

Warszawa, 4 maja 2023 r

Dr hab. Ludwik Pieńkowski, profesor AGH

Katedra Energetyki Jądrowej
Wydział Energetyki i Paliw
Akademia Górniczo - Hutnicza imienia Stanisława Staszica w Krakowie
30-059 Kraków, al. A. Mickiewicza 30
e-mail ludwik.pienkowski@agh.edu.pl

**Recenzja rozprawy doktorskiej magistra inżyniera Pawła Domitra
p.t.: "Metodyka wykonywania obliczeń najlepszego szacowania wraz z
oceną niepewności na podstawie metod wstecznej kwantyfikacji
niepewności"**

Warunkiem rozwoju energetyki jądrowej jest jej użyteczność i bezpieczeństwo. Spełnienie wymagań prawnych musi być bezwzględnie wymagane, ale bezpieczeństwo nie może być osiągnięte poprzez nakładanie bezzasadnie restrykcyjnych norm na każdym etapie projektowania, budowy i eksploatacji elektrowni jądrowych. Innymi słowy wyzwaniem współczesnej energetyki jądrowej jest zapewnienie najwyższych standardów bezpieczeństwa, ale bez ponoszenia nieuzasadnionych kosztów. Recenzowana rozprawa przedstawia oryginalne wyniki pracy naukowej doktoranta, których celem jest wzmocnienie bezpieczeństwa jądrowego poprzez prowadzenie precyzyjnych, ale i bardziej wymagających analiz, a nie poprzez narzucenie bardziej restrykcyjnych norm.

Kilkadziesiąt lat temu, gdy w euroatlantyckiej przestrzeni gospodarczej energetyka jądrowa odnosiła największe sukcesy, deterministyczne analizy bezpieczeństwa prowadzono narzucając konserwatywne założenia na każdym etapie badanych scenariuszy. Takie podejście wynikało z istoty analizowanych gwałtownych, nierównowagowych procesów awaryjnych. Ograniczona była baza doświadczalna jak i możliwości komputerowego modelowania analizowanych zdarzeń i awarii. Brakowało też rozwiniętych strukturalnych, obiektowo zorientowanych języków programowania, a dostępne moce obliczeniowe były niewielkie. Nic więc dziwnego, że przyjęto wówczas metodykę opartą na obliczaniu wartości średnich przy konserwatywnych, czyli pesymistycznych założeniach i narzucaniu kolejnych marginesów bezpieczeństwa na każdym etapie analiz. Widać, że tak wykonane analizy dają podstawę do realizacji bezpiecznych projektów, ale możliwe że kosztem bezzasadnie nadmiernej odległości od wyznaczonych norm bezpieczeństwa, gdyż o marginesach bezpieczeństwa w dużym stopniu decydował użytkownik, czyli zespół analityków prowadzących badania. Nic więc dziwnego, że w deterministycznych analizach bezpieczeństwa już wówczas próbowano wdrażać metody najlepszego szacowania¹, a współcześnie metody „Best Estimate Plus Uncertainty” (BEPU) są rozwijane. Jednak do ich

¹ Patrz na przykład dokument REGULATORY GUIDE 1.157 wydany w maju 1989 roku przez U.S. NRC: BEST-ESTIMATE CALCULATIONS OF EMERGENCY CORE COOLING SYSTEM PERFORMANCE <https://www.nrc.gov/docs/ML0037/ML003739584.pdf>

powszechnego wykorzystania w procesach akceptacji projektów droga jest jeszcze daleka. Jak zauważa autor rozprawy przepisy prawne obowiązujące w Polsce mówią, że analizy zdarzeń eksploatacyjnych oraz awarii projektowych powinny bazować na podejściu konserwatywnym, a metody najlepszego szacowania dopuszczone są w ograniczonym zakresie w obliczeniach projektowych.

