

Warszawa, 4 marca 2026

prof. dr hab. inż. Roman Szewczyk

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP

Al. Jerozolimskie 202, 02-486 Warszawa

email: roman.szewczyk@piap.lukasiewicz.gov.pl

Recenzja pracy doktorskiej pt.:

„Testowanie funkcjonalne złożonych systemów wbudowanych”

Autor: mgr inż. Rafał Kimla

Promotor: dr hab. inż. Robert Czerwiński, prof. PŚ

przewodzonej na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej

1. Wstęp

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Rafała Kimli została wykonana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Śląskiej, Pana dr hab. inż. Adama Gałuszki z dnia 7 stycznia 2025 roku.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy, ocena tematu i celu pracy

Przedstawiona praca doktorska została zrealizowana w ramach Programu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego pt. „Doktorat wdrożeniowy IV”, finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (nr grantu DWD/4/21/2020–76/003). Z tego względu, zgodnie z założeniami Programu, praca doktorska ma charakter aplikacyjny i była realizowana we współpracy z firmą Rockwell Automation, w której przeprowadzono wdrożenie rozwiązań opracowanych w ramach rozprawy.

Rozprawa doktorska koncentruje się wokół zagadnień testowania systemów wbudowanych (ang. embedded systems). W pracy skoncentrowano się na wdrożeniu ulepszanego postępowania testowego, realizowanego w warunkach przemysłowych. Zaproponowane postępowanie testowe systemów wbudowanych zakłada uzyskanie ilościowo zdefiniowanych parametrów jakościowych, przy zapewnieniu zachowania ograniczeń czasowych, technicznych i organizacyjnych. Wobec powyższego tematyka rozprawy doktorskiej jednoznacznie wpisuje się w obszar dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Obejmuje ona zagadnienia z zakresu elektroniki (w zakresie systemów

wbudowanych) oraz automatyki (w zakresie automatyzacji przemysłowego procesu testowania systemów).

W pracy Doktorant w sposób jasny i jednoznaczny sformułował trzy główne cele badawcze:

1. ocena strategii testowania opartej na ryzyku oraz wpływu stopnia automatyzacji testów na efektywność kampanii testowych,
2. analiza wpływu testowania opartego na doświadczeniu, a w szczególności testów eksploracyjnych, na liczbę oraz istotność wykrytych defektów,
3. identyfikacja czynników organizacyjnych i technicznych sprzyjających szybkiej adaptacji nowych strategii testowania w zespołach rozproszonych.

Należy podkreślić, że zagadnienia testowania systemów wbudowanych (często realizowanego przez interdyscyplinarne, międzynarodowe zespoły rozproszone) są aktualnie intensywnie rozwijane przez znaczące ośrodki naukowe na świecie, takie jak Uniwersytet w Insbrucku oraz VTT Technical Research Centre w Finlandii. Są one także przedmiotem zainteresowania koncernów przemysłowych szeroko zaangażowanych w testowanie systemów wbudowanych stosowanych w branży motoryzacyjnej, medycznej oraz w zakresie automatyki konsumenckiej. Wobec powyższego stwierdzam, że tematyka rozprawy dotyczy zagadnienia ważnego dla nauk inżynieryjno-technicznych oraz niewątpliwie aktualnego.

Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że opracowane w ramach pracy doktorskiej rozwiązanie w zakresie testowania układów wbudowanych zostało wdrożone komercyjnie w firmie Rockwell Automation. Stanowi to walidację praktyczną opracowanego w ramach pracy doktorskiej rozwiązania i potwierdza, że zrealizowano z powodzeniem założenia Programu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego pt. „Doktorat wdrożeniowy IV”.

3. Merytoryczna ocena pracy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska obejmuje pięć rozdziałów merytorycznych.

W rozdziale drugim Doktorant dokonał analizy literatury i omówił podstawowe pojęcia z zakresu teorii testowania systemów wbudowanych. Przegląd literatury jest kompletny i adekwatny do zakresu podejmowanych w pracy zagadnień. Uprzejmie proszę jednak, aby Doktorant w trakcie obrony omówił następujące zagadnienia:

- a) W przeglądzie nie doprecyzowano, czy analiza zastosowania dużych modeli językowych dotyczy zastosowania tych modeli w systemach wbudowanych, czy też zastosowania tych modeli do testowania systemów wbudowanych. Uprzejmie proszę o wyjaśnienie tego zagadnienia oraz omówienie, jak zmienił się, od czasu dokonania przeglądu, potencjał zastosowania dużych modeli językowych do testowania systemów wbudowanych (w pracy Doktorant odnosi się do modelu CHAT GPT 3.5).

- b) Zagadnienie wpływu badań na certyfikację omówiono w przeglądzie w sposób pobieżny. Uprzejmie proszę o doprecyzowanie, jak realizowany jest w praktyce proces zmian procedur testowych na skutek przeprowadzonych badań.
- c) W przeglądzie szczegółowo omówiono kolejne metody testowania. Jednak uprzejmie proszę o wskazanie w trakcie obrony kluczowych osiągnięć innych autorów w zakresie wykorzystania metod testów hybrydowych, kluczowych z punktu widzenia pracy.

