



Dr hab. Tomasz Kozłowski
Narodowe Centrum Badań Jądrowych

ul. Andrzeja Sołtana 7, 05-400 Otwock-Świerk
tel. 22 273 14 30
tomasz.kozlowski@ncbj.gov.pl

Champaign, 26.06.2023

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Pawła Domitra
„Metodyka wykonywania obliczeń najlepszego szacowania wraz z oceną niepewności
na podstawie metod wstecznej kwantyfikacji niepewności”**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska dotyczy nowej metodzie wykonywania obliczeń najlepszego szacowania wraz z oceną niepewności. Metoda ta pozwala na usprawnienie obecnie używanych metod poprzez uwzględnienie wstecznej kwantyfikacji niepewności parametrów wejściowych. Metoda najlepszego szacowania wraz z oceną niepewności jest używana do deterministycznych analiz bezpieczeństwa dla awarii reaktorów jądrowych. Autor proponuje nową metodę, która bazuje na połączeniu najlepszych praktyk obliczeń niepewności wykorzystując dotychczasowo stosowane metody, które pozwalają na minimalizację niepewności wynikających z efektu użytkownika, w połączeniu ze wsteczną kwantyfikacją niepewności. W swojej pracy autor również wdrożył i zademonstrował w praktyce użyteczność dwóch metod obliczeniowych z wykorzystaniem wstecznej kwantyfikacji niepewności, a uzyskane wyniki zostały poddane procesowi walidacji. Recenzowana praca rzetelnie i systematycznie analizuje, które z proponowanych rozwiązań ma najlepsze cechy w zastosowaniu teoretycznym i praktycznym, będące decydującymi czynnikami o sukcesie szerokiej implementacji danej technologii w przemyśle energetycznym.

Rozprawa doktorska mgr inż. Domitra wpisuje się w powyższy nurt badań i koncentruje na zagadnieniach bezpieczeństwa eksploatacji reaktorów jądrowych w stanach ustalonych oraz w przypadku awarii. Mgr inż. Domitr w swojej pracy dokonał porównania modeli numerycznych stworzonych do badania stanów ustalonych i awarii, używając kodu TRACE. Rozważane tematy dotyczą usprawnienia dokładności symulacji awarii w elektrowniach jądrowych i zwiększenia bezpieczeństwa eksploatacji reaktorów jądrowych. Wykorzystanie proponowanych metod i algorytmów ma potencjał poprawy zachowania reaktora podczas awarii utraty chłodziwa typu LOCA (Loss of Coolant Accident) i najważniejszych zjawisk obserwowanych podczas tego typu awarii: wpływ krytyczny, wymianę ciepła w rdzeniu i propagacja frontu zalewania. Są to niewątpliwie istotne badania mogące posłużyć do podjęcia decyzji o przyszłym zastosowaniu reaktorów jądrowych do produkcji energii w Polsce, recenzowana praca traktuje ten temat z punktu widzenia dziedzin nauki inżynierjno-technicznych.

W pracy zaproponowano nową metodykę oraz dwie metody obliczeniowe niepewności parametrów wejściowych oparte na dwóch różnych metodach: pierwsza to wnioskowanie Bayesowskie z wykorzystaniem metod Monte Carlo, druga jest oparta o algorytm uczenia maszyn. Głównym i najbardziej oryginalnym osiągnięciem pracy jest algorytm uczenia maszyn do kwantyfikacji niepewności parametrów w analizach deterministycznych obiektów jądrowych, które dotychczas zostały zaprezentowane jedynie przez autora rozprawy. Wdrożenie metodyki w stopniu zaawansowania, dokładności i całości również nie zostało

dotychczas zaprezentowane w literaturze tematycznej. Wykonane analizy poprzez porównanie otrzymanych wyników numerycznych z danymi pomiarów eksperymentalnych przyczyniły się, w pośredni sposób, do walidacji zastosowanego kodu obliczeniowego, co jest niesamowicie ważnym zagadnieniem w symulacji i eksploatacji obiektów jądrowych.

