

dr hab. inż. Sławomir Kowalski, prof. ANS
Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu
Wydział Nauk Inżynieryjnych

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Veroniki Kharina nt. „Algorytm oceny złączy kablowych M12 pod kątem mechanicznym i elektrycznym: analiza cyklicznych obciążeń, siły zrywania oraz powłok galwanicznych”

I. Podstawy formalne i ogólna charakterystyka rozprawy

Recenzję opracowano na zlecenie Rektora Politechniki Opolskiej dr hab. inż. Marcina Lorenca (pismo RR/1112/2025).

Recenzowana rozprawa liczy 193 strony. Jej treść podzielona jest na siedem rozdziałów i oprócz tekstu zawiera 78 rysunków i 41 tabel. Na początku rozprawy zamieszczono również spis skrótów. Rozdziały główne poprzedza spis treści, a pracę zamykają wykaz literatury liczący 130 pozycji, załączniki oraz streszczenie w języku polskim i języku angielskim.

Rozdział pierwszy rozprawy stanowi „Wprowadzenie”. Zwrócono w nim uwagę na znaczenie złączy kablowych wykorzystywanych w warunkach przemysłowych, które to charakteryzują się podwyższoną wilgotnością, obecnością czynników chemicznych, zmiennością temperatury oraz intensywnymi obciążeniami mechanicznymi. Ponadto podkreślono, że złącza M12, będące przedmiotem recenzowanej rozprawy, znalazły szerokie zastosowanie nie tylko w Europie, ale również w Azji i Ameryce Północnej. Szerokie zastosowanie złączy w różnych strefach klimatycznych spowodowało, że oczekuje się od nich nie tylko odporności na drgania, wilgoć, pył czy zmienne temperatury, ale także wieloletniej trwałości eksploatacyjnej przy zachowaniu stabilnych parametrów elektrycznych.

W końcowych zdaniach wprowadzenia zaznaczono, że badania przeprowadzone w ramach recenzowanej pracy obejmują zarówno testy empiryczne, jak i analizę predykcijną przy użyciu modelu regresji logistycznej. Otrzymane wyniki mogą natomiast znaleźć zastosowanie w ocenie nowych partii złączy, w procesach certyfikacyjnych, jak również w projektowaniu trwałych systemów zasilania i transmisji danych w środowiskach o wysokim stopniu krytyczności. W ostatnim akapicie wprowadzenia uzasadniono potrzebę podjęcia tematyki. Zapisano, że z perspektywy inżynieryjnej i praktycznej, proponowane rozwiązanie wypełnia istniejącą lukę między oceną normatywną a rzeczywistymi wymaganiami eksploatacyjnymi,

zwiększając tym samym transparentność procesu testowania, standaryzację wyników oraz możliwość adaptacji algorytmu do różnych środowisk aplikacyjnych.