W rozdziale trzecim rozprawy omówiono metodykę badań oraz plan eksperymentów. Zaproponowano także metryki stosowane w ocenie testów i systemów. O ile poszczególne metody testowania zaproponowane w rozprawie są znane i opisane w literaturze, istotą nowości pracy jest połączenie tych metod w nową, spójną całość (określaną w pracy jako „hybrydowy framework testowy”) i wdrożenie tego rozwiązania w praktyce. Stwierdzam, że zaproponowane podejście do metody badań w rozprawie doktorskiej jest w pełni zgodne z założeniami programu „Doktorat Wdrożeniowy IV”.

W rozdziale trzecim wprost przedstawiono tezę pracy: „Zastosowanie hybrydowego frameworku testowego, opartego na synergii deterministycznej automatyzacji, systematycznej analizy ryzyka, atomizacji przypadków testowych oraz usystematyzowanego testowania eksploracyjnego, pozwala na mierzalną optymalizację procesu weryfikacji złożonych systemów wbudowanych, wyrażoną przez statystycznie istotne podniesienie wartości metryk jakościowych — w szczególności gęstości defektów FD i współczynnika efektywności testów TER — w stosunku do tradycyjnych, monolitycznych strategii testowych”. Świadczy to o konserwatywnym podejściu zarówno Doktoranta jak i Promotora do struktury pracy doktorskiej w obszarze nauk inżynieryjno-technicznych, szczególnie w przypadku pracy o ściśle aplikacyjnym charakterze, realizowanej w ramach Programu „Doktorat Wdrożeniowy IV”. Należy jednak zauważyć, że Doktorant nie wskazał wprost, które wyniki przedstawione w pracy potwierdzają poszczególne części składowe tezy. Deklaracja potwierdzenia tezy badawczej znajduje się w podsumowaniu pracy. Deklaracja ta, co do istoty tezy badawczej, nie budzi zastrzeżeń. Jednak uprzejmie proszę, aby w trakcie obrony Doktorant przedstawił wprost potwierdzenie tezy postawionej w pracy.

W rozdziale czwartym omówiono przyjętą strategię testowania i wyniki badań. Jest to kluczowy rozdział pracy, potwierdzający najważniejsze elementy nowości uzyskane w ramach doktoratu wdrożeniowego: opracowanie oryginalnej, siedmiokrokowej procedury testowania eksploracyjnego w systemach wbudowanych. Zaproponowana metoda testowania zapewnia także uwzględnienie ryzyka związanego z obecnością błędów w systemie poprzez uwzględnienie iloczynu prawdopodobieństwa i konsekwencji ryzyka oraz wykorzystuje automatyczną generację przypadków testowych z plików w formacie JSON. W rozdziale tym Doktorant wskazał, że zastosowana strategia testowania uzyskała wysoką efektywność detekcji błędów (defektów), zwłaszcza w odniesieniu do projektu Oscar. Równocześnie Doktorant na stronie 92 (w podsumowaniu) wskazuje, że projekty Oscar i Lima, dotyczyły nowych produktów, a więc produktów w których może występować więcej błędów, co ułatwia ich detekcję. Uprzejmie proszę o wyjaśnienie tej nieścisłości w trakcie obrony.

Należy jednak podkreślić, że zaproponowana procedura testowania została opublikowana w czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym: Kimla R, Czerwinski R. A Methodical Approach to Functional Exploratory Testing for Embedded Systems. Applied Sciences. 2022; 12(19):10016. <https://doi.org/10.3390/app121910016>, IF=2.5. Publikacja ta, na chwilę obecną została zacytowana 3 razy. Świadczy to o dobrym odbiorze publikacji przez międzynarodowe środowisko naukowe.

W rozdziale piątym Doktorant omówił proces wdrożenia i optymalizacji procesu testowania. Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że w wyniku realizacji pracy doktorskiej w firmie Rockwell Automation zastąpiono wewnętrznie rozwijane, graficzne środowisko Test Automation Framework (TAF), oprogramowaniem napisanym w języku Python, implementującym zaproponowane rozwiązania. W rozdziale tym omówiono kryteria stabilności testów automatycznych i formalne kryteria kwalifikacji testów do puli regresyjnej oraz proces budowy ram postępowania testowego. Doktorant wskazał, że opracowane rozwiązanie zostało uznane za wytyczne procesowe i wdrożone jako standard w przedsiębiorstwie. Ponieważ przedstawione w rozprawie doktorskiej procesy testowania w ramach rzeczywistych projektów są z oczywistych powodów praktycznych ograniczone co do liczby, uprzejmie proszę aby w trakcie obrony Doktorant wyjaśnił, czy po zakończeniu prac opisanych w rozprawie doktorskiej, opracowane rozwiązania były wykorzystywane w firmie Rockwell Automation i z jakim rezultatem.

