

Dr hab. inż. Mikołaj Oettingen, prof. AGH  
Wydział Energetyki i Paliw  
Katedra Energetyki Jądrowej i Radiochemii  
e-mail: moettin@agh.edu.pl  
tel.: +48 12 617 51 89

Kraków, 29.07.2024

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Wojciecha Kubińskiego:**  
***“Optimization of the in-core fuel management  
in a nuclear reactor core using evolutionary algorithms”***

**1. Podstawa formalna wykonania recenzji**

Podstawą formalną opracowania niniejszej recenzji jest uchwała nr 6/06/2024 Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Politechniki Warszawskiej z dnia 27 czerwca 2024 r. w której zostałem powołany na recenzenta przedmiotowej rozprawy doktorskiej, o czym zostałem powiadomiony przez Przewodniczącego Rady Naukowej, prof. dr. hab. inż. Tomasza Wolińskiego pismem z dnia 2 lipca 2024 r.

**2. Ogólna charakterystyka rozprawy**

W rozprawie doktorskiej Pan mgr inż. Wojciech Kubiński porusza istotną kwestię optymalizacji cyklu paliwowego reaktorów jądrowych przy użyciu zaawansowanych algorytmów ewolucyjnych. Wybrana tematyka naukowa stanowi obecnie jeden z trendów w badaniach nad jądrowym cyklem paliwowym, szczególnie nad optymalizacją schematów załadunku paliwa do rdzenia reaktora. Opracowanie wzoru ułożenia kaset paliwowych w rdzeniu reaktora jak i schematu ich uzupełniania oraz tasowania w kolejnych cyklach reaktorowych stanowi skomplikowane zagadnienie matematyczne wymagające użycia zaawansowanych metod optymalizacyjnych. Należy w nim uwzględnić wiele czynników mających wpływ na funkcjonowanie reaktora, takich jak np. rodzaj i rozmieszczenie paliwa w rdzeniu na poziomie pręta paliwowego, czy też wybór metod kontroli reaktywności. Dodatkowo, optymalizacja zarządzania paliwem zależy od założonego celu danej kampanii paliwowej, np. wydłużenia cyklu reaktorowego, oraz od zdefiniowanych warunków brzegowych pracy reaktora, np. maksymalnej wartości efektywnego współczynnika mnożenia neutronów. Tym samym przedstawiona tematyka naukowa jest aktualna, a otrzymane wyniki posiadają nie tylko wartość teoretyczną, ale przede wszystkim praktyczną co stanowi dużą zaletę zaprezentowanej rozprawy doktorskiej.

Strona formalna pracy nie budzi zastrzeżeń. Liczba rozdziałów i podrozdziałów pozwala na obszerne przedstawienie zagadnień teoretycznych jak i wykonanych obliczeń numerycznych wraz z interpretacją otrzymanych wyników. Rozprawa została napisana w sposób przejrzysty z uwzględnieniem wszystkich międzynarodowych standardów piśmiennictwa naukowego. Zaprezentowane rysunki, tabele oraz wzory matematyczne w sposób adekwatny uzupełniają opisy przedstawionych zagadnień naukowych oraz otrzymane wyniki. Na uwagę zasługuje duża liczba referencji wspierających

przeprowadzone badania naukowe (182 referencje). Ich liczba jak i jakość potwierdzają przeprowadzanie przez doktoranta szeroko zakrojonego studium literaturowego przedstawionej tematyki naukowej. Praca została napisana w języku angielskim. Autor biegle posługuje się profesjonalnym słownictwem technicznym jak i żargonem charakteryzującym międzynarodowe prace naukowe z zakresu fizyki oraz energetyki jądrowej. Rozprawa została uzupełniona załącznikami przedstawiającymi strukturę programu komputerowego opracowanego w celu przeprowadzania obliczeń numerycznych jak i konfigurację rdzenia reaktora MARIA, co dodatkowo pozwala na poznanie technicznych szczegółów oraz założeń wykonanych prac badawczych.

### 3. Merytoryczna ocena rozprawy

Rozprawa doktorska składa się z pięciu rozdziałów. Dwa pierwsze rozdziały mają charakter opisowo-informacyjny a pozostałe trzy rozdziały obliczeniowo-naukowy.

W rozdziale pierwszym autor w sposób zwięzły przedstawia podstawy teoretyczne zarządzania cyklem paliwowym reaktora jądrowego, elementy fizyki reaktorowej jak i algorytmy optymalizacyjne. Zagadnienia są przedstawione w sposób prawidłowy z uwzględnieniem najważniejszych podstaw teoretycznych stanowiących bazę wykonanych badań naukowych. Na szczególną uwagę zasługuje krótka prezentacja i klasyfikacja najbardziej powszechnych algorytmów optymalizacyjnych oraz ich najważniejszych cech.