Recenzowana dysertacja magistra inżyniera Pawła Domitra daje zatem wkład do rozwoju perspektywicznych, nowoczesnych i zapewne bardzo przydatnych analiz BEPU w rozwoju energetyki jądrowej. Zgodnie z tytułem stanowi propozycję wprowadzenia metodyki najlepszego szacowania wraz z oceną niepewności na podstawie metod wstecznej kwantyfikacji niepewności. Rozprawa liczy 191 stron, składa się z siedmiu rozdziałów i jednego aneksu. W zwięzłym wprowadzeniu zarysowana jest rola deterministycznych analiz bezpieczeństwa, w tym metod BEPU i na tym tle sformułowana jest teza rozprawy:

Istnieją usprawnienia do obecnie stosowanej metody propagacji niepewności wejściowych, które pozwolą na ograniczenie wpływu użytkownika oraz zapewnienie uniwersalności oraz powtarzalności metody.

Autor proponuje udowodnienie tej tezy poprzez opracowanie i wdrożenie nowej, uniwersalnej metodyki obliczeń najlepszego szacowania wraz z oceną niepewności na podstawie metod wstecznej kwantyfikacji niepewności w oparciu o dostępne dane doświadczalne oraz metody i kody obliczeniowe. Jednak ze względu na ograniczone zasoby i zakres rozprawy doktorskiej nowa metodyka została ograniczona do badania dużego rozerwania rurociągu pierwotnego obiegu chłodzenia (Large Break Loss of Coolant Accident, LBLOCA) rdzenia reaktora jądrowego typu PWR (Pressurized Water Reactor).

W rozdziale drugim przedstawione są obecnie stosowane metody obliczeń najlepszego szacowania wraz z oceną niepewności. Należy wysoko ocenić zarówno szerokie, dojrzałe spojrzenie autora na ten obszar, jak i duże walory dydaktyczne przedstawionego opisu. Na stronie 21 przytoczony jest przykład wskazujący na użyteczność metod BEPU, które „*pozwalają na zwiększenie marginesów bezpieczeństwa, stąd operatorzy elektrowni jądrowych [będą] mogli udowadniać bezpieczeństwo swoich bloków przy pracy ze zwiększoną mocą*”. Wyczerpujący opis metod propagacji niepewności wejściowych i wyjściowych ilustrowany jest oryginalnymi i bardzo czytelnymi, dydaktycznymi schematami (patrz Rysunek 2.1 na stronie 22 i Rysunek 2.2 na stronie 25). Pod koniec krótkiej prezentacji stosowanych metod najlepszego szacowania wraz z oceną niepewności przedstawione są wyniki benchmarków BEMUSE i PREMIUM. Tym samym czytelnik dostaje wyczerpujące wprowadzenie do rozdziału trzeciego, do zaproponowania metodyki wykonywania obliczeń najlepszego szacowania wraz z oceną niepewności.

Metodyka została ujęta w uniwersalnej formie i podzielono ją na sześć elementów, zgodnie z rekomendacjami dużego projektu SAPIUM, które opublikowano w 2019 roku (referencja [16] w rozprawie doktorskiej). Pierwszy, kluczowy element zawiera istotę kwantyfikacji niepewności parametrów wejściowych dla wybranej technologii reaktorowej oraz wybranego scenariusza awarii. Kolejne elementy wymagają przygotowania bazy eksperymentalnej, opracowania modelu, jego kwantyfikacji, walidacji co umożliwi wykorzystanie metody przy analizie modelu elektrowni jądrowej.

Rozdział czwarty to rdzeń rozprawy, wdrożenie zaproponowanej metodyki wstecznej kwantyfikacji niepewności parametrów wejściowych kodu termohydraulicznego TRACE dla awarii LBLOCA w reaktorze typu PWR. W kolejnym rozdziale opisano wykonaną analizę

