

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jana Gierałtowskiego
pt. *Wielkoskalowa analiza właściwości fraktalnych rytmu serca człowieka*

Rozprawa doktorska pana mgr. inż. Jana Gierałtowskiego, powstała na podstawie oryginalnych prac jego współautorstwa, łączy ze sobą w umiejętny sposób dwa wątki. Pierwszy z nich jest czysto teoretyczny i dotyczy metod analizy sygnałów czasowych w celu wykrycia struktur fraktalnych, co, z kolei, jest związane z występowaniem w przebiegach czasowych pewnych korelacji. W części pracy poświęconej tym zagadnieniom autor omawia dostępne w literaturze przedmiotu metody takiej analizy, a następnie proponuje nowe oryginalne podejście do problemu. Drugi wątek pracy ma charakter interdyscyplinarny, autor stosuje opracowaną przez siebie metodę do analizy szeregów czasowych zmienności rytmu serca ludzkiego wykorzystując do tego dane kliniczne.

Analiza przebiegów czasowych różnego rodzaju zjawisk, nie tylko z obszaru czystej fizyki, ale też w ekonomii, czy, jak w recenzowanej pracy, biologii i medycynie, ma już stosunkowo długą historię, i to właśnie w obszarze medycyny, gdzie opracowano takie techniki jak EEG, czy EKG, polegające na pomiarze aktywności elektrycznej organów organizmu, a następnie analizie cech charakterystycznych ich zmienności w czasie. Oczywiście, głównym celem jest tu opracowanie metod diagnostycznych, w szczególności różnicujących organizmy zdrowe i takie, w których występują zjawiska patologiczne z medycznego punktu widzenia. Można oczekiwać, że zmierzone sygnały niosą wiele informacji niewykrywalnych poprzez stosunkowo prostą analizę powtarzalności pewnych widocznych struktur, czy też jakościową analizę kształtu sygnału (czy jego charakterystycznych fragmentów), co stanowiło podstawę diagnostycznych zastosowań metod elektrokardiografii i elektroencefalografii, a także w dużym stopniu, bardziej zaawansowanych metod fizycznych, jak na przykład magnetyczny rezonans jądrowy. Pierwsza część pracy pana mgr. inż. Gierałtowskiego (rozdziały 1.5-3) poświęcona jest opisowi metod badania własności fraktalnych przebiegów czasowych, które to własności są wynikiem występowania w sygnale czasowym pewnych typów korelacji. Autor opisuje szczegółowo znane metody ilościowej charakteryzacji multifraktalności sygnału. Taką charakteryzację otrzymać można poprzez obliczenie na podstawie danych tzw. lokalnego wykładnika Hursta, tzn. wykładnika z jakim skaluje się (potęgowo) tzw. funkcja fluktuacji sygnału. Funkcja ta, skonstruowana z wartości czasowych sygnału w przedziałach czasowych o wybranej długości (wyznaczających *skalę* lokalnej analizy) zależy od dodatkowego parametru, który poprzez zmianę jego wartości pozwala na odniesienie rezultatu do dużych lub małych fluktuacji występujących w sygnale. Klasyczna analiza za pomocą wykładnika Hursta zakłada, iż funkcja fluktuacji skaluje się potęgowo z długością skali, a wykładnik tego skalowania jest funkcją jedynie wspomnianego powyżej parametru wypuklającego rolę małych i dużych fluktuacji.

Autor przedstawia najbardziej popularne metody obliczania wykładnika Hursta i wskazuje na ich słabości, związane z takimi czynnikami, jak odporność na szum pomiarowy, czy też niedookreślone konkretne szczegóły ich wdrażania pozostawiające pewną słabo kontrolowalną dowolność w ich implementacji. Proponuje remedium w postaci opracowanej przez niego metody nazywanej wieloskalową analizą fraktalną, w której lokalny wykładnik Hursta zastępuje się funkcją dwóch zmiennych: skali i parametru określającego wielkość (amplitudę) fluktuacji. Oczywiście zależność funkcji fluktuacji od skali przestaje być czysto potęgowa, jednak pozostaje taką w dobrym przybliżeniu w wypadku słabej zależności wykładnika od skali. Wykres omawianej funkcji jest więc dwuwymiarową powierzchnią nazywaną przez autora powierzchnią Hursta i to ona jest głównym obiektem badania (i wizualizacji) wyników analizy. Ten prosty, na pierwszy rzut oka, pomysł okazuje się bardzo płodny. Panu mgr. inż. Gierałowskiemu udało się wykazać przewagi jego metody nad stosowanymi dotychczas, pozwala ona bowiem na usunięcie wielu słabości tychże, związanych np. z koniecznością arbitralnego decydowania o dopasowaniu trendu, niezbędnego dla wyliczenia wykładnika Hursta dla średnich skal, tu bowiem wykładnik ten *explicite* zależy od skali. Przede wszystkim jednak, co autor wykazuje w drugiej części pracy, opracowana metoda jest skuteczna i płodna w zastosowaniach medycznych. Oczywiście, sama metoda może znaleźć zastosowanie wszędzie tam, gdzie przebiegi czasowe wykazują charakterystyki (multi)fraktalne, a więc np. w ekonomii, o czym autor pisze wspominając o oddźwięku jakim cieszy się jego stosunkowo niedawno opublikowana praca, w której po raz pierwszy przedstawiono omawianą metodę.

