

dr hab. inż. Grzegorz Ślaski, prof. PP

POLITECHNIKA POZNAŃSKA
Instytut Konstrukcji Maszyn
Wydział Inżynierii Mechanicznej
ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań
tel. 61 665 2222

Poznań, 23.12.2024

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Anny GNACY-GAJDZIK

„OPRACOWANIE METODYKI TWORZENIA ZAUTOMATYZOWANYCH TESTÓW SYSTEMÓW WBUDOWANYCH W POJAZDACH SAMOCHODOWYCH, UMOŻLIWIAJĄCEJ WERYFIKACJĘ POPRAWNOŚCI WYNIKÓW Z WYKORZYSTANIEM ALGORYTMÓW ROZSZERZONEJ INTELIGENCJI”

(Promotor: dr hab. inż. Piotr Przystałka, prof. PŚ, Opiekun ze strony przedsiębiorcy: dr inż. Wojciech Sebzda)

Podstawa opracowania:

Zlecenie Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej - dr hab. inż., prof. PŚ Alicji Piaseckiej-Belkhyat - pismo RDJMe.512.12.2024 z dnia 23.10.2024 r.

1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

1.1. Charakterystyka redakcji pracy

Przedstawiona do recenzji rozprawa liczy łącznie 161 stron z czego 132 strony stanowi tekst rozprawy, 13 stron spis literatury zawierający 198 pozycji, 2 strony streszczenie w j. polskim i angielskim, 2 strony spis rysunków i po 1 stronie spis tabel oraz podziękowania. Praca zawiera także 2 strony spisu treści, spis skrótów i oznaczeń (akronimów) – 4 strony oraz wykaz wybranych oznaczeń (symboli) – 2 strony. W pracy zamieszczono 66 ponumerowanych rysunków (numerowane oddzielenie w każdym z rozdziałów). Treść rozprawy została podzielona na 6 rozdziałów i podrozdziały 1 i 2 stopnia.

1.2. Charakterystyka treści pracy

ROZDZIAŁ 1 - Wstęp. Opisano w nim dynamiczny rozwój systemów wbudowanych (systemy sterowania silnikami, bezpieczeństwa czynnego, systemy ADAS) oraz omówiono wyzwania związane z ich projektowaniem i testowaniem. Podano przykłady skutków niedostatecznego testowania takich systemów (wypadki i katastrofy). Odwołując się m. in do normy ISO 26262 *Pojazdy drogowe – Bezpieczeństwo funkcjonalne* wskazano na potrzebę stosowania zaawansowanych metod testowania i jego automatyzacji, wynikającą z rosnących wymagań jakościowych oraz złożoności systemów przy jednoczesnym ograniczaniu dostępnego czasu i budżetu na przeprowadzanie testów. Zdefiniowano istotne dla ocenianej rozprawy tzw. **testy migoczące (ang. Flickering tests)**. Zasygnalizowano, że wprowadzenie sztucznej inteligencji jako narzędzia do analizy i weryfikacji wyników testów powinno pozwolić na poprawę efektywności i wiarygodności testów, co jest kluczowe dla rozwoju nowoczesnych pojazdów.

W **podrozdziale 1.1** bardziej szczegółowo przedstawiono problem badawczy - „**identyfikację przyczyn oraz opracowanie skutecznych metod eliminacji migotania rezultatów testów**”. Postawiono również pytania badawcze i opisano zadania badawcze, które objęły analizę zjawiska migotania rezultatów i jego przyczyn oraz zaprojektowanie stanowiska testowego z adaptowalnym modelem symulacyjnym pojazdu i ocenie wpływu jego zastosowania na występowanie migotania rezultatów testów. Zadania koncentrowały się również na opracowaniu i implementacji algorytmów rozszerzonej inteligencji w procesie testowania, weryfikacji ich skuteczności w identyfikacji anomalii oraz ocenie zaproponowanej metodyki integracji tych algorytmów.

W **podrozdziale 1.2** opisano cel rozprawy: **opracowanie skutecznej metodyki tworzenia zautomatyzowanych testów systemów wbudowanych w pojazdach samochodowych, uwzględniającej wykorzystanie algorytmów rozszerzonej inteligencji oraz symulacyjnego modelu pojazdu.**

Podrozdział 1.3 w pewnym sensie syntetycznie streszczono kolejne rozdziały rozprawy. W **podrozdziale 1.4** zdefiniowano podstawowe terminy i pojęcia stosowane w rozprawie.

ROZDZIAŁ 2 Rozwój układów wbudowanych w przemyśle samochodowym poświęcony jest zagadnieniom związanym z mechatroniką pojazdów samochodowych, normom i standardom obowiązującym producentów systemów wbudowanych dla przemysłu motoryzacyjnego, procesowi rozwoju systemów wbudowanych, a w szczególności inżynierii opartej na modelach oraz testowaniu systemów mechatronicznych przeznaczonych do zastosowania w samochodach. Opisano pod kątem zastosowania systemów wbudowanych specyfikę pojazdów spalinowych zasilanych silnikami ZI, ZS, pojazdów elektrycznych bateryjnych (BEV) i hybrydowych oraz elektrycznych zasilanych wodorem.

W dalszej części w **podrozdziale 2.2.** omówiono wybrane normy (ISO26262, ISO 21448:2022, czy AUTOSAR) i standardy (ASPICE, ASPICE AEC, OBD-II i MISRA) oraz V-model procesu rozwoju systemów wbudowanych w przemyśle samochodowym ze zwróceniem uwagi na etapy procesu testowania. Omówiono także zagadnienie migoczących rezultatów testów, wskazując na podstawie literatury tematu, że badacze zidentyfikowali trzy główne przy czyny błędów: błędy semantyczne, nieudane testy i błędy środowiskowe. Wskazano także znaczenie potrzeby eliminacji migotania rezultatów testów.

