

21 sierpnia 2020 r.

prof. dr hab. inż. Paweł Strumiłło
Instytut Elektroniki
Politechniki Łódzkiej

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
DLA RADY DYSCYPLINY INFORMATYKA TECHNICZNA I TELEKOMUNIKACJA
UNIwersytetu Zielonogórskiego

Tytuł rozprawy: *Sztuczne sieci neuronowe w analizie sygnałów biomedycznych*

Autor rozprawy: mgr inż. Grzegorz Rutkowski

Promotor: dr hab. inż. Krzysztof Patan, prof. UZ

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Artur Gramacki, prof. UZ

I. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy /teza rozprawy/ i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora?

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska dotyczy zastosowania sztucznych sieci neuronowych do analizy sygnału elektroencefalograficznego (EEG), a szczegółowym celem pracy jest opracowanie systemu diagnostycznego do wykrywania napadów epileptycznych na podstawie zapisów EEG.

W rozdziale wstępnym rozprawy wskazano na dużą skalę zapadalności na padaczkę szacowaną w Polsce na ok. 400 tys. osób. Określono zapisy sygnału EEG jako podstawowe źródło informacji o czynności bioelektrycznych mózgu i zaburzeń tej czynności związanych z napadami padaczkowymi. Zapis EEG interpretowano początkowo na drodze oceny wizualnej przebiegu sygnału i zdefiniowano elementarne składowe sygnału EEG nazywane grafoelementami. Obecnie rozwinęły się techniki komputerowego przetwarzania i analizy sygnału EEG, w szczególności techniki, w których wykorzystuje się metody uczenia maszynowego. Autor podał krótki przegląd wyników badań w tym obszarze wskazując jednak na przeważającą liczbę prac koncentrujących się na tzw. analizie off-line sygnału EEG. Cel naukowy badań podjętych przez Autora dotyczy analizy on-line, tj. analizy sygnału prowadzonej na bieżąco podczas jego rejestracji. W tym miejscu należy zwrócić uwagę na zbyt ogólny tytuł pracy zapisany w brzmieniu: *Sztuczne sieci neuronowe w analizie sygnałów biomedycznych*. Tematyka pracy dotyczy jednak wyłącznie sygnału EEG, a nie ogólnie sygnałów biomedycznych. Ponadto Autor koncentruje się też na wykrywaniu krótkotrwałych napadów padaczkowych na podstawie zapisu EEG. W tym kontekście teza pracy jest zdefiniowana bardziej konkretnie, do której odniosę się w dalszej części recenzji.

II. Czy tematyka rozprawy jest aktualna lub dostatecznie ważna?

Rozwój technik obrazowania medycznego (rentgenowska tomografia komputerowa i tomografia rezonansu magnetycznego) umożliwił diagnozę wielu trudnych do wykrycia schorzeń mózgu, m.in. guzów mózgu. Jednak w odniesieniu do zaburzeń funkcjonalnych mózgu prowadzących do ataków padaczkowych elektroencefalografia nadal jest podstawową techniką diagnostyczną. Szacuje się, że ok. 1% społeczeństwa choruje na padaczkę, a u prawie 65% pacjentów padaczka nie jest rozpoznawana. Należy podkreślić, że osoby cierpiące na padaczkę są narażone na zwiększone ryzyko śmierci. Wiadomo, że podłożem padaczki są zaburzenia czynności bioelektrycznej mózgu natomiast jej przyczyny są różnorakie i nie wszystkie odpowiednio zbadane. Zatem tematyka podjęta w niniejszej rozprawie jest ważna i aktualna.

III. Czy autor rozwiązał postawiony problem i czy użył to do tego właściwych metod?

Autor wyraźnie określił cel pracy koncentrujący się na wykrywaniu napadów padaczkowych krótkotrwałych wykonywanych w trybie on-line. Osiągnięcie tego celu poprzedził zastosowaniem wielu różnych metod przetwarzania i analizy sygnałów EEG.