W rozdziale drugim „Przegląd stanu wiedzy i część teoretyczna” zebrano i usystematyzowano aktualny stan wiedzy, ze szczególnym uwzględnieniem aspektów konstrukcyjnych, elektrycznych i mechanicznych, które determinują niezawodność połączeń w środowiskach poddanych intensywnym cyklom obciążeń. Rozdział drugi został podzielony na sześć podrozdziałów. W podrozdziale pierwszym „Charakterystyka złączy kablowych M12” obok podstawowych informacji na temat przedmiotowych złączy omówiono ich budowę i zastosowanie oraz dokonano ich klasyfikacji. Powołano się w tym miejscu na normę ISO 61076-2-101 (aktualnie obowiązuje oznaczenie normy: PN-EN IEC 61076-2-101:2025 - Złącza do urządzeń elektrycznych i elektronicznych -- Wymagania dotyczące wyrobu -- Część 2-101: Złącza okrągłe -- Specyfikacja szczegółowa dotycząca złączy M12 ze sprzęgiem gwintowym). W podrozdziale drugim „Parametry mechaniczne i elektryczne złączy” skupiono uwagę na budowie i warunkach pracy zespołu stykowego. Omówiono podstawowe rodzaje styków elektrycznych oraz podano parametry, na które należy zwrócić uwagę podczas doboru materiału do wykonania styków. Wyjaśniono również pojęcie oporu stykowego i podano czynniki wpływające na ten opór. W podpunkcie trzecim, zatytułowanym „Zagadnienia związane z powłokami galwanicznymi” dużo miejsca poświęcono chropowatości powierzchni, jako jednego z czynników wpływających na opór stykowy. Obok chropowatości powierzchni wskazano również na inne czynniki wpływające na przewodność elektryczną, jak twardość powierzchni czy obciążenie. W dalszej części podrozdziału omówiono zjawisko frettingu, jako problem związany z eksploatacją złączy elektrycznych. Następnie omówiono rodzaje powłok stosowanych w złączach elektrycznych i ich właściwości. Omówienie problemu rozpoczęto od informacji związanych ze złotem i jego zastosowaniem w złączach elektrycznych. W dalszej kolejności zwrócono uwagę na stop CuSn6 i procesy galwaniczne. Podrozdział trzeci kończy punkt omawiający mechanizmy korozji i degradacji. Omówiono podstawowe procesy prowadzące do korozji atmosferycznej i korozji frettingowej. Omówiono w jaki sposób metale szlachetne i procesy galwaniczne wpływają na przebieg tych korozji. Czwarty podrozdział zatytułowano „Cykliczne obciążenia mechaniczne – 100 cykli łączenia” i zawarto w nim informacje związane z wpływem cykliczności na właściwości zmęczeniowe i rezystancję styków elektrycznych. Podpunkt ten kończy stwierdzenie, że w kontekście połączeń elektrycznych, szczególnie istotne jest uwzględnienie wpływu cyklicznych obciążeń mechanicznych na jakość kontaktu elektrycznego. Zmiany w mikrostrukturze materiału, wynikające z powtarzających się obciążeń, mogą prowadzić do wzrostu rezystancji kontaktu, co z kolei wpływa na efektywność przewodzenia prądu. W podpunkcie piątym „Siła zrywania – definicje i czynniki wpływające” podano definicję siły zrywania oraz omówiono czynniki, które wpływają na siłę zrywania styków elektrycznych w zależności od branży, w której te styki są wykorzystywane. W podrozdziale szóstym „aktualny stan badań i standardy branżowe” zacytowano kilka pozycji literaturowych dotyczących niezawodności połączeń stykowych oraz zjawisk występujących na granicy strefy kontaktu metali i wpływem procesów technologicznych na jakość wykonania złączy. Po raz kolejny przywołano normę PN-EN IEC 61076-2-101 oraz rodzinę norm PN-EN IEC 60512. Podsumowując ten podrozdział, Autorka napisała, że aktualny stan badań i standardów branżowych w zakresie łączenia kontaktów elektrycznych — szczególnie w odniesieniu do złączy typu M12 — opiera się na bogatej bazie naukowej oraz szeroko rozwiniętym zapleczu normatywnym i przemysłowym. Połączenie wyników badań materiałowych, procedur testowych i doświadczenia producentów pozwala

dziś tworzyć złącza, które spełniają surowe wymagania trwałości, odporności i niezawodności w nawet najbardziej wymagających zastosowaniach. Ciągły rozwój tych standardów wynika zarówno z presji technologicznej (rozwój Przemysłu 4.0), jak i wzrostu oczekiwań klientów wobec jakości i żywotności połączeń kablowych.

