

Radom dnia 20.I.2025r.

Dr hab. inż. Andrzej Puchalski, prof. URad.  
Uniwersytet Radomski  
Wydział Mechaniczny  
Katedra Mechaniki Stosowanej i Mechatroniki

### Opinia

o rozprawie doktorskiej mgra inż. **Kamila Sternala**

pt. „Metodyka testowania sterowników systemów bateryjnych pojazdów wsparta modelem”

Promotor: dr hab. inż. **Marek Fidali**, prof. PŚ.

Podstawa prawna recenzji: Uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej z dnia 23 października 2024 roku.

Przewód doktorski w trybie „nowej” ustawy z dnia 20.07.2018r.

#### 1. Tematyka, tezy, cel i zakres rozprawy

Rozwój elektromobilności to ogromny krok naprzód, który niesie ze sobą wiele wyzwań i wymagań dla systemów wbudowanych w pojazdach, w szczególności w zakresie funkcji bezpieczeństwa systemów bateryjnych. Zastępowanie układów mechanicznych układami mechatronicznymi wymaga precyzyjnego przetwarzania danych w czasie rzeczywistym, spełniając rygorystyczne wymagania czasowe. Prognozy przewidują, że kod programów systemów wbudowanych w pojazdach autonomicznych osiągnie poziom miliarda linii. W pojazdach elektrycznych i hybrydowych kluczowym jest efektywne zarządzanie baterią, aby zapewnić jej długą żywotność i bezpieczeństwo. Zaawansowane systemy zarządzania baterią (BMS) monitorują stan naładowania, temperaturę oraz inne parametry, aby zoptymalizować wydajność zasilania w energię elektryczną. W kontekście funkcji bezpieczeństwa, jednym z kluczowych tematów jest określanie najgorszego czasu wykonania (WCET), w celu lepszego zarządzania zasobami, takimi jak procesor, pamięć i energia, przewidywania i zapobiegania potencjalnym opóźnieniom, projektowania systemów wydajnych, ale nie nadmiernie skomplikowanych.

Prowadzone przez autora badania mają na celu rozwinięcie metodyki testowania prototypów sterowników systemów bateryjnych z wykorzystaniem nowoczesnych metod uczenia maszynowego, co stanowi ważny krok w rozwoju inżynierii oprogramowania motoryzacyjnego.

Autor sformułował dwie tezy, będące podstawą do analizy i dyskusji w ramach prezentowanej rozprawy doktorskiej:

„1. Istnieje możliwość opracowania metodyki testowania prototypów sterowników systemów bateryjnych bazującej na metodach sztucznej inteligencji pozwalających na opracowanie modelu zależności czasowych uzależnionych od wzajemnych związków między sygnałami wejściowymi.

Biuro Dziekana

1

wpłynęło dnia 23.01.2025  
RDJMe/12/511/2025  
nr ..... zał. ....

2. Istnieje metoda sztucznej inteligencji pozwalająca na detekcję potencjalnych anomalii w kodzie oprogramowania sterowników systemów bateryjnych pojazdów na podstawie wzajemnych zależności między sygnałami wejściowymi i potencjalnymi ścieżkami wykonania kodu.”

Celem autora było stworzenie metodyki testowania sterowników systemów bateryjnych w pojazdach elektrycznych na etapie prototypowania. Dodatkowo, metodyka ta ma na celu prowadzenie kompleksowej analizy czasowej funkcji bezpieczeństwa i identyfikacji najdłuższych ścieżek wykonania kodu.

## **2. Charakterystyka rozprawy**

Recenzowana praca liczy 128 stron, składa się z 5 rozdziałów, zawiera spis rysunków i tablic oraz listę ważnych skrótów. Literatura obejmuje 86 pozycji, w większości z ostatniej dekady. Brak jest czterech powiązanych publikacji autora rozprawy, które znalazły się w osobnym wykazie. Spis literatury nie jest jednolicie sformatowany, w niektórych pozycjach brak istotnych informacji.

