

Prof. dr hab. Elżbieta Jartych
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 38A
20-618 Lublin
e.jartych@pollub.pl

Lublin, 29 września 2025

**Recenzja pracy doktorskiej Jacka Kałowskiego nt.
"Zastosowanie metod probabilistycznych w klasyfikacji systemów, elementów
konstrukcji i wyposażenia reaktora badawczego MARIA"**

Recenzja została przygotowana na wniosek Pana prof. dr hab. inż. Tomasza Wiśniewskiego, Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej (uchwała nr 132/III/2025 z dnia 1 lipca 2025 r.).

Ocena układu rozprawy doktorskiej

Rozprawa obejmuje 93 strony tekstu w języku polskim wraz ze streszczeniami w języku polskim i angielskim, 28 rysunków, 9 tabel, 6 wzorów (5 nieponumerowanych wzorów w Załączniku A) i 62 odnośniki do literatury. Praca składa się z pięciu rozdziałów, zawierających podrozdziały oraz podsumowania. Autor przygotował również spis skrótów. W pierwszym rozdziale przedstawiono przedmiot zainteresowania, jakim jest reaktor badawczy MARIA w Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku. W drugim rozdziale opisano problem naukowy, postawiono hipotezę i określono cele pracy. Następne dwa rozdziały poświęcone są opisowi procesu klasyfikacji systemów, elementów konstrukcji i wyposażenia (SEKW), metodyce probabilistycznej analizy bezpieczeństwa (PSA) oraz opracowanej przez Autora procedurze klasyfikacji bezpieczeństwa SEKW reaktora badawczego. W piątym rozdziale Autor przedstawia wyniki modelowania probabilistycznego dla wybranych trzech typów urządzeń reaktora MARIA. Pracę kończy podsumowanie zawierające wnioski, spis pozycji bibliograficznych oraz Załącznik A z matematycznym opisem algorytmu integracji danych. W mojej opinii układ rozprawy jest prawidłowy.

Ocena piśmiennictwa wykorzystanego w ramach pracy doktorskiej

Bibliografia zawiera 62 pozycje. Większość cytowanych prac została opublikowana w latach 2003-2025 w formie artykułów naukowych z zakresu probabilistycznych metod oceny bezpieczeństwa i niezawodności reaktorów jądrowych. Świadczy to o aktualności podjętego w rozprawie tematu badawczego. Wykorzystano również źródła w postaci instrukcji, procedur i baz danych z Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej MAEA oraz Amerykańskiej Komisji Dozoru Jądrowego (United States Nuclear Regulatory Commission US NRC). Spis bibliograficzny zawiera drobne błędy, np. brak numerów Dzienników Ustaw, w których opublikowano Prawo Atomowe i Rozporządzenie Rady Ministrów, niektóre nazwy czasopism są pisane małymi literami ([28], [55]), podczas gdy większość z nich jest pisana wielkimi literami.

Wskazanie i ocena celu pracy

Głównym celem rozprawy doktorskiej było opracowanie nowej procedury klasyfikacji bezpieczeństwa dla reaktorów badawczych na przykładzie reaktora jądrowego MARIA w NCBJ Świerk zgodnej z normami Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej oraz polskim prawem. Cel został sformułowany w drugim, krótkim rozdziale, opisującym ogólnie podjęty problem naukowy oraz hipotezę. W mojej opinii wystarczyłoby albo wskazanie problemu badawczego albo postawienie tezy. Na str. 26 Autor stawia hipotezę (raczej powinna być to teza), „że wyniki analiz probabilistycznych mają wpływ o charakterze uzupełniającym i pomocniczym na wynik klasyfikacji bezpieczeństwa wg opracowanej procedury”. Zaś na str. 34 pojawia się stwierdzenie, że „PSA czyli Probabilistyczna Analiza Bezpieczeństwa jest komplementarnym do analiz deterministycznych składnikiem oceny bezpieczeństwa obiektu jądrowego”. Wobec powyższego, sformułowanie hipotezy nie było potrzebne, zwłaszcza, że w dalszej części dysertacji nie stwierdzono jednoznacznie, że hipoteza została udowodniona.

