

Łódź, 4 stycznia 2025 r.

prof. dr hab. inż. Michał Strzelecki
Instytut Elektroniki Politechniki Łódzkiej
Al. Politechniki 8
93-590 Łódź

**Recenzja osiągnięcia naukowego oraz istotnej aktywności naukowej
dr inż. Marty Borowskiej**

Przedmiotem recenzji jest ocena osiągnięcia naukowego oraz istotnej aktywności naukowej dr inż. Marty Borowskiej w związku z wszczętym na Jej wniosek w dniu 3.06.2024 r. postępowaniem w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego prowadzonym w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria biomedyczna. Podstawą recenzji jest uchwała nr 11/2024-2028 Rady Naukowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej z dnia 25.09.2024 r. powołującej mnie na recenzenta w tym postępowaniu.

Przedłożona przez Habilitantkę dokumentacja obejmuje wniosek o wszczęcie postępowania habilitacyjnego, dane Wnioskodawczyni, kopię dyplomu potwierdzającego uzyskanie stopnia doktora, wykaz osiągnięć naukowych oraz monografię i publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego wraz z oświadczeniami współautorów dotyczącymi ich udziałów w tych publikacjach.

1. Przebieg kariery zawodowej Habilitantki

Kariera zawodowa dr inż. Marty Borowskiej jest związana z białostockimi uczelniami. W roku 2001 roku ukończyła studia magisterskie na kierunku informatyka, specjalność projektowanie systemów aplikacyjnych na Politechnice Białostockiej. W roku 2011 uzyskała stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie informatyka na podstawie rozprawy doktorskiej „Analiza sygnałów EEG za pomocą nieliniowych deskryptorów synchronizacji” (promotor dr hab. Edward Stanisław Oczeretko, stopień nadany przez Radę Naukową

Wydziału Informatyki Politechniki Białostockiej). W latach 2000-2013 była zatrudniona na stanowiskach asystenta, wykładowcy oraz adiunkta w Instytucie Informatyki Uniwersytetu w Białymstoku. Z kolei od 2013 do chwili obecnej pracuje w Instytucie Inżynierii Biomedycznej Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej na stanowisku adiunkta.

2. Ocena osiągnięć naukowych

Swoje osiągnięcia naukowe Habilitantka przedstawiła w monografii „Wprowadzenie do zastosowania entropii w analizie sygnałów i obrazów biomedycznych oraz jej aplikacje w medycynie i weterynarii” wydanej przez Oficynę Wydawniczą Politechniki Białostockiej w Białymstoku w 2023 r. oraz w cyklu 6. spójnych tematycznie publikacji zatytułowanym:

„Zastosowanie wybranych metod analizy tekstury obrazów w medycynie”

W skład tego cyklu wchodzi następujące publikacje:

- [O1] Borowska M., Oczeretko E., Szarmach J.: Fractal texture analysis of the healing process after bone loss, Computerized Medical Imaging and Graphics, vol. 46, 2015.
- [O2] Borowska M., Borys K., Szarmach J., Oczeretko E.: Fractal dimension in textures analysis of xenotransplants, Signal Image and Video Processing, vol. 11, 2017.
- [O3] Borowska M., Bębas E., Szarmach J., Oczeretko E.: Multifractal characterization of healing process after bone loss, Biomedical Signal Processing and Control, vol. 52.
- [O4] Girejko G., Borowska M., Szarmach J.: Statistical Analysis of Radiographic Textures Illustrating Healing Process After the Guided Bone Regeneration Surgery, w: Information Technology in Biomedicine: Proceedings 6th International Conference: ITIB 2018, Pietka Ewa [i in.] (red.), Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 762, 2018, Springer.
- [O5] Trochim B., Borowska M., Szarmach J.: Analysis of X-rays in bone remodelling around Active and Replace dental implants, Signal Image and Video Processing, vol. 16, nr 1, 2022.
- [O6] Bębas E., Borowska M., Derlatka M., Oczeretko E., Hładuński M., Szumowski P., Mojsak M.: Machine-learning-based classification of the histological subtype of non-small-cell lung cancer using MRI texture analysis, Biomedical Signal Processing and Control, vol. 66, 2021.