Praca liczy 191 stron i składa się z 7 rozdziałów, rozdziału referencji oraz trzech załączników. Na początku pracy autor zamieścił spis treści oraz streszczenie pracy. Na końcu pracy umieszczona jest bibliografia i załączniki. Zadziwiający jest brak spisu rysunków i tablic. Bibliografia składa się 111 pozycji literaturowych, z czego 53 pozycje zostały opublikowane po 2015 roku. Przygotowana lista zawiera zarówno prace starsze dokumentujące podstawy użytych metod, jak i w dużej części prace publikowane niedawno reprezentujące aktualny stan wiedzy, co świadczy o dobrej orientacji autora w tematyce badawczej. W pracy zamieszczono liczne rysunki, wykresy i tablice zawierających zestawienia parametrów użytych w modelowaniu oraz zestawień statystyki uzyskanych wyników.

Rozdział 1 stanowi wstęp i wprowadzenie do tematu, w którym opisano zagadnienie deterministycznych analiz bezpieczeństwa dla reaktorów jądrowych, marginesy bezpieczeństwa w kryterium akceptacji w analizach zachowawczych oraz najlepszego szacowania, i główne zagadnienia w szacowaniu niepewności w deterministycznych analizach bezpieczeństwa. Podstawową motywacją pracy jest opracowanie nowej metody wykonywania i weryfikacji deterministycznych analiz bezpieczeństwa z wykorzystaniem podejścia najlepszego szacowania wraz z oceną niepewności. Jako że rozprawa powstała w ramach programu „doktorat wdrożeniowy,” metoda ta będzie wdrożona w pracach Państwowej Agencji Atomistyki (PAA), gdzie jednym z głównych zadań PAA będzie dokonanie oceny Raportu Bezpieczeństwa obiektu jądrowego wraz z towarzyszącą dokumentacją techniczną. Głównym celem rozprawy jest usprawnienie obecnie istniejących metod wykonywania analiz najlepszego szacowania wraz z oceną niepewności i wdrożenie usprawnionej metody. Cel ten został w pełni spełniony.

Rozdział 2 opisuje metody obliczeń najlepszego szacowania wraz z oceną niepewności. Obecnie stosowane metody najlepszego szacowania wraz z oceną niepewności dzielą się na trzy główne kategorie: metody propagacji niepewności wejściowych, metody propagacji niepewności wyjściowych i metody oparte o analizę Bayesowską z globalną analizą wrażliwości. Wszystkie trzy są opisane zwięźle i rzeczowo, autor demonstruje bogatą wiedzę na ten temat i szczegółowo opisuje zalety, możliwości i ograniczenia obecnie stosowanych metod. W szczególności ciekawy jest opis programu badawczego OECD NEA (Organization for Economic Cooperation and Development, Nuclear Energy Agency) do usprawnienia metod kwantyfikacji niepewności w kodach obliczeniowych do bezpieczeństwa obiektów jądrowych. Omówione tu stosowane metody wraz z ich zaletami i wadami stanowi podstawę i motywację do zaproponowania usprawnień i opracowania nowej metody.

Rozdział 3 poświęcony jest opisowi problemu badawczego tej pracy: metody wykonywania obliczeń najlepszego szacowania wraz z oceną niepewności. W tej części rozprawy przedstawiono opis metody składającej się z sześciu głównych elementów. Autor omówił szczegółowo wszystkie elementy wraz ze składającymi się na nie krokami. Autor prawidłowo wskazuje i używa wniosków i doświadczeń z międzynarodowych benchmarków dotyczących wykorzystania metod najlepszego szacowania wraz z oceną niepewności, które mówią o konieczności standaryzowania procesu wykonywania takich obliczeń. Nadrzędnym i właściwym celem autora jest przede wszystkim ograniczenie wpływu użytkownika na uzyskiwane zakresy niepewności oraz zapewnienie ich powtarzalności. Autor właściwie

identyfikuje główny problem związany ze wsteczną kwantyfikacją niepewności, którym jest fakt, że jest to zagadnienie, któremu brak jednoznacznej odpowiedzi. Mając świadomość ograniczeń i limitacji obecnych metod obliczeń najlepszego szacowania wraz z oceną niepewności, jak i również międzynarodowych trendów, w ramach pracy doktorskiej autor podjął wyzwanie opracowania i opisanie nowej metody pozwalającej na usprawnienie obecnych metod obliczeń najlepszego szacowania wraz z oceną niepewności, które opisał, wdrożył, zademonstrował i zwalidował w swojej pracy doktorskiej.

