotyczące konstrukcji systemu weryfikacji tożsamości w zakresie: sposobu akwizycji sygnałów, metody ekstrakcji cech, selekcji atrybutów o dużej zdolności dyskryminacyjnej, wstępnego przetwarzania i redukcji wymiarowości przestrzeni atrybutów, oraz doboru klasyfikatora. Wnioski uzyskane z eksperymentów pozwalają zaprojektować sprawny i kompletny system do weryfikacji tożsamości. Uzyskana podczas walidacji krzyżowej dokładność klasyfikacji bliska 98% jest satysfakcjonująca dla mniej wymagających systemów weryfikacji tożsamości. Tym samym, należy uznać, że **cel rozprawy został osiągnięty.**

Tezy rozprawy

W rozprawie sformułowano cztery tezy (str. 19):

- 1. Możliwe jest opracowanie metody weryfikacji tożsamości osób na podstawie analizy widmowej sygnału EEG z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego, niezależnej od dziennych lub długookresowych zmian w sygnale, która zapewniałaby uzyskanie wysokich miar oceny jakości klasyfikacji, w szczególności dokładności i swoistości.*
- 2. Możliwa jest redukcja liczby analizowanych podpasów widma sygnału EEG, które zapewnią uzyskanie parametrów weryfikacji tożsamości na podobnym poziomie, jak dla całego rozpatrywanego pasma sygnału EEG.*
- 3. Możliwe jest zmniejszenie liczby elektrod do akwizycji sygnału EEG oraz określenie zestawu elektrod wygodnego do zastosowania z punktu widzenia osób weryfikowanych, zapewniającego uzyskanie jakości weryfikacji na stosunkowo wysokim poziomie.*
- 4. Możliwe jest określenie minimalnej liczby sesji pomiarowych sygnału EEG używanych w procesie uczenia klasyfikatora w celu skrócenia procesu przygotowywania systemu do użycia w praktyce.*

Wszystkie tezy prezentują znaczącą wartość poznawczą, odnosząc się do kluczowych zagadnień związanych z celem rozprawy i konstrukcją systemu weryfikacji tożsamości. Jednocześnie stanowią one uniwersalny wkład w wiedzę o działaniu ludzkiego mózgu. Poznanie i kwantyfikacja długookresowej zmienności cech sygnału EEG oraz wskazanie podpasów częstotliwości sygnału odpowiednich do identyfikacji osobniczej mogą przyczynić się do rozwoju innych zastosowań, nie ograniczających się wyłącznie do weryfikacji lub identyfikacji tożsamości.

Wyniki eksperymentów przedstawione w rozdziale 5. odnoszą się do wszystkich czterech tez, w szczególności pokazując drogę, która doprowadziła do udoskonalenia metody weryfikacji tożsamości (Teza 1). Wpływ liczby sesji pomiarowych (Teza 4) wykorzystywanych w procesie uczenia przedstawiono w podrozdziale 5.6. Wykorzystano dane zgromadzone w czasie 70. dniowego okresu badań (Teza 1). Możliwość wykorzystania wybranych podpasów częstotliwościowych (Teza 2) wykazano w podrozdziale 5.4. Wpływ umiejscowienia oraz liczby elektrod (Teza 3) na wynik klasyfikacji rozważono w podrozdziale 5.5 wskazując podzbiór elektrod umożliwiających weryfikację tożsamości bez znaczącego zmniejszenia jej dokładności. **Uzyskane wyniki dowodzą zatem prawdziwości tez sformułowanych w rozprawie.**

Przegląd literatury

Przegląd aktualnego stanu wiedzy zawarty jest we wstępie rozprawy oraz w rozdziałach 2 i 3. Przegląd we wstępie pozwolił sformułować problemy badawcze oraz przedstawić motywację prac podjętych w doktoracie. W rozdziale 2. przedstawiono przegląd aktualnej wiedzy na temat encefalografii, tego jak sygnały są formowane w mózgu, jaki może to mieć wpływ na ich niepowtarzalność osobniczą, oraz jakimi metodami mierzone są sygnały EEG. W rozdziale 3. przedstawiono krytyczny przegląd literatury tematycznie związanej z zastosowaniami encefalografii w biometrii.

W rozprawie wykorzystano łącznie 119 źródeł w języku polskim i angielskim, które są zarówno aktualne jak i związane z tematyką pracy. Spośród tych źródeł osiem to publikacje autorki rozprawy, w tym dwa artykuły wydane w czasopiśmie *MDPI Sensors* (IF = 3,9; 100 pkt. MEiN), jeden opublikowany w *Photonics Applications in Astronomy*, cztery publikacje pokonferencyjne oraz praca magisterska.

Na podstawie analizy przeglądu stanu wiedzy można stwierdzić, że **autorka rozprawy prezentuje wysoki poziom ogólnej wiedzy teoretycznej** w dyscyplinie Informatyka techniczna i telekomunikacja, oraz szczegółową wiedzę dotyczącą metod przetwarzania i analizy sygnałów, oraz metod uczenia maszynowego i klasyfikacji. Autorka przeprowadziła krytyczną analizę aktualnych doniesień naukowych i na tej podstawie trafnie sformułowała problem badawczy rozprawy. Ponadto **udokumentowała ona swój wkład naukowy wskazując własne publikacje z wynikami oryginalnych badań** dotyczących weryfikacji tożsamości na podstawie sygnałów EEG.

Oryginalność rozprawy

Oryginalnymi osiągnięciami rozprawy są **opracowanie metody weryfikacji tożsamości** odpornej na dzienne i długookresowe zmiany cech sygnału EEG, oraz zbadanie **wpływu podziału danych na zbiory treningowy i testowy** na efektywność weryfikacji tożsamości. Ponadto, w rozprawie zaprezentowano oryginalne wyniki badań naukowych dotyczące **ograniczenia liczby podpasów** częstotliwościowych sygnału EEG oraz **zmniejszenia liczby elektrod pomiarowych**, przy założeniu zachowania dużej dokładności weryfikacji tożsamości. Oryginalnym osiągnięciem autorki rozprawy jest również **zgromadzenie bazy 580. sygnałów EEG** (od 29. osób obu płci, w ciągu 20. sesji i 70. dni), która umożliwiła przeprowadzenie badań nad wpływem długookresowej zmienności tych sygnałów na dokładność weryfikacji tożsamości.