Wchodzące w skład osiągnięcia monografia oraz cykl publikacji dotyczą zagadnień związanych z analizą sygnałów i obrazów biomedycznych zarejestrowanych dla ludzi i zwierząt w celu wspomagania diagnostyki różnych schorzeń, oceny funkcjonowania wybranych narządów i organów oraz oceny skuteczności terapii stosowanej w wybranych zabiegach stomatologicznych.

W przedłożonym cyklu publikacji pięć z nich zostało opublikowanych w czasopismach posiadających tzw. współczynnik wpływu (Impact Factor, IF) a jedna w materiałach międzynarodowej konferencji Information Technology in Biomedicine. Wszystkie te publikacje są wieloautorskie, Habilitantka jest pierwszym autorem w trzech z nich. Udział dr Borowskiej

w tych publikacjach waha się od 20% do 80%, co daje średni udział wynoszący ok. 47%, zatem wkład Habilitantki w ich powstanie jest istotny.

Materiał opisany w monografii można podzielić na dwie części. W pierwszej z nich (rozdziały 1 – 3) przedstawiono i szczegółowo omówiono szereg miar entropii wykorzystywanych w analizie sygnałów oraz obrazów. Szczególnie interesujące są przedstawione warianty entropii, które można zastosować do analizy obrazów, w tym do analizy tekstury. Część opisanych miar entropii stanowi opracowanie autorskie. Dla większości tych miar podano algorytmy służące do ich wyliczenia. Przeanalizowano również właściwości miar entropii na podstawie analizy syntetycznych sygnałów o różnych właściwościach. Druga część monografii przedstawia zastosowania opisanych parametrów do analizy wybranych sygnałów i obrazów biomedycznych. W rozdziale 4. przedstawiono wyniki badania sygnałów elektromiograficznych macicy u loch w celu oceny układu rozrodczego i zaburzeń aktywności skurczowej macicy tych zwierząt. Sygnały zarejestrowane w macicy wykazały istotne statystycznie zróżnicowanie różnych miar entropii dla fazy międzyrujowej oraz okresu rui. Kolejne badania dotyczyły analizy aktywności elektrycznej przewodu pokarmowego owiec, co jest istotne z punktu widzenia oceny aktywności mięśniówki gładkiej żwacza-czepca i trawieńca. Analiza sygnałów EMG zarejestrowanych w stanie spoczynku oraz podczas pożywiania się owiec pokazała ponownie, że miary entropii pozwalają na zróżnicowanie tych sygnałów. Analizowano również aktywność skurczową macicy kobiet w celu przewidywania przedwczesnego porodu. Są to istotne badania, uzupełniające klasyczne badanie KTG przeważnie stosowane do tego celu. Analiza sygnałów bioelektrycznych u ciężarnych kobiet z użyciem elektrohisterografii pozwoliła na zróżnicowanie pacjentek, o których wystąpił poród do 7 dni od zgłoszenia się do szpitala. Potwierdza to przydatność zastosowanej metody do przewidywania porodu przedwczesnego. Rozdział 5. monografii przedstawia zastosowania dwuwymiarowych miar entropii do analizy tekstury wybranych obrazów biomedycznych. Jedno z opisanych badań dotyczy przeprowadzonej oceny zdjęć rentgenowskich zębów siecznych koni. Celem tych prac jest ocena przydatności entropii w detekcji resorpcji i hipercementozy takich zębów. Kolejne badania dotyczyły możliwości użycia entropii w ocenie procesu przebudowy kości wokół implantów stomatologicznych na podstawie zdjęć RTG (założenia tego badania zostały opisane przy ocenie publikacji [O1]). W obydwu przypadkach udało się wykazać statystycznie istotne zróżnicowanie parametrów tekstury przy analizie badanych klas obrazów. Natomiast nie udało się tego wykazać przy analizie obrazów RTG w procesie leczenia ubytków kostnych. W tym wypadku na podstawie wartości użytych miar nie można było rozróżnić obrazów kości wykonanych przed zabiegiem oraz w rok po zabiegu ekstrakcji zęba. Nie jest natomiast jasny cel podrozdziału 5.1, gdzie przedstawiono różne syntetyczne obrazy tekstur, nie przeprowadzając jednak żadnej ich analizy (choć z treści autoreferatu wynika, że jednak jakieś analizy były prowadzone, ale ich wyniki nie zostały opisane w treści monografii).