Autor zbadał skuteczność następujących technik obliczeniowych ukierunkowanych na wykrywanie napadów padaczkowych w trybie off-line i on-line:

- statystyczne metody analizy sygnału EEG, m.in. testowanie odchylenia standardowego sygnału, testowanie sumy skumulowanej, analiza entropii przybliżonej, zastosowanie metody PRMS (ang. *pattern match regularity statistics*), analiza składowych głównych,
- metody parametryzacji sygnału, m.in. przekształcenia transformacyjne, w tym przekształcenie Fouriera i krótkookresowe Fouriera, Falkowa, Stockwella, modele autoregresji, poszukiwanie dopasowujące (ang. *matching pursuit*),
- klasyfikatory danych (liniowa dyskryminacja Fishera, naiwny klasyfikator Bayesa, klasyfikator k-najbliższych sąsiadów, nieliniowa maszyna wektorów nośnych, perceptron wielowarstwowy),
- głębokie sieci neuronowe (m.in. sieci spłotowe, głębokie sieci rekurencyjne).

Jest to bogaty arsenał metod służących do parametryzacji sygnałów i analizy danych, które Autor zastosował do wykrywania napadów padaczkowych na podstawie zgromadzonych zapisów EEG. Autor szczegółowo opisuje badania z wykorzystaniem tych metod i prezentuje szczegółowy wykaz wyników tych badań. W wielu miejscach opisy podstaw teoretycznych zastosowanych metod mają charakter podręcznikowy i wydają się zbyt szczegółowe.

Dla trybu off-line wykrywania napadów padaczkowych najlepsze wyniki Autor uzyskał dla perceptronu wielowarstwowego oraz parametrów sygnału w postaci entropii dla składowych widmowych wyznaczonych na podstawie przekształcenia Stockwella (czułość: 99,7%, specyficzność: 98,6% i dokładność: 99,1%).

Natomiast dla trybu on-line wykrywania napadów padaczkowych dla sygnałów EEG z zastosowaniem sieci głębokich Autor uzyskał wskaźnik czułości wykrywania napadów

w zakresie 20%–100% oraz wskaźnik specyficzności w zakresie 27,7%–100%, przy czym u 33 pacjentów uzyskano 100% skuteczność wykrywania napadów padaczkowych.

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

Za główny oryginalny wkład Autora do dyscypliny informatyka techniczna i telekomunikacja uznają zastosowanie tzw. głębokich sieci neuronowych do wykrywania krótkotrwałych napadów padaczkowych w trybie on-line (podczas gdy większość prac koncentruje się na analizach off-line). Ważnym elementem tego osiągnięcia było utworzenie obszernej bazy danych zapisów EEG rejestrowanych zarówno u pacjentów z napadami padaczkowymi (104 zapisy) jak i u osób zdrowych (71 zapisów). Rejestracje te poddano anotacjom lekarzy z Oddziału Neurologii i Udarów Szpitala Wojewódzkiego w Zielonej Górze.

Autor uzyskał wartościowe wyniki wykrywania napadów padaczkowych w trybie off-line i on-line, trudno natomiast odnieść je do innych doniesień z uwagi na brak odwołań do prac innych badaczy również stosujących głębokie sieci neuronowe do wykrywania napadów padaczkowych. W ostatnich dwóch latach, daje się zauważyć dużą liczbę prac o tej tematyce. Autor jednak nie powołuje się na nie. Należy jednak stwierdzić, że porównanie takie może być trudne z uwagi na różne zapisy w bazach sygnałów EEG stanowiących materiał badawczy.

V. Czy rozprawa świadczy o dostatecznej wiedzy autora i znajomości współczesnej literatury z dyscypliny naukowej, której dotyczy?

W pracy nie wydzielono jednej spójnej części, w której przeprowadzono przegląd stanu badań krajowych i światowych dotyczących wykrywania napadów padaczkowych. Przegląd taki zawarto w części wstępnej pracy, powinien on mieć jednak bardziej obszerną i usystematyzowaną postać. Za taki przegląd nie może też być uznana sekcja 2.5 pt. *Komputerowe systemy do analizy EEG*, która ma objętość niecałej strony. W sekcji tej Autor powołuje się na dwa pakiety komercyjne do analizy EEG, ale nie poddaje ich krytycznej ocenie. W dalszej części tej sekcji w jednym wierszu cytuje 8 pozycji literatury i tylko ogólnie opisuje ograniczenia cytowanych metod. W końcowej części tej sekcji zaś odwołuje się do swoich trzech prac współautorskich opublikowanych w roku 2013.