Formalna i prezentacyjna strona rozprawy

Rozprawa napisana jest w języku polskim, w swej znacznej części **w sposób zrozumiały, logiczny i precyzyjny**. Pracę wzbogacają ilustracje, tabele i wykresy. Zauważalna jest dbałość o estetykę pracy, staranność w projektowaniu ilustracji, oraz konsekwentne stosowanie ustalonej palety kolorów. W rozprawie zamieszczono **15 równań matematycznych** definiujących miary jakości klasyfikacji, transformatę Fouriera oraz wzory skalowania widma mocy. Sposób użycia odsyłaczy do podrozdziałów, tabel, rysunków i publikacji jest prawidłowy i nie budzący wątpliwości. Styl cytowania bibliografii jest zgodny z wymaganiami IEEE a kolejność publikacji na liście jest zgodna z ich kolejnością cytowania w tekście rozprawy. Wyniki zaprezentowane w postaci tabel i wykresów są czytelne i wyczerpująco opisane w tekście, a ich interpretacja nie budzi wątpliwości. Część wyników badań w postaci tabel i wykresów została przeniesiona do czterech załączników rozprawy. Zwiększyło to czytelność pracy i ułatwia odnajdywanie bardziej szczegółowych wyników.

Uwagi krytyczne i zagadnienia dyskusyjne

W podrozdziale 3.2 (str. 37) zdefiniowano sześć miar jakości klasyfikacji. W większości ich opis jest przejrzysty i spójny. Wyjątkiem jest ostatni akapit podrozdziału, w którym definiowany jest błąd zrównoważony, w którym nie wyjaśniono czym jest „punkt, w którym współczynniki FAR i FRR są sobie równe” i jak taki „punkt” można osiągnąć. Ponadto, w treści podrozdziału 3.4 (str. 42) pojawiają się miary CCR, HTER oraz TAR, których wcześniej nie zdefiniowano.

W podsumowaniu rozdziału 3. napisano, „że analiza literatury wykazała, że badania, w których wprowadzono większą liczbę sesji akwizycji sygnału EEG, zazwyczaj osiągają gorsze parametry rozpoznawania”. Czytelnik mógłby z tego zdania błędnie wywnioskować, że preferowanym rozwiązaniem jest stosowanie małej liczby sesji akwizycji. Brakuje komentarza, który jednoznacznie stwierdzałby, że stosowanie małej liczby akwizycji jest błędem, wyjaśniał na czym ten błąd polega i wskazywał, że większe wartości współczynników dokładności klasyfikacji uzyskane przy małej liczbie akwizycji są nieprawdziwe.

Równanie (7) (str. 45) zapisane jest błędnie. Sumowanie wykonywane jest względem indeksu n przy czym w wyrazie będącym przedmiotem sumowania indeks n nie występuje. Ponadto, po obu stronach równania występuje ten sam składnik $x_{i,n}$. W tej sytuacji składnik będący wynikiem sumowania musiałby być równy zeru.

Cecha (10) (str. 48) opisana jest jako „znormalizowana częstotliwość maksymalna”. Wydaje się, że nie jest to częstotliwość maksymalna ale częstotliwość maksymalnej składowej mocy.

W rozdziale 4.3 przedstawiono definicję transformaty Fouriera oraz szybkiej dyskretnej transformaty Fouriera (FFT). Zastosowanie FFT wymaga aby liczba próbek sygnału wejściowego była potęgą całkowitą dwójki. Jeśli analizowane są fragmenty sygnału 7,5 sekundowe przy częstotliwości próbkowania 500 Hz to liczba próbek wynosi $3750 \neq 2^n$. Nie jest więc jasne czy w badaniach wykorzystano FFT i jeżeli tak to dlaczego nie dobrano fragmentu np. o długości 8,2 sekundy i liczbie próbek 4096. Niejasny jest też wybór zastosowanej funkcji okna.

Opis metody ekstrakcji cech, w szczególności przedostatni akapit na str. 48, jest niejasny. Biorąc pod uwagę liczbę podpasów sygnału EEG i liczbę czterech cech zapisanych formułami (10)-(13), czytelnik nie jest w stanie wydedukować dlaczego wynikowy wektor zawiera dokładnie 45 atrybutów.

W pracy wykorzystano pięć różnych metod klasyfikacji, w tym sztuczną sieć neuronową, drzewa decyzyjne, klasyfikator k najbliższych sąsiadów (kNN), maszynę wektorów podpierających (SVM) i las losowy. Porównanie ich zdolności klasyfikacyjnej przedstawiono wykresem na rysunku 26. Brakuje uzasadnienia

wyboru wartości $k = 1$ w klasyfikatorze kNN. Szczególnie, że klasyfikator ma wówczas tendencję do nadmiernego dopasowania się do danych uczących i nie ma zdolności uogólniania wiedzy.

Z badania metod skalowania wartości atrybutów (podrozdział 5.2) wynika, że dane wejściowe wymagają zastosowania przekształcenia nieliniowego, o czym świadczą najlepsze wyniki uzyskiwane po zastosowaniu funkcji logarytmicznej. To sugerowałoby zastosowanie klasyfikatorów nieliniowych. Dlaczego zatem w pracy nie rozważano (str. 52) zastosowania klasyfikatora SVM z nieliniowymi funkcjami jądra?

Z wyników prezentowanych na rysunku 26. (str. 68) wynika, że miary jakości klasyfikacji były porównywalne dla klasyfikatora ANN oraz dla liniowego SVM. Dlaczego w dalszych badaniach wybrano klasyfikator ANN, dla którego wynik uczenia może nie być powtarzalny ze względu na losowy charakter inicjalizacji wag?

