

## **Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Alekseja Kaszko**

### **„Zastosowanie dynamicznych sieci bayesowskich w analizie ryzyka instalacji jądrowych”**

**Promotor rozprawy prof. dr hab. inż. Krzysztof Badyda**

#### **1. Wprowadzenie**

Recenzja została przygotowana w oparciu o Uchwałę Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka z dnia 12 kwietnia 2022, pismo znak RND-IŚGiE/44/2022 w sprawie powierzenia mi opracowania recenzji przedmiotowej rozprawy.

Recenzja przygotowywana będzie w oparciu o następujące akty prawne:

- Ustawa z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 poz. 1789 z późniejszymi zmianami),
- Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2018 r. poz. 261),
- Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018r., poz. 1668 z późniejszymi zmianami).

Recenzja opracowana została na podstawie przekazanej wraz z w/w pismem rozprawy doktorskiej stanowiącej opracowanie zwarte.

#### **2. Ogólna ocena rozprawy wraz z uwagami krytycznymi**

##### **2.1 Zakres rozprawy**

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr inż. Alekseja Kaszko poświęcona jest problematyce analizy bezpieczeństwa obiektów jądrowych w kontekście zastosowania probabilistycznej analizy bezpieczeństwa podczas projektowania, eksploatacji i modernizacji instalacji jądrowych.

Rozprawa została zawarta na 130 stronach tekstu zasadniczego. Pracę podzielono na pięć numerowanych rozdziałów, Bibliografię zawierającą spis literatury obejmujący 100 pozycji, z czego zdecydowana większość to pozycje anglojęzyczne. Spora część cytowanych prac pochodzi z

ostatnich lat, co świadczy o bardzo dobrym rozpoznaniu przez Doktoranta dorobku naukowego w zakresie merytorycznym przedmiotu rozprawy. W wykazie doktorant umieścił cztery publikacje własnego autorstwa, na które powołał się w pracy.

Praca zawiera również cztery obszerne załączniki, w którym Autor w sposób szczegółowy przedstawił opracowany kod źródłowy sieci bayesowskiej (Załącznik I), listę ścieżek awarii SBO (załącznik II) i SCD (załącznik III) oraz opis oprogramowania SAPHIR (załącznik IV).

We **wprowadzeniu** Autor określa tematykę pracy w kontekście problemów związanych z zapewnieniem bezpieczeństwa obiektom jądrowym. Zdefiniowane zostały kategorie bezpieczeństwa jądrowego oraz określone rodzaje przeprowadzanych analiz bezpieczeństwa jako analizy probabilistyczne i analizy deterministyczne. Autor przedstawia ryzyko związane z energią jądrową i związane z nim strefy zagrożenia radiologicznego. Opisana jest klasyfikacja skali INES. Na bazie tego Autor przedstawia problematykę badawczą pracy, tezy i zadania badawcze.

W rozdziale **drugim** przedstawione zostało zagadnienie probabilistycznych analiz bezpieczeństwa. Autor opisuje tu metodę drzew błędów i drzew zdarzeń oraz wprowadza do metody sieci bayesowskich. Przedstawione zostały przykłady struktury drzewa błędów z wykorzystaniem bramek logicznych oraz ich implementacja w programie SAPHIRE. Na tej podstawie przeanalizowano przykładowe awarie, w tym szczególną uwagę zwrócono na tzw. awarie o wspólnej przyczynie. Na bazie twierdzenia Bayesa Autor dokonuje wprowadzenia do sieci bayesowskich oraz podaje ich przykładowe zastosowania – do szacowania parametrów niezawodnościowych instalacji jądrowych czy do modelowania ryzyka operacyjnego. Rozdział ten zawiera również krótkie wprowadzenie do tzw. funkcji wrażliwości.