Liczba pozycji bibliograficznych cytowanych w całej pracy składa się co prawda z 133 pozycji, ale odwołania do tych prac są rozproszone w całym tekście pracy, a ich dyskusja niewystarczająco dogłębna. Czytelnik jest zmuszony do doszukiwania się takiej wiedzy u Autora rozprawy, w wielu jednostkowych stwierdzeniach zamiast otrzymać zwarty tekst obejmujący merytoryczną dyskusję osiągnięć innych badaczy w obszarze tematycznym pracy.

Mając na uwadze sformułowaną tezę pracy, w której Autor postuluje polepszenie jakości diagnozy w stosunku do innych metod dyskusja taka w pracy powinna być przeprowadzona. Zauważalny jest również brak przeglądu pozycji literatury podejmujących tematykę wykrywania napadów padaczkowych z zastosowaniem tzw. głębokich sieci neuronowych (ang. *deep neural networks*). Liczba tych prac w ostatnich kilku latach jest szczególnie liczna.

Proszę Autora rozprawy o uzupełnienie tego przeglądu oraz wskazanie osiągnięcia Autora na tle opublikowanych prac.

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

Za niezbyt mocną stroną pracy uważam sposób prezentacji osiągnięć Autora, poczynając od tytułu pracy, poprzez tezę, a kończąc na układzie pracy.

Jak wspomniano we wstępie recenzji tytuł pracy w brzmieniu: *Sztuczne sieci neuronowe w analizie sygnałów biomedycznych* nie odpowiada zawartości pracy. Z jednej strony jest mowa o zastosowaniu sztucznych sieci neuronowych, podczas gdy Autor stosował również inne metody obliczeniowe. Z drugiej strony tytuł wskazuje na analizę wielu sygnałów biomedycznych podczas gdy osiągnięcia Autora koncentrują się konkretnie na analizie sygnału elektroencefalograficznego i wykrywania napadów padaczkowych.

Mam również uwagi do tezy pracy sformułowanej w brzmieniu:

Wykorzystanie technik sztucznej inteligencji umożliwi zbudowanie wydajnego systemu wykrywania krótkotrwałych napadów padaczkowych, który znacząco polepszy jakość stawianych diagnoz w stosunku do istniejących metod.

Autor zastosował w pracy wiele technik sztucznej inteligencji. Z tezy nie wynika jakie konkretnie techniki sztucznej inteligencji ma na myśli. Można się domyślać, że chodzi o metody uczenia głębokiego, ale proszę Autora o potwierdzenie tego przypuszczenia. W tezie Autor odnosi się również do innych „istniejących metod” – z treści pracy jednak nie wynika jakie konkretnie „istniejące metody Autor miał na myśli”. W pracy wielokrotnie występują odwołania do oceny wizualnej zapisów EEG. Czy właśnie porównanie do tych metod Autor miał na myśli czy też przez inne techniki należy rozumieć inne techniki nieinspirowane obliczeniami inteligentnymi? Uważam, że w tezie powinno znaleźć się zarówno odwołanie do tzw. głębokich sieci neuronowych jak i wykrywania napadów padaczkowych on-line.

Za słabą stroną pracy uważam również jej układ, który jest nietypowy dla pracy doktorskiej. Układ ten mógłby być bardziej odpowiedni dla raportu badawczego, w których referowane są wyniki zastosowania kolejnych technik analizy sygnału elektroencefalograficznego. Dobrze jest opisane wprowadzenie do tematyki rozprawy oraz wskazanie trudnego problemu badawczego dotyczącego wykrywania krótkotrwałych napadów padaczkowych. Przegląd literatury przeprowadzono we wstępie do pracy, podczas gdy przegląd taki powinien stanowić odrębną sekcję pracy. Zabrakło pełniejszego autorskiego przeglądu literatury tematu o czym wspominam w innej części niniejszej recenzji. Z kolei bardziej odpowiednim miejscem dla opisu zapisów EEG zawartych w sekcjach 3.1.1–3.1.5 byłby dodatek pracy.