Rozdział trzeci zawiera cel, zakres pracy i hipotezę badawczą. Zasadniczo praca posiada dwa cele. Pierwszym z nich jest przeprowadzenie badań styków elektrycznych z galwaniczną powłoką cynową, które pozwolą poznać zjawiska rezystancji przejścia oraz określić czynniki wpływających na rezystancje przejścia i wpływ temperatury na powłokę cynową. Przeprowadzone zostaną również badania związane z efektami starzeniowymi. Drugi cel pracy stanowi opracowanie kompleksowego podejścia do oceny jakości i trwałości przemysłowych połączeń kontaktowych, uwzględniającego zarówno czynniki mechaniczne, jak i elektryczne. Cele te zostaną osiągnięte poprzez analizę wpływu cyklicznych obciążeń mechanicznych, na jakość połączenia kontaktowego, poprzez pomiar siły zrywania połączeń zaciskowych zgodnie z wytycznymi normy DIN EN 60352-2 oraz analizę wpływu rodzaju zastosowanej powłoki galwanicznej na stabilność parametrów elektrycznych kontaktu. Integralną częścią pracy jest zastosowanie zaawansowanej metody diagnostycznej, która polega na klasycznym pomiarze rezystancji metodą czteroprzewodową (Kelvina) z modyfikacją przez degradowanie materiału z użyciem metod 85/85 + soak i szoki termiczne.

Autorka postawiła hipotezę badawczą, która zakłada, że jakość powłoki, temperatura, wilgotność otoczenia, geometryczne cechy zakucia kontaktów wpływają na rezystancje przejścia. Zakłada również, że zastosowanie modyfikowanej metody pomiaru rezystancji umożliwi wczesne wykrycie zjawisk degradacyjnych niewidocznych przy klasycznych pomiarach statycznych rezystancji kontaktowej, co stanowi klucz do opracowania skutecznego algorytmu diagnostyczno-predykcyjnego oceny stanu połączeń.

Wynikiem pracy będzie analiza statystyczna i jakościowa wyników badań oraz opracowanie algorytmu oceny połączeń złączy M12, który może znaleźć zastosowanie zarówno w kontroli jakości podczas produkcji, jak i w warunkach eksploatacyjnych, w ramach predykcyjnego utrzymania ruchu (predictive maintenance). Algorytm ten będzie uwzględniał zależności między parametrami geometrycznymi, siłowymi i elektrycznymi.

Rozdział czwarty „Część praktyczna – metodyka badań i analiza wyników” podzielony jest na pięć podrozdziałów. Na wstępie rozdziału Autorka podkreśliła, że w części praktycznej rozprawy skupiono się na przeprowadzeniu szczegółowych badań doświadczalnych mających na celu ocenę wpływu wybranych czynników mechanicznych i technologicznych na parametry jakościowe połączeń kontaktowych w złączach kablowych typu M12. W badaniach zastosowano metody ilościowe i jakościowe, z wykorzystaniem zarówno pomiarów bezpośrednich, jak i analizy sygnałów dynamicznych. Metodyka badań została opracowana w taki sposób, aby umożliwić systematyczne porównanie wpływu cyklicznych obciążeń mechanicznych, rodzaju powłoki galwanicznej oraz geometrii połączenia zagniatanego na parametry mechaniczne (siła zrywania) oraz elektryczne (rezystancja kontaktowa, stabilność przewodzenia).

Do badań wykorzystano standaryzowane złącza M12 w wersji A-coded (4-pole), które wykorzystuje się w aplikacjach przemysłowych do przesłania sygnałów cyfrowych oraz analogicznych. Badania przeprowadzono w trzech etapach. Pierwszy polegał na poddaniu próbek cyklicznym obciążeniom mechanicznym polegającym na 100-krotnym łączeniu i rozłączaniu złącza w warunkach laboratoryjnych, z jednoczesną kontrolą parametrów siłowych i elektrycznych. Drugi, polegał na pomiarze siły zrywania połączenia kontaktowego przy

użyciu uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej (Komax Qstat-100), gdzie rejestrowano siłę maksymalną potrzebną do rozłączenia styku oraz sposób uszkodzenia (przerwanie przewodu, wyrwanie styków, pęknięcie obszaru łączenia). Trzeci etap obejmował zaawansowaną analizę rezystancji kontaktowej z użyciem metody czteroprzewodowej (Kelvina) z modyfikacją przez degradowanie materiału z użyciem metod 85/85 + *soak* (highly accelerated stress test HAST) i szoki termiczne, z zastosowaniem szybkiej akwizycji danych (sample rate ≥ 10 kHz), co pozwoliło na detekcję lokalnych fluktuacji oporności sygnałowej.

