

Dr hab. inż. Rafał Zdunek, prof. uczelni  
Katedra Teorii Pola, Układów Elektronicznych  
i Optoelektroniki. (K35W12ND02)  
Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów (W12N)  
Politechnika Wrocławska  
ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27  
50-370 Wrocław

Wrocław, dn. 23.09.2022r.

## **Recenzja Rozprawy Doktorskiej**

(Podstawa formalna recenzji: pismo Sekretarza Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN Dyscypliny Naukowej z dn. 4.07.2022 r.)

Tytuł rozprawy: „Locally specific human brain dynamics automatically modeled using spectra features of MEG/EEG signals”

Autor rozprawy: mgr inż. Michał Konrad Komorowski

Promotor: prof. dr hab. Włodzisław Duch

### **1. Zagadnienie naukowe i cele rozprawy**

Przedmiotem badań podejmowanym w rozprawie doktorskiej są metody ekstrakcji cech spektralnych struktur mózgowych z sygnałów elektroencefalografii (EEG) lub magnetoencefalografii (MEG). Cechy te umożliwiają modelowanie oscylacyjnej aktywności lokalnych struktur obszarów korowych lub podkorowych. Spośród metod poszukujących charakterystyczne wzorce w aktywności oscylacyjnej mózgu, Autor skupia się na metodzie ekstrahującej cechy spektralne, tzw. metodzie SF – skrótowiec od angielskiego wyrażenia „*spectral fingerprinting*”. Jest to metoda stosunkowo nowa, bowiem zaproponowana przez Keitel i Grossa w 2016 roku i obecnie rozwijana w kilku ośrodków naukowych. Chociaż cel pracy nie jest sformułowany precyzyjnie, to jednak z kontekstu zagadnień omawianych we wprowadzeniu można dość łatwo wnioskować, że praca ma na celu pragmatyczne rozwinięcie i uogólnienie koncepcji metody SF przy pomocy zaawansowanych narzędzi informatycznych, a także opracowanie efektywnego narzędzia informatycznego, przeznaczonego dla szerokiego grona odbiorców, zarówno dla analizy sygnałów MEG, jak i EEG. Praca ma charakter głównie doświadczalny z silnie zarysowanym wątkiem działalności programistycznej, której efektem jest rozbudowany pakiet narzędziowy ToFFi, działający w środowisku Matlaba i przeznaczony do ekstrakcji ww. cech. Uważam, że problem badawczy podjęty w pracy ma duże znaczenie w zakresie badań doświadczalnych, głównie w obszarze kognitywistyki, ale także w innych obszarach nauki o mózgu, neuroinformatyce, czy nawet w diagnostyce medycznej.

### **2. Zakres rozprawy**

Jest to praca w znacznie mierze interdyscyplinarna, łącząca modelowanie oscylacyjnej aktywności obszarów mózgu, co wkomponowuje się w obszar kognitywistyki, z metodami informatycznymi z obszaru uczenia maszynowego i przetwarzania sygnałów. Praca jest

niezwykle obszerna – liczy bowiem 238 stron, podzielonych na pięć rozdziałów głównych, wprowadzenie, podsumowanie, trzy dodatki oraz bibliografię. Zawiera 5 tabel i aż 82 rysunki – część z nich pochodzi z różnych źródeł literaturowych.

Rozdział 1 wprowadza Czytelnika w arkany wiedzy o anatomicznej budowie mózgu, hierarchizując opis od budowy neuronu do ośrodków czynnościowych, a także wyjaśnia w sposób zrozumiały skomplikowane procesy elektrochemiczne zachodzące w strukturze mózgu, np. mechanizm pompy potasowo-sodowej, który jest istotny do zrozumienia oscylacyjnej aktywności ośrodków czynnościowych. W dalszej części rozdziału Autor zwięźle przedstawił fundamentalny opis falowy aktywności elektrycznej mózgu, który stanowi podstawę modelowania sygnałów rejestrowanych zarówno w metodzie EEG, jak i MMG. Następnie krótko omówił fale mózgowe oraz potencjały wywołane. W ostatniej części tego rozdziału (podrozdziały 1.7, 1.8 i 1.9) Autor, bazując na wcześniej opisanych zjawiskach fizycznych, scharakteryzował fundamentalne i nieinwazyjne metody badania aktywności mózgu, takie jak EEG, MEG oraz funkcjonalny rezonans magnetyczny (fMRI), podając również ich zalety i wady w badaniach funkcji poznawczych mózgu.

