

prof. dr hab. inż. Andrzej Materka
Politechnika Łódzka
Instytut Elektroniki

Recenzja rozprawy doktorskiej
dla Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika
Wojskowej Akademii Technicznej

Tytuł rozprawy: Metoda klasyfikacji źródeł sygnałów elektrycznych emitowanych przez korę mózgową człowieka – sterowanie

Autor rozprawy: mgr inż. Urszula Jagodzińska-Szymańska

Promotor: prof. dr hab. inż. Edward Sędek

Dziedzina: nauki techniczne

Dyscyplina: elektronika

Podstawę niniejszej recenzji stanowią:

- pismo WYCH/N/00031/2020 z 15 stycznia 2020 r. Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika (RDNAEE) Wojskowej Akademii Technicznej (WAT) z załącznikami (rozprawa doktorska, dwie uchwały RDNAEE WAT) wysłane 17 stycznia 2020 r. i dostarczone 21 stycznia 2020 r.,
- Ustawa z 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017, poz. 1789),
- Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim [...] (Dz. U. 2018, poz. 261).

1. Cel badań w odniesieniu do tej rozprawy

Tematyka rozprawy obejmuje zagadnienie konstruowania wybranej klasy interfejsów mózg-komputer (ang. *BCI: Brain-Computer Interface*), których cechą szczególną jest wykorzystanie zmiany sygnałów elektroencefalograficznych wywołanej świadomym wyobrażeniem ruchu kończyn. Autorka rozważa zamysły ruchu ręką lewą i prawą jako alternatywne stany myślowe, którym towarzyszą inne rozkłady przestrzenne aktywności elektrycznej neuronów kory mózgowej.

Ogólnym celem badań opisanych w rozprawie było poszerzenie wiedzy na temat możliwości projektowania i konstruowania interfejsów mózg-komputer pozwalających na sterowanie urządzeń technicznych w czasie rzeczywistym i nie wymagających dużych zbiorów danych do trenowania wbudowanych w te interfejsy klasyfikatorów. Autorka zakłada, że klasyfikatory

A. Materka

wykorzystujące w BCI teorię grafów „mogą być prostą i skuteczną metodą” do osiągnięcia tego celu (str. 8). We Wstępie brakuje uzasadnienia tego oczekiwania – formalnego (z odwołaniem do literatury), albo nawiązującego do powszechnej wiedzy.

Cel szczegółowy i teza rozprawy zostały przedstawione na str. 8 i 9. Celem było opracowanie algorytmów przybliżonej rekonstrukcji sygnałów źródłowych EEG, obliczenia i selekcji cech oszacowanych sygnałów oraz klasyfikacji takich cech. Wynikiem klasyfikacji jest przypisanie wektorowi zmierzonych sygnałów etykiety „K2” (zamiar ruchu lewej ręki) bądź „K3” (zamiar ruchu prawej ręki). Wybór tych symboli do oznaczenia rozważanych stanów elektrycznej aktywności mózgu wyjaśniono pośrednio dopiero na str. 39: zostały one użyte do adnotacji zapisów w bazie Iliap (http://www.bbci.de/competition/iii/desc_V.html) przez jej twórców.

Postawiona hipoteza naukowa (str. 9) jest twierdzeniem, że opracowana metoda przetwarzania sygnałów EEG i klasyfikacji jego cech w interfejsie BCI pozwala na „prawidłowe” rozpoznawanie intencji ruchu ręki lewej albo prawej. Słowo „prawidłowe” jest użyte w znaczeniu potocznym, jako że nie zawsze rozpoznawanie intencji jest poprawne, co ilustrują również wyniki badań w rozdziale 4. Przyjmując taką przychylną interpretację można stwierdzić, że teza została w rozprawie udowodniona.