W publikacji [O1] dokonano oceny skuteczności metody regeneracji kości po zabiegach resekcji korzenia z cystektomią. Przeanalizowano rentgenowskie obrazy 25 pacjentów, u których po tych zabiegach zastosowano terapię z wykorzystaniem ksenogennego materiału kościozastępczego. Proces regeneracji kości oszacowano porównując obrazy wykonane w dniu operacji i po 12 miesiącach. Do analizy tych obrazów zastosowano analizę tekstury z użyciem wyznaczonych wartości wymiaru fraktalnego, uwzględniając 5 różnych definicji tego wymiaru. Badania wykazały istotne statystycznie różnice w uśrednionych wartościach tego parametru dla badań wykonanych przez zabiegiem oraz po roku od zabiegu. Zaobserwowano

zmniejszenie się wartości wymiaru fraktalnego w trakcie procesu gojenia po utracie kości, co wskazuje, że parametry tekstury obrazu kości odwzorowują zmiany zachodzące w trakcie procesu regeneracji tkanki kostnej. Bardzo podobne badania opisano w [O2], gdzie dla obrazów tej samej grupy pacjentów zastosowano dwie kolejne metody wyznaczania wymiaru fraktalnego (wymiar pudełkowy i informacyjny). Potwierdzono wcześniej uzyskane wyniki wskazujące na istotne statystycznie zmiany wartości tego parametru dla tekstur analizowanych w zdjęciach rentgenowskich uzyskanych przed oraz po 12 miesiącach od zabiegu. Ponownie te same dane (tylko dla ograniczonej liczby 19 pacjentów) wykorzystano do oceny przydatności analizy multifraktalnej w szacowaniu skuteczności metody regeneracji kości z użyciem analogicznego materiału kościozastępczego [O3]. Uzyskane wyniki również w tym razem potwierdziły zróżnicowanie wykresów funkcji spektrum fraktalnego oraz współczynnika skalowania jak i innych parametrów tych wykresów wyznaczonych dla obrazów jamy ustnej zarejestrowanych przed i w rok po zbiegu ekstrakcji zęba. Kolejna praca [O4] analizuje przydatność do tego celu innych parametrów tekstury, uzyskanych z macierzy zdarzeń (GLCM) oraz macierzy długości ciągów (RLM). Autorka stosuje również wybrane parametry 1. rzędu wyznaczone dla histogramu obrazu, jednak błędnie określa je jako parametry tekstury. Parametry te nie określają bowiem struktury obrazowanych obiektów, tylko właściwości rozkładu poziomów jasności wizualizujących te obiekty. Eksperymenty wykazały, że kilkanaście badanych parametrów, w tym cechy histogramu, statystycznie istotnie różnicuje obrazy kości wykonane przed zabiegiem oraz w okresie roku po zabiegu. Publikacja ta zawiera jednak pewne niejasności. Nie określono, dla jakich kierunków oraz odległości pomiędzy pikselami obrazu zbudowano macierz GLCM. Nie podano to też definicji niektórych wyliczanych parametrów na podstawie tej macierzy. Dotyczy to głównie tych cech, które nie zostały zdefiniowane przez Roberta Haralicka, autora tej (i wielu innych) metody analizy tekstur. W związku z tym opisane w [O4] eksperymenty byłyby trudne do powtórzenia.

Praca [O5] dotyczy możliwości oceny zmian zachodzących w kościach bezpośrednio po wprowadzeniu implantów dentystycznych oraz w okresie 12 miesięcy po zabiegu. Analizowano rentgenowskie zdjęcia pacjentów z implantami jedno- i dwugwintowymi oceniając stan kości szczęki i żuchwy. Do analizy wykorzystano oprogramowanie QMazda, które pozwala na wyznaczenie wielu parametrów tekstury. W tym przypadku użyto parametrów wyliczanych dla macierzy gradientów, zdarzeń oraz długości ciągów. Uzyskane wyniki wykazały, że szereg parametrów tekstury różni się sposób istotny dla obrazów wykonanych po roku obciążenia protetycznego, od wyznaczonych dla zdjęć zarejestrowanych bezpośrednio po umieszczeniu implantów jak i dla cech obrazów tkanki zdrowej.

