



UNIVERSITY
OF WARSAW



Heavy Ion Laboratory

Prof. dr hab. Krzysztof Rusek

Warszawa, 12.12.2023

**Recenzja pracy doktorskiej pani mgr Faranak Tayefi Ardebili zatytułowanej
„Evaluation of the NEMA characteristics for the Modular J-PET scanner”**

Tytuł pracy bardzo dobrze przedstawia jej treść. Celem przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej było wyznaczenie parametrów najnowszej wersji skanera służącego do rejestracji promieniowania gamma emitowanego w wyniku anihilacji pozytonów w ciele pacjenta. Tomografia PET (positron emission tomography) wykorzystywana jest już dość powszechnie w polskich szpitalach do diagnostyki chorób onkologicznych. Wyznaczenie takich parametrów jak czułość, rozdzielczość przestrzenna czy frakcja rozpraszania prototypowego skanera zwanego Modular J-PET, według procedury zgodnej z ogólnie przyjętą normą (NEMA), pozwala na porównanie tego urządzenia z poprzednimi jego wersjami jak też z komercyjnie dostępnymi skanerami. To z kolei pozwala wyznaczyć dalszy rozwój projektu J-PET, a także służy do zachęcenia potencjalnych producentów tomografu opartego na tej idei.

W pierwszej chwili mogłoby się wydawać, że wyznaczenie parametrów urządzenia jest standardowym zadaniem dla technika. Pamiętać jednak trzeba, że badane urządzenie to prototyp, zbudowany w oparciu o nowatorską metodę, wymagający wiedzy i inwencji do jego obsługi. Doktorantka brała udział w jego budowie, w projektowaniu pomiarów potrzebnych do wyznaczenia parametrów tego skanera, w symulacjach eksperymentów, w zbieraniu i selekcji danych, a także w przygotowaniu software'u do ich analizy. Uzyskane wyniki zostały przedstawione w czterech pracach (3 opublikowane, jedna wysłana do wydawcy), których doktorantka jest współautorką.

Modular J-PET został zbudowany na Uniwersytecie Jagiellońskim w oparciu o nowatorską metodę, w której do rejestracji kwantów gamma emitowanych w wyniku anihilacji pozytonów w ciele pacjenta wykorzystywane są detektory scyntylacyjne złożone z długich plastikowych scyntylatorów zakończonych z obu stron fotopowielaczami. Ta metoda zaczerpnięta jest z detektorów używanych w fizyce jądrowej, nie jest jednak stosowana w żadnym z komercyjnie produkowanych tomografów. Metoda jest esencją projektu J-PET realizowanego od kilku lat na Uniwersytecie Jagiellońskim.

Najnowszy prototyp skanera ma formę walca o sporej wewnętrznej średnicy i wysokości 50 cm. Piszę „sporej średnicy”, bo w rozdziale trzecim, gdzie podane są liczne parametry tego skanera nie znalazłem informacji o jego średnicy. Zamiast tradycyjnych fotopowielaczy stosowanych w poprzednich wersjach użyto fotopowielaczy krzemowych, zaś w miejsce prętów scyntylatora zastosowano 24 moduły, każdy złożony z 13 scyntylacyjnych pasków.

Taka modułowa konstrukcja pozwala na szybkie rozłożenie urządzenia i na jego łatwy transport. Pozwala też na pełniejsze wykorzystanie przestrzeni pozostawiając niewiele miejsca na szczeliny między modułami, co rokuje lepszą wydajność skanera w porównaniu z poprzednimi wersjami.

Praca doktorska ma charakter pracy doświadczalnej, a jej wyniki, jak już wcześniej pisałem, będą bardzo użyteczne do dalszego rozwoju projektu J-PET, a w końcu do zbudowania takiego prototypu, który będzie mógł konkurować z komercyjnymi produktami nie tylko ceną ale także parametrami. Praca napisana jest w języku angielskim. Tekst jest bogato ilustrowany a praca składa się z dziesięciu rozdziałów i liczy aż 184 strony. Zawiera trochę drobnych uchybień wynikających, jak sądzę, z pośpiesznej redakcji. Dla przykładu, wszystkie rysunki oznaczone są jako „Rysunek ..” zamiast „Figure...”, tabele jako „Tabela...” zamiast „Table..”, rozdziały jako „Rozdział” zamiast „Chapter..”. Na końcu mamy SPIS TABEL i SPIS RYSUNKÓW zamiast ich angielskich odpowiedników. Na Rysunkach 6.2 i 8.7 oś pionowa nie jest właściwie opisana (na szczęście opis jest pod nimi). Brak Rysunku 3.3 na stronie 31. Liczne skróty nazw nie ułatwiają czytania, dlatego też dodanie „List of Abbreviations” byłoby bardzo wskazane.

W pierwszych dwóch rozdziałach przedstawione są motywacje i cele pracy oraz podstawy tomografii PET.