W **podrozdziale 2.3** omówiono inżynierię opartą na modelach jako narzędzie zwiększania wydajności w procesie rozwoju systemów wbudowanych na różnych etapach tego procesu - od analizy wymagań klienta, przez projektowanie architektury systemu poprzez weryfikację do dokumentacji. Szczegółowiej przedstawiono testowanie oparte na modelach ze zwróceniem uwagi na podejście określane w j. angielskim jako *Model Based Testing*.

W **podrozdziale 2.4** odniesiono się do cyklu V rozwoju systemów wbudowanych oraz zagadnień testowania układów mechatronicznych stosowanych w pojazdach. Podrozdział podkreśla zastosowanie symulacyjnych środowisk testowych, takich jak MIL (*Model in the Loop*), SIL (*Software in the Loop*), PIL (*Processor in the Loop*) na wczesnym etapie rozwoju oraz bardziej zaawansowanych środowisk, takich jak HIL (*Hardware in the Loop*), w późniejszych etapach, zwłaszcza w kontekście weryfikacji wymagań bezpieczeństwa. Symulacja *Vehicle in the Loop* została wskazana jako bardziej kosztowna alternatywa, używana rzadziej.

Omówiono także metodykę testowania oprogramowania wbudowanego, które obejmuje zorganizowane podejście zapewniające jakość, niezawodność i zgodność z wymaganiami. Opisano proces składający się z dziewięciu faz, od analizy wymagań, przez planowanie i implementację testów, aż po analizę wyników i raportowanie. Opisano testy jednostkowe, integracyjne, funkcjonalne, wydajnościowe, regresji i bezpieczeństwa oraz techniki projektowania testów – czamoskrzynkowe (analiza zewnętrznych zachowań systemu na podstawie danych wejściowych i oczekiwanych wyników), białoskrzynkowe (analiza wewnętrznej struktury kodu systemu pozwalająca na pełniejsze pokrycie logicznych ścieżek programu) i oparte na przypadkach użycia (symulacji sposobów użycia systemu przez użytkowników końcowych).

Podkreślono znaczącą rolę automatyzacji dla zmniejszenia kosztów, czasu i błędów ludzkich zapewniającą powtarzalność i spójność oraz dokładność wyników, a także integrację z mechanizmami ciągłej integracji i wdrażania. Opisano proces automatyzacji obejmujący wybór odpowiednich przypadków testowych, implementację skryptów oraz analizę wyników. Zwrócono uwagę, iż problemem pozostają jednak wyniki migoczące i wpływ środowiska testowego na ich stabilność ale jednocześnie wskazano, iż rozwój algorytmów uczenia maszynowego i rozszerzonej inteligencji otwiera możliwości optymalizacji testów i środowiska, w tym automatycznego generowania przypadków testowych, jest to jednak przedmiotem aktualnych badań.

ROZDZIAŁ 3 Rozszerzona inteligencja koncentruje się na przedstawieniu rozszerzonej inteligencji (*Augmented Intelligence – Aul*), łączącej sztuczną inteligencję (AI) z systemami wspierającymi człowieka w podejmowaniu decyzji. W **podrozdziale 3.1** Autorka umiejętnie przedstawiła genezę oraz podstawowe zagadnienia związane ze sztuczną inteligencją. Szeroko opisała różnorodne zadania i metody AI, w tym regresję, klasyfikację oraz grupowanie, uwzględniając algorytmy takie jak drzewa decyzyjne, sieci neuronowe, czy sieci bayesowskie. Autorka przedstawiła jasne rozróżnienie między uczeniem nadzorowanym, nienadzorowanym i półnadzorowanym, wraz z podkreśleniem ich zalet i ograniczeń. Przedstawiła także współczesne kierunki rozwoju AI, jak autonomia systemów, głębokie uczenie, czy współpraca człowieka z AI, co wskazuje na dobre zrozumienie tematyki.

Podrozdział 3.2 Autorka wykorzystała do omówienia różnic między sztuczną a rozszerzoną inteligencją (Aul), podkreślając rolę Aul jako technologii wspomagającej efektywną analizę dużych zbiorów danych, a nie zastępującej człowieka. Przedstawiła również ograniczenia AI i znaczenie harmonizacji wyników z ludzkimi intencjami. **Atutem rozdziału jest także odniesienie do rzeczywistych zastosowań Aul w diagnostyce i testowaniu systemów wbudowanych w przemyśle motoryzacyjnym, co jest spójne z celami rozprawy.**

W **podrozdziale 3.3** Doktorantka szczegółowo omówiła różnorodne obszary zastosowań rozszerzonej inteligencji (Aul) w sektorach medycznym, przemysłowym i finansowym. Wskazała także zastosowania sektorze

przemysłowym do optymalizacji procesów produkcyjnych, monitorowania jakości, przewidywania awarii oraz wsparcia autonomicznych pojazdów. Podrozdział 3.3. w sposób merytoryczny i kompleksowy charakteryzuje potencjał rozszerzonej inteligencji, wykazując jej praktyczne znaczenie w różnych sektorach. Uzupełnia treść poprzednich części, przyczyniając się do spójności pracy, jednocześnie wzbogacając ją o przykłady ilustrujące wszechstronność Aul.

