



UNIWERSYTET  
WARSZAWSKI

Wydział Fizyki

WYDZIAŁ  
FIZYKI

dr hab. Agnieszka Korgul, prof. UW  
Zakład Fizyki Jądrowej  
Instytut Fizyki Doświadczalnej

Warszawa 06.09.2024 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Wojciecha Romana  
Kubińskiego zatytułowanej  
„Optimization of the In-Core Fuel Management in a Nuclear Reactor  
Core Using Evolutionary Algorithms”

Rozprawa doktorska powstała na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej pod kierunkiem dr hab. inż. Krzysztofa W. Fornalskiego i dr inż. Rafał Prokopowicz.

Recenzję rozprawy doktorskiej pt. „Optimization of the In-Core Fuel Management in a Nuclear Reactor Core Using Evolutionary Algorithms” autorstwa Pana mgr inż. Wojciecha Kubińskiego opracowałam na podstawie pisma Pana Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Politechniki Warszawskiej prof. dr. hab. inż. Tomasza Wolińskiego. Recenzję rozprawy doktorskiej wykonałam zgodnie z wymogami ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 r. poz. 1669, z późniejszymi zmianami). Zgodnie z jej treścią rozprawa doktorska powinna stanowić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz wykazywać głęboką wiedzę kandydata w danej dyscyplinie naukowej oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Tematyka dysertacji koncentruje się na optymalizacji procesów związanych z zarządzaniem paliwem w rdzeniach reaktorów jądrowych oraz produkcją radionuklidów medycznych. Większość reaktorów pracuje w cyklach, które obejmują okresową wymianę części wypalonych zestawów paliwowych na nowe oraz przestawianie pozostałych w nową konfigurację, co ma na celu zrekompensowanie utraty materiału rozszczepialnego i zapewnienie ciągłości pracy reaktora. Proces ten jest skomplikowany, wymaga wyłączenia



UNIwersytet  
Warszawski

Wydział Fizyki

WYDZIAŁ  
FIZYKI

reaktora, a liczba możliwych konfiguracji załadunku jest ogromna, co stawia poważne wyzwania obliczeniowe.

W pracy analizowano zastosowanie algorytmów genetycznych (GA) do rozwiązywania tych problemów optymalizacyjnych, ze szczególnym uwzględnieniem projektowania rdzeni reaktorów jądrowych czwartej generacji. Dodatkowo, Autor zajął się badaniem produkcji radionuklidów, takich jak molibden-99 ( $^{99}\text{Mo}$ ), który jest kluczowy dla medycyny nuklearnej. Przeprowadzone analizy i eksperymenty, w tym z wykorzystaniem wiązek neutronów, dostarczają istotnych informacji dla praktycznego zastosowania w projektowaniu reaktorów i produkcji izotopów medycznych.

Rezultaty badań zostały opublikowane w czterech pracach, w których mgr inż. Wojciech Kubiński jest współautorem, a w jednej z nich pełni rolę pierwszego autora. Warto podkreślić, że trzy z tych prac to artykuły, w których współautorstwo ogranicza się do zaledwie trzech osób.

Dysertacja składa się z 5 rozdziałów oraz Dodatku, w którym załączono fragmenty wykorzystanego kodu czy konfigurację rdzenia reaktora Maria, aby poprawić czytelność pracy.

W Rozdziale pierwszym "Wprowadzenie", Autor omawia kwestię zarządzania paliwem wewnątrz rdzenia reaktora (ICFM), akcentując kluczową rolę optymalizacji układu zestawów paliwowych. Celem tych działań jest poprawa efektywności reaktora, zwiększenie jego bezpieczeństwa oraz pełniejsze wykorzystanie dostępnego paliwa. Rozdział przedstawia trudności związane z zarządzaniem paliwem, wynikające z różnych możliwych schematów załadunku oraz wyzwań obliczeniowych, które są związane z dużą liczbą potencjalnych konfiguracji. Szczególną uwagę poświęcono zastosowaniu zaawansowanych algorytmów optymalizacyjnych, takich jak algorytmy ewolucyjne, które odgrywają istotną rolę w doskonaleniu schematów załadunku i poprawie działania reaktora.