Druga część pracy (rozdział 5) poświęcona jest, przede wszystkim, zastosowaniom opracowanej metody do danych klinicznych dotyczących porównania własności rytmu serca u osób zdrowych i dotkniętych różnymi chorobami serca, rozwoju układu regulacji rytmu serca u płodu oraz analizie wpływu fazy snu na fraktalne własności rytmu serca.

Autor ze współpracownikami opracował metody efektywnej analizy własności powierzchni Hursta, co pozwoliło mu na pokazanie, iż powierzchnie te mają, średnio, inne własności w wypadku osób zdrowych i chorych, a ponadto różnym, wybranym schorzeniom serca odpowiadają powierzchnie Hursta o innych własnościach charakterystycznych. Kryteria pozwalające na stwierdzenie występowania takich różnic i ich opisywanie są stosunkowo łatwe do zastosowania i, w dodatku, przetłumaczalne na cechy jakościowe, łatwe do opisu w praktycznym stosowaniu. Obserwowane charakterystyczne cechy powierzchni Hursta zostały stwierdzone w wyniku analizy stosunkowo dużych zbiorów danych klinicznych, co daje wnioskowi solidną podstawę. Dalsze badania mogą sprawić, że zaobserwowane cechy charakterystyczne powierzchni Hursta mogą być wykorzystywane w diagnostyce konkretnych przypadków. Autor, mniej lub bardziej *explicite*, wyraża taką nadzieję, jednak słusznie pozostaje tu bardzo ostrożny i zwraca uwagę na potrzebę dalszych badań na podstawie większych zbiorów danych.

Drugie z zastosowań opracowanej metody MMA dotyczyło analizy zmienności charakterystyk fraktalnych rytmu serca płodu w zależności od jego wieku. Można zasadnie przypuszczać, że własności te istotnie zależą od stopnia rozwoju płodu (autor przytacza tu argument, że w czasie rozwoju płodowego następuje dążenie do obserwowanej u osobników dorosłych koordynacji działania wszystkich organów, co wymaga sukcesywnych zmian ich działania w rozwoju płodowym) i powinny być widoczne we własnościach rytmu serca w zależności od wieku płodu. Pozwalałoby to nie tylko na diagnostykę rozwoju samego serca, ale też na ocenę stopnia rozwoju całego organizmu. Autor koncentruje się na zidentyfikowaniu tych własności sygnału (poprzez znajdowanie charakterystycznych punktów na powierzchni Hursta, które pozwalają na predykcję wieku płodowego. Analiza taka pozwoliła mu na sformułowanie hipotezy, że małe fluktuacje w małych skalach czasowych związane są z aktywnością autonomicznego układu nerwowego, natomiast w dużych skalach z centralnym układem nerwowym.

W ramach poszukiwania odpowiedzi na pytanie jakie procesy fizjologiczne mają decydujący wpływ na fraktalność rytmu serca, zbadano metodą MMA, tzn. poprzez analizę powierzchni Hursta, wpływ różnych faz snu (REM i NREM) na fraktalne własności rytmu, pokazując istotną (wbrew oczekiwaniom) rolę NREM. Oczywiście, co zresztą autor kilkakrotnie podkreśla, tego typu wyniki dają raczej mały wgląd w istotę procesów fizjologicznych, jednak przybliżają możliwość zrozumienia ich roli poprzez dobre oddzielenie procesów istotnych i mniej istotnych dla danego zjawiska (w tym wypadku, fraktalności rytmu serca).