Praca [O6] dotyczy próby rozróżnienia 2 typów nowotworów płuc: raka gruczołowego oraz płaskonabłonkowego. Badania przeprowadzono na dopasowanych obrazach PET i MRI pozyskanych od 44 pacjentów z obydwoma typami nowotworów. Onkolodzy zaznaczyli obszary zainteresowania w tych obrazach, następnie dla tych obszarów wyliczono kilkaset parametrów tekstury z użyciem programu QMazda. Kolejnym krokiem była ich selekcja, pozostawiono tylko cechy w istotny sposób rozróżniające obydwa typy nowotworów. Parametry te podano na wejścia zarówno klasycznych klasyfikatorów (MLP, SVM, k-NN, ...) jak i sieci głębokiej (niestety, nie określono jej architektury). Uzyskano wyniki (miary dokładności, czułości, swoistości) w zakresie od 66% do 88%. Niestety w pracy nie podano sposobu walidacji zastosowanych modeli uczenia maszynowego. Ponadto w przyszłych badaniach rekomendowałbym dalszą redukcję liczby parametrów, ponieważ 135 cech przy 155 obrazach

nie pozwala na uzyskanie w pełni wiarygodnych wyników klasyfikacji. W związku z powyższym uzyskane wyniki są interesujące i obiecujące, należy jednak uznać je za wstępne.

Po lekturze monografii oraz publikacji nasuwa się kilka uwag. Autorka nie w pełni wykorzystała potencjał analizowanych miar entropii. O ile w większości wypadków wykazała, że statystycznie istotnie różnicują one badane klasy sygnałów czy obrazów, to zabrakło kolejnego kroku związanego z przeprowadzeniem klasyfikacji tych danych. Można w tym celu było zaczerpnąć z bogatego zbioru modeli uczenia maszynowego. W ten sposób nie zbadano w pełni przydatności stosowanych miar entropii w analizowanych problemach (takie badania wykonano jedynie w publikacji [O6]). Nie wykorzystano również skutecznie przeprowadzonych analiz PCA, choć należy pochwalić ideę redukcji wymiarowości przestrzeni zawierającej wiele różnych rodzajów entropii. Dla większości badań (poza przypadkami analizy biosygnałów zwierzęcych) przedstawione wykresy największych składowych głównych nie umożliwiają rozróżnienia badanych klas sygnałów i obrazów. Ponownie nie przeprowadzono próby klasyfikacji tych sygnałów w przestrzeni cech PCA. Kolejna uwaga dotyczy braku porównania zastosowanych metod analizy sygnałów i obrazów z metodami referencyjnymi. Istnieje ogromna liczba parametrów sygnałów oraz innych cech tekstury, których skuteczność należało porównać z badanymi miarami entropii lub wymiarami fraktalnymi (takie porównanie wykonano jedynie w publikacji [O6]).

Niemniej, wyniki przedstawione w monografii oceniam jako bardzo interesujące i ważne z punktu widzenia przeprowadzonej dogłębnej analizy przydatności różnych oryginalnych miar entropii w przetwarzaniu wybranych sygnałów i obrazów biomedycznych. Podsumowując ocenę osiągnięć naukowych stwierdzam, że dr Marta Borowska jest autorką oryginalnych metod z zakresu analizy sygnałów i obrazów biomedycznych pochodzących od ludzi i zwierząt. Na szczególne uznanie zasługują opracowane metody analizy biosygnałów zarejestrowanych u owiec i loch oraz obrazów stomatologicznych koni. Badania dotyczące takich danych są prowadzone dużo rzadziej w porównaniu do analiz biomedycznych sygnałów pochodzących od ludzi, natomiast uzyskane wyniki mogą mieć duże znaczenie w weterynarii. Opracowanie i implementacja tych metod stanowi istotny wkład w rozwój dyscypliny inżynieria biomedyczna. Główne osiągnięcia Habilitantki dotyczą:

- opracowania i implementacji metody analizy biosygnałów generowanych przez mięśnie różnych organów, u ludzi oraz u zwierząt z wykorzystaniem wielu rodzajów miar entropii,
- rozwoju metod analizy tekstury obrazów biomedycznych dzięki zbadaniu właściwości dwuwymiarowych miar entropii i wymiaru fraktalnego dla oceny skuteczności terapii stosowanej w wybranych zabiegach stomatologicznych (u ludzi) oraz wybranych zmian zachodzących w tkance zębowej u koni.