W podrozdziale pierwszym „Opis stanowisk badawczych i narzędzi pomiarowych” zawarto, zgodnie z tytułem, opis stanowisk i urządzeń wykorzystywanych podczas badań złączy elektrycznych. W pierwszej kolejności omówiono stanowisko do testów cyklicznych obciążeń mechanicznych, które pozwoliło przeprowadzić ocenę trwałości połączeń w warunkach rzeczywistych, gdzie złącza M12 poddawane są wielokrotnym operacjom łączenia i rozłączania. Następnie opisano stanowisko do pomiaru siły zrywania, w którym wykorzystano maszynę zmęczeniową umożliwiającą przeprowadzenie precyzyjnych pomiarów sił zrywania przy kontrolowanej prędkości rozciągania. Jako trzecie omówiono stanowisko do pomiarów rezystancji metodą czteroprzewodową (Kelvina) z modyfikacją przez degradowanie materiału z użyciem metod 85/85 + *soak* (HAST) i szoki termiczne. Na koniec tego podrozdziału omówiono stanowisko do analizy mikroskopowej powierzchni kontaktów.

Podrozdział drugi zatytułowany „Metody badań cyklicznych obciążeń – 100 cykli łączenia” zawiera wyjaśnienie metody oraz opis procedury badawczej, która polegała na przeprowadzeniu testu wytrzymałościowego dla każdego badanego styku elektrycznego, obejmującego 100 cykli łączenia i rozłączania. Zgodnie z opisem każdy zarejestrowany wynik obejmował sumaryczną rezystancję przewodu oraz badanego styku. Ostateczna rezystancja kontaktu była obliczana poprzez odjęcie zmierzonej wcześniej wartości przewodu od całkowitej wartości zarejestrowanej przez multimetr.

Podrozdział trzeci „Metody pomiaru siły zrywania” zawiera opis procedury pomiaru siły zrywania zgodnie z normą DIN EN 60352-2 (PN-EN IEC 60352-2:2025. Połączenia nielutowane -- Część 2: Połączenia zaciskane -- Wymagania ogólne, metody badań i wskazówki praktyczne). Podrozdział kończy akapit, w którym zapisano, że w przypadku złączy M12, zwłaszcza tych stosowanych w środowiskach o podwyższonej wilgotności, zmiennych temperaturach czy obecności substancji chemicznych jak dla przemysłu FOOD, ocena siły zrywania powinna być rozszerzona o testy po starzeniu termicznym i wilgotnościowym. W takich warunkach materiały izolacyjne i metaliczne mogą ulegać degradacji, co wpływa na adhezję w miejscu połączenia.

Podrozdział czwarty „Pomiar rezystancji metodą czteroprzewodową (Kelvina) z modyfikacją przez degradowanie materiału z użyciem metod 85/85 + *soak* (HAST) i szoki termiczne” zawiera opis metodyki badań oraz wyniki badań. Do badań wykorzystano 15 próbek kabli czterożyłowych typu M12, co przekłada się na 60 indywidualnych połączeń zaciskowych. Po punkcie opisującym metodykę badań zawartych w podrozdziale czwartym omówiono wpływ jakości połączenia zaciskowego na przewodność i trwałość, gdzie oprócz opisu zamieszczono jeden rysunek przedstawiający CT skan zaciśniętych kontaktów w złączu. W dalszej części tego podrozdziału omówiono wpływ powłok na przewodność i trwałość oraz zaprezentowano wyniki badań. Przedstawiono w formie tabelarycznej wyniki: pomiaru rezystancji połówki złota 0,4 μm podczas testu temperaturowego w przedziale -40 do +80°C; pomiaru rezystancji podczas testu temperaturowego w przedziale -40 do +80°C oraz wyniki pomiaru rezystancji podczas testu wilgotnościowego 85/85 + *soak*. Te same wyniki zaprezentowano w formie wykresów na trzech różnych rysunkach.