W rozdziale szóstym Doktorant przedstawił spójne i jasne podsumowanie zrealizowanych prac. Pytania budzi jednak kwestia kierunków dalszych badań, w szczególności związanych z gwałtownie rozwijającymi się zastosowaniami sztucznej inteligencji. Uprzejmie proszę, aby w trakcie obrony Doktorant wyjaśnił, jak gwałtowny rozwój sztucznej inteligencji (obserwowany w trakcie ostatnich 12 miesięcy) może wpłynąć na badania i prace rozwojowe w zakresie testowania systemów wbudowanych.

Należy podkreślić, że przedstawione w recenzji uwagi mają charakter uzupełniający. Nie zmieniają one mojej wysokiej oceny wartości merytorycznej i aplikacyjnej przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej. Wysoką ocenę potwierdza obiektywnie fakt wdrożenia wyników pracy w Rockwell Automation, wiodącym przedsiębiorstwie z branży automatyki przemysłowej.

4. Ocena redakcyjnej strony rozprawy

Rozprawa doktorska została przygotowana w sposób zgodny z dobrymi praktykami edycyjnymi, a jej struktura jest poprawna i typowa dla prac w obszarze nauk inżyniero-technicznych. Jednak Doktorant nie ustrzegł się uchybień językowych i redakcyjnych, które zapewne wynikają z pośpiechu towarzyszącego typowo przygotowywaniu rozpraw doktorskich w ramach programu „Doktorat Wdrożeniowy”. Uchybienia te nie obniżają jakości naukowej pracy, lecz utrudniają jej lekturę. W szczególności:

- używane w pracy określenie „systemy na czipie” jest kalką z języka angielskiego. W języku polskim raczej mówimy o układach scalonych, a określenie czip dotyczy raczej układów RFID, przeznaczonych do identyfikacji,
- podane na stronie 7 pracy przewidywanie wdrożenia w roku 2025 technologii 2 nm jest zbyt optymistyczne. Należy raczej mówić o rozpoczęciu wdrażania produkcji masowej w tym zakresie,
- nie jest jasne, kiedy w pracy Autor ma na myśli wykrywanie błędów, a kiedy defektów. Defekty dotyczą raczej niepoprawnie działających, poszczególnych sztuk układów wbudowanych, a błędy mają charakter powtarzalny (związany np. z błędami w oprogramowaniu),
- określenie „wydanie produktu” ma charakter slangowy,
- w pracy dokonano anonimizacji analizowanych projektów poprzez ich pseudonimizację. Określenie „kryptonim” dotyczy raczej oznaczeń o charakterze wojskowym, konspiracyjnym lub wywiadowczym,
- użyte na stronie 93 i innych stronach pracy określenie „reuzżywalny” (i jego pochodne) jest wątpliwe z punktu widzenia języka polskiego, i nie powinno być używane w rozprawie doktorskiej,
- rysunek 3.1 jest poprawny merytorycznie, lecz bardzo trudny do zrozumienia w trakcie lektury pracy. Ponadto jego podpis jest niejasny.

Pomimo wskazanych powyżej, drobnych uchybień edycyjnych, należy podkreślić, że Doktorant w sposób ścisły operuje w pracy definicjami, terminologią naukową oraz specjalizowanym nazewnictwem fachowym. Jest to bardzo ważne w odniesieniu do prac w dziedzinie nauk technicznych i potwierdza dojrzałość Doktoranta.

5. Wniosek końcowy

Podsumowując szczegółową część opinii o rozprawie Pana mgr. inż. Rafała Kimli stwierdzam, że:

- Zagadnienie naukowe podjęte przez Doktoranta mieści się w obszarze dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, jest aktualne oraz zostało sformułowane w sposób jasny i jednoznaczny.
- Cele przedstawione w pracy zostały przez Doktoranta osiągnięte, a teza pracy potwierdzona. Realizacja założonych celów pracy doktorskiej stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w zakresie dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

- Realizując pracę Doktorant wykazał się zaawansowaną wiedzą o charakterze specjalistycznym oraz teoretyczną wiedzą ogólną w obszarze dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.
- Wyniki prac opisanych w rozprawie doktorskiej poszerzają stan wiedzy w zakresie rozwoju metod testowania systemów wbudowanych, co potwierdza także umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta.
- Opracowane w ramach pracy doktorskiej rozwiązanie w zakresie testowania systemów wbudowanych zostało wdrożone komercyjnie w firmie Rockwell Automation, co stanowi praktyczną walidację opracowanego w ramach pracy doktorskiej rozwiązania. Potwierdza także, że zrealizowano z powodzeniem założenia Programu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego pt. „Doktorat wdrożeniowy IV”.
- Wyniki przedstawione w rozprawie doktorskiej zostały opublikowane w czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym, znaczącym współczynniku wpływu ($IF = 2.5$) i wysokiej punktacji na liście Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Publikacja została trzykrotnie zacytowana w literaturze światowej. Potwierdza to w sposób niezależny wysoką jakość naukową publikacji związanej z rozprawą doktorską.

Stwierdzam, iż rozprawa Pana mgr. inż. Rafała Kimli spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określonym w art. 187 ust. 1 i ust. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz.U. z 2018 poz. 1668 z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.