Wprowadzenie do tematyki rozprawy jest nadmiernie zwięzłe (str. 7) i niekomunikatywne. Zawiera ono niewyjaśnione, nieprecyzyjne pojęcia. Na przykład, na str. 7 napisano: „Testując różnych użytkowników można zauważyć, że w zależności od użytkownika, najlepsze wyniki klasyfikacji uzyskuje się w różnych częstotliwościach”. Czy użytkownik ma swoją częstotliwość? Innym przykładem jest tytuł: trudno dociec do czego odnosi się dopisek „sterowanie”. Czy do tytułowej metody klasyfikacji sygnałów EEG? W miarę lektury pracy niektóre milczące założenia i związki frazeologiczne częściowo się wyjaśniają, jednak czytelnik nie może mieć pewności, czy jego/jej interpretacja jest zgodna z intencjami Autorki. Tekst pracy jest nieprzejrzysty.

Trudno też uznać „napisanie artykułów” (str. 8) za „przesłankę do podjęcia tej tematyki”. Artykuły dokumentują i są podstawą dyskusji oraz oceny wyników badań naukowych, same w sobie osiągnięciami naukowymi w dziedzinie nauk technicznych nie są.

2. Charakter rozprawy

Praca ma charakter teoretyczno-doświadczalny. W celu przeprowadzenia dowodu tezy opracowano metody, algorytmy i programy komputerowe do przetwarzania i analizy sygnałów mierzonych za pomocą elektrod EEG i skonstruowano interfejs BCI. Przeprowadzono doświadczenia z udziałem kilku osób – operatorów interfejsu – i przeanalizowano działanie skonstruowanego urządzenia, z wykorzystaniem możliwości jego adaptacji do indywidualnych cech użytkownika. Do wstępnego strojenia metod przetwarzania i klasyfikacji sygnałów wykorzystano zestaw danych *DataSet V* dostępny w internetowej bazie danych międzynarodowego projektu *BCI Competition III*.

K. Zentka

Przewód doktorski mgr inż. Jagodzińskiej-Szymańskiej jest prowadzony w dyscyplinie elektronika. Przedmiotem analizy w podjętym przedsięwzięciu naukowym jest model urządzenia technicznego umożliwiającego odczytywanie intencji jego użytkownika. Źródłem tej informacji jest umysł operatora wyobrażającego sobie określone ruchy kończyn górnych. Wyobrażenia te mają swoje materialne odwzorowanie w specyficznym rozkładzie przestrzennym prądu elektrycznego płynącego poprzez warstwy kory mózgowej, skutkującym zmianami napięcia elektrycznego na powierzchni skóry czaszki. Zmierzone przebiegi napięcia są przetwarzane za pomocą komputera w celu wydobycia ich cech, pozwalających na rozróżnienie określonych stanów myślowych. Obliczone wektory cech pobudzają wejście klasyfikatora. Klasyfikator rozpoznaje charakterystyczne wzory wektorów wejściowych i generuje sygnał wyjściowy, który można wykorzystać do sterowania innych urządzeń technicznych. Opisane w rozprawie badania naukowe mają charakter interdyscyplinarny i obejmują dyscypliny pokrewne – głównie inżynierię biomedyczną oraz informatykę. Metodyka tych badań jest podobna do wykorzystywanej w pracach naukowych w zakresie rozwoju technik konstruowania elektronicznej aparatury pomiarowej i diagnostycznej, szczególnie w odniesieniu do algorytmów modelowania, przetwarzania i analizy sygnałów zakłóconych, w tym biomedycznych i w odniesieniu do pomiarów pośrednich (problem odwrotny) w systemach linearyzowanych. Uznaję, że przedmiot rozprawy zawiera się w dyscyplinie elektronika.

3. Sposób przeprowadzenia analizy źródeł. Sposób formułowania wniosków wynikających z analizy źródeł.

Wykaz cytowanej w rozprawie literatury obejmuje 108 pozycji. Są to artykuły naukowe i techniczne, książki, dysertacje doktorskie, skrypty oraz doniesienia konferencyjne – z lat 1959-2018. Lista ta zawiera 12 prac własnych Autorki – jeden artykuł w periodyku *International Journal of Electronics and Telecommunications* [42], sześć artykułów w krajowym miesięczniku technicznym *Elektronika Konstrukcje Technologie Zastosowania* [39], [44], [45], [47], [49], [50] i pięć doniesień konferencyjnych [40], [41], [43], [46], [48]. Znaczna liczba autorskich artykułów własnych, obejmujących częściowe wyniki projektu doktorskiego świadczy o aktywności publikacyjnej Doktorantki. Tylko w dwóch przypadkach prace te mają dwóch autorów (mgr Jagodzińska jest pierwszym z nich).

