

dr hab. inż. Marcin WACHOWSKI, prof. WAT
Wydział Inżynierii Mechanicznej
Wojskowa Akademia Techniczna
ul. S. Kaliskiego 2
00-908 Warszawa

Warszawa, dn. 21.02.2026 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Veroniki KHARINA

**pt. „Algorytm oceny złączy kablowych M12 pod kątem mechanicznym i elektrycznym:
analiza cyklicznych obciążeń, siły zrywania oraz powłok galwanicznych”**

Podstawę formalną wykonania recenzji stanowiło pismo Rektora Politechniki Opolskiej Pana dr. hab. inż. Marcina Lorenca, nr RR/1111/2025 z dnia 12 grudnia 2025 r.

1. Wstęp

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska Pani mgr inż. Veroniki Khariny podejmuje problematykę z zakresu niezawodności połączeń elektrycznych stosowanych w systemach automatyki przemysłowej. Tematyka ta mieści się w obszarze badań prowadzonych na styku elektrotechniki oraz inżynierii mechanicznej i dotyczy elementów infrastruktury technicznej o istotnym znaczeniu dla funkcjonowania współczesnych systemów przemysłowych. Przedmiotem analiz są złącza kablowe typu M12, które stanowią jeden z podstawowych standardów połączeń elektrycznych wykorzystywanych w automatyce, robotyce oraz systemach komunikacji przemysłowej. Elementy te pracują często w trudnych warunkach eksploatacyjnych, narażone są na oddziaływania mechaniczne, zmienne warunki środowiskowe oraz długotrwałe obciążenia eksploatacyjne, co może prowadzić do degradacji właściwości elektrycznych i mechanicznych połączeń. Z tego względu zagadnienia związane z oceną jakości oraz trwałości tego typu komponentów stanowią istotny problem badawczy zarówno z punktu widzenia nauki, jak i praktyki przemysłowej. W recenzowanej rozprawie Doktorantka podjęła próbę kompleksowego ujęcia problemu oceny złączy kablowych poprzez uwzględnienie zarówno aspektów mechanicznych, elektrycznych jak i materiałowych, w tym wpływu powłok galwanicznych na trwałość kontaktów elektrycznych. Takie podejście ma charakter interdyscyplinarny i pozwala na bardziej pełne zrozumienie mechanizmów degradacji połączeń elektrycznych w warunkach rzeczywistej eksploatacji. Jednocześnie wskazuje ono na

potrzebę opracowania metod oceny, które uzupełniają tradycyjne procedury testowe oparte na pojedynczych parametrach.

Z tego względu podjęcie przez Doktorantkę w recenzowanej rozprawie doktorskiej próby opracowania algorytmu oceny złączy kablowych M12 pod kątem mechanicznym i elektrycznym uważam za w pełni uzasadnioną inicjatywę.

2. Charakterystyka pracy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Veroniki Khariny składa się z 7 rozdziałów, przy czym numer rozdziału przypisano również *Bibliografii* zawierającej 130 pozycji prac, na które Doktorantka powołała się w tekście oraz *Załącznikom* zamykającym opracowanie.

Praca na 193 stronach jest bogato ilustrowana rysunkami przedstawiającymi w głównej mierze konstrukcje i klasyfikacje złączy kablowych M12, schematy stanowisk badawczych oraz wizualizację wyników analiz eksperymentalnych. Łącznie w rozprawie zamieszczono 79 rysunków i 46 tabel.

W trójstronicowym *Wprowadzeniu*, poprzedzonym wykazem najważniejszych skrótów i akronimów, Doktorantka w zwięzły sposób opisuje kontekst naukowy podjętej problematyki oraz uzasadnia celowość prowadzenia badań nad oceną właściwości mechanicznych i elektrycznych złączy kablowych typu M12.