niepewności dla wypływu krytycznego, wymiany ciepła z otoczeniem i propagacji frontu zalewania. Badania wykonano dwoma metodami, a wyniki obliczeń porównano z danymi doświadczalnymi z dwóch instalacji: Marviken i Flecht Seaset. Walidację uzyskanych rozkładów gęstości prawdopodobieństwa wykonano w oparciu o dane doświadczalne z instalacji LOFT, co opisano w rozdziale szóstym. Zasadniczym wynikiem przeprowadzonej analizy są uzyskane rozkłady gęstości prawdopodobieństwa wybranych parametrów wejściowych modelu wykorzystywanego w kodzie TRACE. Rozdział ten kończy się prezentacją wyników obliczeń niepewności dla modelu elektrowni jądrowej typu PWR. Wykorzystana w rozprawie metoda Bayesowska wspomaganą obliczeniami Monte Carlo jest dość szeroko stosowana. Natomiast implementacja metody uczenia maszynowego stanowi nowatorski wkład doktoranta w rozwój metod BEPU, w kwantyfikację niepewności parametrów w analizach deterministycznych. Osiągnięcie to zostało już częściowo opublikowane w renomowanych wydawnictwach, w dwóch artykułach naukowych, których pierwszym autorem jest autor recenzowanej rozprawy doktorskiej². Rozprawę kończy rozdział siódmy, gdzie autor podjął próbę oceny zaproponowanej metodyki oraz wskazał kierunki kontynuacji badań.

Uważam, że przedstawiona rozprawa doktorska niesie znaczny ładunek nowatorski, jest wartościowa. Z drugiej jednak strony stawia czytelnika przed trudnymi, ale wydaje się, że niepotrzebnymi wyzwaniem:

1. W rozdziale trzecim szczegółowo opisano proponowaną metodykę, ale na bardzo abstrakcyjnym poziomie, bez oparcia o konkretne przykłady. Przy takim układzie rozprawy aby dobrze zrozumieć rozdział trzeci należy powrócić do jego lektury po przeczytaniu całości rozprawy. Co więcej taki układ wymusił zbędne powtórzenia niektórych treści. W mojej opinii rozprawa zyskałaby na czytelności, przejrzystości, gdyby szczegółowe treści rozdziału trzeciego zostały przedstawione pod koniec rozprawy, jako uogólnienie wyników analiz zaprezentowanych w rozdziałach 4, 5 i 6.
2. Autor bardzo starał się o dochowanie precyzji wypowiedzi, ale stało się to kosztem utraty komunikatywności, błędami stylistycznymi, które utrudniają lekturę rozprawy. Na przykład już na stronie 11 czytelnik musi zmierzyć się ze zdaniem, w którym czterokrotnie pada słowo bezpieczeństwo.
3. Znaczna część przedstawionej analizy dotyczy czterech parametrów modelowych w kodzie TRACE o nazwach CHM12, CHM22, C1RC2 i C2RC2. Brakuje wyczerpującego opisu znaczenia tych parametrów oraz uzasadnienia dlaczego je wybrano, a trudno założyć, że czytelnik rozprawy biegle posługuje się kodem TRACE.
4. Na stronie 106 zapisano:

„Bardziej szczegółowe omówienie porównawcze uzyskanych wyników i rozkładów znajduje się w artykule opublikowanym na podstawie wyników badań przeprowadzonych w ramach rozprawy [103].”

Podobnie na stronie 162 zapisano:

„Bardziej szczegółowy opis wprowadzonych zmian oraz całego modelu znajduje się w artykułach [107], [108].”

Jest to niezrozumiała sytuacja, gdyż rozprawa doktorska daje zdecydowanie większe

² Paweł Domitr, Mateusz Włostowski, „*The use of machine learning for inverse uncertainty quantification in TRACE code based on Marviken experiment*”, Nuclear Engineering and Design 384 (2021) 111498.

P. Domitr, M. Włostowski, R. Laskowski, and R. Jurkowski, „*Comparison of inverse uncertainty quantification methods for critical flow test*”, Energy, vol. 263, p. 125640, 2023

możliwości swobodnej, obszernej wypowiedzi niż artykuły w renomowanych, recenzowanych wydawnictwach.