Podrozdział 3.4 analizuje potencjał zastosowania metod rozszerzonej inteligencji (Aul) w testowaniu systemów wbudowanych, z naciskiem na systemy stosowane w pojazdach samochodowych. Autorka podkreśla, że wraz ze wzrostem złożoności tych systemów tradycyjne metody testowania stają się niewystarczające, co otwiera pole dla algorytmów sztucznej inteligencji (AI) oraz Aul. Na podstawie licznie przytoczonych źródeł wskazuje, że inteligencja rozszerzona (Aul) może wspierać proces generowania danych testowych, analizowania wymagań funkcjonalnych oraz identyfikowania wzorców zachowania systemów, oferując narzędzia ułatwiające projektowanie testów, weryfikację wyników oraz wykrywanie anomalii. Rozdział prezentuje liczne przykłady literaturowe, w tym badania nad automatycznym generowaniem testów, priorytetyzacją i analizą wymagań z wykorzystaniem przetwarzania języka naturalnego (NLP) oraz algorytmów uczenia maszynowego. Podkreślono w nim ograniczenia obecnych badań, takie jak brak skalowalności proponowanych rozwiązań i niedostateczne wyniki w kontekście rzeczywistych zastosowań. **W końcowej części podrozdziału wyraźnie wskazano lukę badawczą dotyczącą efektywnego wdrażania Aul w automatyzacji testów systemów wbudowanych w przemyśle motoryzacyjnym jak i brak badań nad zastosowaniem metod wspartych modelowo, które mogłyby znacznie usprawnić procesy testowania poprzez dostosowanie technik do specyficznych wymogów systemów wbudowanych. Jest to w zasadzie sformułowanie genezy a także celu podjętych w pracy badań.**

ROZDZIAŁ 4 **Metodyka testowania systemów wbudowanych uwzględniająca weryfikację wyników z zastosowaniem rozszerzonej inteligencji** przedstawia kompleksowe podejście do testowania systemów wbudowanych, które łączy tradycyjne metodyki z zaawansowanymi technikami rozszerzonej inteligencji (Aul). Rozdział ten dostarcza solidnych wytycznych dla projektowania i wdrażania skutecznych systemów testowych, uwzględniając zarówno tradycyjne, jak i nowoczesne rozwiązania. Składa się z trzech podrozdziałów.

Podrozdział 4.1 omawia kluczowe elementy metodyki testowania: analizę wymagań funkcjonalnych, specyfikację scenariuszy testowych, analizę i wybór środowiska testowego, przygotowanie modelu pojazdu, przygotowanie środowiska testowego, integrację modelu pojazdu ze środowiskiem testowym, implementację przypadków testowych, selekcję zmiennych zależnych i niezależnych, analizę ryzyka i opracowanie zestawu reguł, gromadzenie danych treningowych podczas pracy systemu wbudowanego, trening algorytmów Aul, wykonanie przypadków testowych połączone z logowaniem danych środowiskowych, weryfikację uzyskanych rezultatów z zastosowaniem algorytmów Aul oraz raportowanie wyników i zgłaszanie defektów. **Wśród tych etapów w celu zwiększenia dokładności i efektywności procesu testowania Autorka wprowadziła elementy innowacyjne, takie jak zastosowanie modelu pojazdu oraz algorytmów rozszerzonej inteligencji do weryfikacji rezultatów wykonywanych testów.**

Podrozdział 4.2 koncentruje się na integracji tych elementów w jednolity proces testowy, podkreślając praktyczne aspekty ich zastosowania w systemach wbudowanych.

Podrozdział 4.3 szczegółowo opisuje algorytmy sztucznej inteligencji wybrane do badań, wskazując ich potencjał w ramach rozszerzonej inteligencji i ich znaczenie dla poprawy procesu testowania. Opisano w nim rekurencyjne sieci neuronowe (Recurrent Neural Networks - RNN) oraz ich odmiany z warstwami LSTM (Long Short Term Memory) oraz z jednostką rekurencyjną z bramkami (GRU – Gated Rcurrent Unit). Zastosowano je w badaniach dla skutecznej analizy danych sekwencyjnych oraz identyfikacji anomalii w wynikach testów systemów wbudowanych. LSTM, dzięki swoim zaawansowanym mechanizmom pamięciowym, znalazły zastosowanie w bardziej złożonych przypadkach, podczas gdy GRU oferowały kompromis między wydajnością a skutecznością w mniej wymagających zadaniach.

W dalszej części **podrozdziału 4.3** Autorka skoncentrowała się na opisaniu badań prowadzonych w rozprawie doktorskiej polegających na analizie i ocenie skuteczności wybranych algorytmów stosowanych do wykrywania anomalii w procesach testowania systemów wbudowanych w pojazdach samochodowych. W pracy opisano i przetestowano następujące 7 algorytmów (ECOD, PCA, AvgkNN, IForest, INNE, Autoenkoder i ALAD) z grupy algorytmów nienadzorowanych oraz 5 algorytmów nadzorowanych dostępnych w bibliotece PyOD (Python Outlier Detection) - XGB+, CATB+, LGB, SVM, MLP.

Uwzględnienie algorytmów nadzorowanych i nienadzorowanych pozwoliło Autorce na kompleksową analizę ich przydatności w wykrywaniu anomalii w systemach wbudowanych, z uwzględnieniem różnorodnych podejść do

analizy danych. Dzięki temu Autorka stworzyła solidne podstawy do oceny skuteczności tych metod w praktycznych zastosowaniach w przemyśle motoryzacyjnym.

W celu zrealizowania kompleksowej oceny działania algorytmów w różnych aspektach, takich jak dokładność klasyfikacji, zdolność modelu do wykrywania anomalii oraz jego niezawodność w różnych warunkach danych testowych i treningowych Autorka zastosowała szereg miar oceny skuteczności algorytmów: średnią kwadratową błędów (RMSE), macierz pomyłek (Confusion Matrix), precyzję (Precision, PRE), czułość (Recall, REC), zrównoważoną dokładność (Balanced Accuracy, BA), współczynnik korelacji Matthews'a (Matthews Correlation Coefficient, MCC) oraz pole pod krzywą ROC (Area Under Curve, AUC).

ROZDZIAŁ 5 Badania weryfikacyjne ma kluczowe znaczenie dla pracy - prezentuje praktyczne zastosowanie opracowanej metodyki, wykazując jej skuteczność w rzeczywistych warunkach testowych. Rozdział składa się z trzech głównych części:

Rozdział 5.1 Plan badań - opisano analizę problemu migotania wyników testów systemów wbudowanych. Przedstawiono potencjalne przyczyny tego zjawiska. Przedstawiono plan badań obejmujący kroki mające na celu identyfikację i eliminację przyczyn niestabilności wyników. Plan obejmował implementację **algorytmów rozszerzonej inteligencji** oraz przeprowadzenie eksperymentów weryfikacyjnych w kolejnych V etapach.