Kolejny rozdział rozprawy, liczący 62 strony, stanowi przegląd aktualnego stanu wiedzy dotyczącego zagadnień związanych z budową, właściwościami oraz niezawodnością złączy kablowych typu M12. Doktorantka, w oparciu o 126 pozycji literaturowych, przedstawia w nim charakterystykę konstrukcji złączy, ich klasyfikację oraz obszary zastosowań w systemach automatyki przemysłowej. Szczególną uwagę poświęciła analizie parametrów mechanicznych i elektrycznych połączeń, a także zagadnieniom związanym z materiałami stosowanymi na elementy stykowe oraz powłoki galwaniczne. W rozdziale omówiła również mechanizmy powstawania oporu stykowego, wpływ chropowatości powierzchni oraz oddziaływanie czynników eksploatacyjnych, takich jak obciążenia mechaniczne, korozja czy procesy degradacyjne. Przedstawiony przegląd literatury stanowi wprowadzenie do problematyki badawczej podjętej w pracy i uzasadnia potrzebę prowadzenia dalszych badań w zakresie kompleksowej oceny jakości złączy kablowych.

Wyniki przeprowadzonej analizy danych literaturowych oraz sprecyzowane we wstępie uzasadnienie konieczności podjęcia prac nad opracowaniem algorytmu oceny jakości złączy kablowych typu M12 stanowiły podstawę do sformułowania hipotez badawczych i określenia

celu rozprawy, które stanowią podstawę realizacji części eksperymentalnej rozprawy. Za cel pracy przyjęto zbadanie kontaktów elektrycznych z galwaniczną powłoką cynową, poznanie zjawiska rezystancji przejścia, zbadanie efektów starzeniowych i określenie czynników wpływających na rezystancje przejścia, w tym wpływu temperatury na wybraną powłokę cynową. Celem rozprawy jest także opracowanie kompleksowego podejścia do oceny jakości i trwałości przemysłowych połączeń kontaktowych, uwzględniającego zarówno czynniki mechaniczne, jak i elektryczne. Doktorantka w rozdziale określa zakres prowadzonych badań oraz wskazuje główny problem badawczy związany z oceną jakości i niezawodności złączy kablowych typu M12. Założyła, że cel rozprawy zostanie osiągnięty w wyniku realizacji ściśle określonego i wypunktowanego zakresu prac teoretycznych i doświadczalnych obejmujących analizę wpływu cyklicznych obciążeń mechanicznych (symulowanych poprzez 100 cykli łączenia w postaci modyfikowanej wersji pomiaru) na jakość połączenia kontaktowego, pomiar siły zrywania połączeń zaciskowych zgodnie z obowiązującymi normami oraz analizę wpływu rodzaju zastosowanej powłoki galwanicznej na stabilność parametrów elektrycznych kontaktu. Do osiągnięcia celu zaplanowano wykorzystanie zaawansowanej metody diagnostycznej polegającej na klasycznym pomiarze rezystancji metodą czteroprzewodową z modyfikacją przez degradowanie materiału z użyciem metod 85/85 + soak i szoków termicznych. Przedstawione hipotezy odnoszą się do możliwości kompleksowej oceny tych złączy na podstawie analizy wybranych parametrów mechanicznych i elektrycznych, w szczególności odporności na cykliczne obciążenia mechaniczne, siły zrywania złączy oraz zmian parametrów elektrycznych wynikających z właściwości materiałowych i zastosowanych powłok galwanicznych. Tak sformułowany cel pracy oraz przyjęte hipotezy stanowią logiczną konsekwencję przeprowadzonego przeglądu literatury i wyznaczają kierunek dalszych badań przedstawionych w rozprawie.

Rozdział czwarty, zatytułowany „*Część praktyczna – metodyka badań i analiza wyników*”, stanowi najobszerniejszą i jednocześnie merytorycznie najważniejszą część rozprawy. Doktorantka zawarła w nim zarówno opis metodyki badawczej i wykorzystywanej aparatury pomiarowej, jak również prezentację uzyskanych wyników badań oraz ich analizę. Takie rozwiązanie kompozycyjne należy jednak ocenić krytycznie. Połączenie w jednym rozdziale trzech zasadniczych elementów postępowania naukowego - metodyki badań, wyników oraz ich interpretacji - obniża przejrzystość struktury pracy i utrudnia jej odbiór. Przyjęty układ powoduje, że czytelnik nie zawsze otrzymuje wyraźne rozgraniczenie pomiędzy opisem zastosowanych procedur badawczych, prezentacją materiału wynikowego a jego analizą. W ocenie recenzenta korzystniejsze byłoby wyodrębnienie osobnych rozdziałów

poświęconych odpowiednio metodyce badań, wynikom eksperymentalnym oraz ich dyskusji, co nadałoby rozprawie bardziej uporządkowany i przejrzysty charakter.