3. Ocena aktywności naukowej Habilitantki

Dr Marta Borowska odbyła miesięczny staż naukowy w Department of Biomechanical Engineering, Vilnius Gediminas Technical University, Litwa w okresie od 29.01.2024 r. do 29.02.2024. Prowadziła tam badania dotyczące pozyskiwania i oceny parametrów morfometrycznych charakteryzujących poszczególne zatoki według wieku zdrowego konia na

podstawie analizy obrazów tomografii komputerowej głowy koni. Badania dotyczyły też oceny zatok koni cierpiących na zapalenia lub torbiele zatokowe.

Habilitantka współpracowała również z Katedrą Chorób Dużych Zwierząt Instytutu Medycyny Weterynaryjnej SGGW w Warszawie. Odbyla tam staż o okresie od 01.01.2022 r. do 31.03.2022 r. Wraz z pracownikami Katedry prowadziła badania dotyczące analizy obrazów radiologicznych zębów siecznych koni w celu identyfikacji istotnych cech z punktu widzenia oceny klinicznej radiologicznej resorpcji i hipercementozy tych zębów w przebiegu syndromu EOTRH.

Kolejny staż dr Borowska odbyła w Centrum Badawczym Uniwersytetu Medycznego w Białymstoku w dniach od 25.03.2016 r. do 24.04.2016 r. Celem stażu było poznanie sekwencji obrazowania oraz protokołów badań w tomografii rezonansu magnetycznego oraz tomografii komputerowej w zastosowaniach diagnostyki obrazowej mającej na celu wykrywanie nowotworów u ludzi.

Dr Marta Borowska współpracowała współpracuje również z różnymi naukowymi ośrodkami krajowymi:

- Klinika Perinatologii Uniwersytetu Medycznego w Białymstoku - współpraca dotyczy oceny czynności skurczowej macicy w oparciu o analizę sygnałów bioelektrycznych rejestrowanych na powierzchni brzucha ciężarnych kobiet,
- Klinika Neurologii Dziecięcej Uniwersytetu Medycznego w Białymstoku - współpraca związana z analizą sygnałów EEG w celu przewidywania wystąpienia ataku padaczki,
- Zakład Chirurgii Stomatologicznej Uniwersytet medyczny w Białymstoku - współpraca dotyczy analizy obrazów radiologicznych w różnych zastosowaniach stomatologicznych, m.in. dla oceny stanów zapalnych jamy ustnej, oceny wpływu wszczepianych materiałów na otaczające tkanki lub procesu gojenia ubytków kostnych czy po implantacji,
- Laboratorium Obrazowania Molekularnego Uniwersytetu Medycznego w Białymstoku – wspólne prace dotyczą zastosowania analizy fraktalnej do oceny guzów w obrazach PET/MRI,
- Katedra Chorób Dużych Zwierząt Instytutu Medycyny Weterynaryjnej SGGW w Warszawie - współpraca była związana z wykonaniem analizy sygnałów telemetrycznych reprezentujących aktywność skurczową macicy u loch. Wspólnie z dr Grahamem Smythem z Griffith University School of Medicine w Australii prowadzone są też badania dotyczące analizy obrazów 2D w różnych zastosowaniach weterynaryjnych, m.in. dla oceny pracy grzbietu koni pod zmiennym obciążeniem lub oceny kształtu grzbietu koni w zależności od funkcjonalnego statusu kondycji ciała.

Habilitantka była kierownikiem grantu "Zastosowanie analizy tekstury trójwymiarowych obrazów Tomografii Komputerowej (TK) do detekcji objawów radiologicznych resorpcji i hipercementozy zębów na modelu głowy koni w przebiegu syndromu EOTRH", uzyskanego w ramach konkursu NCN Miniatura i realizowanego w latach 2022—2023). Celem projektu było opracowanie i implementacja metod analizy tekstury obrazów radiologicznych do oceny ilościowej objawów charakterystycznych dla resorpcji i hipercementozy zębów siecznych w przebiegu EOTRH u koni.