Podrozdział piąty „Opracowanie algorytmu oceny złączy” zaprezentowano przedmiotowy algorytm, którego fundamentem są wyniki wcześniej przeprowadzonych testów. Po raz kolejny Autorka podkreśliła, że algorytm został zaprojektowany w taki sposób, aby umożliwić jego wdrożenie zarówno w środowiskach badawczo-rozwojowych, jak i w zastosowaniach przemysłowych, w których zachodzi konieczność szybkiej selekcji komponentów na etapie produkcji seryjnej lub kontroli partii dostaw. Na początku podrozdziału przedstawiono założenia i strukturę algorytmu, która składa się z sześciu etapów. W dalszej części pokazano w jaki sposób wykorzystano dane wejściowe, będące wynikami badań, do stworzenia algorytmu. Podrozdział kończy fragment kodu w języku Python wykorzystany w algorytmie.

Rozdział piąty zawiera podsumowanie i wnioski oraz nakreśla ograniczenia i możliwości dalszego rozwoju badań. Na początku pokrótce scharakteryzowano i podsumowano zawartość rozdziału drugiego, a następnie podkreślono ważność i potrzebę opracowania algorytmu decyzyjnego. W dalszej części przedstawiono wnioski z badań eksperymentalnych, gdzie powtórzono cel pracy i metodykę badań. W rozdziale tym brakuje wypunktowanych wniosków wynikających z badań eksperymentalnych i opracowania algorytmu.

II. Ocena merytoryczna rozprawy

Aktualność i znaczenie podjętej tematyki

Tematyka dotycząca oceny złączy kablowych typu M12 pod kątem mechanicznym i elektrycznym jest obecnie wysoce aktualna ze względu na rosnące wymagania niezawodnościowe w przemyśle automatyki, robotyki, motoryzacji oraz systemach sterowania. Złącza M12 stanowią standardowe wyposażenie w aplikacjach narażonych na wibracje, zmienne obciążenia mechaniczne, podwyższoną wilgotność, obecność mediów agresywnych oraz ciągłe cykle pracy. W takich warunkach niewłaściwie dobrane lub źle zaprojektowane złącze może prowadzić do przestojów, uszkodzeń urządzeń, a nawet zagrożeń bezpieczeństwa.

Opracowanie algorytmu oceny złączy kablowych, który uwzględnia zarówno parametry mechaniczne, jak i elektryczne, odpowiada na zapotrzebowanie przemysłu na narzędzia pozwalające na obiektywną i powtarzalną weryfikację jakości produktów. Analiza cyklicznych obciążeń mechanicznych, siły zrywania oraz wpływu powłok galwanicznych na trwałość kontaktów elektrycznych umożliwia identyfikację kluczowych czynników wpływających na niezawodność połączeń w długim okresie eksploatacji.

Szczególne znaczenie ma ocena powłok galwanicznych, które odpowiadają za odporność na korozję, stabilność rezystancji styków oraz odporność na mikroruchy i ścieranie. Wraz ze wzrostem miniaturyzacji komponentów oraz zwiększeniem gęstości upakowania przewodów, zjawiska takie jak mikrołukowanie, utlenianie i degradacja warstw kontaktowych stają się coraz istotniejsze. Ich wpływ może być trudny do uchwycenia bez odpowiednio zdefiniowanego, systemowego algorytmu oceny.

Zastosowanie metodyki obejmującej testy zmęczeniowe, pomiary siły zrywania oraz analizę zmian parametrów elektrycznych pozwala nie tylko porównywać rozwiązania dostępne na rynku, ale również stanowi cenne narzędzie dla projektantów i producentów w procesie optymalizacji konstrukcji złączy. Wyniki takiej analizy mogą przyczynić się do wydłużenia

trwałości systemów, obniżenia kosztów utrzymania ruchu oraz zwiększenia bezpieczeństwa eksploatacji urządzeń.

Podsumowując, tematyka ta jest ważna zarówno z naukowego, jak i praktycznego punktu widzenia. Łączy zagadnienia materiałowe, mechanikę, elektrotechnikę oraz niezawodność techniczną, odpowiadając na realne potrzeby współczesnego przemysłu i rozwój Przemysłu 4.0.

