

Abstract

Optimization of the in-core fuel management in a nuclear reactor core using evolutionary algorithms

This thesis addresses the use of optimization evolutionary algorithms, primarily genetic algorithms, in the optimization of nuclear reactor fuel cycle management. The work discusses three optimization topics – the first core loading of a PWR-type reactor, the equilibrium cycle of a PWR, and the irradiation scheme of target materials for the production of radioisotopes.

In the topic concerning the first core loading, the issue of arranging fuel assemblies in the core of a Westinghouse PWR with is analyzed. The optimization is performed with the aim of extending the cycle, reducing the unevenness of the flux distribution while maintaining the average enrichment of the fuel assembly and keeping the effective neutron multiplication factor within the appropriate range. The second topic pertains to the equilibrium cycle, which is a universal loading scheme applied each time the core is reloaded. The study aimed to maximize the average burnup of the fuel while maintaining or improving selected safety and economic parameters of core operation – the unevenness factor of power distribution, maximum burnup of the assembly, and neutron leakage. The analysis was based on a test model inspired by the core of the Framatome EPR reactor and was carried out during a six-month visit to the company's headquarters. The last of the topics, concerning the optimization of the irradiation scheme of target materials for the production of ^{99}Mo in the core of the Maria research reactor, aimed to find the optimal loading method, based on theoretical analyses and simulations coupled with a genetic algorithm. The goal of the study was to maximize the efficiency of production and minimize the costs of this process.

Each of the topics demonstrates the application of evolutionary algorithms in various issues of nuclear engineering, related to the management of the cycle in a nuclear reactor and the potential gains resulting from their use. The thesis discusses the technical and theoretical aspects of this topic as well as limitations and, above all, the possibilities for further development, especially in terms of expanding the set of optimized parameters and new optimization methods.

Keywords: Optimization, Evolutionary Algorithms, Nuclear Reactor Core, Nuclear Cycle Management, Radioisotopes Production

Streszczenie

Optymalizacja zarządzania cyklem paliwowym w rdzeniu reaktora jądrowego przy użyciu algorytmów ewolucyjnych

Niniejsza praca dotyczy wykorzystania optymalizacyjnych algorytmów ewolucyjnych, przede wszystkim algorytmów genetycznych w optymalizacji zarządzania cyklem paliwowym reaktora jądrowego. W pracy poruszane są trzy tematy optymalizacyjne – pierwszy załadunek rdzenia reaktora typu PWR, cykl równowagowy reaktora PWR oraz schemat napromieniania materiałów tarczowych do produkcji radioizotopów.

W temacie dotyczącym pierwszego załadunku rdzenia analizowane jest zagadnienie ułożenia kaset paliwowych w rdzeniu reaktora PWR firmy Westinghouse. Optymalizacja jest wykonywana pod kątem wydłużenia cyklu, zmniejszenia nierównomierności rozkładu strumienia, przy jednoczesnym zachowaniu średniego wzbogacenia kasety paliwowej oraz utrzymaniu efektywnego współczynnika neutronów w odpowiednim zakresie. Drugi temat dotyczy cyklu równowagowego, czyli uniwersalnego schematu ładowania który stosowany jest za każdym razem gdy rdzeń jest przeładowywany. Badanie ma na celu maksymalizację średniego wypalenia paliwa, przy jednoczesnym utrzymaniu lub polepszeniu wybranych parametrów bezpieczeństwa i ekonomiki pracy rdzenia. Analiza oparta jest na testowym modelu inspirowanym reaktorem EPR firmy Framatome, a zrealizowana była w ramach 6-cio miesięcznej wizyty w siedzibie firmy. Ostatni z tematów, dotyczący optymalizacji schematu napromieniania materiałów tarczowych do produkcji ^{99}Mo w rdzeniu badawczego reaktora Maria w Narodowym Centrum Badań Jądrowych i skupia się poszukiwaniu optymalnej metody załadunku, opartej na analizach teoretycznych oraz symulacjach sprzężonych z algorytmem genetycznym, w celu maksymalizacji wydajności produkcji oraz minimalizacji kosztów tego procesu.

Każdy z tematów demonstruje zastosowanie algorytmów ewolucyjnych w różnych zagadnieniach inżynierii jądrowej, związanych z zarządzaniem cyklem w reaktorze jądrowym oraz potencjalne zyski wynikające z ich zastosowania. W pracy omówione są techniczne oraz teoretyczne aspekty tej tematyki jak również ograniczenia a przede wszystkim możliwości dalszego rozwoju, zwłaszcza pod kątem rozszerzenia zestawu optymalizowanych parametrów oraz nowych metod optymalizacyjnych.

Słowa kluczowe: Optymalizacja, Algorytmy Ewolucyjne, Rdzeń Reaktora Jądrowego, Zarządzanie Cyklem Paliwowym, Produkcja Radioizotopów