

Gliwice 30.11.2024

Szanowna Pani  
dr hab. inż. Alicja Piasecka-Belkhat, prof. PŚ  
Przewodnicząca Rady Dyscypliny  
Inżynieria Mechaniczna  
Politechnika Śląska  
ul. Stanisława Konarskiego 18A,  
44-100 Gliwice

## **Recenzja Rozprawy Doktorskiej**

autorstwa mgra inż. Kamila Sternala

pt.

Metodyka testowania sterowników systemów bateryjnych pojazdów wsparta modelem

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

### **1. Podstawa prawna i przedmiot wykonania recenzji**

Recenzję wykonano na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej w Gliwicach z dnia 23.10.2024 roku.

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska o tytule „Metodyka testowania sterowników systemów bateryjnych pojazdów wspartych modelem”, której autorem jest mgr inż. Kamil Sternal. Dyscyplina naukowa pracy doktorskiej to: inżynieria mechaniczna.

### **2. Ocena układu rozprawy doktorskiej**

Rozprawa licząca 128 stron została napisana w języku polskim, składa się z 5 rozdziałów, streszczenia w języku polskim i angielskim, wykazu bibliograficznego o 80 pozycjach, listy rysunków, tabel oraz listy użytych w rozprawie symboli i oznaczeń.

#### Rozdział 1

Rozdział stanowi wprowadzenie do rozprawy definiując jej genezę, zakres, cele oraz tezy. Doktorant jako potrzebę badań w zakresie testowania sterowników systemów

baterijnych podaje szybko rosnącą liczbę rejestrowanych pojazdów elektrycznych, złożoności współczesnych systemów sterowania oraz wymagania dotyczące bezpieczeństwa i niezawodności systemów baterijnych. Rozdział definiuje dwa główne cele rozprawy, odpowiednio badawczy i wdrożeniowy:

- Opracowanie metod testowania sterowników systemów baterii pojazdów elektrycznych z zastosowaniem sztucznej inteligencji.
- Walidację efektywności zaproponowanej przez Doktoranta metody testowania systemów baterijnych w kontekście detekcji anomalii w kodzie źródłowym sterowników.

## Rozdział 2

Rozdział obejmuje opis architektury pojazdów elektrycznych, w tym układów napędowych i baterijnych, jak również taksonomię systemów wbudowanych sterowników oraz ich rolę w realizacji funkcji bezpieczeństwa. Przedstawione zostały również wymagania normatywne (ISO 26262) wraz z ich implementacją dla systemów wbudowanych. Kluczowe zagadnienia przedstawione w rozdziale:

- Architektura systemów baterijnych: Doktorant opisuje strukturę ogniw baterijnych (Li-Ion, LFP, NCA), mechanizmy balansowania napięć, systemy zarządzania termicznego oraz bezpieczeństwo obwodów wysokonapięciowych.
- Systemy wbudowane sterowników: Diagramy i przykłady pozwalają zrozumieć złożoność mikroprocesorów, struktur pamięci i interfejsów komunikacyjnych (SPI, CAN).
- Funkcje bezpieczeństwa: Wprowadzenie do poziomów integralności bezpieczeństwa funkcjonalnego ASIL (ang. Automotive Safety Integrity Level), analiza zagrożeń i ryzyka HARA (ang. Hazard Analysis and Risk Assessment) oraz dekompozycja funkcji na potrzeby optymalizacji.

## Rozdział 3

Rozdział przedstawia metodykę przeprowadzonych badań, definiując jej główne elementy:

- Modelowanie zależności czasowych: Zastosowanie sieci głębokiego uczenia CVAE (ang. Conditional Variational Autoencoder) do analizy sygnałów wejściowych z użyciem warunków do wykrywania potencjalnych anomalii w systemach sterowania baterii pojazdów elektrycznych.