Na str. 70 znajdujemy informację, że zwiększenie liczby neuronów w warstwie ukrytej powoduje ponad 500-krotne wydłużenie czasu obliczeń. Nie podano jednak wartości bezwzględnych tych czasów. Wydaje się, że nawet przy wydłużonym czasie obliczenia wymagają zaledwie ułamków sekundy. Czy zatem ograniczanie liczby neuronów ze względu na czas obliczeń ma praktyczne uzasadnienie?

Dlaczego w klasyfikatorze ANN zastosowano dwa neurony w warstwie wyjściowej (str. 53)? Wydaje się, że klasyfikacja binarna (dwuklasowa) wymaga zastosowania pojedynczego neuronu.

W tezie 1. mowa jest o miarach dokładności i swoistości. Dokładność jest średnią ważoną czułości i swoistości, tak więc wartości dokładności i swoistości są zależne. Czy rozważanie pary miar czułości i swoistości zamiast dokładności i swoistości nie byłoby właściwsze?

Czy obserwacja rozkładu wektorów cech należących do różnych klas, w przestrzeni tych cech, mogłaby mieć wpływ na wybór metody klasyfikacji? Czy prezentacja takiego rozkładu w przestrzeni 45-wymiarowej jest możliwa? Czy zastosowanie metod redukcji wymiarowości przestrzeni cech (np. LDA, PCA) do trzech wymiarów umożliwiłoby taką wizualizację i czy byłoby to celowe?

Czy zmniejszenie liczby elektrod pomiarowych i proponowany zestaw ośmiu elektrod zamieszczony na rys. 46 może być podstawą do zaproponowania uproszczonej i taniej konstrukcji urządzenia do akwizycji sygnału EEG? Na rys. 6.b przedstawiono 4-kanalową opaskę do akwizycji sygnałów EEG. Czy rozważano użycie zestawu elektrod Fp1Fp2F7F8T3T4 w celu zasymulowania użycia takiej opaski?

Rozważając zagadnienie identyfikacji osób należałoby wziąć pod uwagę wykorzystanie klasyfikatora wieloklasowego – w przypadku danych wykorzystywanych w rozprawie byłoby to 29 klas, każda klasa wskazująca jedną z osób biorących udział w eksperymencie. Wyniki klasyfikacji należałoby wówczas przedstawić w postaci macierzy pomyłek. Czy zaprezentowanie takiej macierzy w rozważanym problemie identyfikacji osób byłoby celowe i czy pozwoliłoby uzyskać dodatkowe informacje o potencjalnych ograniczeniach opracowanej metody?

Podsumowanie

Podsumowując należy stwierdzić, że zarówno zagadnienie badawcze, jak i motywacja podjętych badań, stanowią istotne atuty rozprawy. Autorka rozprawy **prezentuje wysoki poziom ogólnej wiedzy teoretycznej w dyscyplinie Informatyka techniczna i telekomunikacja**, oraz szczegółową wiedzę i umiejętność stosowania metod w zakresie przetwarzania sygnałów i uczenia maszynowego. Tezy prezentują znaczącą wartość poznawczą, odnosząc się do kluczowych zagadnień związanych z celem rozprawy, a przedstawione wyniki dowodzą ich prawdziwości. Rozprawa **przedstawia oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych** w szeroko rozumianej sferze gospodarczej. W mojej opinii przedstawiona do recenzji rozprawa spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w Art. 187 Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca

2018 roku. Rozprawę oceniam pozytywnie i wnioskuję o skierowanie jej do dalszych etapów przewodu doktorskiego, w tym o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

Przedstawiona do recenzji rozprawa w znacznym stopniu wykracza poza wymagania stawiane pracom doktorskim. Zgromadzony zbiór sygnałów EEG obejmuje wyjątkowo długi okres prowadzenia akwizycji i może stanowić wartościowy materiał również dla innych kierunków badań związanych z aktywnością ludzkiego mózgu. W rozprawie przedstawiono wszechstronną i dogłębną analizę materiału badawczego co świadczy o solidnym opanowaniu warsztatu naukowego. Ze względu na znaczny i oryginalny wkład tej rozprawy do rozwoju wiedzy naukowej w zakresie pomiarów aktywności ludzkiego mózgu i zastosowania analizy sygnałów encefalograficznych do weryfikacji tożsamości, oraz twórczy rozwój zaawansowanych metod informatyki technicznej, a także ze względu na szerokie możliwości implementacyjne przedstawionych w niej wyników badań, **wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.**

Piotr Szarypan

Bydgoszcz, 16.10.2023

Prof. dr hab. inż. Michał Choraś
Wydział Telekomunikacji, Informatyki i Elektrotechniki
Politechnika Bydgoska im. J.J. Śniadeckich, Bydgoszcz

Recenzja rozprawy doktorskiej

**Weryfikacja tożsamości osób na podstawie widma sygnału EEG i jego
podpasm z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego,**

której Autorką jest Pani

mgr inż. Renata Maria Plucińska

realizowanej na Politechnice Warszawskiej

1. Wprowadzenie.

Niniejsza recenzja rozprawy doktorskiej, której Autorką jest Pani mgr inż. Renata Plucińska, została wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Warszawskiej (Uchwała nr 495/2023 z dnia 23 maja 2023 r.) oraz na podstawie zawiadomienia o wyznaczeniu na Recenzenta w postępowaniu o nadanie stopnia doktora podpisanego przez Przewodniczącego RDN ITT Politechniki Warszawskiej Pana dr hab. inż. Jarosława Arabasa, profesora uczelni (z dnia 1 sierpnia 2023).

Rozprawę odebrałem w dniu 17 sierpnia 2023 r., a recenzję wysłałem w wyznaczonym terminie dwóch miesięcy w październiku 2023 r.

Promotorem niniejszej rozprawy jest Pan dr hab. inż. Konrad Jędrzejewski, prof. uczelni. Nie wyznaczono promotora pomocniczego. Praca doktorska składa się ze streszczenia, spisów, sześciu rozdziałów, czterech dodatków oraz bibliografii.

Niniejsza recenzja (poza wprowadzeniem i wnioskiem) zawiera odpowiedzi na siedem pytań dotyczących rozprawy doktorskiej.