W rozdziale trzecim autorka opisuje badany skaner Modular J-PET, który powstał na bazie doświadczeń uzyskanych z poprzednio zbudowanych prototypów. Wśród wielu informacji, jak już wcześniej wspomniałem, nie znalazłem tej o wewnętrznej średnicy tego urządzenia. To bardzo rozbudowany system detekcyjny (24 moduły razy 13 pasków razy dwa fotopowielacze), który wymaga sprawnego systemu akwizycji. Zastosowano cyfrowy odczyt sygnałów nie wymagający triggera, który pozwala na analizę danych w czasie rzeczywistym.

Zadaniem doktorantki było wyznaczenie parametrów tomografu Modular J-PET zgodnie z normą NEMA wyznaczoną przez National Electrical Manufacturers Association. W rozdziale czwartym przedstawione są wymagania tej normy, w tym wykorzystywane do pomiarów źródła pozytonów i fantomy, a także definicje parametrów służących do porównywania tomografów.

W rozdziałach piątym i szóstym przedstawione są wyniki obliczeń symulacyjnych wykorzystujących metodę Monte Carlo, wykonanych przy pomocy programu GEANT4 adaptowanego do potrzeb tomografii. Jeśli chodzi o geometrię, to symulacji dokonano dla skanera o wewnętrznej średnicy ok. 74 cm, wnoszę więc że taka była średnica zbudowanego prototypu. Uważam, że dobrze by było zamieścić wymiary skanera Modular J-PET na Rysunku 5.1, by uzupełnić informacje o nim podane w rozdziale trzecim.

Doktorantka przeprowadziła także symulacje eksperymentów z wybranymi źródłami promieniowania pozytonowego. Uzyskała zachęcające wyniki dotyczące przewidywanej czułości, frakcji rozpraszania i rozdzielczości tomografu Modular J-PET. Przystąpiła więc do serii pomiarów opisanych w rozdziale siódmym. Oprócz standardowych źródeł (^{22}Na i ^{68}Ge) użyła także krótkożyłowego izotopu ^{18}F , używanego w diagnostyce PET. W pomiarach wykorzystane zostały fantomy zbudowane zgodnie z normą NEMA. Ważną częścią prac eksperymentalnych była selekcja pozyskanych danych. Temu zagadnieniu poświęcona jest duża część rozdziału.

By uzyskać końcowy wynik konieczna była analiza danych eksperymentalnych, przedstawiona w rozdziale ósmym. W szczególności rozdzielczość przestrzenna wymagała użycia software'u poprawiającego jakość obrazu. Końcowe wyniki dotyczące czułości, frakcji rozproszonej i rozdzielczości przestrzennej badanego Modular J-PET podane są, odpowiednio, na stronach 117, 127 i 140. Nie zawsze są one zgodne z przewidywaniami opartymi o symulacje i przedstawionymi w rozdziale szóstym.

Rozdział dziewiąty przedstawia porównanie parametrów Modular J-PET z parametrami istniejących komercyjnych skanerów całego ciała, zbudowanych w tradycyjnej technologii. Pokazuje ono, że w przypadku czułości i rozdzielczości osiowej parametry komercyjnych urządzeń są wciąż lepsze. Doktorantka wskazuje drogi poprawy tych parametrów. W przypadku czułości poprawę można osiągnąć budując skaner o większej długości, a także dodając warstwę detektorów. W przypadku rozdzielczości osiowej nadzieje poprawy wiąże doktorantka z zastosowaniem Wavelength Shifter, nie podając jednak szczegółów tego intrygującego urządzenia. Należy też pamiętać, że skaner J-PET jest wielokrotnie tańszy od komercyjnych.

Rozdział dziesiąty jest streszczeniem i podsumowaniem pracy. Zawiera także bardzo skrócony opis następcy prototypu Modular J-PET, skanera Total Body J-PET. Bardzo interesującym jest porównanie wyników doświadczalnych dotyczących czułości, frakcji rozproszonej i rozdzielczości przestrzennej z wynikami symulacji. Zabrakło mi jednak komentarza dotyczącego różnic między nimi. Uważam także, że interesującym byłoby porównanie parametrów Modular J-PET z parametrami poprzednich prototypów pokazując w ten sposób rozwój projektu.

Na jakości manuskryptu odbiła się negatywnie jego ewidentnie pośpieszna redakcja, nie zmienia to jednak faktu, że pani mgr Faranak Tayefi Ardebili wykonała ogromną i bardzo użyteczną pracę wyznaczając parametry tomografu Modular J-PET w zgodzie z obowiązującą normą NEMA. Rozprawa doktorska zawiera wyniki eksperymentów przeprowadzony przez doktorantkę, która je zaplanowała w oparciu o przeprowadzone symulacje numeryczne.

Realizując wyznaczone cele doktorantka pokazała zdolności do prowadzenia samodzielnej pracy naukowej.

Uważam, że przedstawiona rozprawa spełnia wymagania stawiane w ustawie Prawo o Szkolnictwie Wyższym z dnia 20 lipca 2018 roku i wnioskuję o dopuszczenie pani Faranuk Tayefi Ardebili do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.



Krzysztof Rusek