Dodatkowo, omówiono wprowadzenie do podstawowych zagadnień fizyki reaktorów jądrowych, obejmujących równania transportu neutronów oraz ich rozwiązywanie za pomocą metod takich jak Monte Carlo i przybliżenie dyfuzyjne. Opisano także kluczowe parametry pracy rdzenia reaktora oraz algorytmy optymalizacyjne, które mają istotny wpływ





UNIwersytet  
Warszawski

Wydział Fizyki

WYDZIAŁ  
FIZYKI

na poprawę jego funkcjonowania. Jest to bardzo dobre wprowadzenie teoretyczne do kolejnej części pracy.

Rozdział drugi "Przegląd badań nad optymalizacją zarządzania paliwem" skupia się na przeglądzie badań dotyczących optymalizacji w zarządzaniu paliwem wewnątrz rdzenia reaktora (ICFM), z naciskiem na optymalizację wzoru załadunku (LPO) oraz różne technologie reaktorów, takie jak PWR, BWR, reaktory badawcze i reaktory IV generacji. Każda z tych technologii otrzymała osobny podrozdział, który daje krótki, ale szczegółowy przegląd obecnie stosowanych oraz planowanych typów reaktorów. Problematyka została podzielona na zagadnienia związane z cyklami pojedynczymi oraz wielocyklowymi, przy czym zastosowano różnorodne metody, takie jak algorytmy ewolucyjne oraz techniki uczenia maszynowego.

W rozdziale omówiono ewolucję badań nad LPO – od prostych algorytmów opracowanych w latach 50. XX wieku po współczesne, zaawansowane metody obsługujące operacje wielocyklowe. Zwrócono uwagę na rozwój historyczny oraz aktualne trendy w optymalizacji zarządzania paliwem, jednocześnie systematyzując obecną wiedzę. Sekcja podkreśla również trudności związane z adaptacją tych metodologii do różnych typów reaktorów, szczególnie w kontekście rosnącej złożoności zagadnień wielocyklowych oraz wykorzystywania zaawansowanych algorytmów w najnowszych badaniach.

Rozdział trzeci "Optymalizacja problemu pojedynczego cyklu" stanowi istotny element pracy, skupiający się na optymalizacji początkowego schematu załadunku paliwa w rdzeniu reaktora PWR firmy Westinghouse. Autor opiera się na rzeczywistym przykładzie amerykańskiej elektrowni jądrowej, bazując na benchmarku BEAVRS opracowanym przez MIT Computation Reactor Physics Group, co nadaje badaniom solidne podstawy praktyczne. Kluczowym celem rozdziału jest maksymalizacja długości cyklu pracy reaktora przy jednoczesnym zachowaniu istotnych parametrów bezpieczeństwa i efektywności, takich jak średnie wzbogacenie paliwa, minimalizacja współczynnika szczytowego mocy oraz utrzymanie efektywnego współczynnika rozmnożenia neutronów w pożądanym zakresie.

Ważnym elementem tego rozdziału jest implementacja nowego adaptacyjnego algorytmu genetycznego (GA), który został zaprojektowany do optymalizacji wzoru załadunku paliwa. Zastosowanie algorytmów genetycznych, które zyskały już uznanie w wielu dziedzinach inżynierii jądrowej, stanowi o innowacyjności pracy. W przeciwieństwie do wcześniejszych



UNIwersytet  
Warszawski

Wydział Fizyki

WYDZIAŁ  
FIZYKI

badania, w których optymalizowano jedynie pojedyncze parametry (np. efektywny współczynnik namnażania neutronów), autor wprowadza wielozadaniową funkcję dopasowania, umożliwiającą jednoczesne optymalizowanie kilku kluczowych parametrów. W rezultacie uzyskano bardziej zaawansowane i realistyczne wyniki, uwzględniając pełną złożoność rdzenia reaktora.

Na szczególną uwagę zasługuje autorska metoda kontroli wariacji w algorytmie genetycznym, która przewyższa standardowe metody selekcji stosowane dotychczas. Zaproponowane podejście umożliwiło uzyskanie lepszych wyników pod względem długości cyklu paliwowego oraz równomiernego rozkładu mocy w rdzeniu. Wyniki te dowodzą nie tylko skuteczności zastosowanych metod, ale także ich potencjalnej użyteczności w dalszych badaniach i aplikacjach inżynierii jądrowej.

Rozdział ten stanowi więc istotny wkład w rozwój optymalizacji zarządzania paliwem wewnątrz rdzenia, ukazując nowatorskie podejście do problemu, które może znacząco wpłynąć na efektywność i bezpieczeństwo pracy reaktorów jądrowych.