Rozdział 5.2 Obiekt badań – opisano w nim system wbudowany kontrolujący baterię (BCU – Battery Control Unit) będący przedmiotem testowania oraz stanowisko badawcze w postaci środowiska HIL (Hardware in the Loop), w którym elementami symulowanymi były inne jednostki sterujące oraz dynamika wzłużna ruchu pojazdu z wykorzystaniem modelu pojazdu w środowisku SIMULINK.

Rozdział 5.3 Opisy i wyniki badań

Etap I: Ocena problemu migotania wyników testów - przeprowadzono 10-krotne wykonanie 216 przypadków testowych, uzyskując 59% wyników migoczących, 34% stabilnych pozytywnych i 7% stabilnych negatywnych. Wyniki potwierdziły istotność problemu migotania i potrzebę opracowania algorytmów do automatycznej analizy przyczyn zamiast wielokrotnego powtarzania testów.

Etap II: Algorytm identyfikacji anomalii - opracowano algorytm umożliwiający systematyczną analizę wyników testów i identyfikację źródeł migotania. Określono kategorie anomalii (czasowe, komunikacyjne, tolerancji, fluktuacji), a także wagę i prawdopodobieństwo ich wystąpienia. Wyniki analizy wykazały, że 84% negatywnych wyników wymagało szczegółowej diagnozy, a 80% testów oceniono jako poprawne, co wskazuje na konieczność dalszej analizy środowiska testowego.

Etap III: Wpływ modelu pojazdu - zintegrowano środowisko testowe z modelem pojazdu, co pozwoliło na wykrycie defektów niewidocznych w standardowych warunkach testowych. Model umożliwił dokładniejszą symulację rzeczywistych warunków jazdy, co przyczyniło się do lepszej diagnostyki systemu wbudowanego.

Etap IV: Skuteczność algorytmów rozszerzonej inteligencji - przeanalizowano skuteczność algorytmów rozszerzonej inteligencji (RNN z warstwami LSTM i GRU) w identyfikacji fałszywie negatywnych wyników testów. Potwierdzono ich wysoką precyzję oraz efektywność w zmniejszeniu nakładów pracy. Przetestowano także algorytmy nadzorowane i nienadzorowane, wykazując, że ich kombinacja poprawia ogólną skuteczność analizy wyników testów.

Etap V – Końcowa weryfikacja zastosowanej metodyki - przeprowadzono dwa eksperymenty, które potwierdziły zdolność algorytmów do identyfikacji fałszywie negatywnych wyników testów, zarówno w przypadku treningu na danych z tego samego scenariusza, jak i przy zastosowaniu danych z jednego przypadku do analizy innego. Wyniki wykazały, że integracja algorytmów Aul z modelem pojazdu znacząco poprawia jakość analizy i stabilność wyników testów, potwierdzając skuteczność metodyki w diagnozowaniu i eliminacji anomalii. Badania dowiodły, że podejście to może być efektywnie zastosowane w praktycznych środowiskach testowych, zapewniając lepszą niezawodność systemów wbudowanych.

ROZDZIAŁ 6 – Podsumowanie stanowi podsumowanie całej rozprawy, koncentrując się w **podrozdziale 6.1** na kluczowych osiągnięciach badawczych, wnioskach oraz praktycznych implikacjach zaproponowanej metodyki. Autorka podkreśla, że opracowana metodyka testowania systemów wbudowanych, łącząca tradycyjne podejścia z zaawansowanymi algorytmami rozszerzonej inteligencji oraz wykorzystaniem modeli symulacyjnych pojazdów, skutecznie zwiększa stabilność wyników testów i eliminuje problem migotania. Wnioski wskazują na istotną poprawę efektywności, precyzji i niezawodności procesu testowania, co ma szczególne znaczenie dla przemysłu motoryzacyjnego, gdzie testowanie systemów wbudowanych odgrywa kluczową rolę w zapewnieniu bezpieczeństwa i zgodności z normami. Rozdział zwraca również uwagę na ograniczenia pracy, takie jak wąski zakres testowanych systemów oraz potrzebę większych zbiorów danych treningowych, a także proponuje kierunki dalszych badań

(**podrozdział 6.2**), obejmujących rozwój algorytmów sztucznej inteligencji, rozszerzenie zastosowań metodyki na inne sektory przemysłu i analizę kosztów wdrożenia. Pracę kończy **podrozdział 6.3** opisujący potencjał wdrożeniowy opracowanych rozwiązań, które mogą znaleźć szerokie zastosowanie w automatyzacji testów systemów wbudowanych.

2. OCENA SPEŁNIENIA WYMOGÓW STAWIANYCH PRACY DOKTORSKIEJ W USTAWIE PRAWO O SZKOLNICTWIE WYŻSZYM I NAUCE

2.1. Ocena ogólnej wiedzy teoretycznej kandydata w dyscyplinie inżynieria mechaniczna (Art.187 pkt.1)

Spośród 5 rozdziałów pracy (6 to podsumowanie) wiedzę Autorki przedstawiają zasadniczo rozdziały 1, 2 i 3 stanowiące około 30% objętości rozprawy.