Realizacja badań i uzyskane wyniki

Część badawcza rozprawy prowadzi do uzyskania odpowiedzi na pytanie, w jakim stopniu wybrane czynniki mechanicznych i technologicznych wpływają na jakość połączeń kontaktowych złączy kablowych typu M12. Aby odpowiedzieć na to pytanie przeprowadzono szereg badań, które pokrótce zostały scharakteryzowane w punkcie „Podstawy formalne i ogólna charakterystyka rozprawy” niniejszej recenzji.

Pewnym mankamentem części praktycznej rozprawy jest brak osobnego rozdziału, w którym dokonano by kompleksowego i usystematyzowanego przedstawienia metodyki badań. Treści poukładane w następujący sposób poprawiłyby czytelność rozprawy: 1) Obiekt badań, 2) Warunki prac/badań, 3) Metodologia badań, 4) Stanowiska badawcze. Dopiero w następnym rozdziale powinny być zamieszczone wyniki badań, ułożone według zaproponowanej metodologii badań.

Pierwszym przeprowadzonym badaniem była ocena cyklicznych obciążeń złącza M12 w teście stu cykli łączenia. Wyniki tego badania zaprezentowano w tabeli 4.5.6. Krótki komentarz do wyników zamieszczono poniżej tabeli. Brakuje w nim wyjaśnienia dlaczego wartości zamalowane na czerwono nie spełniają warunku oraz jaka jest ewentualna przyczyna takich wartości. Niezrozumiałe jest również zdanie „Na podstawie danych z testu 100 cykli 2...” (str. 110).

W punkcie 4.2. zapisano, że metoda cyklicznego łączenia i rozłączania bazuje na założeniu, że każde połączenie wiąże się z mikroskopijnymi zmianami w strukturze powierzchni kontaktu – zarówno pod względem topografii, jak i stanu fizykochemicznego warstwy wierzchniej. Należy żałować, że w rozprawie nie znalazły się wyniki obserwacji przedmiotowych powierzchni po realizacji odpowiedniej liczby cykli.

Drugim przeprowadzanym badaniem była siła zrywania połączenia kontaktowego. Do tego celu wykorzystano maszynę wytrzymałościową zainstalowaną na stanowisku opisanym w pkt. 4.1.2 rozprawy. Wyniki tego badania natomiast zaprezentowano w tabelach 4.5.4, 4.5.5, 4.5.10. Poniżej tabel zamieszczono komentarz do wyników badań, który jest wystarczających do odpowiedniej interpretacji wyników.

Kolejnymi badaniami realizowanymi w ramach rozprawy były: ocena rezystancji kontaktowej z użyciem metody 85/85 + *soak* i szoki termiczne, z zastosowaniem szybkiej akwizycji danych. Wyniki tych pomiarów zaprezentowano w formie tabelarycznej oraz wykresów. Wyniki zostały również w odpowiedni sposób omówione.

Przeprowadzane w ramach rozprawy badania nie tylko wnoszą wkład w dyscyplinę inżynierii mechanicznej ale również służą do realizacji drugiego celu rozprawy. Celem tym jest kompleksowe podejście do oceny jakości i trwałości przemysłowych połączeń kontaktowych

poprzez opracowanie odpowiedniego algorytmu. Założenia i struktura algorytmu zostały w szczególności opisane i omówione. Algorytm w przedstawionej formie może stanowić wsparcie dla przemysłu i być przydatnym narzędziem w ocenie jakości złączy elektrycznych. Aby temat algorytmu mógł być w pełni zamknięty w rozprawie powinny znaleźć się jeszcze odpowiedzi na pytanie w jaki sposób dobrano współczynniki wagowe w algorytmie agregacji parametrów (rezystancja, siła, liczba cykli)? Czy były one kalibrowane na podstawie danych eksperymentalnych, czy przyjęto wartości arbitralne? Brakuje ponadto analizy wrażliwości algorytmu na zmianę wag i parametrów wejściowych.

Podsumowując należy stwierdzić, że badania przeprowadzone w ramach rozprawy oraz opracowanie algorytmu zasługują na ocenę pozytywną.