W rozdziale 1 naświetlono genezę oraz zidentyfikowano problem badawczy. Mimo ciągłych postępów w inżynierii oprogramowania i systemów wbudowanych wskazano lukę badawczą w metodach analizy czasów realizacji potencjalnych sekwencji kodu programu sterownika systemu wbudowanego w zależności od relacji między sygnałami wejściowymi. Sformułowano także tezy i cel pracy.

Rozdział 2 to obszerny, kilkudziesięciostronicowy opis przedmiotu badań, czyli pojazdu elektrycznego. W architekturze sprzętowej zilustrowanej na rysunku 2.1 wyróżniono układ napędowy, układ bateryjny oraz układy pomocnicze. Uproszczoną strukturę systemu wbudowanego pokazano na rysunku 2.2, a moduł układu bateryjnego na rysunku 2.3. Kryteria i cele bezpieczeństwa funkcjonalnego omówiono bazując na wymaganiach standardu ISO26262. Jako obiekt do badań został wybrany czujnik multimodalny specyfikowany jako ASIL D, co stanowi najwyższy poziom bezpieczeństwa w przemyśle samochodowym. Przykład podstawowej architektury oprogramowania przy realizacji funkcji o wysokim poziomie ASIL pokazano na rysunku 2.6. Przegląd funkcji czujnika obejmuje pomiary natężenia prądu, wysokich napięć, rezystancji izolacji, temperatury bocznika oraz bezpiecznik pirotechniczny. Na podstawie liczba funkcji logicznych, liczb wejść i wyjść, czas przetwarzania oraz poziomu ASIL (tabela 2.2) przyjęto, że bezpiecznik pirotechniczny stanowi idealny przypadek do testowania złożonych interakcji systemowych i zapewnia istotne dane na temat działania całego systemu bezpieczeństwa w realistycznych warunkach operacyjnych. Problemy rozwoju oprogramowania systemów wbudowanych wyjaśniono zgodnie z modelem ASPICE, który zapewnia kompleksowy przewodnik po procesach projektowania, implementacji i weryfikacji oprogramowania w branży motoryzacyjnej. Autor podkreślił konieczność ciągłej pracy nad doskonaleniem metod testowania i analizy systemów oprogramowania w branży motoryzacyjnej, wskazując na konieczność identyfikacji i rozwiązania problemów struktury kodu (rysunki 2.12, 2.13) i zależności czasowych (rysunki 2.14-2.16) dla poprawy bezpieczeństwa i niezawodności pojazdów. Szczegółowo omówiono metody statyczne, dynamiczne oraz hybrydowe, umożliwiające optymalizację czasu wykonania krytycznych funkcji oprogramowania, w tym estymacji najgorszego czasu wykonania (WCET).

Jako model wspierający metodykę testowania sterowników systemów bateryjnych pojazdów autor wybrał zaawansowany model generatywny (rysunek 2.18), który rozszerza klasyczny

autoenkoder wariacyjny (VAE) o dodatkowe informacje warunkowe. W praktyce oznacza to, że enkoder i dekodery nie tylko kodują i dekodują dane, ale także uwzględniają dodatkowe zmienne, które mogą wpływać na generowane wyniki. Dzięki warunkowaniu, CVAE pozwala na bardziej precyzyjne generowanie danych o określonych cechach. Model neuronowy zaprezentowano jedynie w postaci schematu blokowego.