Rozdział 2 przedstawia krótki przegląd metod typu „fingerprinting”, estymujących charakterystyczne cechy w aktywności oscylacyjnej mózgu, które jednoznacznie identyfikują lokalną specyfikę funkcjonalności obszarów mózgu. Autor odwołuje się tutaj do różnych metod identyfikacji charakterystycznych cech. Zaliczył do nich metody identyfikacji źródeł aktywności oscylacyjnej, np. takie jak metody bazujące na przestrzennej filtracji, tzw. beamforming, czy też metody ślepej separacji sygnałów i metody korelacji sygnałów obwiedni, stosowane w detekcji aktywności sieci spoczynkowych. Niestety w pracy nie wspomniano w jakim sensie cechy estymowane tymi metodami są jednoznaczne w kontekście pojęcia „fingerprinting”. Wspomniano również o metodach identyfikacji funkcjonalnej łączności pomiędzy obszarami mózgu i metodach grafowej reprezentacji zależności pomiędzy obszarami. Ostatni podrozdział 2.5 jest niejako wprowadzeniem do następnego rozdziału, w którym Autor skupia się tylko na metodzie SF.

Rozdział 3 poświęcony jest metodzie SF, która jest tematem przewodnim recenzowanej rozprawy. Autor najpierw omawia podstawy teoretyczne, założenia koncepcyjne oraz podstawowe etapy tej metody. Następnie przedstawia wybrane wyniki badań, zarówno z pracy Keitel i Grossa [9], jak i próby replikacji tych wyników przez różne zespoły badawcze. W tym rozdziale znajdują się również oryginalne wyniki badań przeprowadzonych przez Autora, ukazujące próbę odtworzenia wyników z pracy Keitel i Grossa dla sygnałów MEG pochodzących z bazy projektu HCP (z jęz. ang. Human Connectome Project). Pokazano również profile spektralne uzyskane tą metodą dla sygnałów EEG, zarówno pobranych z bazy AP (z jęz. ang. Age-ility project), jak i zmierzonych w laboratorium, w którym pracował Doktorant. Rozdział ten również pokazuje motywację jaką kierował się Doktorant przy wyborze metody SF do jej gruntownego zbadania i usprawnienia.

Rozdział 4 jest najobszerniejszy w pracy i stanowi zarówno techniczny opis działań programistycznych podjętych do usprawnienia metody SF oraz konstrukcji pakietu narzędziowego ToFFi, jak również zawiera częściowe wyniki badań uzasadniające te działania, np. pokazujące czasy wykonywania się różnych funkcji przypisanych do poszczególnych bloków pakietu. Autor bardzo skrupulatnie omówił kwestie implementacyjne, nawet pokazując reprezentacje zmiennych w Matlabie, co wydaje się trochę nadmiarowe. Ciekawe są natomiast schematy blokowe wyjaśniające architekturę oprogramowania oraz podział koncepcyjny na moduły i ich wystarczająco dokładny opis. Opis funkcjonalności modułów często poparty jest wynikami eksperymentalnymi, tzn. badaniami symulacyjnymi lub



przeprowadzonymi na danych rzeczywistych. Takie podejście pozwala na łatwiejsze zrozumienie motywacji, którymi kierował się Autor przy tworzeniu poszczególnych modułów pakietu ToFFi, ale także pokazuje realną funkcjonalność opracowanego oprogramowania. Na uwagę zasługują również analiza teoretyczna złożoności czasowej wykorzystywanych algorytmów, poparta wynikami empirycznymi czasu obliczeniowego, a także rozszerzenie zaproponowanego oprogramowania do pracy w środowisku obliczeń równoległych.

Rozdział 5 zawiera oryginalne wyniki badań właściwości sieci spoczynkowych ludzkiego mózgu uzyskane przy pomocy opracowanego pakietu ToFFi. Jest to też najbardziej wartościowy rozdział z punktu widzenia nowatorskości i znaczenia uzyskanych wyników badań dla rozwoju wielu dziedzin nauki, zwłaszcza nauk o mózgu. W tym rozdziale pokazano również zaawansowany aparat matematyczny, który wykorzystano do analizy cech spektralnych w celu uzyskania tzw. gradientów sieci spoczynkowych i ich wzajemnej korelacji.