Rozdział **trzeci** poświęcony jest zastosowaniom dynamicznych sieci bayesowskich w wyznaczaniu częstości zdarzeń inicjujących. Autor przedstawia dziewięć metod kwantyfikacji zdarzeń inicjujących w oparciu o dokumenty Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej. Przeanalizowany został wpływ starzenia/degradacji komponentów/elementów obiektu jądrowego na częstość zdarzeń inicjujących. Autor podaje wybrane metody modelowania starzenia na bazie literatury, przy czym zaznacza, że w pracy będzie używał tzw. starzenia liniowego. W dalszym ciągu rozdziału opisana została metodologia oraz struktura ideowej sieci bayesowskiej do wyznaczania zdarzeń inicjujących. Opracowana struktura uwzględnia trzy tryby awarii zewnętrznego zasilania: podstawowe, sejsmiczne i powodziowe. Autor opisuje źródła danych wejściowych do stosowanych modeli na przypadku przypominającym awarię w elektrowni Fukushima. dalszej części rozdziału przechodzi do opisu zastosowania dynamicznych sieci bayesowskich do wyznaczania zdarzeń inicjujących związanych z zagrożeniami zewnętrznymi. Przedstawia wyniki obliczeń w których zastosowano probabilistyczny model sejsmiczny opisany histogramem magnitudy i probabilistyczny model tsunami opisany histogramem poziomu wody. Otrzymane wyniki porównane są do wyników modelu referencyjnego. Uwzględnione zostały następujące modele Autora: a) uwzględniający trzęsienia ziemi i tsunami, b) starzenie wszystkich komponentów oraz całkowitą poprawę niezawodności komponentów podstawowych po konserwacjach, c) jak w b), ale z częściową poprawą niezawodności komponentów

Rozdział **czwarty** omawia analizę wybranej sekwencji awaryjnej, metodę uwzględniania wielu zagrożeń zewnętrznych oraz zbudowane dla wybranej sekwencji awaryjnej modele drzew błędów i drzew zdarzeń. Jako wybraną sekwencję awaryjną przedstawiono utratę zewnętrznego zasilania elektrycznego (tzw. LOOP). Analiza oparta jest o metodologię uwzględniania wielu czynników

zewnętrznych (tu sejsmiczne i powodziowe). Utworzone zostało drzewo błędów utraty awaryjnego zasilania (cztery generatory Diesla), utraty systemu chłodzenia wtórnego. W dalszej części rozdziału wybrana została sekwencja awaryjna i dla niej stworzone zostało drzewo zdarzeń. Uwzględniony został wpływ na drzewa zdarzeń tzw. wysokości zalewania (określającej kiedy dany sprzęt bezpieczeństwa zostanie zalany). Autor opisuje wrażliwość sejsmiczną komponentów instalacji. Autor analizuje również drzewo zdarzeń dla wielu zagrożeń i obliczanie prawdopodobieństwa wielu zagrożeń.

Bardzo krótki rozdział **piąty** stanowi podsumowanie całości pracy przedstawiający wykonane prace oraz główne wnioski wysunięte na podstawie analizy wyników tych badań. Zgodnie z Autorem, zaproponowane przez niego dwie metody analizy bezpieczeństwa obiektów jądrowych, poprzez uwzględnienie wiele zagrożeń zewnętrznych zarówno w zdarzeniach inicjujących, jak i w bezpośredniej analizie, umożliwia to analizę szerszego spektrum zagrożeń i w sposób dokładniejszy. Prowadzi to do rzetelniejszej oceny ryzyka awarii.

## 2.2 Ocena prawidłowości wyboru tematu

Problematyka poruszona w pracy, tj. probabilistyczne analizy bezpieczeństwa obiektów jądrowych jest istotna z wielu punktów widzenia:

- Zwiększenie bezpieczeństwa jądrowego, w tym zbadania czy istniejący lub nowo wznoszony obiekt spełnia wymogi bezpieczeństwa,
- Kwestie wymagań przez regulatorów jądrowych
- Potencjalne ryzyko dla społeczeństwa oraz otoczenia i zwiększenia akceptacji społecznej dla rozwoju energetyki jądrowej
- Zwiększone zainteresowanie potencjalnym wpływem wielu jednocześnie występujących zagrożeń zewnętrznych na bezpieczeństwo obiektów jądrowych, m.in. skutek awarii w Fukushima

W związku z powyższym istotne jest opracowanie odpowiednich metod pozwalających na dokładniejsze i bardziej kompleksowe analizy bezpieczeństwa obiektów jądrowych, w tym uwzględniania wielu zagrożeń i dokładniejszego szacowania awarii poszczególnych komponentów jak również zmienność tych czynników w czasie związana ze starzeniem materiałów/komponentów czy ich modernizacją.

Biorąc to pod uwagę, istotnego znaczenia nabiera całokształt prac zmierzających do rozwoju nowych metod obliczeniowych, stosowanie obliczeń dynamicznych i analiza jak największej liczby potencjalnych zagrożeń. Z tego powodu wszelkie prace, łączące aspekty implementacji metod szacowania prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzeń inicjujących, jak i uwzględniania wielu zagrożeń uznaję za bardzo wartościowe.