2. Jaki jest problem naukowy (teza) rozprawy? Czy został on trafnie i jasno sformułowany? Jaki charakter ma rozprawa?

Rozprawa, której Autorką jest Pani mgr inż. Renata Plucińska, dotyczy biometrycznych metod rozpoznawania osób. W szczególności, Autorka zajęła się zagadnieniem

weryfikacji tożsamości na podstawie cech biometrycznych zawartych w pozyskanych sygnałach elektroencefalograficznych (EEG).

Głównym efektem i rezultatem prac Autorki jest opracowanie własnych metod weryfikacji tożsamości osób w oparciu o cechy spektralne sygnału EEG, które pomimo dziennych i długookresowych wahań w sygnale EEG zapewniają wysoką wartość dokładności oraz innych miar statystycznych klasyfikacji. W pracy wykorzystano także znane metody uczenia maszynowego, w tym sieci neuronowe.

Niniejsza praca naukowa ma charakter teoretyczny oraz koncepcyjno-eksperymentalny.

Problemy naukowe rozprawy zostały dość jasno i trafnie sformułowane, a także rozwiązane przez Autorkę.

Tezy rozprawy znajdują się w rozdziale 1.4 na stronie 19. Autorka zdecydowała się postawić aż cztery tezy do weryfikacji w niniejszej rozprawie. Moim zdaniem teza pierwsza jest tezą główną rozprawy, a tezy 2-4 dotyczą już parametrów głównej tezy, rozwiązania i ewentualnie opracowanego systemu.

Teza pierwsza do pewnego stopnia (zabrakło praktycznego zastosowania lub przypadku użycia) została potwierdzona przez Autorkę pracy w dalszych częściach rozprawy; dodatkowe tezy także zostały potwierdzone.

3. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle? Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

Analiza literatury została przeprowadzona w Rozdziale 2 „Elektroencefalografia” oraz w Rozdziale 3 „Zastosowanie elektroencefalografii w biometrii”. Rozdział drugi jest ogólnym wstępem do Elektroencefalografii, w tym sposobów rejestracji, pozyskiwania, analizy oraz charakterystyk sygnałów EEG. Uważam ten rozdział za odpowiednio napisany oraz potrzebny w pracy.

Rozdział 3 to już typowy przegląd literatury przedmiotu wprost dotyczącej tematyki rozprawy (od Rozdziału 3.3 dotyczącego EEG w biometrii). Przegląd nie jest zbyt długi, co wynika z małej popularności analizowanej metody biometrycznej. Dlatego w rozdziale brakuje mi szerszej analizy metod biometrycznych, oraz dyskusji na temat skuteczności i wykorzystania metod tzw. „*soft biometrics*”. Brakuje także krytycznego przeglądu literatury oraz analizy aktualnych trendów w biometrycznym rozpoznawaniu osób.

Sama bibliografia zawiera odpowiednią liczbę źródeł (119), ale w pracy zabrakło szerszej analizy trendów oraz krytycznej oceny stanu wiedzy przedstawionego w wykorzystanych pracach.

4. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia? Czy użył do tego właściwych metod dowodząc, że posiadał umiejętności związane z metodyką i metodologią prowadzenia badań naukowych? Czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Generalnie, Autorka w sposób odpowiedni rozwiązała problemy, których dotyczy rozprawa. Autorka posiada wiedzę dot. zagadnień związanych z systemami biometrycznymi. Autorka posiada bogatą wiedzę dotyczącą ewaluacji (w tym systemów biometrycznych) oraz analizy sygnałów EEG.

Przyjęte założenia są uzasadnione i merytorycznie poprawne, pomimo iż Autorka nie zaproponowała zbyt wielu własnych rozwiązań oraz cech/metod.

Teza rozprawy została dowiedziona, ale zabrakło konkretnego zastosowania czy prawdziwych przypadków użycia zaproponowanej metody biometrycznej.

Autorka bardziej zaangażowała się w część eksperymentalną rozprawy, niż w część ściśle naukową polegającą na propozycjach nowych metod, cech czy rozwiązań. Świadczy także o tym balans między rozdziałami, gdzie Rozdział 4 (własne metody, propozycje) jest dość krótki, a jego znaczną część zajmuje opis od dawna znanych elementów uczenia maszynowego. Natomiast Rozdział 5 jest bardzo bogaty i na słowa pochwały zasługują bogate i dobrze zaprojektowane eksperymenty oraz część rozprawy polegająca na zebraniu danych. Niestety, brakuje jakiegokolwiek odniesienia do praktycznego zastosowania metody oraz projektu systemu odnoszącego się do tego zastosowania (np. kontrola dostępu do konkretnego miejsca, itp.).

Autorka posiada duże umiejętności oraz wiedzę teoretyczną w konstruowaniu, analizie oraz wykorzystywaniu metod ewaluacji systemów biometrycznych.

5. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu nauki reprezentowanych przez literaturę światową?

Głównymi osiągnięciami rozprawy oraz propozycjami Autorki są między innymi:

- opracowane własnej metody weryfikacji tożsamości osób w oparciu o cechy spektralne sygnału EEG, które pomimo dziennych i długookresowych wahań w sygnale EEG zapewniają wysoką wartość dokładności oraz innych miar statystycznych klasyfikacji,
- zbadanie wpływu podziału danych na zbiory treningowe i testowe na efektywność weryfikacji tożsamości osób na podstawie sygnału EEG,
- wykazanie, że wyrażenie widmowej gęstości mocy w skali decybelowej znacząco poprawia jakość weryfikacji tożsamości osób w stosunku do zastosowania innych metod skalowania widma bądź ich braku,

- zbadanie i dobór minimalnego zestawu podpasm widma sygnału EEG, który umożliwi uzyskanie parametrów weryfikacji tożsamości na podobnym poziomie jak dla całego rozpatrywanego pasma sygnału EEG,
- analiza wpływu pojedynczych oraz wybranych zestawów elektrod na dokładność weryfikacji tożsamości osób, w szczególności przeprowadzenie badań na zbiorze sesji testowych, odbywających się w innych dniach niż sesje treningowe,
- zbadanie wpływu liczby sesji treningowych na miary jakości weryfikacji tożsamości osób,
- analiza skuteczności zaproponowanych metod weryfikacji tożsamości osób oraz sprawdzenie ich odporności na zasymulowany atak intruzów,
- przeprowadzenie badań z wykorzystaniem sygnałów zarejestrowanych w trakcie dwudziestu sesji pomiarowych EEG dla każdej z osób.