Cel został jasno określony i jest ważny w kontekście eksploatacji jedynego reaktora jądrowego w Polsce oraz planowanych do budowy reaktorów energetycznych.

Wskazanie i ocena zastosowanych metod badawczych

W celu opracowania procedury klasyfikacji bezpieczeństwa reaktora badawczego uwzględniono stany obiektu jądrowego, funkcje bezpieczeństwa i rozwiązania projektowe. Ponadto dokonano analizy konsekwencji utraty funkcji bezpieczeństwa, ustalono probabilistyczne kryteria dla identyfikacji stanu obiektu jądrowego, stworzono macierz kategoryzacji funkcji bezpieczeństwa. Wynikiem prac jest schemat procesu klasyfikacji bezpieczeństwa SEKW obiektu jądrowego. Następnie opracowana procedura została zastosowana dla reaktora badawczego MARIA dla wybranych funkcji bezpieczeństwa. W modelowaniu probabilistycznym zastosowano standardowy model PSA z wykorzystaniem technik drzewa zdarzeń i drzewa błędów. Narzędzia te umożliwiają ilościową analizę poziomu bezpieczeństwa reaktora zapewniając kompleksową ocenę prawdopodobieństwa i konsekwencji różnych scenariuszy awarii. Standardowe PSA przeprowadzono przy użyciu dedykowanego oprogramowania SAPHIRE. Dane źródłowe do analiz PSA stanowiły dane historyczne reaktora MARIA pochodzące z tzw. kart niesprawności, które zostały skatalogowane w bazie danych, co wymagało pracochłonnego sprawdzenia informacji na kartach i dopasowania ich do nazw kodowych urządzeń reaktora. Dane odniesienia stanowiły bazy MAEA i US NRC. W analizie danych historycznych reaktora MARIA zastosowano ciągły model prawdopodobieństwa, przy czym częstość uszkodzeń opisano rozkładem statystycznym Gamma. Wyłoniono trzy rodzaje urządzeń reaktora MARIA, dla których wielkość próby statystycznej była zadowalająca, tj. pompy główne, wymienniki ciepła układu chłodzenia kanałów paliwowych oraz wentylatory chłodni. Opracowano procedurę porównawczą baz danych historycznych reaktora MARIA, MAEA i US NRC, której wynikiem są wielkości statystyczne (średnia, centyle rzędu 5, 25, 75 i 95) pozwalające na weryfikację statystycznego podobieństwa bądź różnicy modeli pochodzących z analizowanych baz danych. Ponadto Autor zaproponował dwie metody w wypadku, gdy modele PSA oparte są o niewystarczającą ilość eksploatacyjnych danych wejściowych oraz gdy mamy do czynienia z nowymi obiektami jądrowymi, dla których modele PSA powinny być aktualizowane po rozpoczęciu eksploatacji tych obiektów. Pierwsza z metod to wnioskowanie bayesowskie oparte o rozkład Gamma z wykorzystaniem oprogramowania SAPHIRE, symulacji Monte Carlo, oprogramowania Weibull++. W drugiej proponowanej metodzie zastosowano model Crow-AMSAA zaimplementowany do programu Weibull++

wykorzystującego metodę największej wiarygodności. Na koniec Autor proponuje zastosowanie metody integracji danych wejściowych do analiz PSA nowych obiektów jądrowych w oparciu o algorytm integracji opracowany wspólnie z innymi specjalistami z Zakładu Energetyki Jądrowej i Analiz Środowiskowych NCBJ.

Zastosowane w pracy metody probabilistyczne i symulacyjne są zaawansowane matematycznie i informatycznie. Ich wybór uważam za trafny i dostarczający rzetelnych informacji ilościowych o potencjalnych sekwencjach awarii i związanym z nimi ryzykiem.