Praca zawiera również trzy dodatki, które zajmują łącznie 31 stron. Najistotniejszy jest jednak dodatek A, w którym pokazano matematyczne formuły implementowanych lub wykorzystanych algorytmów. Pokazano aż 14 algorytmów, wyrażonych w ujęciu matematycznie sformalizowanym i spójnym. Część z tych algorytmów, np. algorytmy 3, 7 i 8 w znaczący sposób uzupełniają opisową wiedzę przekazaną w głównych rozdziałach pracy i w opinii recenzenta powinny znaleźć się w zasadniczych częściach pracy, a nie w dodatku. Sposób prezentacji algorytmów zasługuje też na uwagę, ponieważ algorytmy są bardzo dobrze opisane, a poniżej każdego algorytmu zamieszczono notatkę wyjaśniającą użyte symbole i skomplikowane pojęcia związane z danym algorytmem.

Dodatek B zawiera skrypt Matlaba oryginalnej wersji algorytmu SF, który jest udostępniany przez Keitel i Grossa.

Dodatek C zawiera krótki przewodnik instalacji oprogramowania ToFFi.

### **3. Ocena merytoryczna rozprawy**

#### **3.1. Analiza źródeł**

Bibliografia jest imponująca – zawiera bowiem 262 pozycje ściśle powiązane z tematyką rozprawy. Są to głównie artykuły w czasopismach o zasięgu międzynarodowym, zwłaszcza w prestiżowym czasopiśmie *NeuroImage*. Zdarzają się również materiały konferencyjne, monografie, patenty, a nawet jest jedna pozycja w języku polskim. Autor cytuje również dwie swoje prace.

Większość z prac zamieszczonych w wykazie literatury są z obszaru neuroinformatyki i kognitywistyki i zostały publikowane w ciągu ostatnich kilku lat. Świadczy to o aktualności poruszanej tematyki, a ponadto również o głębokiej wiedzy Doktoranta w zakresie najnowszych osiągnięć w wymienionych obszarach wiedzy.

#### **3.2. Metodyka badawcza**

Autor rozprawy przyjął metodykę badawczą, którą można scharakteryzować w następujący sposób:

- w pierwszej kolejności opracowanie zaawansowanego narzędzia informatycznego, tzn. pakietu ToFFi i wykorzystanie go jako platformy do badań z zakresu neurodynamiki mózgu,
- replikacja wyników z pracy Keitel i Grossa dla sygnałów MEG,



- zastosowanie opracowanego narzędzia do ekstrakcji cech spektralnych z sygnałów EEG,
- pokazanie, że dla pewnych obszarów w mózgu istnieją niezmiennicze cechy spektralne, niezależne od metody pomiaru, MEG czy fMRI.

Znaczna część pracy poświęcona jest opisowi architektury pakietu narzędziowego ToFFi. Autor wykonał ogromną pracę programistyczną i znacznie rozszerzył podstawową funkcjonalność oprogramowania udostępnianego przez Keitel i Grossa dla metody SF o nowe możliwości, bardzo użyteczne w zastosowaniach praktycznych. Zaproponowany pakiet w obecnej formie ma strukturę modułową i umożliwia analizę dowolnych zbiorów danych, automatycznie znajduje optymalną liczbę modów w cechach spektralnych, nie ogranicza się tylko do atlasu AAL definiującego obszary anatomiczne mózgu, ale pozwala użytkownikowi wybrać inne atlasy, np. funkcjonalny podział Schaefera lub anatomiczną mapę Desikan-Killiany. Moduł realizujący analizę estymowanych cech spektralnych został znacząco zmodyfikowany. Zastosowano walidację krzyżową do oceny wyników klasteryzacji na poziomie identyfikacji grupowej. Dodano moduły do wizualizacji wyników, a także dokonano podziału niezależnych zadań obliczeniowych w taki sposób, aby można było je realizować w środowisku obliczeń równoległych. Oszacowano teoretyczną złożoność czasową poszczególnych modułów oprogramowania. Pokazano również wyniki empiryczne dla pomiaru czasu wykonywania się poszczególnych bloków oprogramowania.