- Normalizacja danych: Wektoryzacja i standaryzacja danych wejściowych i wyjściowych zwiększająca skuteczność uczenia modeli CVAE
- Proces uczenia i walidacji modelu: Tworzenie zestawów danych syntetycznych oraz ich weryfikacja w kontekście operacyjnych (rzeczywistych) warunków pracy sterowników.
- Scenariusze testowe: Symulacja typowych błędów, takich jak przeciążenia, opóźnienia czasowe oraz awarie komunikacyjne.

#### Rozdział 4

Rozdział podsumowuje przeprowadzone badania i eksperymenty, w ramach których dane syntetyczne i operacyjne (rzeczywiste) zostały podzielone na kategorie:

- Logiczne (związane z wewnętrznymi procesami sterowania, algorytmami i przepływem sygnałów),
- Fizyczne (kluczowe dla monitorowania stanu baterii i sterowania procesami fizycznymi w systemie).

Dane pozwoliły na kompleksową weryfikację zaproponowanej przez Doktoranta metody testowania sterowników bateryjnych. Wyniki walidacji modeli oceniają skuteczność detekcji anomalii na podstawie miar takich jak: RMSE (ang. Root Mean Square Error), VLB (ang. Variational Lower Bound) oraz IWAE (ang. Importance Weighted Autoencoder). Doktorant uzyskał następujące rezultaty badań:

- Modele oparte na CVAE osiągnęły wysoką dokładność w wykrywaniu anomalii, szczególnie w zestawach danych syntetycznych.
- Dane operacyjne wykazały większą zmienność wyników wykrywania anomalii, co może być związane z ograniczeniami w jakości sygnałów wejściowych.

#### Rozdział 5

Rozdział przedstawia podsumowanie, wnioski końcowe oraz zarys rekomendowanych przez Doktoranta przyszłych prac badawczych. Jako główne osiągnięcia rozprawy Doktorant podaje:

- Metoda testowania systemów bateryjnych oparta na sieci głębokiego uczenia CVAE, może znacząco poprawić proces testowania sterowników systemów bateryjnych, szczególnie w kontekście detekcji anomalii.
- Zastosowanie sztucznej inteligencji w analizie zależności czasowych otwiera nowe możliwości w optymalizacji systemów wbudowanych sterowników bateryjnych.



Doktorant podkreśla wkład rozprawy w rozwój metod testowania systemów sterowników wbudowanych w branży motoryzacyjnej, szczególnie w kontekście ich bezpieczeństwa i niezawodności. Podane zostały również kierunki dalszych prac badawczych nad skutecznością metody w warunkach operacyjnych (rzeczywistych). Doktorant rozważa również potrzebę rozszerzenia scenariuszy testowych o bardziej złożone przypadki.

### 3. Główne osiągnięcia rozprawy

Rozprawa porusza tematykę kluczową dla współczesnej elektromobilności, czyli metody optymalizacji testowania systemów sterowania bateriami pojazdów elektrycznych. Doktorant zastosował narzędzie sztucznej inteligencji, którym jest głęboka sieć neuronowa CVAE (ang. Conditional Variational Autoencoder) stanowiąca rozszerzenie klasycznej sieci VAE (ang. Variational Autoencoder), zaprojektowanej do generatywnego modelowania danych. CVAE różni się od standardowego VAE tym, że proces generowania i rekonstrukcji danych jest uzależniony od dodatkowego warunku, który może być reprezentowany przez zmienną, np. klasę, atrybut, czy sygnał zewnętrzny. Metodyka badawcza i wyniki badań są dobrze udokumentowane, a także osadzone w kontekście normatywnym oraz technologicznym. Do głównych osiągnięć rozprawy doktorskiej należy:

- a) Opracowanie nowatorskiej metodyki testowania sterowników systemów bateryjnych
  - Metodyka wykorzystuje modele sztucznej inteligencji, w szczególności CVAE (ang. Conditional Variational Autoencoder), co wyróżnia pracę na tle dotychczasowych badań w tej dziedzinie.
  - Modelowanie zależności czasowych między sygnałami wejściowymi i ich wpływ na ścieżki wykonania kodu sterowników pozwala na precyzyjne wykrywanie potencjalnych odchyłeń, nietypowych wzorców czy rzadko występujących zdarzeń, nazywanych przez Doktoranta „anomaliami”
- b) Integracja norm bezpieczeństwa z metodami sztucznej inteligencji
  - Praca uwzględnia wymagania norm ISO 26262 (Automotive Safety Integrity Level, ASIL) w kontekście funkcji bezpieczeństwa systemów wbudowanych, co nadaje jej wysoką wartość praktyczną.

