

Janusz Braziewicz  
Instytut Fizyki  
Uniwersytet Jana Kochanowskiego  
Kielce

**Recenzja osiągnięcia habilitacyjnego**  
nt. „*Digital Signal and Image Processing*  
*in Jagiellonian Positron Emission Tomography*”  
dr. Lecha Raczynskiego  
z Narodowego Centrum Badań Jądrowych

Otrzymany do recenzji materiał, związany ze zgłoszonym tematem osiągnięcia naukowego, stanowi oryginalna monografia naukowa nt. „*Digital Signal and Image Processing in Jagiellonian Positron Emission Tomography*” wydana przez Jagiellonian University Press w roku 2021 (ISBN 978-83-233-5015-6. W monografii tej, na liście referencji, znajdujemy 7 oryginalnych prac autorstwa i współautorstwa Pana Lecha Raczynskiego, stanowiących jej podstawę, opublikowanych w recenzowanych czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JCR). Sumaryczny Impact Factor tych prac wynosi: IF 9,84, a wyszczególnione prace były cytowane ponad 200 razy. We wszystkich zgłoszonych pracach Habilitant był inicjatorem projektu, osobą odpowiedzialną za zaplanowanie i wykonanie badań lub symulacji oraz analizę otrzymanych danych.

W swoim dorobku autor wymienia ponad 50 oryginalnych prac opublikowanych po uzyskaniu stopnia doktora w recenzowanych czasopismach naukowych.

Technika pozytonowej tomografii emisyjnej (PET) jest jedną z najbardziej dynamicznie rozwijających się metod obrazowych stosowanych w medycynie w badaniach diagnostycznych, ale również, jak pokazuje przykład krakowskiego J-PET, jako narzędzie wspomagające terapię z wykorzystaniem wysokoenergetycznej wiązki protonowej.

Rozwój techniki PET zależy bezpośrednio od najnowszych badań naukowych w zakresie rejestracji i przetwarzania sygnałów. Znaczną poprawę zdolności rozdzielczej w nowych skanerach PET osiągnięto po wdrożeniu techniki „time of flight” (TOF). Jest to podstawowa metoda obrazowania molekularnego, ale jak pokazuje przykład J-PETa, również obrazowania procesów fizycznych zachodzących w ciele pacjenta w wyniku oddziaływania wysokoenergetycznych protonów.

Na Uniwersytecie Jagiellońskim rozwijana jest zupełnie nowa technologia skanera PET opartego na plastikowych scyntylatorach, który obecnie jest intensywnie testowany w terapii protonowej CCB w Krakowie do określania miejsca depozycji wiązki protonowej. Unikalność tego rozwiązania polega na jego blokowej budowie, której konfiguracja może być zmienna w zależności od potrzeb.

Wykorzystywane w J-PET, plastikowe scyntylatory mają znacznie mniejszą wydajność detekcji anihilacyjnych kwantów gamma o energii 511 keV, w porównaniu z nieorganicznymi kryształami scyntylacyjnymi stosowanymi w skanerach medycznych. Niedogodność ta jest kompensowana poprzez zwiększenie pola obrazowania FOV oraz poprawę czasowej zdolności rozdzielczej w pomiarze czasu przelotu kwantów promieniowania. Jest to niezbędne w J-PET, który składa się z długich pasków scyntylacyjnych ułożonych na obwodzie powierzchni cylindrycznej. Tutaj, w pojedynczym pasku, pozycja oddziaływania kwantu z materiałem detektora wyznaczana jest przez pomiar różnicy czasu propagacji impulsów świetlnych na drodze do fotopowielaczy znajdujących się na dwóch przeciwległych końcach paska.

Ze względu na odmienną stosowaną technologię względem „tradycyjnych” skanerów PET oraz kluczową rolę informacji o czasie przelotu kwantów gamma, konieczne było opracowanie odmiennych metod przetwarzania sygnałów skanera J-PET.