Autorka wykonała szereg testów i prac eksperymentalnych w celu zbadania i porównania zaproponowanej metody biometrycznej, wkładając bardzo dużo pracy w tę część rozprawy oraz prezentując bogaty zestaw wyników i porównań (Rozdział 5 niniejszej rozprawy).

Autorka (we współpracy z Instytutem Biologii Doświadczalnej PAN im. Marcela Nenckiego) zgromadziła zbiór danych sygnałów EEG, co jest ważnym elementem rozprawy. Niestety w Rozdziale 4.1 „Opis analizowanego zbioru rejestracji sygnałów EEG” nie ma informacji czy zbiór został opublikowany, czy jest otwarty, ani informacji na temat udostępnienia tego zbioru dla innych badaczy. Udostępnienie zbioru byłoby ważnym elementem rozprawy i zwiększyło widoczność prac Autorki.

6. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników? Jaka jest poprawność redakcyjna rozprawy?

Niniejsza rozprawa stanowi przykład profesjonalnie przygotowanej pracy doktorskiej. Praca napisana jest na wysokim poziomie edycyjnym oraz graficznym.

W pracy występują oczywiście drobne usterki, literówki i błędy językowe, ale jest ich niewiele i nie są znaczące. W pracy zdarzają się typowe dla doktorantów błędy dotyczące przedstawiania informacji na Rysunkach, itp.. Dla przykładu Rysunek 27 przedstawiający wyniki dla różnych liczb neuronów w warstwie ukrytej jest w innej skali niż Rysunek 30, co znacząco utrudnia porównanie.

Praca jest przemyślana i ma dobrą strukturę oraz układ. Z mojej perspektywy jednak, układ pracy utrudnia porównywanie wyników, gdyż wyniki znajdują się w różnych podsekcjach, poprzeplatane opisami. Zebranie i podsumowanie wyników badań w jednym podrozdziale poprawiłoby ich czytelność oraz łatwość ich porównania.

Drobne usterki nie zmieniają ogólnej opinii o bardzo dobrym i profesjonalnym poziomie językowym i edycyjnym rozprawy.

7. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Rolą recenzenta jest zauważenie ewentualnych niedociągnięć i mankamentów przedstawianej pracy, oraz zgłoszenie uwag, które mogą być pomocne i przydatne w dalszych pracach.

Uwagi krytyczne to między innymi:

- Brak odniesienia (we wstępie, propozycji metody, badaniach czy podsumowaniu) do jakiegokolwiek praktycznego zastosowania niniejszej metody. W pracy zabrakło podrozdziału chociażby o teoretycznych przypadkach użycia czy wykorzystania metody biometrycznej. Dlatego ciężko całkowicie potwierdzić główną tezę pracy, gdyż powinna mieć ona odzwierciedlenie w praktyce (choćby na niskim poziomie TRL i niekoniecznie w warunkach produkcyjnych/rzeczywistych).
- W pracy zabrakło szerszej dyskusji na temat ograniczeń proponowanej modalności biometrycznej i wykorzystania EEG w praktyce. Rozdział 6.2 dotyczący ograniczeń zawiera jedynie szczegółowe ograniczenia proponowanej metody oraz sposobu przeprowadzenia i porównywania rezultatów.
- Kontynuując wątek dot. Rozdziału 6.2. „Ograniczenia”: Autorka odnosi się do kwestii kłopotu z porównaniem z podobnymi metodami. Zabrakło dalszej szczegółowej analizy różnic pomiędzy znalezionymi w literaturze podejściami, a propozycjami Autorki. Zabrakło także własnej propozycji ustandaryzowanego podejścia do walidacji (tak by umożliwić adekwatne porównania w przyszłości). Należałoby również wyraźnie określić przewagi wyjątkowego podejścia zaproponowanego przez Autorkę, by zainspirować przyszłych badaczy do podjęcia tego sposobu zbierania danych (wiele sesji w różnych dniach, itp.) Oczywiście rozumiem, że te „życzenia” Recenzenta mogły być już poza zakresem lub terminem niniejszej rozprawy.
- Badania prowadzone są na bardzo specyficznym zbiorze danych, który może nie być reprezentatywny w szerszym ujęciu. Zabrakło szerokich badań i testów na standardowych bazach danych.
- W części poświęconej opisowi zbioru danych (str. 44) nie jest oznaczone, czy pomiary miały miejsce o tych samych czy o różnych porach dnia. Nie zaadresowano też wspomnianej w pracy kwestii stanu psychicznego osoby (wzburzenie, stres, stan emocjonalny, itp.), co może mieć wpływ na zarejestrowany sygnał EEG i w konsekwencji na wyniki weryfikacji (a jest to typowa sytuacja dla metod i modalności behawioralnych oraz tzw. *soft biometrics*).
- W pracy podany jest jedynie średni wiek (28,17), przez co trudno określić, czy zbiór jest zbalansowany, czy jednak nie. Średnia wieku najmłodszej i najstarszej osoby to 33.5 lat. Najmłodsza badana osoba jest odległa od średniej całego zbioru

o 5 lat, najstarsza o 16 lat, co sugeruje tzw. '*bias*' na osoby młodsze, a co za tym idzie użycie metryki '*accuracy*' może nie oddawać rzeczywistych osiągnięć klasyfikatorów.