W rozdziale czwartym Doktorantka przedstawia wyniki badań eksperymentalnych dotyczących właściwości mechanicznych i elektrycznych złączy kablowych typu M12. Program badawczy obejmował trzy główne testy: próbę siły zrywania połączenia zgodnie z normą DIN EN 60352-2, test cyklicznego łączenia i rozłączania złącza (100 cykli) z kontrolą zmian rezystancji oraz badania stabilności rezystancji kontaktowej metodą czteroprzewodową (Kelvina), uzupełnione o testy starzeniowe w warunkach 85/85 oraz szoków termicznych. Badania stabilności rezystancji kontaktowej metodą czteroprzewodową wykonano na 15 próbkach złączy M12 (60 połączeń zaciskowych), co pozwoliło na porównanie wpływu rodzaju powłoki galwanicznej (Au, Ag, Sn, brak powłoki) oraz geometrii zacisku na parametry mechaniczne i elektryczne połączeń. Na podstawie uzyskanych wyników Doktorantka opracowała algorytm decyzyjny integrujący trzy parametry oceny: stabilność rezystancji (R), siłę zrywania (F) oraz trwałość cykliczną (C). Zastosowanie algorytmu pozwoliło na jednoznaczną klasyfikację złączy – przykładowo złącza z powłoką złotą o grubościach 0,4 μm i 0,2 μm zostały zakwalifikowane jako spełniające wymagania jakościowe, natomiast złącza bez powłoki lub z powłoką cynową uzyskały wynik negatywny ze względu na niestabilność rezystancji kontaktowej. Jednocześnie sposób prezentacji wyników w tej części pracy budzi pewne zastrzeżenia. W rozdziale zamieszczono liczne tabele i ilustracje, jednak nie wszystkie zostały w pełni przeanalizowane w tekście. Dodatkowo pojawiają się wyniki badań sugerujące zastosowanie metod takich jak tomografia komputerowa, bez jednoznacznego opisu ich metodyki, co utrudnia ocenę kompletności przeprowadzonej analizy.

Ostatni rozdział rozprawy, zatytułowany „*Podsumowanie i wnioski*”, zawiera syntetyczne zestawienie najważniejszych rezultatów uzyskanych w trakcie realizacji pracy oraz ich odniesienie do postawionego celu i hipotez badawczych. Doktorantka podsumowuje w nim wyniki badań dotyczących wpływu rodzaju powłok galwanicznych, geometrii procesu zaciskania oraz warunków eksploatacyjnych na parametry mechaniczne i elektryczne złączy kablowych typu M12. Wskazała, że zarówno właściwości materiałowe powłok kontaktowych, jak i parametry technologiczne procesu zaciskania mają istotny wpływ na stabilność rezystancji przejścia oraz trwałość połączeń elektrycznych. W rozdziale odniosła się również do opracowanego algorytmu oceny jakości złączy, który umożliwia integrację wyników testów mechanicznych i elektrycznych w ramach jednej procedury klasyfikacyjnej. Doktorantka wskazuje możliwości zastosowania zaproponowanego rozwiązania w systemach kontroli jakości oraz diagnostyce elementów infrastruktury połączeniowej w automatyce przemysłowej.

Rozdział ma charakter podsumowujący i porządkujący, syntetycznie zamykając tok rozważań przedstawionych w rozprawie.

