

Poznań 14.08.2025

Dr hab. inż. Bartosz Ceran, prof. uczelni
Instytut Elektroenergetyki
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Politechnika Poznańska
e-mail: bartosz.ceran@put.poznan.pl

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jacka Kałowskiego

pt. „Zastosowanie metod probabilistycznych w klasyfikacji systemów, elementów konstrukcji i wyposażenia reaktora badawczego MARIA”

Recenzję wykonano na wniosek Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej nr 132/III/2025 z dnia 01.07.2025 r.

Przedstawiona w recenzji ocena rozprawy doktorskiej ma odpowiedzieć na pytania czy i w jakim stopniu przedstawiona rozprawa spełnia wymagania określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2024 poz. 1571).

1. Przedmiot rozprawy

Celem rozprawy doktorskiej było opracowanie procedury klasyfikacji bezpieczeństwa systemów, elementów konstrukcji i wyposażenia (SEKW) reaktora badawczego, uwzględniającej wyniki Probabilistycznej Analizy Bezpieczeństwa (PSA) reaktora MARIA, które stanowią punkt odniesienia dla przyszłych projektów budowy reaktorów jądrowych w Polsce, zarówno badawczych jak i energetycznych.

Rozprawa przedstawia:

- aktualny stan wiedzy dotyczący zagadnień bezpieczeństwa jądrowego,
- opis opracowanej procedury klasyfikacji systemów, elementów konstrukcji i wyposażeni SEKW z umiejscowieniem analiz probabilistycznych,
- opis modeli Probabilistycznych Analiz Bezpieczeństwa (PSA) dla reaktora MARIA,
- porównanie bazy danych historycznych reaktora MARIA z bazami danych Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (MAEA) i US NRC (ang. United States Nuclear Regulatory Commission),
- opis metod analiz danych historycznych,
- opis metody integracji niejednorodnych danych niezawodnościowych.

POLITECHNIKA WARSZAWSKA
Rada Naukowa Dyscypliny
INŻYNIERIA ŚRODOWISKA,
GÓRNICTWO I ENERGETYKA

Wpłynęło dn. 19.08.2025



2. Przegląd treści rozprawy

Rozprawa doktorska składa się z 96 stron. Zawiera 62 pozycje literaturowe. Praca jest podzielona na 6 rozdziałów.

W rozdziale 1 autor przedstawia krótki opis awarii elektrowni jądrowych w Three Mile Island, Czarnobylu oraz Fukushima. Następnie autor przedstawia aktualny stan reaktorów badawczych wg danych Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (MAEA) i zaznacza, że ze względu na swoją specyfikę, stanowią one szczególne wyzwanie dla projektantów oraz operatorów. Autor przedstawia charakterystykę reaktora badawczego MARIA oraz wymienia szereg wyzwań, jakie należało rozwiązać aby przeprowadzić procedurę klasyfikacji bezpieczeństwa.

Rozdział 2 zawiera analizę tytułu rozprawy doktorskiej, zdefiniowany problem naukowy, hipotezę oraz cele pracy.

Rozdział 3 zawiera definicję pojęcia „bezpieczeństwo jądrowe”, opisuje zasady bezpieczeństwa jądrowego ze szczególnym opisem zasady „obrony w głąb”. W dalszej części rozdziału autor opisuje proces klasyfikacji bezpieczeństwa Systemów, Elementów konstrukcji i Wyposażenia (SEKW) oraz opisuje metodykę Probabilistycznej Analizy Bezpieczeństwa (PSA)

W rozdziale 4 autor przedstawia opracowaną procedurę klasyfikacji Systemów, Elementów konstrukcji i Wyposażenia (SEKW) reaktora badawczego. Procedura jest rozszerzona w stosunku do wymogów Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej MAEA o opracowany przez autora dodatkowy czynnik modyfikujący kategorię funkcji bezpieczeństwa, polegający na zsumowaniu częstości wymogu użycia funkcji bezpieczeństwa dla wszystkich Przewidywanych Zdarzeń Inicjujących (PZI), w których jest aktywowana, przez co dokładniej uwzględnione zostaje ryzyko utraty funkcji stosowanych w wielu sekwencjach awaryjnych.