Rozdział 4, "Optymalizacja problemu wielocyklowego," skupia się na opracowaniu uniwersalnego schematu załadunku paliwa, tzw. cyklu równowagowego. Analizowano przykładowy rdzeń reaktora oparty na modelu EPR, a badania te przeprowadzono podczas sześciomiesięcznego pobytu w siedzibie Framatome w Paryżu – jednej z czołowych firm zajmujących się dostawami i obsługą elektrowni jądrowych na świecie. W celu zoptymalizowania tasowania paliwa w rdzeniu wykorzystano algorytm genetyczny oraz równoległe wyżarzanie symulowane. Główne cele obejmowały maksymalizację wypalenia paliwa przy jednoczesnym utrzymaniu lub poprawie kluczowych parametrów, takich jak równomierność rozkładu mocy, wpływ neutronów oraz maksymalne wypalenie zestawów paliwowych.

W ramach badań zaproponowano innowacyjne podejście, które polegało na przedstawieniu cyklu równowagowego w formie macierzowej, co znacznie uprościło proces generowania i analizowania różnych schematów załadunku. Nowatorskim rozwiązaniem było również zastosowanie entropii Shannona jako wskaźnika zbieżności algorytmu, co stanowiło nowość w optymalizacji cykli paliwowych. W rozdziale przeprowadzono także szczegółową dyskusję na temat symetrii rdzenia, analizując jej zalety oraz potencjalne wady w kontekście poszukiwania optymalnych rozwiązań.





Kolejnym istotnym elementem rozdziału było zaproponowanie hybrydowego algorytmu, który łączył zalety algorytmu genetycznego – zdolność do skutecznego przeszukiwania złożonej przestrzeni rozwiązań – z możliwościami równoległego wyżarzania symulowanego, co pozwalało unikać utknięcia w lokalnych ekstremach. W efekcie, metoda ta wykazała wyższą efektywność w wybranych przypadkach, co skutkowało wydłużeniem cyklu paliwowego o kilka dni, przy jednoczesnym utrzymaniu lub poprawie pozostałych istotnych parametrów.

Ostatni rozdział pracy skupia się na optymalizacji schematu napromieniania, ukazując zarówno teoretyczne założenia, jak i praktyczne zastosowanie algorytmu optymalizacyjnego w poszukiwaniu najbardziej efektywnego sposobu napromieniania materiałów w reaktorze Maria. Badania, przeprowadzone w Narodowym Centrum Badań Jądrowych (NCBJ), miały na celu opracowanie optymalnej metody napromieniania tarcz uranowych, która zwiększałaby efektywność produkcji molibdenu-99 ( $^{99}\text{Mo}$ ), kluczowego izotopu wykorzystywanego do pozyskiwania technetu-99m ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ). Reaktor Maria odpowiada za około 9% światowej produkcji Mo-99, jednak rosnące globalne zapotrzebowanie na ten izotop przekracza obecne zdolności produkcyjne. Dodatkowo, awarie, przerwy w cyklach oraz wyłączenie starych instalacji przyczyniają się do zakłóceń w dostawach radionuklidów, co zagraża dostępności kluczowych procedur medycznych. W związku z tym praca badawcza skupiła się na optymalizacji funkcjonowania reaktora Maria, aby zwiększyć produkcję radiofarmaceutyku  $^{99}\text{Mo}$  i ograniczyć problemy z jego dostępnością.

Przeprowadzone badania wykazały, że optymalizacja schematu napromieniania tarcz uranowych może przynieść wzrost efektywności produkcji nawet o 15%, jednocześnie redukując koszty produkcji. To obiecujące wyniki, które wskazują na potencjał dalszych badań w tym obszarze. Opracowana metoda została zoptymalizowana do cyklu produkcyjnego trwającego osiem dni, przy czym dalsze wydłużenie cyklu nie prowadziło do poprawy efektywności. W obliczeniach wykorzystano oprogramowanie FISPACT-II, co zapewnia solidność i wiarygodność uzyskanych wyników.