3. Ocena rozprawy

Oceniając przedłożoną do recenzji rozprawę należy podkreślić aktualność podjętej tematyki badawczej. Doktorantka zajęła się problematyką oceny jakości i niezawodności złączy kablowych typu M12, które stanowią ważny element infrastruktury połączeniowej w systemach automatyki przemysłowej i transmisji danych. Zagadnienie to ma duże znaczenie praktyczne, ponieważ niezawodność takich komponentów wpływa bezpośrednio na stabilność pracy całych systemów technicznych. Na pozytywną ocenę zasługuje również interdyscyplinarny charakter pracy, łączący zagadnienia z zakresu inżynierii materiałowej, mechanicznej i elektrotechniki. Rozprawa zawiera rozbudowany przegląd literatury dotyczącej budowy i parametrów technicznych złączy M12 oraz mechanizmów degradacji styków elektrycznych, co stanowi dobre wprowadzenie do dalszych badań. Istotnym elementem rozprawy jest przeprowadzenie programu badań eksperymentalnych. Zebrany materiał badawczy jest stosunkowo obszerny i został zaprezentowany w formie licznych tabel, wykresów oraz dokumentacji fotograficznej. Na uwagę zasługuje także próba opracowania algorytmu umożliwiającego kompleksową ocenę jakości złączy na podstawie kilku parametrów diagnostycznych. Zaproponowane rozwiązanie stanowi interesującą próbę integracji wyników badań mechanicznych i elektrycznych i może mieć potencjalne znaczenie aplikacyjne w systemach kontroli jakości.

Pomimo interesującej i aktualnej tematyki rozprawy oraz dużego nakładu pracy eksperymentalnej, przedstawiona praca zawiera szereg uchybień o charakterze zarówno redakcyjnym, jak i merytorycznym. Część z nich utrudnia odbiór pracy i obniża jej przejrzystość, a niektóre budzą również wątpliwości dotyczące spójności metodologicznej przedstawionych badań. Uwagi obszaru merytorycznego przedstawiono poniżej:

- Główna uwaga dotyczy niespójności pomiędzy sformułowanym celem pracy a zakresem przeprowadzonych badań. W opisie celu pracy Doktorantka wskazała, że obszarem analizy będą jedynie powłoki cynowe, natomiast w części eksperymentalnej przedstawiła wyniki badań również dla powłok złotych i srebrnych, co zostało potwierdzone na stronie 74 w zdaniu: „*Do badań wybrano złącza wiodących producentów branżowych, różniące się powłoką galwaniczną (cynowanie, złocenie, srebrzenie)*”.
- Opis metodyki badań jest niewystarczający. Informacja o tym, że do badań wybrano złącza M12 w wersji A-coded (4-pole), wykorzystywanych w aplikacjach przemysłowych do przesyłania sygnałów cyfrowych oraz analogowych wiodących producentów różniące się

powłoką galwaniczną, jest zbyt ogólna i nie pozwala na jednoznaczną identyfikację badanych komponentów. Na stronie 74 Doktorantka podaje jedynie ogólną informację o wyborze złączy różnych producentów, bez szczegółowej charakterystyki ich konstrukcji, parametrów elektrycznych czy materiałowych.

- W części teoretycznej (strona 11: „*Konstrukcyjnie złącza te oferowane są w wielu wariantach – różniących się liczbą i rodzajem styków (2 do 12), sposobem kodowania, typem połączenia kablowego (zacisk, lut, IDC), kierunkiem wyprowadzenia (proste, kątowe), materiałem korpusu (metalowy, plastikowy, hybrydowy) oraz parametrami szczelności (IP67, IP68, IP69K)*”) Doktorantka wskazała, że złącza M12 występują w wielu wariantach konstrukcyjnych, natomiast w metodyce badań nie podała szczegółowych informacji, jakie dokładnie warianty zostały wykorzystane w eksperymencie.
- Zauważalna liczba tabel i rysunków przedstawiających wyniki badań nie została omówiona w tekście. W wielu przypadkach dane eksperymentalne pozostają jedynie w formie ilustracyjnej, bez pogłębionej interpretacji, co osłabia wartość analityczną tej części pracy. Przykładem są tabele z wynikami pomiarów rezystancji przedstawione w podrozdziale 4.4.1, które nie zostały poddane szczegółowej interpretacji.
- W pracy występują także powtórzenia całych fragmentów tekstu pomiędzy rozdziałami, przy czym w niektórych przypadkach zmieniono dodatkowo cytowania literaturowe. Taka praktyka budzi wątpliwości co do poprawności zastosowanych odniesień bibliograficznych. Przykładowo, na stronie 25 wielowierszowy fragment tekstu rozpoczynający się od słów „*Pierwszym źródłem...*” i kończący „*...właściwości materiałów [84].*” został niemal w całości powtórzony w rozdziale 2.3, przy czym zastosowano inne cytowania literaturowe. Powtórzenie fragmentów tekstu występuje także przy opisie dotyczącym krzywej Wöhlera: „*Jedną z podstawowych metod jest analiza krzywej Wöhlera, która przedstawia zależność pomiędzy amplitudą naprężeń a liczbą cykli do zniszczenia materiału. Dla wielu metali wykres ten posiada charakterystyczną granicę zmęzeniową, poniżej której materiał może wytrzymać nieskończoną liczbę cykli bez uszkodzeń*”. Fragment ten, ze strony 59, został niemal identycznie powtórzony na stronie 60.
- Na stronie 81 Doktorantka opisuje testy cykliczne zgodne z normami IEC 60512, DIN EN 60352-2 i IEC 61076, wskazując, że liczba cykli zależy od zastosowania złącza. W pracy nie wskazano jednak, dla jakiej konkretnej aplikacji przemysłowej przeznaczone