- c) Zwiększenie bezpieczeństwa i niezawodności systemów wbudowanych
- Metoda zaproponowana przez Doktoranta w rozprawie może zostać zastosowana w procesach projektowania i testowania sterowników systemów bateryjnych, co przyczynia się do redukcji błędów i poprawy bezpieczeństwa pojazdów elektrycznych.
- d) Zastosowanie zaawansowanych metod analizy czasowej
- Metody analizy czasowej pozwalają na analizę najdłuższych ścieżek wykonania kodu w sterownikach systemów czasu rzeczywistego (metoda statyczna analizy oparta na teorii grafów oraz statycznej strukturze kodu, metoda statystyczna analizy z wykorzystaniem danych empirycznych oraz metoda hybrydowa stanowiąca połączenie metody statycznej i statystycznej)
  - Metody analizy czasowej umożliwiają wykrywanie anomalii, takich jak nadmierne opóźnienia czasowe, które mogą wpłynąć na bezpieczeństwo i wydajność systemu systemów sterowania baterii.
- e) Wprowadzenie metod sztucznej inteligencji do detekcji anomalii w systemach wbudowanych
- Opracowany model CVAE wykazuje wysoką skuteczność w detekcji anomalii na podstawie analizy danych syntetycznych i rzeczywistych, co stanowi istotny wkład w rozwój sztucznej inteligencji w inżynierii systemów wbudowanych.
  - Modele zostały ocenione przy użyciu miar takich jak RMSE (ang. Root Mean Square Error), VLB (ang. Variational Lower Bound) oraz IWAE (ang. Importance Weighted Autoencoder), co potwierdza ich dokładność i znaczny potencjał zastosowań.
- f) Konstrukcja scenariuszy testowych do weryfikacji działania sterowników
- Doktorant zaprojektował zestawy scenariuszy testowych symulujących różne typy błędów (przeciążenia, awarie komunikacyjne, opóźnienia czasowe), co umożliwia kompleksową ocenę działania sterowników w różnych warunkach pracy. Scenariusze te mogą być łatwo adaptowane do testowania podobnych systemów wbudowanych.



g) Wykorzystanie danych syntetycznych i operacyjnych do walidacji zaproponowanej metody testowania sterowników

- Rozprawa obejmuje testy na dwóch typach danych: syntetycznych (logicznych i fizycznych) oraz rzeczywistych, co zapewnia szeroką ocenę skuteczności metody. Wyniki badań wskazują na wysoką skuteczność modeli w identyfikacji anomalii w warunkach syntetycznych, natomiast mniejszą skutecznością w przypadku analizy danych operacyjnych.

h) Praktyczny wkład w rozwój technologii elektromobilności

- Rozprawa wnosi istotny interdyscyplinarny wkład (inżynieria systemów wbudowanych, sztuczna inteligencja, normy bezpieczeństwa) w rozwój branży motoryzacyjnej, oferując rozwiązania dedykowane dla systemów sterowania bateriami, które są kluczowe dla efektywności i bezpieczeństwa pojazdów elektrycznych.

i) Możliwość praktycznego wdrożenia wyników

- Zaproponowane rozwiązanie jest skalowalne i może być implementowane w procesach testowania systemów wbudowanych w branży motoryzacyjnej, co czyni je atrakcyjnym dla przemysłu.