Opracowany pakiet wykorzystano do badań eksperymentalnych. Przeprowadzono różne testy opracowanego oprogramowania z wykorzystaniem sygnałów MEG z projektu HPC, a także sygnałów EEG z bazy AP i z pomiarów wykonanych w laboratorium badawczym, w którym zrealizowano tę pracę doktorską. W pierwszej kolejności Autor próbuje replikować wyniki z pracy Keitel i Grossa dla sygnałów MEG, co udaje się osiągnąć na zadawalającym poziomie. Potwierdzają to rezultaty pokazane na rys. 3.8 i 3.9 w rozdz. 3. Podjęto też próbę identyfikacji aktywności oscylacyjnej z obszaru jądra ogoniastego mózgu z wykorzystaniem sygnałów EEG uzyskanych dla tych samych warunków i parametrów pomiaru. Otrzymane cechy spektralne znacznie różniły się, zarówno w przypadku stosowania różnych zbiorów obserwacji uzyskanych tą samą techniką pomiarową, tzn. metodą EEG, jak również pomiędzy różnymi technikami obserwacji, tzn. EEG i MEG. Niestety różnicę tę wyjaśniono zbyt lakonicznie, podając jedynie, że metoda EEG nie jest stosowna do badania neurodynamiki w zakresie większych częstotliwości. W dalszej części pracy Autor ogranicza się tylko do analizy sygnałów MEG. Tym razem do badań wykorzystał sygnały MEG z bazy HPC, pozyskane od 89 zdrowych osób w wieku od 22 do 35 lat, dla których były dostępne modele anatomicznych obszarów mózgu. Stosując atlas funkcjonalnego podziału Schaefera, Doktorant uzyskał cechy spektralne dla różnych obszarów czy sieci mózgu oraz procentowy czas trwania estymowanych modów w tych cechach. Wyniki tych badań pokazano na rys. 5.2 w rozdz. 5. Następnie wyniki te poddano dalszej analizie statystycznej wykorzystując różne metody z obszaru statystyki matematycznej i przetwarzania sygnałów. W efekcie uzyskano informację nie tylko o podobieństwie cech z różnych obszarów, ale także jak bardzo pozyskane cechy są informacyjne dla oceny neurodynamiki mózgu i czy te cechy są w jakiś sposób skorelowane z cechami spektralnymi pozyskiwanymi w podobny sposób z sygnałów fMRI.



### 3.3. Naukowa wartość rozprawy

Autor rozprawy dość mocno podkreśla swoje osiągnięcia inżynieryjne i programistyczne, które doprowadziły do opracowania zaawansowanego oprogramowania umożliwiającego badania oscylacyjnej aktywności różnych obszarów mózgu. Są to niewątpliwie znaczące osiągnięcia w obszarze inżynierii oprogramowania, które bezpośrednio prowadzą do realizacji badań naukowych, ale same w sobie nie mają wartości naukowej. Nie oznacza to jednak, że rozprawa nie ma wartości naukowej, bowiem powstałe narzędzia informatyczne posłużyły do uzyskania wyników badań o dużej wartości naukowej. Są to głównie rezultaty przedstawione w rozdziale 5, ale także częściowo w rozdz. 3 i 4. W opinii recenzenta najważniejsze osiągnięcie naukowe to pokazanie, że istnieje korelacja pomiędzy najistotniejszym gradientem uzyskanym metodą SF z sygnałów MEG, a podobnie wyznaczonym gradientem z sygnałów funkcjonalnego rezonansu magnetycznego dla wybranych obszarów sieci spoczynkowych. Ten wynik pokazuje, że metoda SF pozwala na replikację charakterystyk częstotliwościowych uzyskanych w eksperymentach przeprowadzonych przez inne zespoły badawcze. Pozwala zatem odkrywać składowe funkcjonalne podobne do gradientów z sygnałów fMRI, co sugeruje, że istnieją niezmiennicze cechy w spoczynkowych sygnałach oscylacyjnych, które mogą być wykrywane różnymi metodami pomiarowymi (tzn. MEG czy fMRI). Zaproponowany pakiet narzędziowy ToFFi może zatem wkrótce przyczynić się do większego zainteresowania metodą SF, zwłaszcza w kontekście badań zaburzeń procesów neurodynamicznych, a może nawet przyczynić się do nowych odkryć w obszarze neurodynamiki mózgu.

### 4. Słabe strony rozprawy i jej główne wady

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Michała Komorowskiego napisana jest starannie i na zadawalającym poziomie merytorycznym. Na uwagę zasługują poprawność językowa. Mimo że praca jest bardzo obszerna, trudno znaleźć w niej nawet drobne błędy językowe czy nawet tzw. literówki. W pracy bardzo dokładnie omówiono implementację metody SF i wyniki badań eksperymentalnych. Niemniej jednak, niektóre z zaprezentowanych zagadnień wymagają dokładniejszego wyjaśnienia. Poniżej przedstawiam uwagi natury polemicznej, bądź też natury edycyjnej.