W rozdziale 3 „Koncepcja metodyki” zaproponowano procedurę testowania układów bateryjnych pojazdów elektrycznych w odniesieniu do wymagań czasowych dotyczących funkcji bezpieczeństwa. Za główny tej procedury przyjęto sprawdzenie, czy funkcje bezpieczeństwa w sterownikach systemów bateryjnych spełniają rygorystyczne wymagania czasowe. Metodologia zakłada kompleksowe podejście do oceny czasowej funkcji bezpieczeństwa, uwzględniające zarówno aspekty teoretyczne, jak i praktyczne. Istotne jest uzyskanie pełnego pokrycia wszystkich możliwych ścieżek wykonania funkcji oraz estymacja najdłuższych czasów wykonania (WCET). Proces ten składa się z etapów: instrumentacja kodu, analiza ścieżek, przygotowanie danych dla algorytmu, uczenie algorytmu, weryfikacja poprawności modelu (rysunek 3.1). Elementy funkcji bezpieczeństwa, są transformowane na wektor (3.1) i macierz danych (3.2) algorytmu warunkowego autoenkodera wariacyjnego. Każdy wektor reprezentuje zbiór danych dla jednego kroku funkcji bezpieczeństwa, obejmując zarówno wartości sygnałów wejściowych, jak i informacje o liczbach wykonań ścieżek decyzyjnych. W ocenie aktywności ścieżki autor zaproponował sprawdzenie obecności informacji o jej aktywności w danych wejściowych lub korelacji między danymi wejściowymi. Algorytm uczył się na podstawie rzeczywistych warunków działania funkcji bezpieczeństwa, dostosowując swoje parametry tak, aby poprawnie rekonstruować brakujące informacje i wykrywać zależności między sygnałami wejściowymi. Weryfikacja algorytmu polegała na przygotowaniu wektorów, gdzie część sygnałowa była ukryta, a część zawierająca informacje o ścieżkach odzwierciedlała wybraną ścieżkę do weryfikacji. Algorytm dostarczył wyjściowy wektor identyczny z wejściowym, jeśli wybrana ścieżka była możliwa w rzeczywistości.

W dalszej części rozdziału przeprowadzono analizę sygnałów wejściowych oraz scenariuszy testowych wybranych ze względu na pochodzenie danych i charakter sygnałów wejściowych funkcji bezpieczeństwa czujnika multimodalnego. Do oceny poprawności działania CVAE zastosowano RMSE, Variational Lower Bound (VLB) oraz Importance Weighted Autoencoder (IWAE).

Wyniki badań zawiera rozdział 4. Do badania zaproponowano proste algorytmy o zminimalizowanej liczbie parametrów wejściowych oraz węzłów decyzyjnych funkcji bezpieczeństwa bezpiecznika pirotechnicznego. Analizowano zestawy danych syntetycznych logicznych i fizycznych w algorytmach 4 ścieżkowych (rysunki 4.1, 4.2) oraz zestawy danych rzeczywistych logicznych i fizycznych w algorytmach 6 ścieżkowych. Przedstawiono statystyki procesów uczenia (tabele 4.1, 4.3, 4.5, 4.7) oraz wyniki walidacji (tabele 4.2, 4.4, 4.6, 4.8).

W rozdziale 5 autor podsumował wyniki badań wykonane według zaproponowanej metodyki bazując na prostych algorytmach z rozdziału 4. Potwierdzenie sformułowanych tez stanowi podstawę do dalszych badań oraz rozwijania metodyki na inne typy funkcji bezpieczeństwa. Jednocześnie autor zauważył problem braku uniwersalności i bariery dla praktycznego wdrożenia metodyki w bardziej złożonych systemach oraz zalecił kierunki dalszych badań.

### 3. Ocena merytoryczna i uwagi

Podjęta tematyka i podejście do jej realizacji przyjęte przez Autora rozprawy wpisuje się w wyzwania i wymagania dla systemów wbudowanych w pojazdach elektrycznych, w szczególności w zakresie funkcji bezpieczeństwa systemów bateryjnych. Autor sformułował tezy pracy o istnieniu możliwości opracowania metodyki testowania prototypów sterowników systemów bateryjnych bazującej na metodach sztucznej inteligencji oraz detekcji potencjalnych anomalii w kodzie oprogramowania sterowników systemów bateryjnych pojazdów na podstawie wzajemnych zależności między sygnałami wejściowymi i potencjalnymi ścieżkami wykonania kodu.

Opisane w rozprawie zagadnienia sprzętowe i programowe dotyczące pojazdu elektrycznego oraz standard bezpieczeństwa funkcjonalnego wskazują na właściwą znajomość przedmiotu badań. Zebrany materiał stanowi syntezę wiedzy z zakresu systemów bezpieczeństwa pojazdu i jest interesujący dla czytelnika.