W rezultacie interdyscyplinarnego podejścia i zastosowaniu metod sztucznej inteligencji, Doktorant stworzył nowatorską metodologię testowania sterowników systemów bateryjnych, która nie tylko odpowiada na współczesne wymagania rynku, lecz także wnosi istotny wkład w rozwój bezpiecznej i niezawodnej elektromobilności.

Ważnym wynikiem przeprowadzonych przez Doktoranta badań jest analiza tzw. „anomalii”, które w rozprawie odnoszą się do nieprawidłowości w działaniu sterowników systemów bateryjnych, w tym w szczególności opóźnień czasowych, odstępstw logicznych w danych wejściowych, błędów w kodzie źródłowym, czy też zakłócenia w transmisji. W rezultacie zastosowania modeli sieci neuronowych typu CVAE oraz zaproponowanej symulacji scenariuszy testowych, Doktorant uzyskał możliwość wykrywania tychże „anomalii” wraz z analizą ich przyczyny, co realizuje cel rozprawy w zakresie zwiększenia bezpieczeństwa i niezawodności pojazdów elektrycznych.

Doktorant w rozprawie zdefiniował główne powody występowania anomalii, do których zaliczył:

a) Przekroczony czas wykonania programu sterownika baterii spowodowany:

- Złożonym odwzorowaniem pomiędzy sygnałami wejściowymi oraz ich wpływem na czas przetwarzania zdarzeń przez system mikroprocesorowy sterownika bateryjnego,
- Nieoptymalną strukturą kodu, która zwiększa czas wykonania krytycznych funkcji związanych z monitorowaniem sterownika bateryjnego (pomiar i monitorowanie rezystancji izolacji między liniami wysokiego napięcia a nadwoziem pojazdu, szybkie odłączanie obwodów wysokonapięciowych w przypadku wykrycia przeciążeń lub zwarcia).

b) Odstępstwami w danych wejściowych spowodowanymi:

- Nagłym wzrostem temperatury lub napięcia w ogniwach, prowadzącym do błędnego działania sterownika.
- Kombinacjami sygnałów, które nie były uwzględnione podczas projektowania systemu oraz uczenia modelu CVAE.

c) Zakłócenia w transmisji danych

- Zakłócenia elektryczne lub brak odpowiednich mechanizmów korekcji błędów w magistrali komunikacyjnej

d) Błędy w implementacji kodu źródłowego programu sterownika

- Nieoczekiwane ścieżki logiczne w kodzie sterownika wynikające z niedoskonałości w algorytmach sterowania.
- Brak odpowiednich mechanizmów obsługi błędów w krytycznych funkcjach bezpieczeństwa

## 4. Ocena merytoryczna rozprawy

### 4.1. Uwagi krytyczne o charakterze ogólnym

4.1.1. W rozprawie bardzo często pojawia się sformułowanie „anomalie”, którego popularność w terminologii technicznej i naukowej może wynikać z wpływów angielskich. Nie jest to klasyczna kalka językowa, tym nie mniej pojęcie



„anomalie” jest bardzo szerokie i warto je doprecyzować w kontekście prowadzonych badań, np. odchylenie od normy, nietypowe obserwacje, nietypowe wzory danych, odstępstwo, nieprawidłowość, czy też niezgodności.