Z tytułu rozprawy wynika, że głównym osiągnięciem naukowym Doktorantki jest metoda klasyfikacji źródeł sygnałów emitowanych przez korę mózgową. Zasadniczy, wydzielony przegląd literatury obejmuje w związku z tym algorytmy klasyfikacji (str. 12 – 19). Wykorzystano w nim artykuł przeglądowy [71] odnoszący się do klasyfikacji sygnałów EEG w BCI i kilkanaście innych artykułów o zróżnicowanym stopniu szczegółowości, niestety raczej niestarannie przetłumaczone. Zawarte w przeglądzie informacje obejmują zbyt wiele różnych zagadnień, bez uzasadnienia ich znaczenia w przedmiotowym projekcie. Jakiej wielkości dotyczy „dowolny rozkład” (str. 12) i dlaczego się nim zajmujemy? Jaki jest empiryczny rozkład wartości cech sygnału w rozważanych eksperymentach? Do czego odnosi się „separowalność

K. Matyka

liniowa” i jaka forma separowalności byłaby odpowiednia? Czy nieliniowa granica decyzyjna (str. 13) byłaby lepszym rozwiązaniem? Jak widać, bez odniesienia do własności cech sygnału niełatwo jest formułować wymagania dotyczące własności klasyfikatora. Uważam, że przegląd algorytmów klasyfikacji powinien być w większym stopniu ukierunkowany i poprzedzony wprowadzeniem objaśniającym kolejne etapy przetwarzania informacji w interfejsie BCI, własności cech sygnału i rolę klasyfikatora w procesie przetwarzania sygnałów konkretnej klasy. Postulat ten byłby spełniony gdyby, na przykład, rys. 1 został umieszczony w odpowiednim rozdziale przed analizą stanu wiedzy nt. klasyfikatorów, stosownie podpisany i omówiony w celu bardziej szczegółowego i jasnego zdefiniowania problemu.

Tekst rozdziału poświęconego analizie źródeł literaturowych wymaga wyjaśnień lub korekty. Na przykład, nie wiadomo czym się różnią od siebie „klasyfikatory pracujące *online* i w czasie rzeczywistym”, jakimi „sąsiadami” są „treningi wektorów cech” (str. 13), jak zdefiniowano „efektywność klasyfikatora”, gdzie znajduje się wyjaśnienie terminów „Bootstrapping, Bagging, Boosting” i czy nazwane w ten sposób metody byłyby przydatne w ocenianej pracy, czym jest „kalibracja klasyfikatora” (str. 14), a także „klasyfikacja EEG macierzy i tensorów” (str. 15)? „Losowy klasyfikator lasu” to lasy losowe i tak dalej...

Autorskie wnioski wynikające z analizy źródeł są rozproszone w tekście, bardzo słabo zaakcentowane i pozostawione domyślności czytelnika. Sugeruję Autorce by w kolejnych swoich pracach bardziej skutecznie realizowała wymaganie „krytycznej i kreatywnej analizy stanu wiedzy”. Analiza taka nie powinna być wyliczeniem zagadnień podjętych w cytowanych publikacjach (to może zrobić program komputerowy analizujący streszczenia prac źródłowych), ale przede wszystkim własną oceną przydatności opublikowanych badań do rozwiązania podjętego problemu, zidentyfikowaniem słabych stron znanych rozwiązań i podstawą do sformułowania oraz wstępnego racjonalnego uzasadnienia hipotezy – obejmującego zalety i niedostatki proponowanej metody.