Uwagi merytoryczne:

1. W rozdziale 3. pracy przeprowadzono niezbyt merytoryczną dyskusję dotyczącą filtracji rejestrowanych sygnałów EEG oraz częstotliwości próbkowania. Jeżeli zastosowano analogowy filtr dolnoprzepustowy w rejestratorze EEG o częstotliwości odcięcia 35Hz to wystarczyło powołać się na twierdzenie o próbkowaniu, które mówi, że częstotliwość

- próbki powinna być co najmniej dwukrotnie większa od składowych sygnału o największej częstotliwości.
2. Amplitudowe widma częstotliwościowe wykreślone na rys. 3.2 przyjmują wartości zarówno dodatnie jak i ujemne podczas gdy widma te wyznaczane jako moduł współczynników Fouriera powinny przyjmować tylko wartości nieujemne.
 3. W niewystarczający sposób uzasadniono przyjęcie trzech kryteriów klasyfikacji zapisów EEG. W kryterium 1. uznaje się za prawidłowo wykryty napad jeżeli wskaźniki czułości i specyficzności osiągają wartości większe niż 50%, w kryterium 2. zapis EEG uznaje się za stan „normalny” jeżeli wskaźnik specyficzności (dla zapisów rejestrowanych u osób zdrowych) jest większy niż 50%, natomiast w kryterium 3. zapis EEG uznaje się za prawidłowo rozpoznany jeżeli wskaźnik dokładności jest większy niż 85%. Proszę Autora o uzasadnienie przyjętych wartości progowych w ww. kryteriach.
 4. Dlaczego krzywe ROC do ceny jakości klasyfikacji danych stosowano tylko dla wybranych metod?

W tekście pracy zauważono bardzo dużą liczbę błędów językowych (m.in. gramatycznych, znaczeniowych i stylistycznych). Poniżej zamieszczono wybór niektórych z bardziej istotnych:

- str. 2: ... *tradycyjne metody zwracają rezultaty* ...
- str. 3: .. *wniosły prace w lat 90* ...
- str. 5: ... *sieci neuronowe udowodniły* ...
- str. 5: ... *systemu* ... *opartego o* ...
- str. 9: ... *filtry niskiej i wysokiej częstotliwości* ...
- str. 9: ... *niska amplitudą* ...
- str. 10: ... *wzmacniaczy zwanych różnicowymi* ...
- str. 10: ... *występujące artefakty odbijają się we wszystkich kanałach* ...
- str. 10: ... *wykonanie badanie EEG spoczynkowego oraz z aktywacją zapisu* ...
- str. 10: ... *w postaci zwolnienia lub zmian amplitudy* ...
- str. 10: ... *napadowe wyladowanie iglic lub fal ostrych* ...
- str. 14: ... *ostrzy potencjał* ...
- str. 15: ... *że, padaczka mogą występować* ...
- str. 18: ... *interpretację szczegółową zapisu EEG przedstawiającą procesy korelacji w przestrzeni neuronowej*
- str. 19: ... *Rytmy te po przez interpretację numeryczną posłużyły jako wzorce do tworzenia systemów diagnostycznych* ...
- str. 19: ... *Problemy wynikające z zastosowania zgromadzonych baz dotyczą postaci dyskretnej dla pojedynczej komórki neuronowej jak i reprezentacji całych sieci neuronowych* ...
- str. 54: ... *za pomocą metody można z łatwością wykrywać* ...
- str. 76: ... *Spektrogramy dla przypadku chorego* ...
- str. 86: ... *sygnał wynikowy będący złożeniem tych funkcji*
- str. 98: ... *słabe wyniki* ...
- str. 98: ... *słabą w dziedzinie częstotliwości* ...