**Mając na uwadze wyżej przytoczone argumenty, uznaję że temat rozprawy doktorskiej mgr inż. Alekseja Kaszko został wybrany prawidłowo, jako bardzo aktualny, a całość podjętej pracy wynikała nie tylko z problematyki naukowo-badawczej, ale przede wszystkim nakierowana była na osiągnięcie potencjalnych efektów praktycznych z obszaru bezpieczeństwa obiektów jądrowych.**

## 3. Analiza treści rozprawy wraz z uwagami krytycznymi

W niniejszym rozdziale recenzji skupiam się na zagadnieniach naukowych samodzielnie rozwiązanych przez doktoranta, krytyce prawidłowości rozważań zawartych w pracy, pozyskanych wynikach i wniosków przedstawionych przez Doktoranta. Przedstawię pewne uwagi dyskusyjne i wątpliwości,

które nasunęły mi się podczas lektury rozprawy. Przedstawię również uwagi na temat oryginalności rozprawy jak i wskaże główne walory rozprawy.

### **3.1 Zagadnienia naukowe i utylitarne rozwiązane samodzielnie przez Doktoranta**

Po przeprowadzeniu analizy treści rozprawy stwierdzam, że postawiony przez Doktoranta cel pracy został zrealizowany.

Do najważniejszych zagadnień naukowych rozwiązanych samodzielnie przez Doktoranta zaliczam:

- krytyczna analiza literatury,
- opracowanie struktury sieci bayesowskiej uwzględniającej trzy tryby awarii zewnętrznego zasilania (podstawowe, sejsmiczne, powodziowe), w tym modyfikację pozwalającą uzyskać sieć dynamiczną,
- implementacja dynamicznej sieci bayesowskiej i opracowanie odpowiedniego oprogramowania w Matlabie,
- przeprowadzenie obliczeń i analiza otrzymanych wyników, w tym porównanie z wynikami modelu referencyjnego bazującego na uproszczonej metodologii i zawężonym zakresie danych wejściowych.

Za najistotniejsze elementy pracy w aspekcie praktycznym uważam:

- opracowanie oprogramowania o zakładanej funkcjonalności,
- przeprowadzenie serii analiz obliczeniowych,
- opracowanie zestawu zaleceń do analizy szerszego niż do tej pory zakresu możliwych zagrożeń bezpieczeństwa.

### **3.2 Uwagi krytyczne do pracy**

Treść rozprawy dowodzi, że Doktorant bardzo dobrze orientuje się w przedstawionej problematyce. Nie stwierdzam w tym zakresie uchybień i oceniam znajomość przedmiotu zagadnienia przez Doktoranta, w tym jego przygotowanie zawodowe i naukowe – bardzo pozytywnie.

Poniżej zamieszczam uwagi, które uznaję za drobne lub posiadające charakter porządkowy, niektóre z nich jednakże wymagają pewnej dyskusji naukowej podczas publicznej obrony pracy. Uwagi do pracy można podzielić na trzy kategorie:

#### Uwagi formalne związane ze strukturą pracy, tj.

- brak jest formalnego odniesienia się w podsumowaniu do postawionej tezy pracy, czy faktycznie udało się ją wykazać/obalić, w jaki sposób itp.,
- Sformułowanie „Badanie powinno wykazać ....”, (rozdz. 1.4.2) jest niezbyt zręczne,
- brak wyraźnie postawionego celu pracy i danie odpowiedzi w Podsumowaniu, czy faktycznie postawiony cel pracy został osiągnięty (w pracy jest to pokazane pośrednio).

#### Uwagi związane z redakcją pracy i sposobem prezentacji materiału

- brak jest dokładnego porównania modelu referencyjnego i modeli rozwijanych przez Autora, przydałoby się zestawienie cech np. w tabeli,

- Rozdział 5 ‘Wnioski i podsumowanie’ jest zbyt skrótowy i dość ogólny,
- wskazane byłoby umieszczenie spisu symboli.