Rozdział 5 przedstawia problematykę modelowania probabilistycznego. Autor opisuje rozwój modeli PSA reaktora MARIA. Autor przeprowadza porównanie bazy danych historycznych reaktora MARIA z bazami danych MAEA oraz US NRC na podstawie analiz pracy pomp głównych reaktora, wymienników ciepła układów chłodzenia kanałów paliwowych oraz wentylatorów chłodni wentylatorowych. W dalszej części rozdziału autor przedstawia przykłady zastosowania zaawansowanych metod analizy danych historycznych tj. wnioskowanie bayesowskie oparte o rozkład Gamma oraz model Crow-AMSAA. W ostatniej części rozdziału autor opisuje algorytm integracji danych wejściowych do analiz PSA nowych obiektów jądrowych, przy użyciu metody integracji danych niezawodnościowych.

Rozdział 6 stanowi podsumowanie pracy.



Podział rozprawy na poszczególne rozdziały jest poprawny. W kilku miejscach autor rezygnuje z opisu danego zagadnienia powołując się na współautorką publikację. W mojej ocenie utrudnia to odbiór monografii czytelnikowi, ponieważ należało przerwać lekturę i przeczytać wskazaną publikację.

Przykłady:

Str. 32. „Obszerny przegląd literatury na temat procesu klasyfikacji bezpieczeństwa dokonany został w publikacji Autora [13]”

Str. 45. „Autor w swojej publikacji [13] proponuje dodatkowy czynnik modyfikujący kategorię dla funkcji bezpieczeństwa w reaktorach badawczych.”

Str. 49. „Autor w swojej publikacji na temat procesu klasyfikacji [13] przedstawia wybrane wyniki procesu klasyfikacji bezpieczeństwa reaktora MARIA.”

Z kolei na stronie 55 autor pisze:

„Porównanie baz danych MAEA i US NRC do bazy danych historycznych reaktora MARIA, omawianej w poniższych rozdziałach, opisano w niepublikowanej jeszcze pracy Autora [60].”

Jest to niezgodne ze stanem faktycznym, ponieważ manuskrypt [60], o którym autor wspomina jest opublikowany z datą - czerwiec 2025.

Nazwy rozdziałów 5.2.5., 5.2.6. i 5.2.7 tj. „Analiza pomp głównych”, „Analiza wymienników ciepła” oraz „Analiza wentylatorów” są, według mnie, zbyt ogólne.

3. Główne osiągnięcie doktoranta

W rozdziale drugim autor zawarł hipotezę rozprawy. Zdaniem autora, wyniki analiz probabilistycznych mają wpływ o charakterze uzupełniającym i pomocniczym na wynik klasyfikacji bezpieczeństwa wg opracowanej procedury.

W celu udowodnienia postawionej hipotezy autor zrealizował następujące cele badawcze:

- opracował procedury klasyfikacji bezpieczeństwa Systemów, Elementów konstrukcji i Wyposażenia (SEKW) reaktora badawczego,
- określił wartości graniczne skali prawdopodobieństwa stosowanej w procedurze klasyfikacji SEKW,
- dokonał oceny wpływu Probabilistycznej Analizy Bezpieczeństwa (PSA) na wyniki klasyfikacji bezpieczeństwa Systemów, Elementów konstrukcji i Wyposażenia SEKW reaktora badawczego,
- sformułował rekomendacje na temat wyboru bazy danych niezawodnościowych odpowiedniej dla procesu klasyfikacji bezpieczeństwa Systemów, Elementów konstrukcji i Wyposażenia SEKW reaktora badawczego.

Do celów modelowania autor wykorzystał m.in. oprogramowanie Sapphire 8 oraz Weibull++. Zastosowane metody matematyczne należy zakwalifikować do grupy

zaawansowanych (np. opisany w „załączniku A” algorytm integracji danych z wykorzystaniem próbkowania Monte Carlo).

Mając na uwadze powyższe, wysoko oceniam **główne osiągnięcie naukowe doktoranta**.