Efektom rozprawy jest propozycja metodyki postępowania, prowadzonej na etapie prototypowania, mającej na celu prowadzenie kompleksowej analizy czasowej funkcji bezpieczeństwa i identyfikacji najdłuższych ścieżek wykonania kodu. Jako model wspierający metodykę testowania sterowników systemów bateryjnych pojazdów Autor wybrał zaawansowany model generatywny uczenia maszynowego CVAE, co stanowi propozycję nowego podejścia. Zastrzeżeń nie budzi wybór bezpiecznika pirotechnicznego czujnika multimodalnego do testowania złożonych interakcji systemowych i działania całego systemu bezpieczeństwa w realistycznych warunkach operacyjnych.

Wnioski końcowe, po przeprowadzonej weryfikacji na wyodrębnionych fragmentach algorytmów funkcji bezpieczeństwa pojazdu, nie potwierdzają jednak uniwersalnego charakteru zastosowanej procedury. Nie przedstawiono analizy możliwości instrumentacji kodów oraz transformacji danych wejściowych kompletnych algorytmów funkcji bezpieczeństwa w zestaw danych wykorzystywanych przez algorytm CVAE.

Należy zwrócić uwagę na szereg innych kwestii dyskusyjnych oraz błędów, do których Autor winien się także ustosunkować i zweryfikować.

1. s6: 1.3 *Tezy pracy*. Proszę przeformułować tezy bez powtórzeń.
2. s7: Rysunek 2.1 przedstawia *kompozycję*, na która składają się elementy elektroniczne i mechatroniczne, oznaczone kolorem szarym oraz *elementy całkowicie mechaniczne oznaczone kolorem białym*. Proszę o erratę tekstu lub rysunku- silnik elektryczny i bateria to nie elementy całkowicie mechaniczne.
3. s11: Obwody bezpieczeństwa w pojeździe to *pierścieniowe układy elektryczne, które przechodzą przez komponenty* oraz jednostki sterujące i mostki kontaktowe w złączach. Proszę wyjaśnić, zweryfikować zapis zgodnie z definicją komponentu podaną w r.2.5.1- komponent można rozumieć jako zbiór procedur.
4. s16: 2.3.1 Bezpieczeństwo *funkcyjne*. Proszę o ujednoczenie nazewnictwa, w spisie treści oraz opisach w rozdziałach, gdzie bezpieczeństwo nosi nazwę funkcjonalne.
5. s57: 2.7.2 *Metoda statystyczna*. Proszę o ustalenie i ujednoczenie nazewnictwa, w spisie treści oraz opisach w rozdziałach i rys.2.17, statystyczna czy dynamiczna?
6. s58: Początkowo, podczas fazy analizy, kod źródłowy jest przetwarzany w celu ekstrakcji informacji o ścieżkach wykonania... W fazie pomiarów, *generowane automatycznie dane testowe kierują wykonanie programu po zadanych ścieżkach*, a wynikające z tego czasy wykonania są rejestrowane dzięki wcześniej dodanym instrumentacjom. Proszę o rozwinięcie tej sekwencji.

7. s73: Do tego celu wykorzystuje się odpowiednią metodę analizy, która może obejmować techniki takie jak analiza statyczna lub dynamiczna, czy też bardziej zaawansowane metody jak *analiza formalna*. Proszę o rozwinięcie tej sekwencji.
8. s98-100: *Jednak w trybie uczenia węzłów, wartość błędu średniokwadratowego dla możliwej ścieżki RMSE znacznie wzrasta do 0,61 przy niskiej liczbie próbek, co sugeruje trudności modelu w efektywnej rekonstrukcji danych przy ograniczonej ilości informacji*. Proszę zweryfikować zgodność tego wniosku z tabelą 4.2.
9. s105: W podanym algorytmie są trzy sygnały wejściowe: poduszka *powietrzna*, wyzwalacz oraz prąd akumulatora. Poduszki są gazowe + kolokwializm.
10. s115: Innowacyjnym elementem opracowanego podejścia jest zastosowanie algorytmu autoenkodera wariacyjnego z warunkowaniem, który umożliwia automatyczne modelowanie *zależności między sygnałami wejściowymi a czasami reakcji funkcji bezpieczeństwa*. Proszę o wskazanie w treści rozprawy podstaw do tego stwierdzenia, uzasadnienie wniosku.
11. s116: Dane zebrano na podstawie analiz wyników czterech badanych algorytmów, z których *każdy dostarczał sześć par wartości RMSE*. Proszę o zweryfikowanie treści zapisu.