Przedstawiona do oceny praca jest interdyscyplinarna i mocno zahacza o automatykę, robotykę, inżynierię oprogramowania i metody sztucznej inteligencji. Jednak kluczowy obiekt zainteresowania – pojazd samochodowy – jest z natury złożonym układem mechanicznym, a w zasadzie współcześnie mechatronicznym, co już samo stawia go na pograniczu różnych dyscyplin naukowych. Testy, które uwzględniają procesy wynikające z mechaniki ruchu samochodu (dynamika wzdluzna) i ich aspekt energetyczny w odniesieniu do funkcjonowania napędu i magazynu energii, bezpośrednio wynikają z praktyki inżynierii mechanicznej stosowanej w przemyśle motoryzacyjnym. Autorka wniosła do tych testów wyraźny element inżynierii mechanicznej w postaci wykorzystania modelu matematycznego ruchu pojazdu. Dlatego w mojej opinii, choć w dużym stopniu praca dotyczy też zagadnień informatycznych (opracowanie i zastosowanie algorytmów AI do weryfikacji testów), to jednak kluczowy kontekst – testowanie systemów mechatronicznych w pojazdach – zdecydowanie należy do domeny inżynierii mechanicznej, a dokładniej do szeroko pojętej inżynierii motoryzacyjnej. Elementy wykorzystania sztucznej inteligencji wykorzystują gotowe narzędzia i służą w rozprawie zwiększeniu efektywności testów systemów wbudowanych a nie doskonaleniu ich samych. Z drugiej strony rozprawa pokazuje jak bardzo współczesne konstrukcje pojazdów są interdyscyplinarne i coraz trudniej jednoznacznie definiować relacje typu „samochód = inżynieria mechaniczna”.

Autorka rozprawy przedstawiła w niej szeroką wiedzę w obszarze testowania systemów wbudowanych w pojazdach, w szczególności w obszarze inżynierii mechanicznej były to:

- umiejętność zastosowania modeli numerycznych pojazdów w procesie testowania systemów wbudowanych,
- umiejętność analizy dynamiki pojazdu i interakcji między jego komponentami mechanicznymi a systemami wbudowanymi,
- znajomość specyfikacji pojazdów i norm technicznych – w szczególności takich jak **ISO 26262** czy **ASPICE**, które mają kluczowe znaczenie dla projektowania, testowania i eksploatacji systemów wbudowanych w motoryzacji,
- praktyczną znajomość metod i środowisk testowania systemów wbudowanych w szczególności środowiska testowego Hardware in the Loop (HiL), obejmującego analizę wpływu mechanicznych i środowiskowych czynników na systemy wbudowane.

Warto podkreślić, że Autorka rozprawy poza elementami przypisanymi do inżynierii mechanicznej wykazała się ponadprzeciętną wiedzą interdyscyplinarną, która obejmuje także zagadnienia z obszaru automatyki oraz informatyki, co było niezbędne w kontekście realizowanej pracy, a także wynikało z współczesnych wymagań przemysłu motoryzacyjnego. Autorka w swojej rozprawie przedstawiła znakomitą orientację w realiach współczesnego przemysłu motoryzacyjnego, w obszarze rozwoju systemów wbudowanych - w tym uwarunkowań normatywnych i standardów pochodzących z ostatnich kilku lat (2017- 22). Podjęcie tematu zastosowania algorytmów sztucznej inteligencji w analizie migotania wyników testów oraz optymalizacji procesu testowania wymagało od niej poznania tych narzędzi na poziomie ich praktycznego wykorzystania (w pracy podkreślono praktyczne wykorzystanie narzędzi na poziomie dostępności dla użytkowników nie związanych z AI), ale także głębokiego zrozumienia potrzeb i wyzwań branży (ograniczenia czasu i budżetu na realizację testów). Przyjęte w rozprawie interdyscyplinarne podejście pozwoliło na stworzenie metodyki, która spełnia rygorystyczne wymagania stawiane przez współczesne standardy motoryzacyjne, co jest zasadniczym warunkiem możliwości wdrożenia opracowanego rozwiązania w realiach przemysłowych. Powyższe Autorka deklaruje w swojej pracy, a wynika to także z faktu, iż realizowana rozprawa realizowana była jako doktorat wdrożeniowy.

Podsumowując przedstawiona rozprawa doktorska wyraźnie prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Autorki w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, uzupełnioną elementami automatyki i informatyki, co podkreśla jej interdyscyplinarny charakter oraz bardzo dobrą orientację w realiach współczesnego przemysłu motoryzacyjnego.

2.2. Ocena umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej (Art.187 pkt.1)

Na podstawie analizy treści rozprawy (głównie rozdziały 4 i 5 stanowiące około 55% treści rozprawy – 90 stron) można stwierdzić, że Autorka wykazała się bardzo dobrą umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, co wynika z następujących argumentów:

- wykazała orientację w najnowszych trendach i standardach związanych z testowaniem systemów wbudowanych w pojazdach samochodowych; pozwoliło jej to na adaptację najnowszych osiągnięć nauki i techniki do własnych badań,
- wykazała się zdolnością do identyfikacji i zdefiniowania problemu badawczego - precyzyjnie określiła go na związany z identyfikacją i minimalizacją migotania wyników testów systemów wbudowanych; zdefiniowała dobrze pytania badawcze i poprawnie zaplanowała zadania badawcze, ukierunkowane na rozwiązanie praktycznych problemów i uzyskanie nowej wiedzy,
- wykazała się interdyscyplinarnym podejściem łącząc wiedzę z różnych dziedzin, takich jak inżynieria mechaniczna, automatyka i informatyka; skutecznie integrowała różne perspektywy, co wymagało samodzielności w zdobywaniu wiedzy oraz umiejętności krytycznego myślenia;
- opracowała oryginalną metodykę badawczą projektując i wdrażając nowatorską metodykę testowania systemów wbudowanych (rozdz. 4.2, rys. 4.30), łącząc tradycyjne metody z wykorzystaniem algorytmów sztucznej inteligencji uwzględniając jednocześnie realia przemysłu motoryzacyjnego i spełniając rygorystyczne standardy - świadczy to o zdolności Autorki do samodzielnego planowania i realizacji zaawansowanych badań,
- Autorka wykazała się umiejętnością przeprowadzenia kompleksowych eksperymentów oraz samodzielnej ich analizy z wykorzystaniem nowoczesnych narzędzi, oraz sformułowania precyzyjnych wniosków z badań – zrealizowała następujące badania:
 - analizę występowania testów migoczących,
 - analizę przyczyn migotania rezultatów testów,
 - badania wpływu zastosowania modelu pojazdu na stabilność wyników testów,
 - badania zastosowania algorytmów sztucznej inteligencji do identyfikacji fałszywie negatywnych wyników testów systemów wbudowanych,
 - badania końcowe weryfikacyjne zaproponowanej metodyki testów,
- realizując doktorat wdrożeniowy wykazała się zdolnością do łączenia pracy naukowej z realiami przemysłowymi, co wymagało nie tylko wiedzy technicznej, ale także samodzielności w zarządzaniu projektem oraz współpracy z partnerami przemysłowymi.

