



UNIVERSITY  
OF WARSAW

Heavy Ion Laboratory



Prof. dr hab. Krzysztof Rusek

Warszawa, 19.09.2023

**Recenzja pracy doktorskiej pani mgr Moniki Pawlik – Niedźwieckiej p.t.  
„Determination of performance characteristics of the J-PET tomograph”**

Podstawowym celem recenzowanej pracy było wyznaczenie charakterystyk unikatowego tomografu J-PET, (PET – positron emission tomography) zbudowanego na Uniwersytecie Jagiellońskim w oparciu o nowatorską metodę opracowaną przed laty przez profesora Moskala. Do rejestracji kwantów gamma emitowanych w wyniku anihilacji pozytonów w ciele pacjenta wykorzystywane są w niej detektory scyntylicyjne złożone z długich plastikowych scyntylatorów zakończonych z obu stron fotopowielaczami. Informację o punkcie rejestracji kwantu gamma uzyskuje się z precyzyjnego czasu rejestracji impulsów przez oba fotopowielacze. Główne zalety takiego tomografu to niska, w porównaniu z innymi, cena, oraz duża objętość „robocza” pozwalająca na jednoczesną obserwację dużego fragmentu organizmu pacjenta.

Prace nad kolejnymi, coraz większymi prototypami doprowadziły do powstania wersji tomografu o osiowej długości ok. 50 cm i średnicy ok. 40 cm,. Wyznaczeniem jego charakterystyk, w oparciu o normę opracowaną przez National Electrical Manufacturers Association (NEMA), zajęła się pani mgr Monika Pawlik – Niedźwiecka. W tym celu przeprowadziła szereg pomiarów, opracowała metody analizy danych i takie analizy przeprowadziła, a uzyskane parametry porównała z parametrami innych tomografów używanych w diagnostyce medycznej. Wyniki posłużą do budowy następnej, doskonalszej wersji.

Praca doktorska ma więc charakter pracy doświadczalnej, której wyniki mogą znaleźć zastosowanie w sferze gospodarczej (produkcja tomografów PET nowej generacji) czy też w medycynie (rozwój diagnostyki PET). Napisana jest w języku angielskim, tekst jest zwarty, bogato ilustrowany, zaś całość jest bardzo starannie zredagowana. Czyta się ją z przyjemnością, bo praca zawiera szereg interesujących wiadomości dotyczących nie tylko tomografów, a pani Monika Pawlik – Niedźwiecka ma ewidentny talent dydaktyczny.

Pierwszy rozdział wprowadza czytelnika w problematykę diagnostyki medycznej opartej o zjawisko anihilacji pozytonów, jej zalety i problemy, historię projektu J-PET na Uniwersytecie Jagiellońskim, a także precyzyjnie wylicza zadania wykonane w ramach pracy doktorskiej przez autorkę.

W drugim rozdziale znajdziemy bardzo ładnie podany opis metody PET wraz z przedstawieniem zjawisk fizycznych, na których jest oparta. Jest tam też przegląd aparatury diagnostycznej wykorzystującej tę metodę wraz z listą i charakterystyką używanych radioizotopów. Pisząc o rozwoju zastosowań metody PET pani Monika Pawlik – Niedźwiecka opisuje tomograf uEXPLORER, pozwalający na uzyskiwanie obrazów całego ciała pacjenta. To unikatowe urządzenie zbudowane jest w tradycyjny sposób i jest, mówiąc w skrócie, złożeniem kilku komercyjnych skanerów PET. Pokazuje ono obecne trendy naukowców – dążenie do budowy skanerów całego ciała. W te trendy znakomicie wpisuje się projekt J-PET.

Jak wspomniałem wyżej, zadaniem doktorantki było wyznaczenie parametrów tomografu J-PET zgodnie z normą NEMA. Rozdział trzeci poświęcony więc jest przedstawieniu tej normy, definiującej warunki później przeprowadzonych eksperymentów, zaś w rozdziale czwartym znajdziemy opis obecnej wersji tomografu wraz z systemem rejestracji danych.