Ponadto Habilitantka brała udział w roli wykonawcy w realizacji projektu „Identyfikacja i wdrożenie kompetencji badawczych, transferu technologii na rzecz przemysłu”

realizowanego w ramach programu „Nauka dla Społeczeństwa II” Ministra Edukacji i Nauki przewidzianego na lata 2024-2026.

Dorobek publikacyjny dr Borowskiej obejmuje łącznie 69 publikacji naukowych. Trzydzieści z tych publikacji ukazało się w czasopismach posiadających współczynnik wpływu, pozostałe to artykuły w innych czasopismach (19), rozdziały w monografiach (9) oraz artykuły konferencyjne (11). Pośród tych czasopism są również tytuły istotne dla dyscypliny inżynieria biomedyczna jak Computerized Medical Imaging and Graphics, Biomedical Signal Processing and Control, Signal Image and Video Processing.

Liczba cytowań prac Habilitantki wynosiła w chwili składania wniosku to 222 (193 bez autocytowań) w bazie Web of Science oraz 456 (393 bez autocytowań) w bazie Scopus. Indeks Hirscha wynosił 10 i 12 dla obydwu tych baz odpowiednio. Wartości parametrów bibliometrycznych Habilitantki pozwalają na stwierdzenie, że Jej prace są rozpoznawalne w środowisku międzynarodowym i cieszą się zainteresowaniem innych naukowców zajmujących się zbliżoną tematyką. Należy też stwierdzić z uznaniem, że liczba cytowań Habilitantki wzrosła od momentu składania wniosku do stycznia br. do 483, co potwierdza zainteresowanie środowiska naukowego prowadzonymi przez Nią badaniami.

Dr Borowska jest również autorką 21 recenzji publikacji dla czasopism posiadających IF oraz projektu badawczego Holistic explainable artificial intelligence schemes for lung cancer prognosis (French National Research Agency, 2021). Jest także członkiem Polskiego Towarzystwa Informatycznego oraz Polskiego Towarzystwa Telemedycyny i e-Zdrowia. Należała także do komitetów organizacyjnych konferencji The 12th International Conference Mechatronic Systems and Materials 2016 oraz 14th International Conference BIOMDLORE 2023, które odbyły się w Białymstoku.

Podsumowując, aktywność naukową Habilitantki oceniam pozytywnie, mimo ograniczonego udziału w projektach badawczych. Niemniej, jest ona wystarczająca w punktu widzenia wymagań stawianych kandydatom do stopnia doktora habilitowanego przez przepisy obecnej ustawy Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce.

4. Wniosek końcowy

Analizując dorobek Habilitantki oraz przedstawione do oceny osiągnięcia naukowe opisane w monografii cyklu artykułów „Wprowadzenie do zastosowania entropii w analizie sygnałów i obrazów biomedycznych oraz jej aplikacje w medycynie i weterynarii” oraz w cyklu publikacji „Zastosowanie wybranych metod analizy tekstury obrazów w medycynie” należy stwierdzić, że wykazała się Ona umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych na odpowiednim poziomie a także umiejętnością współpracy z zespołami z innych ośrodków badawczych. Wyniki tych badań zostały udokumentowane dzięki publikacjom w renomowanych czasopismach i stanowią ważny wkład do dyscypliny inżynieria biomedyczna. Tym samym przedłożone przez dr Martę Borowską osiągnięcia naukowe spełnia wymagania art. 219 ust. 1 p. 2 ustawy Prawo o szkolnictwie wyższymi nauce z 20 lipca 2018 r. z późn. zm. Za istotną uznaję również aktywność naukową Habilitantki, która spełnia wymagania art. 219 ust. p. 3 w/w ustawy.

Podsumowując, Habilitantka spełnia wszystkie wymagania formalne i merytoryczne stawiane kandydatom do uzyskania stopnia doktora habilitowanego. Z tych powodów wnioskuję o nadanie dr inż. Marcie Borowskiej stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria biomedyczna.

Krzysztof Stachurski