Podsumowując można jednoznacznie stwierdzić, że Autorka wykazała się wysokim poziomem umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Znaczenie osiągniętych wyników jest istotne zarówno z perspektywy naukowej, jak i przemysłowej. Autorka dowiodła zatem nie tylko zdolności samodzielnego prowadzenia badań, ale również ich praktycznej aplikacyjności w realiach przemysłowych.

2.3. Ocena oryginalności rozwiązania problemu naukowego, zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej (Art.187 pkt.2)

Oceniana rozprawa doktorska spełnia kryterium oryginalności w zakresie rozwiązania problemu naukowego oraz zastosowania wyników badań w sferze gospodarczej. Opracowana przez Autorkę i przedstawiona w rozprawie metodyka testowania systemów wbudowanych w pojazdach łączy tradycyjne podejścia inżynierskie z innowacyjnym wykorzystaniem modeli dynamiki pojazdu i jego podzespołów oraz algorytmów sztucznej inteligencji do analizy wyników testów. Podejście to jest w mojej ocenie nowatorskie zarówno pod względem koncepcyjnym, jak i praktycznym, choć w większym stopniu w zakresie algorytmów AI natomiast w zakresie zastosowania modelu dynamiki oryginalność bardziej dotyczy praktyki przemysłowej niż w ogóle koncepcji znanej nauce. Analiza literatury w bazach naukowych (Scopus, Elsevier) w zakresie przedstawionej w rozprawie tematyki wykazuje zaledwie kilkanaście pozycji wśród, których publikacja Autorki „*Automating the Analysis of Negative Test Verdicts: A Future-Forward Approach Supported by Augmented Intelligence Algorithms*” jest wymieniana jako jedna z wskazujących przyszłościowe trendy w tym zakresie. Dlatego w szczególności należy podkreślić, że oryginalność naukowa rozprawy wynika głównie z opracowania i przetestowania ulepszonej metodyki testowania systemów wbudowanych minimalizującej problem migotania wyników testów poprzez integrację rozszerzonej inteligencji (Augmented Intelligence) a dodatkowo w praktycznym aspekcie wykorzystanie symulacji dynamiki pojazdu w środowisku testowym. W szczególności Autorka dla samodzielnie zaplanowanych eksperymentów badawczych uzyskała oryginalne i interesujące wyniki badań o praktycznej przydatności:

- **dla analizy występowania testów migoczących** - 59% wszystkich przypadków testowych wykazało cechy „migotania”, wśród których połowa charakteryzowała się „wysoką” zmiennością, (więcej niż 2 na10 okazały się negatywne), 84% negatywnych wyników wymagało szczegółowej diagnozy;
- **dla analizy przyczyn migotania rezultatów testów** – wyodrębniła i zintegrowała w analizie raportów kilka typowych źródeł anomalii: zakłócenia komunikacyjne, błędne progi tolerancji lub niewłaściwe ramy czasowe w skryptach testowych, fluktuacje parametrów fizycznych, niepełne lub niewłaściwie skonfigurowane skrypty testowe, pozostałe (interakcje między różnymi podzespołami czy ograniczenia środowiska HIL); przypisała każdemu negatywnemu wynikowi atrybuty (waga testu – blokująca, krytyczna, główna i drobna, prawdopodobieństwo – niskie, średnie wysokie, tryb – niepełny/pełny);
- **dla badania wpływu zastosowania modelu pojazdu na stabilność wyników testów** – wykazała istotny jakościowo wpływ modelu pojazdu na możliwość wykrycia defektu systemu wbudowanego i zweryfikowanie jego naprawy,
- **badania zastosowania algorytmów sztucznej inteligencji do identyfikacji fałszywie negatywnych wyników testów systemów wbudowanych** – Autorce udało się skutecznie zautomatyzować wskazywanie fałszywie negatywnych wyników oraz wyeliminować część przyczyn migotania, poprawić wskaźniki stabilności testów, zmniejszyć ilość migoczących rezultatów (poprzez automatyczne rozpoznanie ich jako fałszywie negatywne), znacząco przyspieszyć czas analizy (np. poprzez automatyczne wskazywanie nietypowych przebiegów sygnałów)
- **dla badań końcowych weryfikacyjnych zaproponowanej metodyki testów** – Autorka uzyskała zmniejszenie zjawiska migotania wyników, automatyzację rozpoznawania wyników fałszywie negatywnych, przyspieszenie analiz i ograniczenie powtórzeń testów, zwiększenie wiarygodności i poprawę stabilności, gotowość wdrożeniową metodyki wraz z jej skalowalnością.

Zastosowanie wyników sferze gospodarczej (w przedsiębiorstwie realizacji doktoratu wdrożeniowego) podkreśla potencjał wdrożeniowy metodyki, szczególnie w przemyśle motoryzacyjnym, gdzie skrócenie czasu testów, poprawa niezawodności i redukcja kosztów mają kluczowe znaczenie. Rozprawa nie tylko odpowiada na praktyczne potrzeby branży, ale również wprowadza skalowalne i modułowe rozwiązania, które mogą być adaptowane do różnych środowisk testowych. **Tym samym praca w pełni spełnia wymogi oryginalności w zakresie problematyki naukowej oraz potencjalnych zastosowań gospodarczych.**

2.4 Ocena aspektów formalnych (Art.187 pkt.3 i4)

Przedstawiona rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane tego typu pracom w kontekście ustawy, ponieważ ma formę pracy pisemnej, która łączy cechy monografii naukowej z elementami pracy wdrożeniowej. Autorka przedstawia w niej zarówno wiedzę związaną z podstawami teoretycznymi jak i praktycznymi wynikającymi z umiejscowienia jej w realiach przemysłowych, jak i oryginalną metodykę badawczą wraz z przedstawieniem, analizą i interpretacją szczegółowych wyników badań związanych z praktycznym zastosowaniem opracowanych rozwiązań w przemyśle motoryzacyjnym.