- W części opisującej zbiór danych brakuje także danych statystycznych: średniej, mediany, odchylenia standardowego, wariancji, itd.
- Nie umieszczono informacji czy pozyskany zbiór danych biometrycznych został opublikowany, czy jest otwarty, ani informacji na temat sposobu udostępnienia tego zbioru dla innych badaczy.
- Wykorzystywana w pracy sieć neuronowa nie jest w pełni opisana. Nie jest jasne jaki wykorzystano algorytm optymalizacji. Nie podano istotnych parametrów takich jak: liczba epok, parametr '*batch size*', itp.. Nie podano motywacji dotyczącej wyboru użytej architektury ani procedury wyłaniania hiperparametrów.
- Dodatkowo z opisu wynika, że na warstwie wyjściowej są dwa neurony, gdzie cytując: "Jeden z neuronów wyjściowych miał za zadanie określać, czy dana osoba jest tą, którą sieć uczyła się rozpoznawać, drugi, że nią nie jest." Czy w takiej sytuacji drugi neuron nie jest zbędny? (jeden neuron może przekazać te informacje (wartość 1 - jest, 0 - nie jest)).
- W pracy nie zawarto dyskusji na temat ewentualnych problemów związanych z etyką wykorzystania opisywanej technologii.
- Układ pracy utrudnia porównywanie wyników, ponieważ wyniki znajdują się w różnych podsekcjach, przeplatane opisami. Zebranie wyników badań w jednym rozdziale poprawiłoby ich czytelność i porównywalność
- W pracy brakuje informacji na temat istotności statystycznej różnic między wynikami, parametrami.

Pomimo powyższych uwag (często natury dyskusyjnej lub dotyczącej życzeń recenzenta) generalnie bardzo pozytywnie oceniam dobór tematu, bardzo przemyślaną i formalnie poprawną rozprawę oraz przede wszystkim dużo pracy Doktorantki nad częścią eksperymentalną niniejszej rozprawy oraz pozyskaniem zbioru danych.

Warto zauważyć, że Doktorantka jest także współautorką kilku artykułów naukowych dotyczących tematyki niniejszej rozprawy (prace te są uwzględnione w Bibliografii (np. pozycje [58]-[63])).

8. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Praca dotyczy bardzo aktualnych i potrzebnych zagadnień nowoczesnej informatyki technicznej i telekomunikacji, a w szczególności metod biometrycznej identyfikacji osób, w tym z wykorzystaniem mniej popularnych modalności oraz metod tzw. *soft biometrics*.

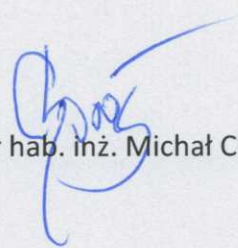
Niniejsza rozprawa i przedstawione metody mogą być szczególnie interesujące i przydatne dla komercyjnych i publicznych podmiotów wykorzystujących systemy rozpoznawania osób.

Ponadto, być może, zaprezentowane w pracy metody mogą znaleźć zastosowanie w naukach medycznych oraz społecznych (badanie stresu, psychologia), itp.

9. Wniosek

Biorąc pod uwagę przedstawioną przez Doktorantkę rozprawę stwierdzam, że recenzowana praca **spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim** przez obowiązujące przepisy.

Dlatego wnoszę o przyjęcie niniejszej rozprawy i **dopuszczenie** mgr inż. Renaty Marii Plucińskiej do publicznej obrony.


Prof. dr hab. inż. Michał Choraś



Prof. dr hab. inż. Khalid Saeed
Wydział Informatyki
Politechnika Białostocka
ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok
Tel. (+48-85) 746 9196
k.saeed@pb.edu.pl

Rada Naukowa Dyscypliny
INFORMATYKA TECHNICZNA
I TELEKOMUNIKACJA

Sekretariat

Data wpływu 23.10.2023 r.
Numer.....

Białystok, 16.10.2023 r.

**RECENZJA rozprawy doktorskiej
mgr inż. Renaty Marii Plucińskiej**

z Wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych
Politechniki Warszawskiej

zatytułowanej "Weryfikacja tożsamości osób na podstawie analizy
widma sygnału EEG i jego podpasm z wykorzystaniem metod
uczenia maszynowego"

Promotor:

dr hab. inż. Konrad Jędrzejewski, prof. uczelni
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
Politechnika Warszawska

Niniejszą recenzję przygotowałem na zlecenie zawarte w piśmie, które otrzymałem od Profesora Jarosława Arabasa przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Warszawskiej. Recenzję dokonałem na podstawie dostarczonej mi rozprawy doktorskiej dnia 21.08.2023.

I. Wstęp – omówienie i ocena zawartości rozprawy

Celem rozprawy doktorskiej mgr inż. Renaty Plucińskiej i umieszczonych w niej badań naukowych było opracowanie nowych rozwiązań zwiększających jakość weryfikacji tożsamości osób na podstawie ich sygnału EEG. Autorka postawiła cztery ważne tezy - najważniejsza z nich to, zdaniem recenzenta, eksperymentalne udowodnienie możliwości opracowania podejścia do weryfikacji tożsamości osób na podstawie analizy widmowej sygnału EEG z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego, niezależnej od dziennych lub długookresowych zmian w sygnale.

Rozprawa zawiera 144 strony tekstu, rysunków i tabel, składa się z sześciu rozdziałów, bibliografii oraz czterech dodatków zawierających istotne i ważne tabele uzupełniające materiały z rozdziału 5. Doktorantka podaje na początku manuskryptu wykazy skrótów i najważniejszych symboli stosowanych w rozprawie, która ma charakter raczej doświadczalny.

Rozdział pierwszy to wprowadzenie do tematyki pracy, w którym doktorantka wyjaśnia biometryczne podejścia do weryfikacji tożsamości osób. Dodatkowo opisuje sygnał EEG jako cechę biometryczną oraz dokładnie analizuje jego szczególne cechy. Tu również podano cel i tezy rozprawy doktorskiej. Tezy są jasno sformułowane.

Rozdział drugi pracy przedstawia sposób powstania sygnału EEG, charakterystykę i rytm oraz metody akwizycji tego sygnału.

Rozdział trzeci zawiera podstawowe pojęcia biometrii i metody oceny jakości klasyfikacji oraz szczegółowy przegląd metod rozpoznawania człowieka na podstawie jego sygnału EEG. Ponadto autorka wykazała się dobrą znajomością tematyki dotyczącej sygnału EEG, przeanalizowała ponad 60 prac dotyczących sygnału EEG.