W podsumowaniu merytorycznych walorów pracy pragnę stwierdzić, że pan mgr inż. Gierałtowski uzyskał szereg bardzo interesujących rezultatów teoretycznych dotyczących analizy szeregów czasowych, w szczególności podał skuteczną i lepszą od stosowanych dotychczas metodę charakteryzacji cech fraktalnych takich przebiegów. Co równie ważne pokazał stosowalność tej metody do zagadnień diagnostyki lekarskiej, co sprawia, iż cała rozprawa jest wzorcowym przykładem interdyscyplinarnego podejścia do nauki. Cała rozprawa stanowi bez wątpienia ustawowo wymagane „oryginalne rozwiązanie problemu naukowego”.

Również konstrukcja pracy zasługuje na najwyższe uznanie. Autor jasno uzasadnia wybór tematyki rozprawy poprzez przedstawienie konkretnych, nierozwiązanych problemów, zarówno teoretycznych jak i aplikacyjnych związanych z analizą szeregów czasowych, w tym problemów jakie powstają przy stosowaniu dotychczas znanych metod (rozdział 1.2). W równie przejrzysty sposób formułuje cele rozprawy (rozdział 1.3) i jej tezy (rozdział 1.4). W części monograficznej (rozdziały 1.5-2.7) przedstawiającej stan badań i dostępne metody analizy szeregów czasowych autor zawarł wszystkie istotne informacje. Sama oryginalna metoda autora przedstawiona została wyczerpująco w rozdziale 3, a jej zastosowanie wraz z dyskusją w sposób niezwykle przejrzysty w rozdziałach 4 i 5. Na szczególną pochwałę zasługuje rozdział 6. stanowiący posumowanie rozprawy. Zawiera on nie tylko najważniejsze wnioski z przedstawionych w rozprawie badań, ale także

syntetyczną analizę zalet i wad prezentowanego podejścia, proponuje również kierunki dalszych badań. Zdaję sobie sprawę z powodzi superlatywów, które zawarłem w tym akapicie, chciałem oddać nimi prosty fakt, że rozprawę, po prostu, „bardzo dobrze się czyta”. Tu też nasuwa się określenie „wzorowa” w odniesieniu do jej konstrukcji i redakcji.

Pozycje bibliograficzne dotyczące teoretycznych podstaw analizy sygnałów czasowych zostały dobrze wybrane. Jeśli weźmie się pod uwagę olbrzymią liczbę prac publikowanych w tym obszarze tematycznym, należało się skoncentrować na pozycjach najważniejszych i monograficznych, co autor uczynił. Sądzę, że taka samą taktykę zastosował w wypadku prac medycznych, tu jednak brak mi odpowiednich kompetencji do oceny. W kilku wypadkach informacja podana w bibliografii jest niepełna (brak numerów stron, np. już w pozycji 1 – oryginalnej pracy autora, na której bazuje rozprawa, co przedłużyło mi o kilka chwil dotarcie do niej).

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska pana mg. inż. Jana Gierałtowskiego pt. *Wielkoskalowa analiza właściwości fraktalnych rytmu serca człowieka* spełnia wszelkie wymagania, zarówno formalne, jak i zwyczajowe stawiane tego typu pracom i wnioskuję o dopuszczenie jej autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Jednocześnie proponuję wyróżnienie pracy jeśli tylko spełnione zostaną ustalone przez Radę Wydziału Fizyki PW kryteria dotyczące przebiegu egzaminu i obrony. Swoją propozycję pragnę uzasadnić za pomocą wymienionych już w mojej recenzji wysokich ocen zarówno merytorycznej zawartości rozprawy, jak i jej strony redakcyjnej. Przede wszystkim więc autor skonstruował nową metodę analizy własności fraktalnych szeregów czasowych, która unika wad metod stosowanych dotychczas. Metoda ta znajduje zastosowanie w różnych dziedzinach nauki, o czym świadczy rezonans w postaci publikacji innych autorów, który zbudził ją po jej opublikowaniu w *Physical Review A*. Zastosowanie jej przez autora do analizy danych klinicznych dotyczących zmienności rytmu serca pokazało jej praktyczną stosowalność, a osiągnięcia opisane w rozprawie stanowią wzorcowy przykład interdyscyplinarnej działalności naukowej, której wyniki są istotne i interesujące z punktu widzenia obu dziedzin nauki (w tym wypadku fizyki i medycyny). Również sama konstrukcja rozprawy zasługuje na miano wzorca.

Warszawa, 27.12.2016


prof. dr hab. Marek Kuś