4. Rozwiązanie przedstawionego zadania, właściwości przyjętych metod i założeń

Najbardziej istotne elementy proponowanego rozwiązania problemu (którym jest rozpoznawanie zamiaru wykonania ruchu ręki lewej lub prawej przez użytkownika BCI) skonkretyzowano dopiero na str. 32-33. Podstawą tego rozwiązania jest wykorzystanie zjawiska desynchronizacji/synchronizacji (ang. *event-related desynchronization/event-related synchronization, ERD/ERS*) grup neuronów kory mózgowej w jej obszarach motorycznych, w konsekwencji wykonania lub wyobrażenia ruchu kończyny, palca, języka, itp. [r1], [r2]. W rezultacie tego zjawiska, wyobrażenie ruchu prawej ręki wpływa na moc składowych sygnału EEG generowanego w obszarze kory motorycznej lewej półkuli mózgu, w pewnych pasmach częstotliwości. Ruch ręki lewej, lub jego wyobrażenie, ma wpływ na poziom sygnału w obszarach półkuli prawej. Mechanizm zjawiska *ERD/ERS* jest złożony [r1]. Opóźnienie jego wystąpienia w odniesieniu do chwili zdarzenia (wystąpienia lub wyobrażenia ruchu) oraz pasmo częstotliwości, w którym moc składowych sygnału EEG ulega największym zmianom

R. Matejka

cechują się dużą zmiennością osobniczą. Stałą cechą jest związek ruchu kończyny z aktywnością kory mózgowej w przeciwległej półkuli mózgu.

W ocenianym projekcie doktorskim aktywność elektryczna kory mózgowej jest szacowana drogą rozwiązania tzw. zagadnienia odwrotnego – numerycznej estymacji położenia i wartości składowych hipotetycznych dipoli prądowych wewnątrz kory mózgowej, na podstawie zmierzonych wartości napięcia między elektrodami umieszczonymi na skórze głowy. Oszacowane wektory w każdym z arbitralnie zdefiniowanych 36 obszarów na powierzchni kory mózgowej (rys. 9) są przybliżeniem nieznanego rozkładu przestrzennego aktywności elektrycznej neuronów. Każdy z tych obszarów podzielono na 9 mniejszych brył w przestrzeni kory mózgowej (wokseli, str. 24). Numeryczne rozwiązanie zadania odwrotnego przybliży wektory źródeł prądu wewnątrz każdego woksela. (Błąd tego przybliżenia nie jest w pracy szacowany, ale nie jest to niezbędne do wykorzystania tej metody w interfejsie BCI.)

Można się domyślać, że moduły oszacowanych wektorów dipoli prądowych w wokselaх są podstawą obliczenia cech sygnału EEG według wzoru (58). W każdym z obszarów P_i , $i=1,2,\dots,36$ (rys. 7) obliczane są wartości średnie i wariancje modułu tych wektorów i dla wszystkich par obszarów wyznaczana jest wartość t-statystyki (58). Niestety, nieznaną jest liczba stopni swobody N_i . Na stronie 32 stwierdzono, że wartości t-statystyk „będą potrzebne do klasyfikacji obiektów K1 i K2”, bez bardziej szczegółowego wyjaśnienia rozumowania, które doprowadziło do wyboru tych właśnie cech sygnału.

Pojawia się tu też niespójność w opisie metod, związana ze schematem przedstawionym na rys. 1 oraz z treścią rozdziału 3.2. Wynika z nich, że rekonstrukcja źródeł sygnałów jest poprzedzona wstępnym przetwarzaniem przebiegów napięcia między elektrodami, a efektem tego przetwarzania są próbki widmowej gęstości mocy (13). W takim przypadku, jakiej wielkości fizycznej dotyczyłyby symbole występujące po prawej stronie wzoru (58)? Być może wykorzystywano widmową gęstość amplitudy składowych sygnału?