są analizowane złącza M12, przez co brak jest precyzyjnego wyjaśnienia powodu wyboru 100 cykli w testach cyklicznego łączenia i rozłączania złącza.

- W tabeli 4.2 przedstawiono warunki badań, jednak nie wskazano, czy zostały one przyjęte na podstawie konkretnej normy lub standardu badawczego.
- W wynikach badań pojawiają się obrazy tomografii komputerowej (CT) np. rys. 4.5.6, natomiast w części metodycznej brak jest opisu zastosowanej aparatury, parametrów pomiarowych oraz procedury wykonania badań tomograficznych. Utrudnia to ocenę poprawności przeprowadzonej analizy.

Pewne uwagi budzą też liczne niedociągnięcia natury edytorskiej, do których zaliczyć można m.in.:

- W rozprawie występują liczne nieprawidłowości w numeracji cytowań literaturowych. Cytowania nie pojawiają się w kolejności ich występowania w tekście ani według uporządkowania alfabetycznego, lecz w sposób losowy, co świadczy o braku konsekwencji w stosowaniu systemu odwołań bibliograficznych.
- Struktura części praktycznej pracy budzi również pewne zastrzeżenia. Doktorantka połączyła metodykę badań, wyniki eksperymentalne oraz ich analizę w jeden rozdział, co znacząco utrudnia czytelnikowi śledzenie toku badań i ocenę poprawności zastosowanych procedur. W klasycznej strukturze rozprawy doktorskiej elementy te powinny zostać wyraźnie rozdzielone.
- Na stronie 8 pojawia się zdanie: „*Obecnie, wiodące ośrodki badawcze w Niemczech, Japonii, Stanach Zjednoczonych i Korei Południowej koncentrują się na rozwoju metod diagnostycznych dla kontaktów elektrycznych...*”. Stwierdzenie to ma charakter przeglądowy, jednak nie zostało poparte żadnym odniesieniem do literatury naukowej.
- W części rysunków wykorzystano opisy w języku angielskim, np. 2.3.3 - 2.3.9.
- Na stronie 23 pojawia się odwołanie do artykułu autorstwa Peng Zhang z tytułem przetłumaczonym na język polski: „*Wpływ chropowatości powierzchni na kontakt elektryczny...*”. W cytowanych publikacjach naukowych tytuły artykułów powinny być przywoływane w języku oryginału.
- W wielu rysunkach (np. 2.2.1) składających się z kilku podrysunków (np. oznaczonych jako a, b, c) nie zamieszczono szczegółowego wyjaśnienia w podpisach, co dokładnie przedstawiają poszczególne elementy ilustracji.
- Na rysunkach 2.1.3 oraz 2.1.4 nie podano źródła pochodzenia ilustracji. Ponadto rysunki zawierają niespójności w oznaczeniu typów złączy – przykładowo model opisany jako

Plug X-coded na jednym rysunku odpowiada temu samemu modelowi, który na kolejnym rysunku oznaczono jako L-coded 5-pin. Analogiczna sytuacja dotyczy oznaczeń Plug L-coded oraz D-coded 4-pin.