Główną częścią pracy były przeprowadzone przez panią Monikę Pawlik – Niedźwiecką eksperymenty. Ich opis znajdujemy w rozdziałach 5 i 6, a celem było wyznaczenie czułości, rozdzielczości przestrzennej i „czułości na niepożądane zdarzenia”, które dalej w tekście nazywał będę tłem. Pomiary wykonane zostały w specjalnie przygotowanym, klimatyzowanym laboratorium. Spośród kilku izotopów emitujących pozytony wybrane zostały dwa –  $^{22}\text{Na}$  i  $^{68}\text{Ge}$ . Źródła umieszczane były w odpowiednio przygotowanych fantomach, te zaś umieszczane w tomografie. Pomiary emitowanego promieniowania gamma trwały od kilku do kilkunastu godzin. Czytając ten fragment zabrakło mi wyjaśnienia dlaczego właśnie te izotopy zostały wykorzystane.

Pomiary mają sens tylko wówczas, gdy przeprowadzane są przez wykalibrowane detektory. W przypadku tomografu J-PET skalę trudności wyznacza ich liczba – 192 scyntylatory, każdy wyposażony w dwa fotopowielacze. Zarówno scyntylatory jak i fotopowielacze, mimo iż pochodziły od tych samych producentów, różniły się nieco parametrami. Nic więc dziwnego, że kalibracja takiego układu była ogromną pracą. Pewnym ułatwieniem był fakt, że użyte do kalibracji źródło sodowe emitowało trzy kwanty gamma (dwa z anihilacji pozytonu a jeden z faktu, że emisja pozytonu prowadzi do stanu wzbudzonego jądra neonu). Niemniej opis kalibracji układu to jeden z najdłuższych rozdziałów pracy.

Norma NEMA narzuca warunki, jakie muszą spełniać przeprowadzone eksperymenty. Rozdział siódmy pracy poświęcony jest omówieniu jak warunki NEMA spełnione zostały w przeprowadzonych eksperymentach. W pomiarach czułości, zamiast sugerowanego przez NEMA źródła  $^{18}\text{F}$  użyte zostało źródło  $^{68}\text{Ge}$ . Narzuca się więc pytanie, czy wyniki pomiarów byłyby uznane przez National Electrical Manufacturers Association? Być może, użycie źródła  $^{18}\text{F}$  pozwoliłoby uniknąć problemu z zanizonym pomiarem przy wykorzystaniu pojedynczej



rukki (Rys. 7.4)? Samo tłumaczenie faktu niższej rejestracji kwantów gamma przy użyciu jednej rurki niż przy użyciu dwóch też sprawia pewien kłopot – przecież grubość ścianki rurki to 2.5 mm a nie 1.25 mm. Brakuje mi też wyjaśnienia, dlaczego zmiana pozycji fantomu o 10 cm w stosunku do osi tomografu zmienia wyniki pomiarów, jak pokazano na Rys. 7.4?

Inny ważny parametr to rozdzielczość przestrzenna tomografu. Pomiary przeprowadzone zostały przy pomocy punktowego źródła  $^{22}\text{Na}$  umieszczanego w kilku miejscach wewnątrz tomografu. Ich wyniki przedstawia tabela 7.3. To co dziwi to fakt, że w przypadku umieszczenia źródła w pozycji  $Z=0$  cm pomiar podaje wyniki różniące się o wartości od 0.25 cm do 1.25 cm. Jednak gdy źródło jest w pozycji  $Z=-18.25$  cm pomiar jest dokładny. Dlaczego dokładność rośnie w miarę oddalania się od środka tomografu? Zauważyłem, że w tekście pod tabelką pani Monika Pawlik-Niedźwiecka wspomina o precyzji pomiaru pozycji  $Z$  wahającej się od 0.25 cm do 0.5 cm (a nie 1.25 cm). To chyba jakieś przeoczenie? Generalnie, wyniki rozdzielczości jeśli chodzi o parametry  $X, Y$ , są lepsze niż w przypadku parametru  $Z$ . Doktorantka tłumaczy to specyficzną konstrukcją tomografu J-PET.