Spośród wszystkich 1296 elementów antysymetrycznej macierzy t-statystyk, 36 ma z definicji wartość 0. Z pozostałych wybrano dwa podzbiory, z których każdy zawiera 12x18 elementów, odpowiadających wybranych obszarom kory mózgowej, w odniesieniu do pól Brodmanna naszkicowanych na rys. 4 i zjawiska desynchronizacji/synchronizacji neuronów zlokalizowanych w tych polach. Na rys. 8 przedstawiono przykładową macierz z zaznaczeniem wydzielonych podzbiorów. Nie objaśniono rozumowania, którym się kierowano dzieląc dane przyporządkowane lewej półkuli mózgu na dwie części (a oraz c) i pozostawiając niepodzielone dane półkuli prawej (część b). Wzmianka dotycząca tego zagadnienia metodycznego pojawia się nieoczekiwanie na str. 43 (4.3. Opis wyników badawczych dla danych Idiap), jednak go nie wyjaśnia w stopniu pozwalającym innym badaczom na powtórzenie badań przeprowadzonych przez Autorkę.

Sformułowano wzory (59) i (60), które przyporządkowują t-statystyki do rozpatrywanych klas sygnału EEG (wyobrażenie ruchu lewą ręką i prawą ręką), na podstawie ich indeksów, odnoszących się do położenia wewnątrz wcześniej zdefiniowanych części sferycznego modelu

K. M. K.

kory mózgowej (a), (b) i (c), rys. 9. Dokonano dalszej redukcji zbioru cech, zachowując tylko te elementy, które wykazują istotne statystycznie zróżnicowanie odpowiednich obszarów P_i . Zapisano tę operację wzorami (61) i (62), w których indeksy i_1i_2 błędnie, jak przypuszczam, przyrównano do t-statystyk, kopiując je z [45]. Nie zdefiniowano też znaczenia symbolu H w tych wzorach. Nie objaśniono również powodu zmiany znaku wyselekcjonowanych t-statystyk $t_{i_1i_2}$ przypisanych wielkości $m_{i_1i_2}$ w (61), której odwrotność jest miarą podobieństwa cech w obszarach P_{i_1} oraz P_{i_2} .

Domyślam się, że wyboru najbardziej różniących się obszarów P_i dokonuje się według proponowanej metody na podstawie ustalonego zbioru treningowego. Nie ma informacji na temat sposobu gromadzenia danych tego zbioru. Opis metody jest niesystematyczny i niepełny w tym aspekcie.

W kolejnym kroku zdefiniowano graf, którego wierzchołkami są (wyselekcjonowane jak wyżej?) obszary $P_{i_1i_2}$, a wagami krawędzi wartości t-statystyk $t_{i_1i_2}$. Znajdowane jest drzewo rozpinające tego grafu, o największej sumie modułów wag krawędzi. Przekształcenie to pozwala zastosować progowanie jako regułę klasyfikacyjną: jeśli suma wag krawędzi drzewa jest dodatnia, to klasyfikator przypisuje wektorowi zmierzonych sygnałów wyobrażenie ruchu lewą ręką, jeśli ujemna – ręką prawą.

Drzewo rozpinające grafu nie jest jednak klasyfikatorem, jak pisze Autorka na str. 37. Skonstruowane drzewo zdefiniowanego w rozprawie grafu pozwala przetworzyć wartości cech wielowymiarowych sygnałów zmierzonych w interfejsie na jedną wielkość skalarną: sumę wag gałęzi. Drzewo nie klasyfikuje, tylko służy do przetwarzania (kompresji) cech sygnału. Klasyfikatorem jest układ sprawdzający znak obliczonej sumy; w elektronicznym systemie BCI mógłby to być układ komparatora.

Wyniki badań eksperymentalnych opisano w rozdziale 4. Wykorzystano w nich dane z bazy Ildiap oraz sygnały z adnotacjami uzyskane z własnych pomiarów. Obliczona dokładność klasyfikacji ruchu rąk zamierzonego przez użytkowników odpowiada najlepszym wynikom uzyskanym w konkursie BCI Competition III. W rozprawie brakuje pogłębionego opisu przebiegu doświadczeń i dyskusji osiągniętych rezultatów. Na przykład, na str. 40 wspomniano, że „zbieranie danych rozpoczęło się od usłyszenia sygnału dźwiękowego”. Jaki to był sygnał? Kto go generował? Na ile wyniki klasyfikacji zależą od (chyba nieokreślonej) dokładności wyobrażenia sobie ruchu ręki przez użytkownika? Czy można ten składnik błędu zminimalizować?