W rozdziale 4 został opisany temat wdrożenia elementów metody wykonywania obliczeń najlepszego szacowania wraz z oceną niepewności, które były opisane w rozdziale 3. Główna część rozprawy jest poświęcona opracowaniu metody obliczeniowej do kwantyfikacji niepewności wejściowych w ramach stosowania metody wykonywania obliczeń najlepszego szacowania wraz z oceną niepewności. Jest to duże i czasochłonne wyzwanie, które zostało podjęte przez autora i opisane w tym rozdziale. Głównym osiągnięciem jest szczegółowy opis dwóch metod wstecznej kwantyfikacji niepewności: metody opartej na podejściu Bayesowskim i metody opartej na uczeniu maszyn, co stanowi oryginalne osiągnięcie tej pracy godne doktoratu. Praktyczna demonstracja tej metody jest pokazana w następnym rozdziale.

Rozdział 5 jest poświęcony kwantyfikacji niepewności wejściowych na podstawie obliczeń dla instalacji testowych. W tym celu wykorzystane są dwie metody zaproponowane w rozprawie i opisane w rozdziale 4. Jest to główną częścią obliczeniową rozprawy, demonstrującą i porównującą dwie opracowane metody obliczeniowe kwantyfikacji niepewności. Obliczenia i wyniki zostały pokazane dla instalacji eksperymentalnej Marviken i Flecht-Seaset. Marviken jest źródłem danych eksperymentalnych dotyczących wpływów krytycznych. W instalacji Marviken przeprowadzono 26 testów z różnymi warunkami początkowymi oraz konfiguracjami dysz wylotowych, więc dostępna jest bardzo obszerna baza danych doświadczalnych. Instalacja Flecht-Seaset służy jako źródło danych eksperymentalnych do badania zjawisk związanych z wymianą ciepła w rdzeniu reaktora podczas fazy zalewania w trakcie awarii typu LB-LOCA (Large Break Loss of Coolant Accident). Testy przeprowadzono w warunkach odwzorowujących odkrycie rdzenia reaktora, więc nawet przy wartościach temperatury symulującego pręty paliwowe przekraczających 1200 °C. W rozprawie wykorzystano dane eksperymentalne dla wymuszonego zalewania rdzenia dla niezablokowanych kaset paliwowych. Wyniki metody wstecznej kwantyfikacji niepewności rozkładów gęstości prawdopodobieństwa parametrów oparty o analizę Bayesowską i uczenie maszyn jest opisane dokładnie i obszernie. Porównania wyników są opisane szczegółowo i wnioski są użyte do walidacji uzyskanych wyników w rozdziale 6. Stanowi to znaczny wkład w ogólny stan wiedzy i opracowanie jest jednolite i przejrzyste.

Rozdział 6 zawiera walidacje uzyskanych rozkładów gęstości prawdopodobieństwa parametrów wejściowych uzyskanych w rozdziale 5. Walidacja wykonana była zgodnie z metodą opisaną w rozdziale 3. W tym elemencie metody, wykonywane są obliczenia walidacyjne dla instalacji eksperymentalnej, aby była możliwość porównania wyników obliczeń z danymi pomiarowymi. Instalacja eksperymentalna, dla której wykonano obliczenia walidacyjne to instalacja LOFT. W tej instalacji wykonywano między innymi doświadczenia odwzorowujące awarie typu LB-LOCA w elektrowni jądrowej, co pozwoliło na zebranie danych doświadczalnych dla zjawisk wymiany ciepła w rdzeniu oraz wpływu rozerwania rury. Wszystkie kroki, analizy, obliczenia opisane w rozdziale 3, 4, 5 są zademonstrowane spójnie i systematycznie w tym rozdziale. Uzyskane zakresy niepewności wyników są szerokie, ale pozwalają na pokrycie danych eksperymentalnych. Wynika to z metody wyznaczania rozkładów gęstości prawdopodobieństwa, których zakres był szerszy ze względu

na złożenie rozkładów dla wielu testów o różnych warunkach początkowych i brzegowych w instalacjach eksperymentalnych. Zapewnia to większą uniwersalność uzyskanych rozkładów, czyli możliwość zastosowania ich przy zróżnicowanych warunkach początkowych w obiektach jądrowych, co znacznie zwiększa jakość i cenność pracy.