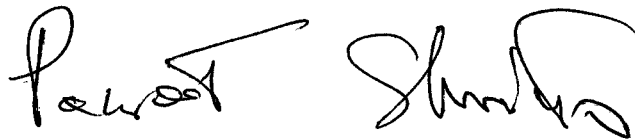
- str. 112: ... *sygnał surowy* ...
- str. 122: ... *świadczy to niskiej rozpoznawalności* ...
- str. 124: ... *najbardziej informatywne oraz nieredundantne cechy z posiadanych danych* ...
- str. 124: ... *możliwości na eliminację tych problemów* ...
- str. 126: ... *strategie zwykle poprawiają wyniku uczenia* ...
- str. 126: ... *mniej deterministycznych, a bardziej dynamicznych rozwiązań* ...
- str. 127: ... *są neuronami z warstwy warstwa redukującej* ...
- str. 128: ... *dodanie tych warstw zwiększaj rozdzielczość obrazu wyjściowego* ...
- str. 129: ... *W rezultacie część ekspansywna sieci jest mniej więcej symetryczna* ...
- str. 129: ... *pierwszego autora przełomowego papieru klasyfikacyjnego* ...
- str. 129: ... *Sieć ta po raz pierwszy udowodniła* ...
- str. 129: ... *analizie obrazów co wyznaczyło wpłynęło na stworzenie* ...
- str. 129: ... *sieć... zwraca bardzo dobre rezultaty* ...
- str. 134: ... *wartościami zerowymi prowadząc do sprawdzając że obie estymaty* ...
- str. 135: ... *Algorytm Ada Grad zachowuje się analogicznie jak algorytm Adam* ...
- str. 139: ... *Każda sekwencja miała długość 300 (3 sekundy)*...
- str. 141: ... *niskiej liczby neuronów* ...
- str. 155: ... *można stwierdzić, że oba podejścia działają całkiem dobrze* ...
- str. 155-156: ... *osiągnęła bardzo wysoki rezultat* ...
- str. 161: ... *jakości jak i precyzji stawianych diagnoz* ...
- str. 161: ... *narzędzi diagnostycznych dedykowanych zastosowaniom klinicznym*...

W pracy korzystnie byłoby zamieścić wykaz skrótów i oznaczeń.

VII. Wniosek końcowy

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska dotyczy analizy sygnału elektroencefalograficznego odwzorowującego aktywność elektryczną mózgu. Autor podjął się trudnego zagadnienia badawczego polegającego na wykrywaniu krótkookresowych napadów padaczkowych. Praca zawiera opis badań, w których Autor zastosował wiele technik obliczeniowych obejmujących przetwarzanie sygnału EEG, transformacje tego sygnału, jego parametryzację oraz metody klasyfikacji odcinków tego sygnału ukierunkowanych na wykrywanie napadów padaczkowych. Większość doniesień literaturowych dotyczy wykrywania napadów w trybie off-line, podczas gdy Autor za cel badań objął wykrywania napadów w trybie on-line. Za oryginalne uważam zastosowanie tzw. głębokich sieci neuronowych do wykrywania takich napadów. Na drodze badań eksperymentalnych Autor dobrał strukturę sieci LSTM (ang. *Long Short-Term Memory*), dla której osiągnął najlepsze wyniki klasyfikacji sygnału EEG, przewyższające inne metody obliczeniowe zbadane w pracy. Pomimo zauważonych niedoskonałości pracy, m.in. układu pracy oraz nieprecyzyjnie sformułowanej tezy, uważam że Autor wniósł oryginalny wkład do dyscypliny naukowej informatyka techniczna i telekomunikacja, w zakresie zastosowania technik sztucznej inteligencji do wgrzywania krótkotrwałych napadów padaczkowych na podstawie zapisów sygnału elektroencefalograficznego.

Tym samym stwierdzam, że przedłożona do recenzji rozprawa doktorska spełnia wymagania Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym z 14 marca 2003 roku, Dziennik Ustaw Nr 65, poz. 595 z późn. zm. oraz Rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 roku w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora. Wnioskuje o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Grzegorza Rutkowskiego do publicznej obrony.

A handwritten signature in black ink, consisting of two parts: 'Paweł' on the left and 'Słomka' on the right. The script is cursive and fluid.