5. Oryginalność rozprawy, samodzielny dorobek autora, pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy (poziomu techniki) reprezentowanego w literaturze światowej

Koncepcja interfejsu BCI wykorzystującego zjawisko desynchronizacji/synchronizacji neuronów kory mózgowej i jego wpływ na zmierzone wartości napięcia między elektrodami umieszczonymi na skórze głowy jest znana od kilkudziesięciu lat. Również znany jest pomysł

R. Matek

wykorzystania zmierzonego napięcia do estymacji położenia i wartości hipotetycznych źródeł prądowych wewnątrz kory mózgowej (zagadnienie odwrotne) i użycia zbioru takich źródeł do sterowania klasyfikatora w interfejsie. Ta „rekonstrukcja źródeł” w celu wypracowania cech sygnału EEG w BCI, obliczanych w krótkim czasie drogą rozwiązania układu równań liniowych i pozwalających na zmniejszenie błędu klasyfikacji, została wykorzystana w pracy doktorskiej [79] z 2006 r. i opublikowana w postaci artykułu [80] w roku 2008. Była ona rozwijana w pracy [42] Autorki z 2013 r. oraz [83] dr. inż. Łukasza Oskwarka z roku 2014. W tekście rozprawy nawiązano do tych publikacji.

Zagadnieniu rekonstrukcji źródeł sygnałów EEG poświęcono rozdział 3.3. Po wstępnej ilustracji zjawisk elektromagnetycznych towarzyszących pracy mózgu człowieka, w której wykorzystano quasistatyczne rozwiązanie równań Maxwella, w rozdziale 3.3 przedstawiono znane z literatury [82], [87], [88], [29] macierzowe modele generacji sygnałów EEG i metody numerycznego rozwiązywania zagadnienia odwrotnego EEG. Założono sferyczny jednorodny model głowy o średnicy 160 mm. Korę mózgową reprezentuje w nim powierzchnia kulista o średnicy 120 mm (130 mm na str. 41 i 42). Na stronie 24 wspomniano, że między korą mózgową znajduje się skóra, tkanka miękka, czaszka i opona twarda, ale nie wydaje się, by warstwy te zostały uwzględnione w modelu. Przyjęto stałą wartość przewodności ośrodka, niestety nie wiadomo jaką.

Ponieważ liczba elektrod (14) jest mniejsza od liczby nieznanych wektorów źródeł prądu w obszarach (36), to problem odwrotny jest źle postawiony. Metody jego przybliżonego rozwiązywania różnią się między sobą podejściem do regularyzacji i nakładem potrzebnych obliczeń. Spośród nich Autorka wybrała algorytm najmniejszych kwadratów z dekompozycją według wartości osobliwych [zaimplementowaną w środowisku Matlab pod postacią funkcji *pinv()* wykorzystującej macierz pseudoodwrotną Moore’a-Penrose’a]. W porównaniu z innymi metodami metodę tę cechował najkrótszy czas obliczeń (str. 31 i 32).

Oryginalnym osiągnięciem naukowym mgr Jagodzińskiej-Szymańskiej jest zastosowanie teorii grafów do przetwarzania cech wielokanałowego sygnału EEG w interfejsie BCI, w sposób pozwalający na uwzględnienie przybliżonej lokalizacji źródeł sygnału na powierzchni kory mózgowej, co upraszcza klasyfikację wyobrażeń ruchu rąk operatora BCI – sprowadzając ją do zbadania znaku skalara.

6. Poprawność przedstawienia uzyskanych wyników (zwięzłość, jasność, umiejętność przekonywania, poprawność redakcyjna)

Sformułowane wyżej przeze mnie uwagi, pytania i komentarze, odnoszące się do niedostatków redakcyjnych i nieprzekonującej stylistyki pracy, prowadzą do wniosku, że informacje składające się na zawartość rozprawy nie są uporządkowane w sposób odpowiadający oczekiwaniom.