Rozdziały 4, 5 i 6 są najważniejszymi rozdziałami pracy i tworzą trzon dorobku naukowego autora. Uzyskane wyniki są bez wątpienia kluczowe dla dalszego rozwoju oraz walidacji eksperymentalnej kodów służących do symulacji instalacji jądrowych.

Rozdział 7 zawiera podsumowanie oraz wnioski wyciągnięte z przeprowadzonych obliczeń, szczególnie na temat możliwości zastosowania nowej metody w jądrowym reaktorze energetycznym. Praca kończy się trzema załącznikami zawierającymi opis metod obliczeniowych, porównanie wyników obliczeniowych z pomiarami w instalacji Marviken i porównanie wyników obliczeniowych z pomiarami w instalacji Flecht-Seaset.

Praca napisana jest przejrzysto, tok rozumowania jest prezentowany jasno i konsekwentnie. Cel pracy i postawione problemy badawcze są jednoznacznie zdefiniowane, a użyte metody i algorytmy precyzyjnie opisane. Uzyskane wyniki są ilustrowane adekwatnymi rysunkami i tabelami. Teza proponowana przez autora: „Istnieją usprawnienia do obecnie stosowanej metody propagacji niepewności wejściowych, które pozwolą na ograniczenie wpływu użytkownika oraz zapewnienie uniwersalności, oraz powtarzalności metody” została udowodniona i spełniona w tej pracy. Z całą pewnością doktorant zrealizował założone cele, a w szczególności:

- Wdrożył metody obliczeń najlepszego szacowania wraz z oceną niepewności.
- Dokonał kwantyfikacji niepewności parametrów wejściowych na podstawie obliczeń dla instalacji testowych.
- Wykonał walidację uzyskanych rozkładów gęstości prawdopodobieństwa parametrów na podstawie niezależnej instalacji testowej.
- Zaprezentował metodę, która jest systematyczna, uniwersalna i powtarzalna na określenie zakresów i rozkładów gęstości prawdopodobieństwa dla parametrów modelowych.
- Dokonał rozważań i analizy możliwości wdrożenia i zastosowania metody obliczeń najlepszego szacowania wraz z oceną niepewności wykonywanych dla reaktorów lekko-wodnych przez PAA.

Wspólnym celem tych tematów jest zwiększenie bezpieczeństwa eksploatacji reaktorów jądrowych z punktu widzenia procesów przepływowo-ciepłych.

Mam następujące główne uwagi krytyczne do pracy:

- Praca opiera się na kodzie obliczeniowym TRACE jednakże brakuje pełnego opisu narzędzia badawczego pod względem jego założeń i uproszczeń.
- Uzyskane zakresy niepewności są bardzo szerokie. Autor opisuje to jako kompromis między rozkładami szerokimi, które są uniwersalne a wąskimi, które są ograniczone w zakresie stosowalności. Mimo że szerokie rozkłady są bardziej uniwersalne, mogą wychodzić poza fizyczne granice parametrów modelu, który może być stosowany do zjawisk fizycznych (np. współczynnik próżni poniżej 0% lub powyżej 100%).
- Wsteczna kwantyfikacja niepewności została przeprowadzona dla tylko dwóch procesów w reaktorze podczas awarii LOCA: wpływy krytyczne (4 parametry) i

wymiana ciepła w rdzeniu reaktora podczas fazy zalewania w trakcie awarii typu LOCA (5 parametrów). Ostatnia wersja kodu TRACE ma ponad 40 modeli fizycznych, których niepewność powinna być określona. Wartościowy i interesujący byłby dodatek z informacją o innych instalacjach i eksperymentach, które są potrzebne to kwantyfikacji niepewności wszystkich modeli fizycznych kodu TRACE.

Dostrzeżone słabe punkty i nieścisłości wymienione powyżej nie umniejszają w żadnym stopniu wartości merytorycznej pracy. Chciałbym podkreślić, że rozprawa ukazuje wszechstronność zainteresowań i umiejętności mgr inż. Domitry, podejmuje wiele zagadnień dotyczących obliczeń najlepszego szacowania i oceny niepewności na podstawie metody wstecznej kwantyfikacji niepewności.

W mojej ocenie praca doktorska spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim, które są konieczne do otrzymania stopnia doktora. W związku z tym wnioskuje o dopuszczenie mgr inż. Pawła Domitry do obrony publicznej i dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Tomasz Kozłowski

Dr hab. Tomasz Kozłowski