Rozprawa została przygotowana w języku polskim, a więc zgodnie z wymogami ustawowymi powinna zawierać streszczenie w języku angielskim co ma miejsce (nie numerowana strona rozprawy – wg kolejności 147 strona). Streszczenie jest dobrze skonstruowane i wyczerpująco przedstawia kluczowe aspekty rozprawy. Streszczenie w logiczny i spójny sposób podsumowuje zakres, cel oraz osiągnięcia rozprawy, choć można by je wzbogacić o bardziej precyzyjne dane liczbowe dotyczące uzyskanych wyników.

Podsumowując – zarówno wymogi odnośnie do formy pracy jak i zawartości streszczenia rozprawy w języku angielskim są spełnione.

3. UWAGI DOTYCZĄCE TREŚCI ROZPRAWY

1. Na stronie 30 w opisie wzoru 2.8 zapisano dla ΔM – „to moment wprawiający w ruch przekładnię”, czy nie jest to jednak moment obrotowy związany z oporami wprawiania w ruch przekładni mechanicznej (opory wewnętrzne układu napędowego)?
2. Na stronie 57 rozprawy przedstawiono na rys 4.6 blok „Longitudinal Vehicle” – jak model ten uwzględnia inne opory ruchu niż wzniesienia? – np. aerodynamiczne, toczenia? Model mógłby być bardziej precyzyjnie opisany – np. wprost równaniami ruchu lub czytelnik mógłby być odesłany do odpowiednich równań z rozdziału 2.3.3.
3. Na rysunkach 4.8 i 4.9 na stronach 58 i 59 przedstawiono blok modelu „High Voltage Battery” oraz przedstawiono parametry tego bloku. Jednak wyraźnie brakuje wyjaśnienia modelu matematycznego i interpretacji przedstawionych parametrów.

4. Na stronie 59 zamieszczono rys. 4.10 z informacją w tekście, iż jest to rzeczywisty sygnał zarejestrowany na magistrali CAN pojazdu elektrycznego, określający prędkość pojazdu – jednak zarówno opis w nagłówku wykresu profilu prędkości oraz jego przebieg wyraźnie odzwierciedlają standardowy cykl jezdny FTP75 a nie rzeczywisty cykl eksploatacyjny. Skąd taka zbieżność cykli lub błąd w opisie?
5. Na stronie 61 przedstawiono rysunek podpisany „Model pojazdu przygotowany do integracji z oprogramowaniem symulacyjnym”. Wydaje się, że ten podpis nie oddaje treści rysunku – sam model jest tu przedstawiony w zasadzie tylko w formie jednego bloku. Czy można lepiej opisać ten rysunek?
6. Strona 9 i 107 – częstotliwość migotania rezultatów testów zdefiniowano jako stosunek liczby negatywnych rezultatów do liczby pozytywnych rezultatów. Dlaczego nie dotyczy to np. liczby testów fałszywie negatywnych i fałszywie pozytywnych względem wszystkich testów? Czy można to bardziej szczegółowo wyjaśnić?
7. Na stronach 115 i 116 w tabelach 5.4 i 5.5 opisano kolumny nagłówkami „Krok 1” i „Krok 2” (Tab. 5.4) i „Pierwszy etap” oraz „Drugi etap” (tab. 5.5). Pojawia się niepewność ze strony czytelnika czy cały czas wyniki przedstawione w tabelach dotyczą „Kroku 1” i „Kroku 2” opisanego przed tabelą 5.4 z tą różnicą, że 5.4 dla jednego testu (Tab. 5.4 – Test ID9) a 5.5 wszystkich 20 testów przedstawionych w tabeli 5.3?
8. W rozdziale 5.3.3 przedstawiono badania wpływu zastosowanego modelu pojazdu na występowanie zjawiska migotania rezultatów testów omawiając uzyskane wyniki jakościowe. Czy możliwe jest także wskazanie ilościowego wpływu tej modyfikacji środowiska testowego? Brakuje go wyraźnie w treści pracy.
9. Czy można podać ilościowe wyniki w zakresie skrócenia czasu analizy wyników testów po zastosowaniu zmodyfikowanej metodyki testowania (uwzględniającej algorytmy sztucznej inteligencji i/lub model pojazdu) w testowaniu systemów wbudowanych?