Rozdział drugi przedstawia historię rozwoju prac nad optymalizacją zarządzania paliwem w rdzeniach reaktorów jądrowych, zagadnienia wymiany i tasowania paliwa jak również przykłady użycia algorytmów optymalizacyjnych dla różnych typów reaktorów jądrowych. Rozdział prezentuje istotne informacje dotyczące celów optymalizacji, warunków optymalizacji oraz problemów związanych z optymalizacją. Liczba potencjalnych wariantów ułożenia kaset w rdzeniu została prawidłowo określona przy pomocy rachunku macierzowego i kombinatoryki dla problemu załadunku początkowego rdzenia reaktora oraz wielokrotnej wymiany paliwa z uwzględnieniem cyklu równowagowego. Dodatkowo autor prawidłowo przedstawił unikalne zagadnienie optymalizacyjne produkcji wybranych izotopów, głównie  $^{99}\text{Mo}$  w reaktorach badawczych, do wykorzystania medycznego. Złożoność zagadnienia optymalizacyjnego zależy od typu reaktora jądrowego a tym samym od konfiguracji jego rdzenia i używanego paliwa jak i założonego celu optymalizacji. Problem ten został właściwie przedstawiony przez doktoranta dla reaktorów PWR, BWR, reaktorów badawczych oraz reaktorów IV generacji na bazie dostępnej literatury, wraz z uwzględnieniem wykorzystanych algorytmów numerycznych.

W rozdziale trzecim autor skupia się na optymalizacji początkowego rdzenia cztero-pętlowego reaktora firmy Westinghouse na podstawie benchmarku BEAVRS. Benchmark stanowi profesjonalne, ogólnodostępne źródło informacji na temat charakterystyki reaktora i jest powszechnie używany w pracach naukowych dotyczących modelowania numerycznego fizyki reaktorowej. Głównym celem optymalizacji jest wydłużenie cyklu reaktorowego pod określonymi warunkami brzegowymi dotyczącymi średniego wzbogacenia paliwa, wypłaszczenia profili mocy, poziomego efektywnego współczynnika mnożenia neutronów oraz liczby prętów z wypalającym się absorberem. Przy implementacji algorytmu autor słusznie wykorzystał symetrię rdzenia reaktora co znacznie uprościło zagadnienie optymalizacyjne i skrócił czas obliczeń. Wszystkie parametry wykorzystanego algorytmu genetycznego (chromosom, funkcja dopasowania, metoda selekcji, krzyżowanie, mutacja, wariacja) zostały prawidłowo zdefiniowane co pozwoliło na otrzymanie wiarygodnych wyników obliczeń numerycznych. Autor poprawnie przeprowadził zaawansowaną analizę porównawczą dla rozpatrywanych przypadków



optymalizacji pod różnymi warunkami brzegowymi, jak również przedstawił zmodyfikowaną metodę kontroli wariancji, którą również przetestował w serii obliczeń numerycznych. Otrzymane wyniki dla wszystkich przypadków zostały obszernie opisane i zinterpretowane. Wykorzystana metodologia jest rzetelna i wiarygodna o czym świadczą otrzymane wyniki numeryczne zbliżone do wyników benchmarku BEAVRS.

Rozdział czwarty skupia się na optymalizacji wielokrotnej wymiany paliwa na przykładzie rdzenia francuskiego reaktora jądrowego EPR. Do optymalizacji zostały użyte algorytm genetyczny, algorytm symulowanego wyżarzania jak i metoda hybrydowa łącząca oba algorytmy. Obliczenia zostały wykonane dla przypadku testowego jak i dwóch przypadków zakładających 1/4 i 1/8 symetrii rdzenia reaktora. Algorytmy zostały sprzężone z kodem do obliczeń neutronowych jak i opracowanym przez autora narzędziem optymalizacyjnym. Autor profesjonalnie przedstawił założenia problemu optymalizacyjnego z uwzględnieniem wpływu wypalenia paliwa jądrowego i poziomu reaktywności na liczbę przeładowań rdzenia reaktora. Wybór reaktora jądrowego do badań naukowych został dokonany poprawnie, reaktor EPR jest jednym z najczęściej budowanych reaktorów jądrowych w skali światowej. Operatory niezbędne do uruchomienia obliczeń optymalizacyjnych dla obu algorytmów zostały prawidłowo zdefiniowane. Idea użyciu entropii Shanona do monitorowania wydajności algorytmu genetycznego jest w pełni uzasadniona. Dużym osiągnięciem doktoranta jest sprzężenie algorytmów ewolucyjnych z kodem neutronowym przy pomocy dedykowanego interfejsu graficznego, co w znaczny sposób ułatwiło obliczenia numeryczne. Opracowana metodologia sprzężonych obliczeń numerycznych oraz weryfikacji wydajności algorytmu wraz z definicją przypadków obliczeniowych jest rzetelna i wiarygodna. Otrzymane wyniki oraz ich analiza porównawcza dla wszystkich algorytmów oraz przypadków obliczeniowych z uwzględnieniem czynników wpływających na długość cyklu reaktorowego (rozkład mocy, ucieczka neutronów, wypalenie paliwa) zostały przedstawione oraz zinterpretowane prawidłowo, co pozwoliło autorowi na sformułowanie miarodajnych wniosków końcowych. Doktorant również w sposób prawidłowy zdefiniował potencjałe dalsze kierunki rozwoju opracowanego aparatu matematycznego oraz powiązanych obliczeń numerycznych.