5. Przedstawiona rozprawa nie jest wolna od błędów pisarskich, edytorskich. Dla przykładu:
 - a. Nazwa języka Python powinna być pisana dużą literą. Patrz strony 71, 75, 77, 105
 - b. Rysunek 1.1 na stronie 14 został zaczerpnięty z referencji [12], a nie z [9]. Podobnie na stronie 21 w 10 linijsce od dołu powinno być odniesienie do referencji [12] a nie [9]
 - c. Na stronie 81 pada słowo „wstępne”, a powinno paść „wstępnie”
 - d. Na stronie 81 jest odwołanie do metody BIGUSA, ale brakuje opisu i referencji mówiącej czym jest ta metoda
 - e. Na stronie 89 niezrozumiałe jest zdanie:
„Odchylenie standardowe dobrano po wykonaniu wstępnych obliczeń testowych algorytmu, zgodnie z praktyką wartość ta powinna być dobierana przez użytkownika pod konkretne zastosowanie.”
 - f. Na stronie 115 jest zapis „model instancji testowej” a powinien być „model instalacji testowej”
 - g. Na stronie 122 jest zapis „1031 oraz 1031” a wydaje się, że powinien być „1031 oraz 1033”
 - h. Na stronie 138 jest zapis „dane eksperymentalnie” a powinien być „dane eksperymentalne”
 - i. Na stronie 139 podpis pod rysunkiem 5.31 mówi o znormalizowanym maksymalnym poziomie wody, a na rysunku pokazano znormalizowany czas zalania rdzenia
 - j. Na stronie 142 jest zapis „zauważalne są znaczne różnie w uzyskanych”, a powinien być „zauważalne są znaczne różnice w uzyskanych”

Pytania i prośby o komentarz:

1. W tabeli 5.1 na stronie 87 przypisano sposób wykorzystania danych doświadczalnych z instalacji Marviken do wskazanych etapów metody wstecznej kwantyfikacji. Czy wybór pokazany w dwóch ostatnich kolumnach tabeli 5.1 był jedynym logicznie uzasadnionym? Jak zmieniłyby się wyniki analiz gdyby na przykład zamieniono miejscami wybór „Zbiór testowy” i „Zbiór uczący”?
2. Proszę o wyjaśnienie procedury ze strony 90:
„Zgodnie ze standardową praktyką pierwsze 10% propozycji zostało odrzucone z dalszej analizy.”
3. Na stronie 98 pada stwierdzenie:
„W związku z zauważalnym niedoszacowaniem wydatku przepływu w fazie przepływu cieczy przechłodzonej, zdecydowano o wykonaniu dodatkowych 27 obliczeń, gdzie parametr CHM12, mnożnik w fazie wypływu przechłodzonego, był losowany z rozkładu 1.5 – 2.5. Pozostałe parametry były losowane z poprzednio stosowanych rozkładów.”
Proszę o uzasadnienie tej procedury „ręcznego” dopasowania.
4. Wykorzystane w rozprawie dane doświadczane pochodzą z eksperymentów wykonanych około 40 lat temu. Wydaje się, że dynamiczny postęp we wdrażaniu metod BEPU wymaga nowych, obszerniejszych, bardziej precyzyjnych danych doświadczalnych. Bardzo proszę o komentarz.

5. Przygotowując rozprawę autor wykonał tysiące obliczeń, przygotował zapewne tysiące plików wsadowych wymaganych przez kod TRACE. Tymczasem współczesne obiektowo zorientowane, strukturalne języki programowania potrafią znacznie więcej niż tylko zautomatyzować proces przygotowania plików wsadowych. Jaką rolę w rozwoju metod BEPU mogą odegrać takie języki i środowiska jak Modelica? Bardzo proszę o komentarz.

Powyższe uwagi krytyczne, ani komentarze w żaden sposób nie zmniejszają bardzo dobrej oceny recenzowanej rozprawy doktorskiej i wnoszę o jej wyróżnienie.

Podsumowując uważam, że przedstawiona rozprawa spełnia wszystkie ustawowe warunki stawiane pracom doktorskim i wnioskuje o dopuszczenie magistra inżyniera Pawła Domitra do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Ludwik Pieńkowski