K. Motyka

Mimo formalnie poprawnej struktury, faktycznie praca doktorska nie została napisana w sposób pozwalający na pełne zrozumienie i replikację przeprowadzonych badań naukowych. Dysertacja jest zbyt zwięzła i mało klarowna w odniesieniu do sformułowania problemu i opisanie proponowanej metody oraz przebiegu i dyskusji badań. Jej tekst jest w wielu miejscach niejasny i nieprecyzyjny, przez co wieloznaczny.

Odniosę się teraz do poprawności przedstawienia uzyskanych wyników.

Symbol ε w (24) został powtórnie użyty w innym znaczeniu niż w (20). Nie wiadomo dlaczego w niektórych wzorach użyto informatycznego operatora przypisania $:=$, np. w (29), zamiast matematycznego operatora $=$ (wyrażającego równość strony lewej i prawej).

Z tekstu na str. 32 wynika, że cechy sygnałów EEG obliczono dla „gęstości natężenia prądu dla wokseli w obszarach P_{i1}, P_{i2} ”. W każdym takim obszarze znajduje się 9 wokseli (str. 24). Czy zatem w (58) $N_{i1} = N_{i2} = 9$? Wartości średnie m_{i1} i m_{i2} oraz wariancje w tym wzorze byłyby w takim przypadku średnimi i wariancjami modułu wektorów źródeł prądu wewnątrz wycinka sfery o raczej małej powierzchni. Jeśli wziąć pod uwagę regularyzację rozwiązań zagadnienia odwrotnego, można oczekiwać, że rozkład prądu jest opisany gładką funkcją współrzędnych przestrzennych. Jeśli tak, to wartości prądu wewnątrz obszaru (między woksalami) mało by się między sobą różniły. Niestety, praca nie zawiera informacji na temat empirycznych rozkładów prawdopodobieństwa dla populacji próbek modułu prądu w woksalach obszaru, choćby obszaru przykładowo wybranego.

Nie wiadomo też, jaki jest zakres obliczonych wartości „gęstości natężenia prądu” (str. 32). Jeśli wartości te zostały obliczone drogą rozwiązania równania (32), przy czym elementy macierzy K w nim występujące zdefiniowano nienumerowanym wzorem w pierwszym wierszu str. 28, a jednostką potencjału Φ jest wolt, to elementy macierzy J w (32) mają wymiar Am (amperometr). Wydaje się w związku z tym, że element tej macierzy nie jest gęstością prądu tylko momentem dipola prądowego [r3].

Na str. 35 stwierdzono, że „w przypadku klasyfikacji nienadzorowanej nie dysponuje się zbiorem uczącym”. Jest to stwierdzenie nieprawdziwe. Klasyfikator nienadzorowany jest konstruowany na podstawie zbioru uczącego. Zbiór ten zawiera przykłady danych wejściowych, ale w odróżnieniu od uczenia nienadzorowanego, nie zawiera etykiet klas, do których należą podzbiory zestawu uczącego.

Na str. 41 i dalszych konsekwentnie nie są podawane jednostki przedziałów czasowych, w których mierzono, przetwarzano, zapisywano i klasyfikowano sygnały EEG (2-4, 4-6, 6-8, 8-10, 10-12). Zdefiniowano je w artykule [50], choć niepoprawnie. Według układu SI, jednostką podstawową czasu jest sekunda, oznaczana symbolem s , a nie sek. [50]. Z drugiej strony częstotliwość składowych sygnału jest prawidłowo określana w hercach [Hz], rys. 10 i inne.