Uwagi merytoryczne:

- Cele bezpieczeństwa jądrowego są przedstawione bardzo ogólnie (typu chronienie, zapobieganie, skuteczna ochrona itp.). Czy jest to może zdefiniowane bardziej ilościowo? W tym kontekście trudno jest połączyć wymagania bezpieczeństwa jądrowego, postawionej tezy pracy i otrzymanych wyników, ze względu właśnie na to, że bezpieczeństwo jądrowe nie jest ściśle określone. Tyczy się to również rozdziału 1.2, w tym skali zdarzeń i poziomów skali INES,
- Brak jest definicji czy pokazania jak przyjmuje się pewne wielkości, np. CDF, czy te wielkości są w jakiś sposób wyliczane, co oznacza sformułowanie typu „ogólnie akceptowane CDF ...”, czy to nie jest tak, że te wartości nie mają zbyt dużego uzasadnienia?,
- Rozważania odnośnie śmiertelności po awarii w Czarnobylu – dlaczego są tak duże różnice w przytoczonych danych? Czy zatem jeśli są duże rozbieżności w szacowaniu skutków awarii, to czy to się nie odbija na analizach ryzyka (poszczególnych ryzyk), które przecież muszą brać pod uwagę skutek awarii,
- Wydaje się bardzo problematyczna walidacja metod bazujących na różnych obliczeniach (w tym probabilistycznych), czy zatem (pomijając naukowe metody) mamy tu do czynienia z nauką, w sensie walidacji poprzez porównywanie z rzeczywistością?
- W związku z poprzednim – czy zatem sensowne jest budowanie nowych metod obliczeniowych, uwzględniających mniej lub bardziej subtelne efekty, jeżeli dane wejściowe, np. prawdopodobieństwa poszczególnych awarii, czy zdarzeń inicjujących są szacowane w sposób bardzo zgrubny i w zasadzie nie podlegają weryfikacji?,
- Sformułowanie strona 26: „Awaria w ...[31]” jest niejasne,
- Tabela 2.2 nieczytelna, kłopoty z interpretacją informacji
- Dlaczego do analiz wybrano program SAPHIRE – w czym ten program jest lepszy, jaka jest jego przewaga nad innym oprogramowaniem itp.?,
- Str. 31: „W zdarzeniach podstawowych ....rozkład oraz parametry rozkładu niepewności.” – czy można podać jakieś przykłady tych rozkładów?,
- Str. 31: co to jest praca na żądanie lub praca na godzinę?,
- W pracy zamieszczona jest duża liczba zrzutów ekranu z oprogramowania, jest to zdaniem recenzenta dość problematyczne, po prostu nie wszystko widać i nie za bardzo jest to jasne,
- Tabela 2.4 – niezbyt dobra konstrukcja, m.in. wielkość  $Q_t$  jest definiowana trzykrotnie, parametr  $\beta$  ma inną definicję w zależności od modelu, natomiast szereg wielkości jest zupełnie niezdefiniowanych:  $m$ ,  $k$ ,  $Q_k^{(m)}$ ,  $p_i$ , ( $m$  i  $k$ ) są objaśnione dopiero w ostatnim wierszu,

Ponadto dla „wielokrotnej greckiej litery” nie są jasne przypadki dla  $k=1$  i  $k=m$  (w odróżnieniu od modelu „współczynnik beta”),

- Tabela 2.5 – o jaki wskaźnik chodzi? Czy symbole są oznaczone wg tabeli 2.4 i czy to jest rozwinięcie tabeli 2.4?,
- Ogólne – może przydałoby się dać bardziej fizyczne przyczyny awarii z powodu CCF, (strona 34 u dołu)?,
- Odnośnie awarii EDG (str. 35), czy te prawdopodobieństwa są dla konkretnego typu generatora Diesla, czy po prostu przyjmuje się podane wartości niezależnie od typu, wielkości itp.?,
- Co to jest  $Q_{tot}$  (oznaczenie), str. 35?,
- Dlaczego prawdopodobieństwo awarii przy pracy  $> 1h$  jest mniejsze niż przy pracy  $< 1h$  (str. 35)?,
- Symbol  $CCF_{MGL}$  nie jest zdefiniowany (str. 35),
- Brak jest opisu rysunku 2.6, nie wiadomo co tak naprawdę tu widzimy,
- Aktualne sposoby wyznaczania częstości zdarzeń inicjujących przedstawione są bardzo ogólnie, sugeruje to stosowanie danych obarczonych dużymi niepewnościami,
- W pracy Autor stosuje tzw. liniowe starzenie (str. 46), dlaczego zastosowano to podejście, a nie np. omawiane przez Autora inne metody modelowania starzenia?,
- Nie do końca jest jasny opis modelu tsunami przedstawiony na stronach 49-50. Proszę o wyjaśnienie co to znaczy „... Model tsunami opracowany na podstawie rozkładu empirycznego, ...” – o jaki rozkład empiryczny chodzi? Może coś więcej na ten temat. Nie za bardzo jest jasne w jakim przypadku ściana „anty-tsunami” może ulec awarii i jak to zostało uwzględnione. Co oznaczają symbole użyte w tabeli 3.3 i gdzie ta informacja została wykorzystana?
- Czy Autor dokonał analizy zbieżności wyników dla dynamicznej i statycznej sieci bayesowskiej, tzn. czy jest zbieżność wyników dla współczynników przy wielkościach zależnych od czasu dążących do zera? Jak bardzo dynamika sieci ma wpływ na wyniki końcowe?,
- Str. 54, nie jest jasne sformułowanie „W związku z zastosowaniem ... o wartości  $1g$ ”,
- Co to jest współczynnik błędu w tabeli 3.4?,
- Str. 56, jakie znaczenie ma, że zastosowano „milion losowań”? Czy to poprawiało zbieżność wyników czy inne wskaźniki obliczeniowe? W pracy brak dyskusji o wyborze liczby losowań,
- Nie bardzo rozumiem związek pomiędzy tabelami 3.4 i 3.5. Tabela 3.4 zawiera dane do modelu referencyjnego (jak sugeruje jej podpis), natomiast wyniki z tego modelu są w 3.5.