Ocena części rozprawy doktorskiej dotyczącej omówienia wyników badań

Autor od 2018 roku był głównym wykonawcą analiz probabilistycznych na potrzeby projektu klasyfikacji bezpieczeństwa reaktora MARIA. W związku z tym bezpośrednio był zaangażowany w proces badawczy, dzięki czemu mógł stworzyć procedurę klasyfikacji bezpieczeństwa SEKW tego obiektu jądrowego. Wyniki udostępnione w dysertacji są przedstawione w postaci tabel porównawczych, macierzy, wykresów tzw. pudełkowych. Te ostatnie służą porównaniu najważniejszych wielkości charakterystycznych jakimi są średnia częstość uszkodzeń λ oraz centyle 5, 25, 75 i 95 rzędu dla różnych baz danych, w tym przypadku US NRC, MAEA i danych historycznych reaktora MARIA. Dzięki takiemu zestawieniu można wnioskować, które modele są bardziej optymistyczne lub bardziej konserwatywne. W przypadku zaawansowanych metod analizy danych historycznych reaktora MARIA wyniki przedstawiono także w postaci wykresów zależności skumulowanej liczby awarii od czasu eksploatacji w dwóch skalach: logarytmicznej i zwykłej z zaznaczonymi przedziałami ufności. Zwłaszcza skala logarytmiczna pozwala dokonać właściwszej oceny wzrokowej dopasowania modelu do danych. Autor zaproponował także metodę integracji danych wejściowych do analiz PSA nowych obiektów jądrowych współtworząc specjalny algorytm.

Najważniejszym wnioskiem płynącym z uzyskanych wyników jest to, że dostępne publicznie bazy danych nie są wystarczające do projektowych analiz PSA reaktora badawczego. Proponowana przez Autora metoda integracji baz danych pozwala wyłonić źródła danych wejściowych optymalne dla procesu klasyfikacji i analiz bezpieczeństwa reaktora badawczego.

Badania zostały przeprowadzone w sposób przemyślany i kompleksowy, a wyniki jasno przedstawione, szczegółowo opisane i zinterpretowane. Dla każdej części analiz dokonano podsumowania i wyciągnięto wnioski. W ten sposób przedstawiony opis jest logiczny i daje możliwość prześledzenia systematycznej pracy badawczej doktoranta.

Informacje na temat praktycznego zastosowania uzyskanych wyników

Głównym rezultatem przeprowadzonych badań, mającym znaczenie praktyczne, jest opracowanie dla reaktora badawczego MARIA zaawansowanych modeli probabilistycznych stosowanych w klasyfikacji bezpieczeństwa m.in. po to, aby w przyszłości zastosować to podejście w ramach polskiego przemysłu jądrowego. Uzyskane w dysertacji wyniki stanowią podstawę do dalszego udoskonalania i aktualizowania modeli zgodnie z zaleceniami MAEA.

Informacja o nieprawidłowościach w ocenianej rozprawie doktorskiej

Rozprawa, w ogólności, jest dobrze napisana i zilustrowana rysunkami, wykresami i tabelami. Praca jest napisana specjalistycznym językiem, co może stanowić wyzwanie dla czytelnika. W tym kontekście uważam, że w pracy powinno być podane więcej szczegółów, jeśli chodzi o oprogramowanie SAPHIRE. Przydałaby się także przykładowa macierz ryzyka

(str. 33/34). We wprowadzeniu Autor pisze: „Wykorzystanie uranu do produkcji energii nie pociąga za sobą zanieczyszczenia atmosfery”; nie zgodzę się z tym stwierdzeniem, ponieważ przygotowanie paliwa uranowego odbywa się raczej kosztem energii z paliw kopalnych, jak również elektrownia jądrowa emituje do atmosfery promieniotwórcze gazy.