W *rozdziale czwartym* przedstawiono metody przetwarzania sygnału EEG – zbiór rejestracji, wstępne przetwarzanie i ekstrakcję cech. Opisano również stosowane w rozprawie metody maszynowego uczenia z nadzorem – drzewa decyzyjne, metody KNN, SVM oraz ANN. Podano tu wybrane z literatury metody, które wykorzystwała autorka w swoich badaniach w obliczaniu wymaganych parametrów oraz elementów wektora cech. W rozdziale tym oczekiwałem własnego podejścia doktorantki, którego niestety brak. W zamian, w rozdziale piątym, jest obszerny opis sposobu wykorzystywania innych podejść z analizą przykładów i tabel.

W *rozdziale piątym* doktorantka pokazuje opis przeprowadzonych badań oraz ich wyniki. Ten rozdział jest obszerny i stanowi najważniejszą część rozprawy – przeprowadzono analizy na dużym zbiorze rejestracji sygnałów EEG, w którym dla każdej z osób nagrano po 20 sesji pomiarowych rejestrowanych na przestrzeni wielu dni. Każda z sesji była rejestrowana innego dnia. Przeprowadzenie analiz na zbiorze zawierającym tyle sesji pomiarowych, wykonanych w różnych dniach, dla wielu osób, wyróżnia się na tle innych prac przedstawionych w literaturze. Do tego rozdziału należą również tabele umieszczone w dodatkach A, B, C i D z danymi dotyczącymi dodatkowych wyników prac.

Część merytoryczną zamyka *rozdział szósty*, który opisuje i podsumowuje przeprowadzone badania, ich wyniki oraz wnioski końcowe. Doktorantka w tym rozdziale podaje również ograniczenia, jakie zaistniały podczas realizacji swoich tez oraz przedstawia kierunki dalszych badań.

Ciekawą cechą manuskryptu jest to, że każdy rozdział kończy się podsumowaniem, gdzie autorka podaje streszczenie rozdziału oraz najważniejsze wnioski o badaniach i ich wynikach w danym rozdziale.

Całość pracy kończy *bibliografia*, która zawiera 119 pozycji, a 8 z nich to współautorstwo doktorantki. Dobór literatury świadczy o szczegółowej wiedzy doktorantki w badanym obszarze naukowym, co oceniam pozytywnie.

Brakuje mi jednak oddzielnego rozdziału, jak wspomniałem, poświęconego własnym metodom i podejściom autorki, o których jest mowa w jej założeniach i które były niezbędne do realizacji tej rozprawy. Doktorantka pisze o wkładzie własnym (cytat ze str. 19 rozprawy doktorskiej autorki): *„Poniżej przedstawiono oryginalny wkład autorki w dziedzinie weryfikacji tożsamości osób na podstawie sygnału EEG i wymienia między innymi: opracowanie metod weryfikacji tożsamości osób w oparciu o cechy spektralne sygnału EEG, które pomimo dziennych i długookresowych wahań w sygnale EEG zapewniają wysoką wartość dokładności oraz innych miar statystycznych klasyfikacji,”*.

Niemniej jednak w analizach przedstawionych w rozprawie wykorzystywane znane metody obliczeniowe zostały łączone ze sobą w jasny sposób przy weryfikacji tożsamości osób na podstawie sygnału EEG. Jako przykład zaproponowano, by wyekstrahowane cechy sygnału EEG będące współczynnikami widma gęstości mocy wyrażać w skali decybelowej. Prowadzi to do uwypuklenia składowych sygnału o niskich energiach. Umożliwiło to doktorantce uzyskanie lepszych wyników w porównaniu do innych znanych z literatury metod normalizacji sygnału.

II. Ogólna ocena pracy

Rozprawa doktorska mgr inż. Renaty Plucińskiej przedstawia wkład doktorantki w rozwój metod weryfikacji tożsamości osób na podstawie analizy widmowej sygnału EEG z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego. Autorka eksperymentalnie pracowała nad metodami poprawienia jakości weryfikacji tożsamości osób na podstawie ich sygnału EEG. Rozdział 5. w całości poświęcony jest wynikom różnych i obszernych badań doktorantki w zakresie analizy sygnału EEG, a w szczególności jako cechy biometrycznej do weryfikacji osób w pewnych sytuacjach życiowych.

Według mojej oceny temat pracy autorki jest aktualnym kierunkiem badań naukowych. Dostatecznie popularne są zastosowania sygnału EEG w interfejsach mózg-komputer umożliwiającymi między innymi sterowanie urządzeniami za pomocą myśli. Doktorantka osiągnęła wyznaczony cel rozprawy doktorskiej, który wnosi ważne aspekty do nauk technicznych w zakresie informatyka. Doktorantka wykazała się dobrą znajomością technik i metod analizy sygnału EEG w celu weryfikacji człowieka. Cytowana literatura jest interesująca, starannie i prawidłowo dobrana. Praca prezentuje szeroką wiedzę, jaką posiada doktorantka z zakresu biometrycznego rozpoznawania tożsamości osób za pomocą analizowanego sygnału EEG. Ważnym wkładem badań własnych

doktorantki, poza tymi wymienionymi powyżej, jest zbadanie wpływu liczby sesji treningowych pozwalających na określenie najmniejszej liczby sesji potrzebnej do przeprowadzenia weryfikacji. Również istotnym badaniem było analizowanie wpływu sposobu podziału danych na zbiory treningowe i testowe na otrzymywany wynik weryfikacji tożsamości osób na podstawie sygnału EEG.

Praca została napisana poprawnym językiem. Rysunki i schematy blokowe oraz tabele i inne ilustracyjne materiały są klarowne i dobrze wyjaśniają ich cel.