- W tekście pojawiają się również błędne odniesienia do elementów pracy, np. wskazanie tabeli 1 zamiast tabeli 2.2.1 („*Powyższe wymagania najlepiej spełniają srebro, złoto, platyna i ich stopy, wolfram oraz miedź (tabela 1).*” lub rysunku 2 zamiast rysunku 2.3 („*W przypadku systemów powłok przedstawionych na Rysunku 2...*”).
- W niektórych przypadkach rysunki oraz tabele nie są w żaden sposób omówione w treści rozprawy (Rys. 2.1.1, 2.1.2, 2.1.5, 2.1.6, 2.3.1, 4.3.2, Tabela 2.3.1), np. w rysunku 4.3.2 brak jest wyjaśnienia elementów (czerwona klamerka) zaznaczonych na fotografii oraz odniesienia do tej ilustracji w treści rozdziału.
- Podrozdział 4.4.2 zatytułowany „*Wpływ jakości połączenia zaciskowego na przewodność i trwałość*” nie zawiera analizy wyników eksperymentalnych, lecz raczej ogólny opis zjawisk fizycznych. W związku z tym umiejscowienie go w części eksperymentalnej może być dyskusyjne.

4. Wniosek końcowy

Podsumowując ocenę rozprawy należy stwierdzić, że przedstawiona praca podejmuje aktualną i interesującą problematykę dotyczącą oceny niezawodności złączy kablowych typu M12 oraz integracji wyników badań mechanicznych i elektrycznych w postaci algorytmu oceny jakości. Jednakże analiza pracy ujawnia pewną liczbę uchybień o charakterze zarówno edytorskim, jak i merytorycznym. Występujące miejscami nieścisłości w zakresie braku odniesienia do rysunków i tabel, powtórzenia fragmentów tekstu oraz brak konsekwencji w opisie materiału ilustracyjnego wskazują na niedostateczną staranność redakcyjną. Podstawowe zarzuty natury merytorycznej dotyczą pewnej rozbieżności pomiędzy sformułowanym celem pracy a faktycznym zakresem przeprowadzonych badań, niewystarczającego opisu metodyki eksperymentalnej, braku szczegółowej charakterystyki badanych obiektów oraz miejscami niepełnej analizy przedstawionych wyników pomiarów. Na odbiór pracy niekorzystnie wpływa również przyjęta struktura części praktycznej, w której połączono opis metodyki badań, prezentację wyników oraz ich analizę w jednym rozdziale, co utrudnia prześledzenie toku postępowania badawczego. Dodatkowo w pracy pojawiają się wyniki badań wykonanych z zastosowaniem metod, których metodyka nie została ujęta w części eksperymentalnej, co w pewnym zakresie ogranicza możliwość oceny poprawności przeprowadzonych analiz.

Jednocześnie należy zauważyć, że Doktorantka podjęła aktualny problem badawczy związany z oceną niezawodności złączy kablowych stosowanych w systemach automatyki przemysłowej, przeprowadziła własne badania eksperymentalne dotyczące właściwości mechanicznych i elektrycznych analizowanych połączeń oraz zaproponowała algorytm integrujący wyniki różnych testów diagnostycznych w ramach jednej procedury oceny jakości. Na pozytywną ocenę zasługuje również próba powiązania wyników badań mechanicznych, elektrycznych i materiałowych w spójnym modelu oceny jakości złączy, co stanowi interesujący element aplikacyjny pracy.

Uwzględniając zarówno wskazane wcześniej liczne uwagi krytyczne, jak i przedstawione elementy pozytywne, stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Veroniki Khariny pt. *„Algorytm oceny złączy kablowych M12 pod kątem mechanicznym i elektrycznym: analiza cyklicznych obciążeń, siły zrywania oraz powłok galwanicznych”* spełnia w minimalnym stopniu wymagania ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku *„Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”* z późniejszymi zmianami. Wniosuję zatem do Rady Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Opolskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