Od kilku lat obserwuję, że autorzy prac dyplomowych, a potem dysertacji doktorskich, pisząc teksty stosują metodę wyliczania, podobnie jak to jest w prezentacjach referatów. Nie jest to może błędem, ale przy takim wyliczaniu w podpunktach należy zachować pewne zasady. Całość takiej wyliczanej informacji stanowi zdanie, więc przy wyliczaniu należy stosować raczej małe litery w danym podpunkcie, oddzielać podpunkty przecinkiem lub średnikiem i na końcu stawiać kropkę. W niniejszej rozprawie takich sytuacji jest bardzo dużo. Ponadto Autor nie uniknął nieprawidłowości natury edytorskiej:

- (1) str. 17, 61 i inne (Rysunek 2 poniżej, Rysunek 14) – słowo „poniżej” niepotrzebne, rysunek jest na następnej stronie;
- (2) podpis Rysunku 2 – „schemat paliwa” – raczej „Schemat elementu paliwowego”;
- (3) str. 26 – „W rozdziale 0 Autor prezentuje” – gdzie jest rozdział 0?;
- (4) niezrozumiałe zakończenie zdania na str. 26 – „zgodnie z wymogiem opisanym w ustawie Rozporządzeniu Projektowym [7].”;
- (5) brakuje objaśnienia litery t w równaniu (5);
- (6) zdarzają się błędy stylistyczne, np. na str. 74 „Na wykresach widoczne jest zgrupowanie punktów, w którym większość stanowią wycieki cieczy z uszczelnienia wałów pomp.”;
- (7) dużo błędów interpunkcyjnych.

Ocena oryginalności rozwiązania problemu naukowego

Oryginalnym rozwiązaniem było opracowanie kompletnego modelu PSA po raz pierwszy dla reaktora jądrowego badawczego MARIA pracującego w Polsce. Rozwiązanie to może stanowić punkt odniesienia dla przyszłych projektów budowy reaktorów energetycznych, jak również badawczych. Wyniki uzyskane w tej rozprawie stanowią ważną wskazówkę dla specjalistów zajmujących się analizami probabilistycznymi, które wymagają baz danych niezawodnościowych odpowiednich dla procesu klasyfikacji bezpieczeństwa SEKW reaktorów badawczych.

Ocena ogólnej wiedzy kandydata z dyscypliny oraz umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

Z przedłożonej do oceny rozprawy doktorskiej wynika, że badania zostały przeprowadzone starannie, kompleksowo i systematycznie. Przeprowadzenie analiz i symulacji prawdopodobieństwa dotyczących bezpieczeństwa reaktora jądrowego wymagało znajomości fizyki, matematyki i informatyki, a te są podstawą wielu innych dyscyplin w naukach inżyniersko-technicznych, w tym także Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka. Uzyskane wnioski znajdują pełne potwierdzenie w wynikach przeprowadzonych analiz, a postawiony cel pracy został osiągnięty. Cytowane w dysertacji publikacje współautorskie doktoranta opublikowane w *Nuclear Engineering and Technology* w 2023 i 2025 r. stanowią podstawę rozprawy i świadczą o wysokim poziomie naukowym prowadzonych badań. Na podstawie ocenianej rozprawy doktorskiej mogę stwierdzić, że poziom wiedzy ogólnej Jacka Kałowskiego jest wysoki, a doświadczenie zdobyte przez lata w zespole pracowników NCBJ oraz nad rozprawą pozwoli mu na samodzielne prowadzenie dalszej pracy naukowej.

Podsumowanie

Pomimo drobnych niedoskonałości, głównie o charakterze redakcyjnym, rozprawę doktorską Jacka Kałowskiego, ze względu na aktualność, oryginalność i wagę badań, aspekt aplikacyjny w energetyce jądrowej oraz uzyskane interesujące wyniki, oceniam pozytywnie, stwierdzam, że spełnia warunki określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2024r. poz. 1571) i wnioskuję o dopuszczenie doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Lublin, 29.09.2025

Elżbieta Jartych