A. M. K.

Dwustanowe wyjście klasyfikatora (wyobrażony ruch ręki lewej albo ręki prawej), zamienione na odpowiedni sygnał fizyczny (elektryczny, mechaniczny, optyczny, itd.) może służyć do sterowania urządzeń technicznych. W przypadku ocenianej pracy doktorskiej, generowana za pomocą komputera decyzja klasyfikatora jest przesyłana do wyświetlacza LED (łączy Bluetooth lub WiFi), w celu sygnalizacji funkcjonowania interfejsu i przekazania użytkownikom optycznej informacji zwrotnej w czasie rzeczywistym. Skonstruowane przez Doktorantkę urządzenia elektroniczne do realizacji tych funkcji opisano w rozdziale 6. Mają one charakter techniczny i nie odnoszą się bezpośrednio do wyводу naukowego rozprawy. W szczególności wydruki skryptów w języku Matlab i programu sterującego w języku C dla płytki Arduino, nie zawierające wyczerpujących komentarzy, rozpraszają uwagę czytelnika dysertacji.

Przekazywanie wyniku klasyfikacji łączy WiFi na większą odległość niż za pomocą łączy Bluetooth nie wnosi nic nowego do wiedzy w dyscyplinie naukowej elektronika. Wartość naukowa konstrukcji z płytką Arduino również jest wątpliwa. Z drugiej strony, opracowanie programów komputerowych, zaprojektowanie, skonstruowanie, uruchomienie, przetestowanie i wykorzystanie zbudowanych analogowo-cyfrowych układów elektronicznych w opisywanych badaniach naukowych świadczy o dużej wiedzy technicznej oraz inżynierskich umiejętnościach Doktorantki.

Na stronie 70 jest mowa o „podzieleniu głowy” na zadaną liczbę obszarów. Zakładam, że Autorka ma na myśli podział geometrycznego modelu głowy. Tego rodzaju skróty myślowe nie powinny być używane w tekście rozprawy o interdyscyplinarnym, wyżej naszkicowanym charakterze.

7. Słabe strony rozprawy, jej główne wady

Uwagi krytyczne zawarte w p. 1 – 6 mojej recenzji odnoszą się do wad ocenianej rozprawy. Oczywiście obniżają one ocenę ogólną.

8. Przydatność rozprawy dla nauk technicznych, przemysłu, obronności kraju, itp.

Praca jest ukierunkowana na rozwiązanie problemu praktycznego i może mieć zastosowania. Uzyskane wyniki, po ich pełnej ocenie i dyskusji, przejrzystym opracowaniu i udokumentowaniu, mogłyby być podstawą do dalszych badań naukowych lub do konstruowania urządzeń sterowanych aktywnością elektryczną mózgu.

9. Podsumowanie (czy praca spełnia wymagania określone przez obowiązujące przepisy)

Magister inżynier Urszula Jagodzińska-Szymańska przedstawiła wydrukowane opracowanie pt. *„Metoda klasyfikacji źródeł sygnałów elektrycznych emitowanych przez korę mózgową człowieka – sterowanie”* o objętości 110 stron formatu A4, będące podsumowaniem Jej badań

U. Jagodzińska-Szymańska

naukowych oraz konstrukcyjnych i złożyła je jako rozprawę doktorską w dyscyplinie elektronika. Dysertacja ta zawiera opis oryginalnego rozwiązania nietrywialnego problemu naukowego i spełnia wymagania art. 13.1. Ustawy. Jestem za dopuszczeniem Autorki do publicznej obrony rozprawy.

Rudrzej Matek

Łódź, 15-23 marca 2020 r.

Literatura

- [r1] G. Pfurtscheller, F. H. Lopes da Silva, "Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: basic principles", *Clinical Neurophysiology* 110 (1999) 1842–1857.
- [r2] J. Żygierewicz, P. J. Durka, H. Klekowicz, P. J. Franaszczuk, N.E. Crone, „Computationally efficient approaches to calculating significant ERD/ERS changes in the time–frequency plane”, *Journal of Neuroscience Methods* 145 (2005) 267–276.
- [r3] J. P. Ary, S. A. Klein, D. H. Fender, "Location of Sources of Evoked Scalp Potentials: Corrections for Skull and Scalp Thicknesses", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 28 (1981) 447-452.