W ostatnim, piątym rozdziale rozprawy doktorant przedstawia ciekawe zagadnienie optymalizacyjne produkcji  $^{99}\text{Mo}$  w badawczym reaktorze jądrowym MARIA. Zagadnienie naukowe ma stricte praktyczne zastosowanie i może zostać wykorzystane do rzeczywistej optymalizacji produkcji  $^{99}\text{Mo}$  podczas naświetlania tarcz uranowych. Autor w sposób właściwy przedstawił charakterystykę rdzenia reaktora MARIA i możliwości jego wykorzystania do produkcji radioizotopów. Na uwagę zasługuje przedstawienie zagadnień teoretycznych dotyczących efektywności produkcji radioizotopów w zależności od schematu naświetlania, głównie od liczby cykli naświetleniowych oraz od zmiany pozycji tarcz uranowych. Wyniki teoretyczne zostały słusznie porównane z wynikami wypaleniowych obliczeń numerycznych wykonanych za pomocą kodu FISPACT-II. Zgodność wyników jest wysoka co świadczy o wykorzystaniu przez autora poprawnego aparatu matematycznego. Wykonana analiza ekonomiczna pokazała zależność względnych kosztów naświetlania w zależności od długości cyklu naświetleniowego oraz liczby cykli naświetleniowych dla danego stosunku kosztów cyklu do kosztów tarczy uranowej. Doktorant następnie wykorzystał algorytm genetyczny jako element skomplikowanego systemu obliczeniowego używanego do optymalizacji schematu naświetlania. W systemie zaawansowane kody numeryczne wykorzystywane są do obliczeń strumienia neutronów, spektrum energetycznego neutronów jak i wydajności reakcji jądrowych dla danych pozycji naświetleniowych w rdzeniu reaktora. Wydajności reakcji jądrowych następnie porównywane są z wartościami otrzymanymi eksperymentalnie. Doktorant użył





powyższych parametrów w algorytmie genetycznym jako parametrów wejściowych do optymalizacji kosztów naświetlania zestawu tarcz uranowych z uwzględnieniem ich tasowania w rdzeniu reaktora podczas kolejnych cykli naświetleniowych. Całość zastosowanej metodologii naukowej jest wiarygodna, wyniki obliczeń zostały zinterpretowane poprawnie, wyciągnięte wnioski znajdują uzasadnienie w otrzymanych wynikach

#### 4. Zagadnienia do omówienia

Rozprawa doktorska została przygotowana z należytą starannością i nie wymaga poprawek. Bardzo proszę o odniesienie się do poniższych kwestii podczas obrony rozprawy doktorskiej:

- a) Porównanie wykorzystanych algorytmów optymalizacyjnych z innymi metodami optymalizacyjnymi mogącymi mieć zastosowanie do optymalizacji zarządzania paliwem w rdzeniu reaktora.
- b) Wpływ schematu ładowania oraz przeładowania rdzenia reaktora na kluczowe parametry operacyjne w odniesieniu do bezpieczeństwa jego pracy.
- c) Możliwość optymalizacji cyklu paliwowego w kontekście minimalizacji produkcji wysokoaktywnego zużytego paliwa jądrowego.

#### 5. Podsumowanie

Po zapoznaniu się z przedstawioną rozprawą doktorską stwierdzam jednoznacznie że spełnia ona wszystkie wymagania ustawowe stawiane rozprawom doktorskim, tzn. stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w określonej dyscyplinie oraz umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Niniejszym wnioskuję o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

Rozprawa doktorska stanowi zwieńczenie kilkuletniej pracy naukowej doktoranta wykonanej w ramach grantu naukowego na Politechnice Warszawskiej, stażu krajowego w Narodowym Centrum Badań Jądrowych oraz stażu zagranicznego w francuskiej firmie Framatom. Podczas prowadzenia badań doktorant przedstawił otrzymane wyniki na renomowanych międzynarodowych konferencjach naukowych (cztery konferencje) jako i w uznanych czasopismach naukowych (cztery artykuły). Ze względu, na powyższe oraz na unikatowy charakter przedstawionych badań naukowych jak i możliwość ich praktycznego zastosowania wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

  
Dr hab. inż. Mikołaj Oettingen, prof. AGH