W przypadku pomiarów tła, ponownie zamiast sugerowanego przez NEMA źródła  $^{18}\text{F}$  użyto liniowego źródła  $^{68}\text{Ga}$ . Wynik pomiaru to ok. 35 procent w stosunku do całej liczby zliczeń. Tu znów wraca pytanie, czy użycie innego źródła nie spowodowałoby kłopotów z akceptacją wyniku przez National Electrical Manufacturers Association? Tym bardziej, że w następnym rozdziale doktorantka stwierdza, że ten wynik może być poprawiony m.in. przez zastosowanie źródła  $^{18}\text{F}$ . Wszystko to jest jednak pewnie mało istotne, bo przecież te wyniki mają posłużyć obecnie tylko do rozwoju projektu J-PET.

Ten następny rozdział poświęcony jest porównaniu wyznaczonych parametrów tomografu J-PET z komercyjnymi urządzeniami różnych producentów. Jeśli chodzi o czułość, pomiary pokazały iż J-PET ustępuje komercyjnym skanerom. Pani Monika Pawlik-Niedźwiecka ponownie tłumaczy to jego specyficzną konstrukcją i zapewnia, że w następnej wersji wynik będzie znacząco lepszy. Jeśli chodzi o rozdzielczość przestrzenną, wyniki są podobne dla trzech różnych miejsc dla każdego z czterech urządzeń wybranych do porównania. W przypadku współrzędnych  $XY$  tomograf J-PET ma podobną rozdzielczość do trzech produkowanych komercyjnie. Jednak w przypadku współrzędnej  $Z$  (wzdłuż osi tomografu) rozdzielczość J-PET jest znacznie gorsza. Znów wynika to po prostu z konstrukcji tomografu, którego cylindryczna komora jest otoczona długimi prętami scyntylatora.

Rozdział dziewiąty przedstawia perspektywy rozwoju i udoskonalenia obecnej wersji a w przyszłości zastąpienia jej wersją modułową. Zbudowany już jest skaner złożony z 24 modułów o długości 50 cm. Wersja ta pozwala na przedłużenie ich do 2.5 m, będzie więc skanerem całego ciała, podobnym (ale znacznie tańszym) do wspomnianego wcześniej uEXPLORERa.

Wstępne pomiary pokazały znacznie lepszą rozdzielczość przestrzenną wzdłuż osi symetrii tomografu. Poprawiona też będzie jego czułość poprzez zastosowanie dwóch warstw modułów detekcyjnych. Wszystko to wskazuje na fakt, iż wersja modułowa J-PET będzie konkurencją, jeśli chodzi o parametry, dla komercyjnych urządzeń wykorzystujących scyntylatory kryształowe, ale będzie znacznie od nich tańsza.

Pani mgr Monika Pawlik-Niedźwiecka jest związana z projektem J-PET od około dziesięciu lat. Jest współautorką wielu publikacji, których listę można znaleźć na końcu przedstawionej do oceny pracy doktorskiej. W ramach pracy doktorskiej dokonała bardzo ważnej dla dalszego rozwoju projektu oceny obecnie istniejącego prototypu, wyznaczając jego parametry zgodnie z ogólnie przyjętą normą i porównała je z parametrami tradycyjnych urządzeń opartych o scyntylatory kryształowe. Znalazła w ten sposób słabe strony prototypu, co pozwoliło na opracowanie znacznie doskonalszej wersji, która być może będzie miała zastosowanie komercyjne.

Praca doktorska jest bardzo dobrze napisana i zredagowana. W tekście można znaleźć drobne błędy, które mnie ucieszyły, bo świadczą o tym, że nie był on stworzony przez sztuczną inteligencję. Uważam, że przedstawiona rozprawa spełnia wymagania stawiane w ustawie Prawo o Szkolnictwie Wyższym z dnia 20 lipca 2018 roku i wnioskuję o dopuszczenie pani mgr Moniki Pawlik-Niedźwieckiej do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.



Krzysztof Rusek