Pomimo wysiłków autorki, aby praca prezentowała jej osiągnięcia w sposób klarowny, można niestety zauważyć pewne niewielkie usterki, które wymieniam poniżej:

- Ponieważ rozprawa doktorska dotyczy dyscypliny informatyka, uważam, że metodologie doktorantki powinny mieć raczej opis i charakter algorytmiczny. W pracy brakuje algorytmów, jak również implementacji komputerowej, przynajmniej w ramach konkretnego środowiska obliczeniowego. Być może wynika to jednak z faktu, iż praca miała mieć charakter eksperymentalny.
- W czwartym rozdziale *Opis wykorzystywanych metod przetwarzania sygnału EEG* nie podano kolejnych etapów przetwarzania sygnału, w większości nie podano, jakie narzędzia były stosowane, jak parametry zostały obliczane, jak wygląda, najważniejszy do wykonania klasyfikacji, wektor cech, (Rys. 15. *Segmentacja danych*).
- Podrozdział 3.3 nosi tytuł "*Analiza sygnału EEG jako źródła cech biometrycznych*". Jest to sprzeczne z podrozdziałem 1.2, gdzie sygnał EEG jest zdefiniowany jako cecha biometryczna. Moim zdaniem lepszym rozwiązaniem byłoby zostawić sygnał EEG jako cechę biometryczną, która staje się źródłem punktów charakterystycznych i/lub elementów niezbędnych do sformułowania wektora cech.
- Ważną informację podano na str. 39 o zastosowaniach sygnału EEG - "*Potencjalnych zastosowań sygnału EEG do biometrycznej weryfikacji tożsamości osób można szukać między innymi w systemach:*". Jednak nie ma odpowiedniego cytatu do źródeł informacji. Jeżeli uważa doktorantka to za swoje własne wnioski i osiągnięcia, to na pewno warto byłoby rozszerzyć i nadmienić jako wyniki swoich własnych badań i obserwacji.
- Na str. 47. podano zbędne informacje o *Transformacie Fouriera* oraz *Szybkiej Transformacie Fouriera*.
- Tabela 9. pokazuje średnie wyniki miar jakości klasyfikacji. Najwyższe średnie miary skuteczności osiągnięto dla całego pasma oraz zestawu " $\delta + \alpha + \beta + \gamma$ " - 97,8. Natomiast niższe dla zestawu fal ($\theta + \alpha + \beta + \gamma$) - 97,5. Dla pojedynczych fal θ skuteczność to $88,5 \pm 0,8$ a dla samych fal δ $82,3 \pm 3,4$. Wydaje się więc, że fale θ niosą wyższą informację biometryczną, a jest odwrotnie. Co może być przyczyną? Dlaczego zmiana fal δ (dających

samodzielnie gorsze wyniki) na fale θ (dające samodzielnie lepsze wyniki) w zestawie fal ($X+\alpha+\beta+\gamma$) pogarsza metryki?

- Z drugiej strony na Rys. 8 przedstawiono fale θ , a na Rys. 11 falę γ . Fala γ posiada znacznie bardziej zaszumiony przebieg. W przypadku systemu biometrycznego opartego o sygnały fali γ osiągnięto skuteczność $91,7\pm 2,0$ a dla fali θ $88,5\pm 0,8$ (Tabela 9, strona 80). Raczej można było spodziewać się odwrotnego wyniku. Proszę o wyjaśnienie tego zjawiska lub przynajmniej rozszerzenie opisu rysunku.
- Str. 75., autorka pisze *"Duże różnice zaobserwowano w długości czasu nauczania sieci, który był ponad pięćset razy dłuższy dla sieci z dwudziestoma neuronami ukrytymi niż dla sieci z jednym neuronem ukrytym"*. Jest to całkowicie typowe dlatego, że na liczbę parametrów sieci wpływa nie liczba neuronów, a liczba połączeń między neuronami z biasem.
- Na str. 76-77, zrozumiałe jest, że przy niewielkiej liczbie sesji uczącej wyniki będą miały miejsce małe miary skuteczności. Ponadto dość intuicyjne jest to, że np. przy 2 sesjach uczących dodanie sesji nr 3 (wzrost o 50 % liczebności zbioru treningowego) może wprowadzić pewne perturbacje, a nawet spadek skuteczności, jak na Rys. 36. Nie jest jednak jasne, co stało się w przypadku sesji nr 10, dla której miary skuteczności spadły jak np. na Rys. 34. Dodanie sesji 10. to wzrost zbioru uczącego o około 11 %, mimo to obserwowane jest pogorszenie. Czy sesja nr 10 ma coś specyficznego, jakie mogą być przyczyny tego spadku? Proszę o wyjaśnienie znanych dla autorki przyczyn takiego stanu rzeczy.

III. Merytoryczne osiągnięcia Doktorantki oraz Jej publikacje

Wkład autorki rozprawy w zagadnienie weryfikacji tożsamości osób na podstawie ich sygnału EEG jest znaczny. Świadczą o tym prace naukowe opublikowane w czasopiśmie i materiałach konferencji międzynarodowych. Pani mgr inż. Renata Maria Plucińska jest współautorką 9 różnych publikacji – 5 referatów opublikowanych w materiałach konferencyjnych oraz trzech artykułów naukowych w recenzowanych czasopiśmie i jednego artykułu w recenzji. Tematyka pracy inżynierskiej i magisterskiej była związana bezpośrednio z sygnałem EEG oraz jego zagadnieniami. Dodatkowo, doktorantka napisała pracę dyplomową licencjacką z kognitywistyki, również w ramach tematyki EEG.

IV. Wnioski końcowe

Wystawiam ocenę pozytywną rozprawie doktorskiej wykonanej przez panią mgr inż. Renatę Marię Plucińską pt. *"Weryfikacja tożsamości osób na podstawie analizy widma sygnału EEG i jego podpasm z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego"*. Stwierdzam również, iż mimo wymienionych powyżej niedociągnięć, praca spełnia wymagania i warunki nakładane przez ustawę o stopniach naukowych. Rozprawa stanowi nowe rozwiązanie problemu

naukowego oraz osobisty wkład Doktorantki w rozwój metod poprawienia jakości weryfikacji tożsamości osób na podstawie ich sygnału EEG.

Na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie Autorki wymienionej rozprawy doktorskiej do jej obrony w celu uzyskania stopnia doktora nauk technicznych w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja.



Khalid Saeed