4. UWAGI DOTYCZĄCE FORMY ROZPRAWY

1. W pracy występuje niespójność językowa w zakresie tekstu i ilustracji. Rozprawa jest napisana w języku polskim natomiast wiele rysunków zamieszczonych w tekście jest przedstawionych z opisami w języku angielskim. O ile ma to jeszcze uzasadnienie do tzw. „zrzutów ekranowych” z oprogramowania w j. angielskim to trudno uzasadnić to w odniesieniu do ilustracji np. specyfiki aplikacji systemów wbudowanych w różnych typach pojazdów. O ile w wielu przypadkach współczesny czytelnik literatury naukowej poradzi sobie ze zrozumieniem takich dwujęzycznych treści to dbałość o rozwój języka polskiego i szacunek dla czytelnika wskazywałyby jednak na celowość dostosowania ilustracji do opisów w j. polskim. Uwaga ta dotyczy np. Rys. 2.1, Rys. 2.2, Rys. 2.4, Rys. 2.5, Rys. 2.7, Rys. 2.9, Rys. 2.10.
2. Wykorzystanie „zrzutów ekranowych” z oprogramowania w języku angielskim z dodatkowo zastosowanymi skrótami utrudnia zrozumienie ich treści i wykorzystanie jako elementu wspomagającego zrozumienie treści pracy odwołującej się do takiego rysunku - np.:
 - Rys. 4.2 - utrudnia zrozumienie specyfikacji scenariuszy testowych.
 - Rys. 4.12 – rysunek powinien ilustrować i objaśniać tekst rozprawy ale skrótowe opisy bloków pozostawiają wiele niedomówień,
 - Rys. 4.16 – rysunek zamiast wyjaśniać tekst rozprawy wzbudza ciekawość co do szczegółów poszczególnych testów,
 - Rys. 4.17, Rys. 4.18, 4.22 - trudno interpretować treść przedstawioną na rysunku – brak szczegółowego wyjaśnienia w tekście a treść na rysunku nie do końca jest czytelna,
 - Rys. 4.30 – bardzo istotny z punktu widzenia osiągnięć pracy – mógłby być stworzony w czytelniejszej formie i po polsku – w obecnej jest mało czytelny i utrudnia zrozumienie jego treści.
3. Nie wszystkie rysunki są dostatecznie jasne same w sobie lub nie do końca jasno opisane w tekście, np.:
 - Rys. 4.24 – o brak jakich zmian chodzi – sygnał nie jest linią prostą, więc jego wartości są zmienne.
 - Rys. 4.25, 4.26 – nie widać czasu t_2 ,
4. W pracy występują drobne błędy lub niejasności terminologiczne, np.:
 - str. 11 - termin „**efektywność paliwowa**” wydaje się być kalką z angielskiego terminu „**fuel efficiency**”, w polskim języku technicznym i naukowym bardziej właściwym terminem będzie „**sprawność energetyczna**”,
 - str. 15 – „Rada Unii Europejskiej przyjęła rozporządzenie Euro 7, ustanawiające nowe przepisy o limitach **transmisji dla samochodów.**” Chyba chodziło o „**emisję**”?
 - str.16 - Co oznacza termin **Elektryczna skrzynia biegów**? Przedstawiona definicja nie wydaje się być prawidłowa.
 - str. 16 - Czy konieczne jest użycie sformułowania **termiczny układ chłodzenia**?

5. Forma opisu planu badań weryfikacyjnych (Rozdział 5.1, str. 100) w gotowej rozprawie w opinii recenzenta powinna być formą czasu przeszłego i trybu dokonanego – rozprawa ma formę dokumentacji dokonań a nie ich planu czy zamierzeń.
6. Niektóre opisy w tabelach wymagają domyslenia się ich znaczenia, np.: Tab. 4.4 - niejasne nagłówki wierszy - pewnie chodzi o: TP (True Positive) – Prawdłowo pozytywne, TN (True Negative) – Prawdłowo negatywne...itd...?

5. PODSUMOWANIE KOŃCOWE I WNIOSEK RECENZENTA

Dokładna analiza dysertacji mgr inż. Anny Gnacy-Gajdzik pt. „Opracowanie metodyki tworzenia zautomatyzowanych testów systemów wbudowanych w pojazdach samochodowych, umożliwiającej weryfikację poprawności wyników z wykorzystaniem algorytmów rozszerzonej inteligencji” pozwala stwierdzić, iż **stanowi ona wartościowy naukowo, oryginalny wkład w rozwój metod testowania systemów wbudowanych w branży motoryzacyjnej**. Przedstawiona metodyka łączy podejścia klasyczne (inżynieria oparta na modelach, automatyzacja) z zastosowaniem nowoczesnych algorytmów sztucznej inteligencji. Rezultatem jest uzyskanie wiedzy na temat możliwości usprawnienia testowania systemów wbudowanych w pojazdach samochodowych – skrócenie czasu testów poprzez m.in. zmniejszenie zjawiska „migotania” wyników testów, poprawę skuteczności wykrywania anomalii i zwiększenie wiarygodności całego procesu testowania. Zawarte w pkt. 3 uwagi do treści rozprawy nie mają charakteru podważającego uzyskane wyniki – są prośbą o dodatkowe wyjaśnienia lub skorygowanie drobnych niejasności. Uwagi co do formy zawarte w pkt 4 recenzji, są raczej drobne i nie obniżają znacząco wysokiej jakości redakcyjnej rozprawy.

Podsumowując, to co zostało szczegółowo wykazane w pkt. 2 niniejszej recenzji, rozprawa mgr inż. Anny Gnacy-Gajdzik pt. „Opracowanie metodyki tworzenia zautomatyzowanych testów systemów wbudowanych w pojazdach samochodowych, umożliwiającej weryfikację poprawności wyników z wykorzystaniem algorytmów rozszerzonej inteligencji” **spełnia wszystkie wymagania określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 poz. 1668 z późn. zm.), tj.:**

- **prezentuje rozległą wiedzę teoretyczną oraz praktyczną Autorki** w dyscyplinie inżynieria mechaniczna w zakresie budowy, działania i testowania systemów sterowania w pojazdach samochodowych oraz wiedzę interdyscyplinarną powiązaną z tym obszarem,
- **potwierdza umiejętność samodzielnego definiowania problematyki badań naukowych, ich prowadzenia oraz analizowania i interpretacji ich wyników,**
- **stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego** w postaci opracowania i przebadania zintegrowanej metodyki testowania systemów wbudowanych, z zastosowaniem algorytmów rozszerzonej inteligencji oraz modelu dynamiki pojazdu w środowisku testowym,
- **spełnia wymogi formalne** w zakresie posiadania formy monografii naukowej opatrzonej streszczeniem w j. angielskim.

W związku z powyższym **wnioskuję o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie mgr inż. Anny Gnacy-Gajdzik do publicznej obrony** przed Radą Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej, rekomendując **nadanie stopnia doktora** w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

Poznań, 23.12.2024

dr hab. inż. Grzegorz Ślaski, prof. PP