Interesującym uzupełnieniem tej analizy byłaby krótka ocena innych radiofarmaceutyków produkowanych w reaktorach, takich jak jod-131 ( $^{131}\text{I}$ ) czy lutet-177 ( $^{177}\text{Lu}$ ), które odgrywają istotną rolę w diagnostyce i terapii nowotworowej. Oba izotopy mają szerokie zastosowanie kliniczne, a ich produkcja w reaktorach badawczych, podobnie jak Tc-99m, zapewnia stabilne dostawy kluczowych substancji medycznych. Dodatkowo, warto rozważyć alternatywne



UNIwersytet  
Warszawski

Wydział Fizyki

WYDZIAŁ  
FIZYKI

metody pozyskiwania Mo-99 ( $^{99}\text{Mo}$ ) lub Tc-99m ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ), w tym technologie oparte na akceleratorach protonowych czy elektronowych, które mogłyby uniezależnić produkcję tych radionuklidów od reaktorów jądrowych. Takie rozwiązania mogłyby przyczynić się do większej stabilności dostaw i zmniejszenia ryzyka przerw w produkcji. Krótka analiza opłacalności tych alternatyw w porównaniu z tradycyjnymi metodami reaktorowymi byłaby ciekawym podkreśleniem istotności badań przedstawionych w pracy, pokazując szerszy kontekst technologiczny i potencjalne innowacje w tej dziedzinie.

Przeprowadzona w dysertacji szczegółowa analiza dotycząca zastosowania algorytmów genetycznych w optymalizacji cyklu paliwowego stanowi istotny wkład w rozwój metod zarządzania paliwem w reaktorach jądrowych. Zastosowanie tych algorytmów może znacząco poprawić wydajność i efektywność operacyjną reaktorów. Ciekawi mnie jednak, jaka jest opinia Autora na temat innych metod optymalizacji, które są obecnie stosowane lub mogą być zaadaptowane w reaktorach jądrowych. Czy dostrzega on potencjał w alternatywnych podejściach, jak np. metaheurystyki, które mogłyby uzupełnić lub wzbogacić analizowane podejście?

Na podstawie analizy treści przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej pt. „Optimization of the In-Core Fuel Management in a Nuclear Reactor Core Using Evolutionary Algorithms” autorstwa Pana mgr inż. Wojciecha Kubińskiego stwierdzam, że Doktorant wykazał odpowiedni poziom wiedzy w zakresie problematyki badawczej objętej niniejszą dysertacją, dowiódł, że posiada umiejętność samodzielnego formułowania problemów naukowych oraz organizacji i prowadzenia procesu badawczego w celu efektywnego rozwiązania postawionych problemów. Przedstawiona w pracy analiza wyników i prezentacja końcowych rezultatów badań dowodzi dojrzałości naukowej Autora. Dyskusja oraz wyniki końcowe sformułowane w dysertacji przekonują, iż Doktorant zrealizowała założone cele naukowe.

Uważam, że recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Wojciecha Kubińskiego spełnia wymagania ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. – przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 r. poz. 1669, z późniejszymi zmianami). Na tej podstawie wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie Pana mgr inż. Wojciecha Kubińskiego do publicznej obrony przedmiotowej rozprawy doktorskiej.





UNIwersytet  
Warszawski

Wydział Fizyki

WYDZIAŁ  
FIZYKI

Jednocześnie wnioskuję o przyznanie wyróżnienia przedłożonej do oceny rozprawie doktorskiej mgr inż. Wojciecha Kubińskiego. Tematyka badawcza doktoratu jest częścią ważnej i szybko rozwijającej się dziedziny związanej z energetyką jądrową jak i medycyną nuklearną. Wyniki badań przedstawione w dysertacji nad optymalizacją wymiany paliwa w reaktorach jądrowych są kluczowe dla zwiększenia efektywności energetycznej, wydłużenia cykli pracy reaktorów oraz zapewnienia bezpieczeństwa eksploatacji. Optymalizacja ta pozwala na lepsze wykorzystanie paliwa, co przekłada się na mniejsze zużycie zasobów i redukcję kosztów operacyjnych. Z kolei produkcja radiofarmaceutyków, takich jak  $^{99m}\text{Tc}$ , w reaktorach badawczych ma ogromne znaczenie dla medycyny, umożliwiając diagnostykę milionów pacjentów rocznie. Poprawa wydajności produkcji tych radionuklidów jest niezbędna do zaspokojenia rosnącego zapotrzebowania na procedury medyczne, przy jednoczesnym zapewnieniu ciągłości dostaw.

Potwierdzenie doniosłości wyników i dobrego warsztatu zaprezentowanego w pracy stanowią cztery publikacje z tematyki objętej pracą dokorską, których Doktorant jest pierwszym autorem lub współautorem. Stwierdzam zatem, że zarówno tematyka jak i całość prac badawczych, wykonanych i przejrzyście przedstawionych przez Pana mgr inż. Wojciecha Kubińskiego w rozprawie, zasługuje na wyróżnienie.

*Agneska Gorgul*