Recenzowana działalność naukowa dr. Lecha Raczyńskiego doskonale wpisuje się w oczekiwania i potrzeby grupy badawczej skupionej na Uniwersytecie Jagiellońskim w ramach projektu J-PET. Rolą Habilitanta było opracowanie szeregu algorytmów cyfrowego przetwarzania sygnałów i obrazów na wszystkich etapach rekonstrukcji, i jak wymienia w swoim autoreferacie, było to:

1. odtwarzanie impulsów czasowych z fotopowielaczy,
2. wyznaczanie pozycji oraz czasu oddziaływania anihilacyjnego kwantu gamma z paskiem scyntylacyjnym,
3. stworzenie teoretycznego modelu umożliwiającego obliczenie rozdzielczości czasowej tomografu PET,
4. oddzielenie zdarzeń tła od przypadków nadających się do rekonstrukcji obrazu,
5. rekonstrukcja obrazu oparta o projekcję wsteczną rejestrowanych zdarzeń z uwzględnieniem czasu przelotu kwantów gamma.

Odmienną budowę J-PET skanera oraz innowacyjne i niespotykane dotąd metody detekcji promieniowania anihilacyjnego pociągały za sobą konieczność stworzenia innowacyjnych rozwiązań w cyfrowym przetwarzaniu danych tomograficznych. W tym zakresie dr Lech Raczyński odegrał wiodącą rolę i jego działalność naukowa pozwoliła rozwiązać szereg problemów

związanych z przetwarzaniem sygnałów i rekonstrukcją tomograficzną. Wdrożone przez Habilitanta rozwiązania umożliwiają obecnie rozpoczęcie prac nad konstrukcją nowego rozwiązania jakim jest skaner całego ciała.

Szczegółowe osiągnięcia naukowe związane z metodami cyfrowego przetwarzania danych w skanerze PET obejmowały:

Procedura rejestracji impulsów czasowych z fotopowielaczy w zespole J-PET wymagała opracowania i budowy układu elektronicznego do odczytu sygnałów na kilku wybranych poziomach napięć, na zboczu narastającym i opadającym. Jednym z najważniejszych zagadnień opracowanej metody odtwarzania sygnałów czasowych było wyznaczenie zależności błędu odtworzenia sygnału od liczby progów do odczytu amplitudy. Przeprowadzone przez Habilitanta analizy teoretyczne zostały następnie zweryfikowane w oparciu o dane eksperymentalne, gdzie wykazano konieczność stosowania układu elektronicznego umożliwiającego próbkowanie tylko na czterech poziomach napięć.

W technice PET wyznaczenie pozycji oraz czasu oddziaływania kwantu anihilacyjnego z detektorem odgrywa kluczową rolę w dalszym procesie przetwarzania i akceptacji sygnałów do dalszej procedury rekonstrukcji obrazu. Zastosowanie nowego typu detektorów w postaci pasków plastikowych wymagało innowacyjnego podejścia do tego zagadnienia. Habilitant stworzył tu algorytm opierający się na statystycznym modelowaniu cech możliwego sygnału napięciowego. W ramach swojej pracy zaproponował zmodyfikowaną metodę testu statystycznego do badania wielowymiarowych rozkładów normalnych rejestrowanych danych.

Czasowa rozdzielczość skanera PET jest kluczowym parametrem z punktu widzenia procedury rekonstrukcji obrazu. W tym zakresie tematycznym Habilitant stworzył model teoretyczny analizy błędów rekonstrukcji łącznej funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla statystycznych zjawisk, tj. emisji światła w scyntylatorze pod wpływem promieniowania anihilacyjnego, propagacji impulsów świetlnych wzdłuż plastikowego detektora scyntylacyjnego używanego w J-PET, oraz przejścia fotoelektronów przez fotopowielacz. Zaproponowana przez dr. Lecha Raczyńskiego metoda estymacji została potwierdzona przez szereg przeprowadzonych symulacji Monte-Carlo. Jednocześnie metoda szacowania rozdzielczości czasowej tomografu została potwierdzona przez wysoką zgodność z rzeczywistymi wynikami pomiarowymi.

Jakość finalnych obrazów tomograficznych PET jest determinowana sposobem rejestracji i jakością rejestrowanych danych wejściowych, wymagających akceptacji lub odrzucania określonych zdarzeń. W tym zakresie tematycznym Habilitant zaproponował rozwiązanie polegające na zapisie kolejnych zdarzeń w trybie list-mode, w którym każde zdarzenie zostało opisane

przez wielowymiarowy wektor cech oraz metodę klasyfikacji tak zarejestrowanych zdarzeń.