4. Uwagi szczegółowe i dyskusyjne

a) Str. 11.

„W dodatku jego wykorzystanie do **produkcji energii** nie pociąga za sobą zanieczyszczenia atmosfery.”

Autor zastosował skrót myślowy. Nie produkujemy energii samej w sobie, ponieważ jest to niezgodne z zasadą zachowania energii. Możemy przekształcać ją z jednej formy w drugą. Przykładowo w energetyce zawodowej produkujemy **energię elektryczną**, która jest rozumiana, jako efekt poszczególnych przemian energetycznych.

Proszę o komentarz.

b) Str. 34.

„poziom 2 tj. analiza dróg **przedstawiania się uwolnień z uszkodzonego paliwa** do środowiska”

Co autor rozumiem pod pojęciem „**uwolnień z uszkodzonego paliwa**”.
Czy samo słowo „**uwolnień**” jest skrótem myślowym?

Rozumiem pojęcia „uwolnień substancji radioaktywnych” lub „uwolnień materiałów radioaktywnych”.

Proszę o komentarz.

c) Str. 36.

„W pkt. 5.2.9 Autor rozważa użycie innych od wykładniczego modeli częstości awarii urządzeń reaktora, w szczególności rodziny modeli opartych na niejednorodnym procesie Poissona (NHPP – ang. Non-homogeneous Poisson Process) np. modelu Crow-AMSAA, opublikowanego w 1974r. [54] **lub modelu GRP (ang. General Renewal Process) [55].**”

W której części rozdziału 5.2.9 Autor rozważa użycie modelu GRP (ang. **General Renewal Process**)?

Proszę o komentarz.



d) Str. 38.

„Oslanianie przed promieniowaniem jonizującym, zatrzymywanie substancji promieniotwórczych, ograniczanie i kontrolowanie ich uwolnień do środowiska, a także **ograniczanie uwolnień awaryjnych**.”

Co autor rozumie pod pojęciem „**uwolnień awaryjnych**”?

Proszę o komentarz.

e) Str. 86. „Autor wykorzystał wyniki analiz danych historycznych reaktora MARIA aby wskazać **optymalną metodę doboru danych wejściowych** do modeli PSA reaktora badawczego.”

Na jakiej podstawie autor stwierdza, że metoda doboru danych wejściowych do modeli PSA reaktora badawczego jest optymalna? Jakie mierzalne wielkości lub inne czynniki pozwalają autorowi na postawienie tego twierdzenia?

Proszę o komentarz.

f) Uwaga dyskusyjna

Autor w pracy stwierdza, że jego metoda stanowi punkt odniesienia dla przyszłych projektów budowy reaktorów jądrowych w Polsce, **zarówno badawczych jak i energetycznych**.

W przypadku reaktora MARIA autor prowadził analizy dotyczące awarii pomp głównych, wymienników ciepła oraz wentylatorów chłodni wentylatorowych.

Jakie urządzenia, zdaniem autora, będzie należało poddać podobnym analizom w przypadku reaktora energetycznego (elektrowni jądrowej)?

Proszę o komentarz.

Powyższe uwagi mają charakter dyskusyjny i nie umniejszają wartości merytorycznej rozprawy.

5. Uwagi redakcyjne

Uwagi redakcyjne dotyczące błędów gramatycznych oraz edytorskich.

Str. 11.

Jest: „Co istotne, **Uran** jest obecny w płaszczu ziemskim w ilościach wystarczających do zaspokojenia rosnących potrzeb ludzkości.”

Powinno być: „Co istotne, **uran** jest obecny w płaszczu ziemskim w ilościach wystarczających do zaspokojenia rosnących potrzeb ludzkości.”



Str. 15.

Jest: „Reaktor MARIA, mimo że nie jest nowym obiektem, **miała stać się** pierwszym reaktorem w Polsce, dla którego wdrożono procedurę klasyfikacji bezpieczeństwa”.

Imię własne reaktora nie wpływa na odmianę rodzaju.