1. Autor bardzo dużo uwagi poświęcił metodzie SF, która wyciąga cechy spektralne z odpowiednio przeskalowanych widm krótkich, jednosekundowych fragmentów zmierzonych sygnałów w dziedzinie czasu, wykorzystując do tego celu metody grupowania danych (metodę k-means w połączeniu z metodą GMM). Tymczasem w swojej pracy opublikowanej w Acta Physica Polonica B w 2108r. [12] stosuje inne narzędzia ekstrakcji cech, bazujące na dekompozycjach tensorów. Niestety w rozprawie doktorskiej nie wspomniał o takiej możliwości analizy danych i czy cechy uzyskane metodą SF mają jakiś związek z cechami uzyskanymi np. metodą NCPD opisaną w cytowanej pracy [12].
2. Wyniki pokazane na rys. 3.8 powinny być lepiej wyjaśnione. Dlaczego w zakresie większych częstotliwości nie ma korelacji pomiędzy cechami spektralnymi uzyskanymi dla sygnałów EEG i MEG? Czy zatem badana metoda SF nie nadaje się do analizy sygnałów EEG?
3. Pewnym mankamentem pracy jest brak postawienia tezy badawczej, co wydaje się raczej niedopatrzeniem, ponieważ rozprawa ma charakter pracy badawczej, w której zrealizowano różne cele naukowe i wyciągnięto poprawne wnioski.



Uwagi o charakterze edytorskim:

4. Na rys. 3.2 transformacja sygnałów czasowych z segmentów do dziedziny częstotliwości następuje przed zastosowaniem metody LCMV do estymacji źródeł, natomiast według algorytmu 3 na str. 183, ta operacja wykonywana jest w kroku 5, czyli po rekonstrukcji źródeł. Tę rozbieżność należy wyjaśnić.
5. Na str. 62 podano, że  $k = 1$  w metodzie k-means, co budzi wątpliwości, ponieważ wtedy estymowany jest tylko jednej klaster. Jaki zatem byłby sens stosowania metody grupowania danych?
6. Format reprezentacji liczb zmiennoprzecinkowych typu „double-precision floating-point” wymaga 64 bitów, a nie 16 jak podano na str. 75.
7. Opis podstawowych zmiennych Matlaba w rozdz. 4.3 nie powinien znaleźć się w podstawowych rozdziałach pracy, ponieważ dotyczy zagadnień elementarnych z programowania w Matlabie, nie ma żadnego związku z tematyką omawianą w pracy i nie zwiększa wartości naukowej pracy. Podobnie, wyświetlanie wartości niektórych zmiennych z Matlaba w rozdz. 4 nie wnosi żadnych znaczących informacji. Skrypty Matlaba z rozdz. 4 można byłoby także przenieść do dodatków – nie są istotne z punktu widzenia wyników badań.
8. W rozdz. 4 wymieniono wiele funkcji Matlaba, ale nie za bardzo wiadomo, które są autorskie, a które zostały zaczerpnięte z Internetu.
9. Sieci spoczynkowe wspomniane na stronach 47 i 48 powinny być lepiej opisane, a nie tylko wymienione z nazwy.
10. Za małe czcionki na rys. 4.1, 4.2, 4.4, 4.7 i 4.8.
11. W trzecim akapicie wprowadzenia, w zdaniu informującym o liczbie ludności w Europie cierpiących na choroby układu nerwowego powinno być „Brain diseases affect 180 million Europeans” zamiast „Brain diseases affect 180 billion Europeans”.
12. Str. 12, linia 23: Jest „Neurotransmitters are the chemical synthesized ...”. Powinno być: „Neurotransmitters are chemical synthesized ...”.
13. Rozdz. 1.8, akapit 3, linia 3: Jest „howesver”. Powinno być: „however”.
14. Str. 180, w opisie oznaczeń brakuje informacji, że norma wektora jest normą  $l_2$ . Podobnie, w ostatnim zdaniu z „Notation” założono, że macierz B jest prostokątna o rzeczywistych elementach, natomiast odwrotność macierzy dotyczy tylko nieosobliwych macierzy kwadratowych. Brakuje zatem odpowiedniego założenia tylko dla odwrotności macierzy.

Chciałbym jednak zaznaczyć, że powyższe uwagi mają jedynie charakter polemiczny lub edytorski i nie umniejszają wysokiej wartości naukowej niniejszej rozprawy.

#### Wnioski końcowe:

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska została przygotowana na zadawalającym poziomie merytorycznym i redakcyjnym, a uzyskane wyniki stanowią oryginalny wkład Autora rozprawy w rozwój dyscypliny „Informatyka techniczna i telekomunikacja”. Moja finalna ocena rozprawy doktorskiej jest zdecydowanie pozytywna.

**Stwierdzam zatem, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Michała Konrada Komorowskiego spełnia zwyczajowe i formalne warunki stawiane rozprawom doktorskim i na podstawie przepisów Ustawy o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym wnoszę do Wysokiej Rady Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie Autora do publicznej obrony.**