Zatem niejasne jest sformułowanie „ ... w tabeli 3.5 są uzyskane probabilistycznie, w odróżnieniu od wyników Tabeli 3.4, ...”,

- Jak bardzo będą się różnić wyniki sieci dynamicznej dla kolejnych lat? Czy rozrzut będzie duży względem wyników modelu statycznego?,
- Niejasne sformułowanie na str. 58: „.....nie opisuje utraty zasilania .....oraz tsunami.”,
- Str. 86, oznaczenia awaryjnych generatorów Diesla nie są wyjaśnione, brak też tych oznaczeń na rysunku 4.4. Czy istotne jest odróżnianie tych generatorów?,
- Str. 90, niejasne sformułowanie „Analiza niepewności ...awarii systemów SBO”,
- Tabela 4.8, przedstawiony jest bardzo szeroki zakres wysokości powodzi, co oznacza powódź 1 cm? Czy taka „powódź” była uwzględniana podczas analizy?

Podkreślić należy, że wskazane uwagi nie umniejszają znacząco wartości naukowej pracy. Przedstawiony cel pracy został osiągnięty, zakres pracy także umożliwił recenzentowi odpowiednie odniesienie się do postawionego problemu badawczego.

Praca jest dość starannie zredagowana, oprócz drobnych potknięć stylistycznych nie spotkałem w niej błędów ortograficznych ani tzw. literówek.

### **3.3 Oryginalność pracy i jej główne walory**

Doktorant zrealizował dość szeroki zakres prac symulacyjnych, bazujących na własnoręcznie opracowanych modelach, przygotowaniem danych wejściowych, opracowaniem schematów obliczeniowych wraz z implementacją w postaci odpowiedniego kodu.

Zakres zrealizowanych prac stanowi oryginalny dorobek Doktoranta a uzyskane wyniki dostarczają wniosków, które mogą być przydatne na etapie rozwoju systemów bezpieczeństwa obiektów jądrowych. - są zatem cenne nie tylko z naukowego, ale również z praktycznego punktu widzenia.

Uzyskany w trakcie realizacji pracy materiał jest wartościowy i z pewnością wart dalszej popularyzacji poprzez np. zaprezentowanie uzyskanych wyników na konferencjach naukowych czy w czasopiśmie. W tym kontekście wiele uwag krytycznych tyczy się poprawy jakości takiej prezentacji.

## **4. Wnioski końcowe**

Zdaniem recenzenta, przedstawiona do recenzji praca oraz dotychczasowy dorobek naukowy Autora w pełni spełniają wymagania stawiane do uzyskania tytułu doktora nauk technicznych określone w Art. 13.1 przywołanej w pkt. 1 Ustawy [3] warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim w Dyscyplinie Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka.

Praca poświęcona jest zagadnieniu w pełni aktualnemu, wpisując się w prowadzone w szeregu ośrodkach naukowych i przemysłowych badania związane ze stworzeniem odpowiednich metod analizy i poprawy bezpieczeństwa obiektów jądrowych. W pracy otrzymane zostały wartościowe wyniki, które już znajdują swoje zastosowanie w szeroko rozumianym przemyśle jądrowym.

**Reasumując, pomimo pewnych niedociągnięć redakcyjnych i uwag natury formalnej związanych ze strukturą pracy oraz zarzutów merytorycznych, jednak nie umniejszających istotnie wartości otrzymanych wyników, recenzent wnioskuje o dopuszczenie pracy Pana mgr Aleksieja Kaszko do publicznej obrony.**