Wykonane prace były niezbędne do przeprowadzenia finalnego etapu, w którym Autor proponuje oryginalną technikę rekonstrukcji obrazu. Przeprowadzone przez Niego badania symulacyjne wykazały, że zaproponowany algorytm rekonstrukcji obrazu jest szybszy niż „klasyczna” analityczna metoda filtrowanej projekcji wstecznej dla skanerów ToF-PET oraz umożliwia otrzymanie obrazów o wyższej jakości, niż te otrzymywane iteracyjną metodą TOF-MLEM.

W podsumowaniu należy podkreślić wyjątkowe znaczenie prac, prowadzonych przez Autora dla rozwoju unikatowego rozwiązania diagnostycznego jakim jest krakowski J-PET. W przeciwieństwie do stosowanych konwencjonalnych skanerów PET, jeden pasek z tworzywa sztucznego zastępuje cały rząd scyntylatorów krystalicznych w kierunku osiowym i wymaga jedynie dwóch dedykowanych fotopowielaczy odczytujących na jego końcach. Ten innowacyjny skaner J-PET jest planowanym narzędziem do pomiaru przestrzennego rozkładu  $\beta^+$  radioizotopów tak deponowanych w ciele pacjenta w trakcie procedur diagnostycznych jak i tych indukowanych przez wiązki protonów w tkankach w ramach prowadzonej terapii hadronowej.

Przeprowadzone przez dr. Lecha Raczyńskiego prace teoretyczne opisane w recenzowanych publikacjach oraz zebrane w zgłoszonej monografii nt. „*Digital Signal and Image Processing in Jagiellonian Positron Emission Tomography*” w sposób znaczący poszerzyły możliwości techniki tomograficznej J-PET oraz stanowią wkład do planowanego nowego skanera całego ciała.

Niezależne badania własne Habilitanta, wykonywane w trakcie lub przed rozpoczęciem współpracy z grupą J-PET były związane z rejestracją i analizą sygnałów wykorzystywanych w radiolokacji. W tym zakresie Habilitant wykazuje się dużą aktywnością w ramach międzynarodowych grup badawczych skupionych wokół NATO-STO. Prowadzone badania z zakresu radiolokacji stanowiły część dużego programu międzynarodowego, a jedno z finalnych rozwiązań zostało zgłoszone jako wynalazek objęty ochroną patentową.

Pragnę również podkreślić, że w mojej ocenie Habilitanta cechuje unikalna umiejętność kreatywnego włączania się w główne nurty badań w uprawianej dziedzinie. Posiada On zdolności dostrzegania potrzeb swojego środowiska badawczego oraz idącego za tym, trafnego odpowiadania na te potrzeby. Prace dr. Raczyńskiego są pięknym przykładem badań, które uzyskały wysoką renomę w skali międzynarodowej.

Ich wysoki poziom naukowy, niezwykła precyzja, szczegółowość i dogłębność są potwierdzone przez renomą czasopism, w których zostały opublikowane.

Wysoki poziom naukowy, niezwykła szczegółowość i dogłębność w rozwiązywaniu problemów naukowych są potwierdzone poprzez Jego udział w międzynarodowych zespołach badawczych. Jest to cecha niezbędna we współczesnej nauce.

Od 2017 roku do chwili obecnej jest członkiem Komitetu Sterującego ze strony NCBJ w ramach projektu CYBER-SECIDENT/369195/I/NVBC „Narodowa Platforma Cyberbezpieczeństwa”, a od 2021 roku rolę koordynatora działań NCBJ związanych z przygotowaniem do ewaluacji jednostek naukowych w roku 2022.

Dr Lech Raczyński sprawdził się również w działalności dydaktycznej. Pełni obecnie również rolę promotora pomocniczego w przewodzie doktorskim.

Te wszystkie osiągnięcia Habilitanta, będące wynikiem realizacji szeregu projektów naukowych, recenzowanych już przez wybitnych specjalistów, budzą moje najwyższe uznanie. W mojej opinii dr Lech Raczyński jest osobą cechującą się nadzwyczajną inicjatywą oraz samodzielnością naukową. Jego udział w prestiżowych międzynarodowych projektach w dużej mierze wynika z jego odważnego angażowania się w nowe przedsięwzięcia, popartego wysoką renomą, którą posiada w swojej dziedzinie.

W podsumowaniu mojej recenzji z wielką przyjemnością konkluduję, że dorobek naukowy, doświadczenie organizacyjne i dydaktyczne dr. Lecha Raczyńskiego są w pełni wystarczające do nadania mu stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne.

Kielce, dn. 27 lutego 2022 r.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'P. Raczyński', written in a cursive style.