Powinno być: „Reaktor MARIA, mimo że nie jest nowym obiektem, **miał stać się** pierwszym reaktorem w Polsce, dla którego wdrożono procedurę klasyfikacji bezpieczeństwa”.

Str. 16.

Jest: „Jego rdzeń ma 30 MW maksymalnej mocy cieplnej”

Powinno być: „Maksymalna moc cieplna reaktora wynosi 30 MW”.

Str. 17.

Jest: „*Rysunek 1. Reaktor MARIA w Świerku.*”

Zdjęcie nie przedstawia reaktora MARIA.

Powinno być: „*Rysunek 1. Widok Narodowego Centrum Badań Jądrowych z lotu ptaka.*”

Str. 21.

Jest: „Podczas pracy reaktora cyrkulację zapewniają dwie pompy główne (**dwie dodatkowe pompy w rezerwie**).”

Powinno być: „Podczas pracy reaktora cyrkulację zapewniają dwie pompy główne (**dwie dodatkowe pompy stoją w rezerwie**)” lub „... **dwie dodatkowe pompy stanowią rezerwę**”

Str. 26.

Jest: „W **rozdziale 0** Autor prezentuje procedurę klasyfikacji bezpieczeństwa opracowaną na potrzeby reaktorów badawczych, która uwzględnia wyniki analiz probabilistycznych.”

Powinno być: „W **rozdziale 4** Autor prezentuje procedurę klasyfikacji bezpieczeństwa opracowaną na potrzeby reaktorów badawczych, która uwzględnia wyniki analiz probabilistycznych.”

Str. 82.

Jest: „W **Tabeli Tabela 9** podano wartości częstości wycieków użyte do aktualizacji modelu PSA omawianego zdarzenia inicjującego.”

Powinno być: W **Tabeli 9** podano wartości częstości wycieków użyte do aktualizacji modelu PSA omawianego zdarzenia inicjującego.”

Str 86.

Jest: „Jako alternatywę Autor proponuje **użycie algorytmu** scalającego dane z wielu źródeł, **którego użycie** zaprezentowano na przykładzie urządzeń reaktora MARIA.”

Powinno być: Jako alternatywę Autor proponuje **wykorzystanie algorytmu** scalającego dane z wielu źródeł, **którego użycie** zaprezentowano na przykładzie urządzeń reaktora MARIA.

Uwagi edycyjne:

- Wykresy na rysunkach 11, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 25 powinny zawierać legendy.
- W tekście jednoliterowe spójniki i przyimki takie jak "a", "o", "i", "u", "w", "z" itp. nie powinny zostawać na końcu wiersza.
- Str. 31. „Zadowolający poziom obrony w głąb osiąga się poprzez kombinację działań:
- ...
- ... itd.”

Po dwukropku poprzedzającym wyliczenie, poszczególne elementy wyliczenia oddziela się przecinkami, a całość wyliczenia zamyka się kropką.

Liczba błędów gramatycznych jest stosunkowo niewielka i należy podkreślić, że od strony językowej oraz edycyjnej **rozprawa jest przygotowana bardzo solidnie.**

Wyżej wymienione błędy gramatyczne, nie wpływają na jakość wykonanych badań i analiz. W związku z powyższym, według mnie, nie obniżają one wartości głównego osiągnięcia rozprawy doktorskiej.

6. Podsumowanie

Uważam, że założony przez Doktoranta cel rozprawy doktorskiej został osiągnięty, a w trakcie realizacji pracy Pan mgr inż. Jacek Kałowski wykazał się znaczną wiedzą, zarówno teoretyczną jak i praktyczną, w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Doktorant wykazał się także umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, planowania badań symulacyjnych, budowania modeli matematycznych, analizy i interpretacji otrzymanych wyników oraz zdolnością wnioskowania.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska pt. „Zastosowanie metod probabilistycznych w klasyfikacji systemów, elementów konstrukcji i wyposażenia reaktora badawczego MARIA” autorstwa Pana mgr inż. Jacka Kałowskiego spełnia określone wymagania, o których mowa w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2024 poz. 1571).

W związku z powyższym **wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżyniera Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.**