Autor nie ustrzegł się także pomyłek redakcyjnych, błędów językowych stylistycznych i leksykalnych oraz błędów pisowni.

1. s3: Rys. 3.5 ilustruje te zależności, ukazując, jak działanie jednej z funkcji sterownika pojazdu zależy od innych sterowników podłączonych do wspólnej magistrali danych. Proszę poprawić nr rysunku.
2. s14: *Takie rozwiązanie dostarcza moc*. Przykład kolokwializmu.
3. s20: *Dodatkowo rysunek ten przedstawia użycie podejścia dekompozycji przy realizacji funkcji o wysokim poziomie ASIL*. Język.
4. s34: *GIT*. Proszę rozwinąć skrót.
5. s38: *Peryferia mikrokontrolera*. Przykład kolokwializmu.
6. s52: *Początkowo omówione zostaną metody statyczne*. Język.
7. s61: Sieci neuronowe typu autoenkodery [22] są szczególnie przydatne do redukcji wymiarowości danych oraz *imputacji brakujących wartości*. Przykład kolokwializmu, zapożyczeń z j.ang.
8. s65-66: Ostatnia warstwa liniowa generuje podwójne wartości dla każdego wymiaru latentnego, odpowiadające średniej i logarytmowi wariancji (*32 × 2 wymiarów latentnych*). Język.
9. s69,rys.2.18: Ta sieć reprezentuje *przekonanie modelu o rozkładzie zmiennych latentnych w braku niektórych obserwacji*. Przykład kolokwializmu, zapożyczeń z j.ang.
10. s75: Rysunek ?? przedstawia graficzne odwzorowanie procesu transformacji sygnałów wejściowych i ścieżek decyzyjnych na wektor danych. Proszę o uzupełnienie.
11. 75-76, s78-79: *s1 s2 s3 . . . p1 p2 p3 . . .* Zbędne powtórzenia współrzędnych wektora danych. Powtórzenia wzorów i zdań!, brak numeracji formuł matematycznych. Proszę zweryfikować.
12. s79: Podział na zestawy: Pierwsza część danych została użyta do trenowania algorytmu, a druga do jego weryfikacji. *Do tego zestawu przygotowano wektory na podstawie znajomości węzła*. Język.
13. s88: oczekiwanej log-wiarygodności *rekonstrukcji*. Błąd pisowni.
14. s91: Dla celów wizualizacji wektora stosuje się skalę kolorów, *gdzie 0 reprezentuje kolor niebieski, 1 – czerwony, a wartości pośrednie – odcienie żółtego*. NIEZGODNOŚĆ KOLORÓW Z TYM ZAPISEM na rys 3.7 i kolejnych, zarówno w wersji elektronicznej jak i drukowanej. Proszę zweryfikować.
15. s94-95: *P(Ai)* oznacza *prawdopodobieństwo wystąpienia anomalii w polu i-tym*. Powtórzenia wyjaśnienia *P(Ai)*. Proszę zweryfikować.
16. s116: Teza 1: *Istnieje możliwość*. Błąd pisowni.

#### 4. Wniosek końcowy

Po analizie treści i wyników badań naukowych zaprezentowanych w rozprawie, stwierdzam że oceniana praca mieści się w dyscyplinie inżynierii mechanicznej. Autor wykazał się teoretyczną i praktyczną szczegółową znajomością wybranego przedmiotu badań, powiązanych metod inżynierskich i standardów oraz problematyki, z której wywodzi się temat rozprawy. Potwierdził umiejętność korzystania z literatury naukowej, najnowszych technologii uczenia maszynowego w zastosowaniach do modelowania i diagnostyki mechatronicznych systemów wbudowanych oraz tworzenia i weryfikacji wyników programu badawczego.

Podsumowując niniejszą recenzję pracy doktorskiej Pana mgr inż. Kamila Sternala wykonanej pod opieką promotora Pana dr hab. inż. Marka Fidali, prof. PŚ stwierdzam, że praca doktorska spełnia wymagania określone w Ustawie (z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1668 ze zm.) i wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej o dopuszczenie Pana mgr inż. Kamila Sternala do publicznej obrony.