- 4.1.2. Doktorant nie zaprezentował porównania wyników CVAE z innymi metodami, takimi jak LSTM (ang. Long Short-Term Memory), GAN (ang. Generative Adversarial Networks), czy też klasyczne autoenkodery AE/VAE. W rezultacie przeprowadzone w rozprawie badania zostały ograniczone w zakresie alternatywnych metod sztucznej inteligencji. Doktorant nadmienia, że zastosowanie CVAE jest najbardziej odpowiednie w analizowanym celu zastosowania, natomiast nie wykazuje tego w przeprowadzonych badaniach.
- 4.1.3. Doktorant zastosował skończoną liczbę podstawowych scenariuszy testowych (np. przeciążenia, opóźnienia czasowe, zakłócenia w komunikacji), które nie obejmują wszystkich potencjalnych awarii mogących wystąpić w warunkach eksploatacji (rzeczywistych) systemów sterowania baterii. Rozprawa powinna zawierać przynajmniej listę potencjalnych scenariuszy, planowanych w dalszych badaniach, np. testy symulujące degradację ogniw baterii w czasie w celu oceny jak sterownik radzi sobie z kompensowaniem różnic w parametrach zużycia ogniw (np. zwiększony opór wewnętrzny), symulacja utraty funkcji kluczowego modułu (np. ogniwa lub czujnika), testowanie systemu przy zmiennych cyklach obciążenia (np. naprzemienne fazy wysokiego i niskiego obciążenia), testowanie działania systemu przy bardzo niskim stanie naładowania w tym jego wpływu na układ napędowy i funkcje bezpieczeństwa, itd.
- 4.1.4. Rozprawa nie przedstawia szacowanych kosztów wdrożenia proponowanej metody w przemyśle, co nie pozwala przeprowadzić nawet wstępnej analizy SWOT zaproponowanego rozwiązania (mocne-słabe strony, szanse-zagrożenia), a tym samym umniejsza praktyczne znaczenie wyników.
- 4.1.5. Dyskusja wyników badań nie przedstawia potencjalnych (teoretycznych) przyczyn trudności w modelowaniu danych operacyjnych, w tym nieliniowości lub niejednorodności zbiorów danych, np. nieliniowa zależność pomiędzy napięciem a SOC (ang. State of Charge) w bateriach litowo-jonowych, nieliniowa rezystancja wewnętrznej baterii w zależności od temperatury, stanu naładowania, wieku ogniwa i innych czynników, z kolei niejednorodność danych może wynikać z zakłóceń w komunikacji, które mogą powodować propagację błędów w zależności od miejsca wystąpienia zakłócenia.



- 4.1.6. Rozprawa jest umocowana w kontekście norm bezpieczeństwa, takich jak ISO 26262, nie zawiera jednak wytycznych co do integracji zaproponowanego przez Doktoranta z istniejącymi procesami certyfikacyjnymi i testowymi w przemyśle motoryzacyjnym. Czy sieć neuronowa głębokiego uczenia typu CVAE może być zgodna z wymogami ASIL (Automotive Safety Integrity Level) w kontekście niezawodności i testowania funkcji bezpieczeństwa? Integracja sztucznej inteligencji z systemami czasu rzeczywistego może wiązać się z dodatkowymi wyzwaniami związanymi z czasem przetwarzania oraz poprawnością generowanych odpowiedzi. Stosowanie algorytmów opartych na uczeniu maszynowym w systemach wbudowanych, które muszą działać w czasie rzeczywistym, może generować opóźnienia w obliczeniach, co może zagrażać stabilności i bezpieczeństwu systemu. Jak Doktorant ocenia przewidywalność, deterministyczność oraz możliwość uzasadnienia wstecz (dowodzenia poprawności logicznej) odpowiedzi generowanych przez sieć neuronową?
- 4.1.7. W rozprawie nie podano jaki system operacyjny czasu rzeczywistego (ang. Real-Time Operating System) jest używany badanych sterownikach, co mogłoby być istotnym punktem w dyskusji nad zapewnieniem deterministyczności (bezpieczeństwa) zgodnie z normami takimi jak ISO 26262. Doktorant pisze: (Strona 40) „*Odnosząc się do wcześniej omówionego sposobu aktywacji komponentów przez procedury wywoływane, nie należy zapomnieć o roli **systemów operacyjnych** w tym kontekście. System operacyjny, będący fundamentalnym składnikiem zarówno prostych, jak i skomplikowanych urządzeń elektronicznych, zarządza zasobami sprzętowymi i oprogramowaniem.*” Doktorant omawia architekturę oprogramowania (Rysunek 2.5), jednak w dalszym ciągu nie precyzuje jaki model systemu operacyjnego ma na myśli i nie podaje jego właściwości w relacji do norm przemysłowych (**ISO 26262** w kontekście bezpieczeństwa funkcjonalnego, **AUTOSAR** dla standaryzacji wymagań w branży motoryzacyjnej, IEC 61508 dla zapewnienia niezawodności i minimalizacji ryzyka awarii, MISRA w zakresie wytycznych dotyczących programowania w systemach wbudowanych z uwzględnieniem RTOS dla zapewnienia niezawodność i bezpieczeństwo kodu, oraz normy branżowej IEEE 1003 (ISO/IEC 9945) **POSIX** dla prawidłowej kodowania interfejsów (API) z uwzględnieniem zarządzanie procesami, wątkami, pamięcią i komunikacją między procesami/wątkami w RTOS.



