

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 tożsamość. 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 podpasem 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 zapewniłaby uzyskanie wysokich miar oceny jakości klasyfikacji, w szczególności dokładności i swoistości.*
- 2. Możliwa jest redukcja liczby analizowanych podpasem 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 podpasem 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 podpasem 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 niepoważalność 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 podpasem** 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 odsyła 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 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