## 4.2. Uwagi krytyczne o charakterze szczegółowym

- 4.2.1. Strona 115-118: Przykład niestarannej edycji tekstu „(...) która umożliwia wykrywanie anomalii w oprogramowaniu realizującym **za** funkcje bezpieczeństwa systemu bateryjnego pojazdu elektrycznego.”
- 4.2.2. Strona 40: Przykład złego doboru słów w warstwie technicznej pracy przez Doktoranta, „*System operacyjny, będący fundamentalnym składnikiem zarówno prostych, jak i skomplikowanych urządzeń elektronicznych, zarządza zasobami sprzętowymi i oprogramowaniem.*” W tym kontekście słowo „skomplikowany” w domyśle oznacza system trudny do zrozumienia, co wymaga w odniesieniu do niego większego wysiłku intelektualnego lub technicznego. Bardziej adekwatnym jest użycia słowa „złożony”, które podkreśla, że system składa się z wielu elementów powiązanych w spójny sposób, podkreślając jego strukturę, wielowymiarowość i harmonię w relacjach między częściami, bez konieczności implikowania trudności, np. „*Projekt systemu elektronicznego jest bardzo złożony, ale dobrze przemyślany*”.

## 5. Wniosek końcowy

W opiniowanej rozprawie doktorskiej pt.: „Metodyka testowania sterowników systemów bateryjnych pojazdów wsparta modelem”, mgr inż. Kamil Sternal samodzielnie rozwiązał postawione zadanie badawcze i wykazał się wiedzą oraz kompetencjami wymaganymi dla uzyskania stopnia doktora nauk technicznych. Wyniki rozprawy mogą zostać zastosowane w praktyce przemysłowej.

Rozprawa mgr inż. Kamila Sternala jest kompleksowym i wartościowym wkładem w rozwój metod testowania systemów wbudowanych w pojazdach elektrycznych. Podjęcie tematu badań przedstawionych przez Doktoranta, uważam za uzasadnione, z punktu widzenia naukowego, a przede wszystkim wdrożeniowego. Opracowana metoda testowania, chociaż wymaga dalszych badań, ma duży potencjał wdrożeniowy. Metoda wyróżnia się nowatorskim podejściem, solidnym opracowaniem merytorycznym, łącząc interdyscyplinarnie sztuczną inteligencję z technologią motoryzacyjną oraz standardami bezpieczeństwa. Poszczególne rozdziały rozprawy logicznie prowadzi do uzasadnionych wniosków, co czyni pracę spójną i naukowo rzetelną.

Stwierdzam, że rozprawa mgr inż. Kamila Sternala spełnia wymagania formalne stawiane rozprawom doktorskim określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku, Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2022r. poz. 574 z późn. zm.). W



wnioskuje o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna. Sformułowane przeze mnie uwagi krytyczne nie wpływają na ogólną pozytywną ocenę rozprawy.



dr hab. inż. Piotr Czop, prof. AGH

Katedra Robotyki i Mechatroniki  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki  
Akademia Górniczo Hutnicza im. St. Staszica  
Al. Mickiewicza 30  
30-059 Kraków