Strona edytorska i redakcyjna pracy

Praca napisana jest poprawnym i zrozumiałym językiem. Występują w niej jednak nieliczne usterki o charakterze edytorskim lub redakcyjnym. Należy pokreślić, że wskazane poniżej usterki nie mają negatywnego wpływu na zrozumienie treści rozprawy.

- Rysunki: 2.1.3; 2.3.2 – 2.3.9; 4.2.3 powinny zawierać opis w języku polskim.
- Rysunek 2.1.4 jest słabo czytelny.
- Niektóre tabele powinny być wstawione bezpośrednio przez kreatora tabel (przykładowo: Tabela 2.2.1.; 2.3.1).
- Tekst znajdujący się na stronach 21, 49-51, 53, 54, 63, 78, 86, 98 powinien być ułożony w taki sposób, aby zapełnić całą stronę (strony te nie kończą rozdziału).
- Niektóre rysunki wydają się być za duże, przykładowo: Rys. 2.2.1; 2.2.2; 2.3.1; 2.3.6; 2.3.7; 2.3.8. Rysunki te mogłyby być pomniejszone na poczet obszerniejszego ich opisu w tekście.
- Rysunki zamieszczone w pkt. 4.4.3 i rozdziale 7 powinny zostatac przedstawione w bardziej czytelny sposób. Zbędny jest tytuł wykresu, a także można byłoby zmniejszyć zakres osi rzędnych.
- Nie wszystkie rysunki posiadają odniesienia w tekście, co utrudnia czytelność, przykładowo: Rys. 4.1.1; 4.1.2; 4.1.3, 4.1.7.
- W tabeli 4.2.2. znajdują się niefortunne określenia „siła wkładania” oraz „siła wyciągania”, które korelować z nazewnictwem znajdującym się w tabeli 4.5.6.
- W tekście rozprawy dwukrotnie pojawia się słowo „trybologia” (str. 47, 52). Słowo to jest niewłaściwe. Prawidłowe powinno być słowo „tribologia”, pochodzące od greckich słów tribos-tarcie, logos-nauka.
- Str. 89, czy słowo „delaminacja” występuje w języku polskim?
- Zapis wartości dziesiętnych powinien być ujednolicony. W rozprawie miejscami spotyka się liczby dziesiętne z przecinkiem, a miejscami – z kropkami.

Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Szczegółowa analiza pracy nasuwa kilka pytań i wątpliwości, na które prosiłbym aby Doktorantka odpowiedziała podczas obrony publicznej.

1. Proszę o ustosunkowanie się do wątpliwości zapisanych w punkcie Realizacja badań i uzyskane wyniki niniejszej recenzji.

2. Na stronie 74 zapisano, że w każdym przypadku złącza M12 wykonano pomiary wstępne: wysokości zacisku, średnicy przewodu, geometrii styku oraz parametrów początkowej rezystancji kontaktowej. Proszę o omówienie tych wyników, ponieważ w rozprawie nie znaleziono ich zbiorczego zestawienia.
3. W jaki sposób realizowana była powtarzalność siły docisku i kąta wprowadzenia, o których mowa na stronie 82.
4. Proszę o wyjaśnienie pojęcia „fretting inicjacja pęknięć” (str. 81) oraz rozwinięcie myśli, że powtarzające się procesy mechanicznego docisku i tarcia pomiędzy powierzchniami kontaktowymi prowadzą do zjawisk takich jak fretting inicjacja pęknięć.
5. Proszę o informację, czy deklarowany potencjał aplikacyjny został wystarczająco uwiarygodniony. Czy Autorka może wskazać konkretne scenariusze przemysłowego wdrożenia algorytmu oraz wymagania sprzętowo-pomiarowe?
6. Czy przedstawiony algorytm może być zastosowany w praktyce przemysłowej (np. w kontroli jakości, badaniach odbiorczych)? Jakie byłyby wymagania sprzętowe i pomiarowe dla jego wdrożenia?

Wskazane uwagi i wątpliwości obniżają nieco wartość pracy, jednak nie wpływają na ostateczną pozytywną ocenę.

III. Podsumowanie i wniosek końcowy

W pracy doktorskiej autorstwa mgr inż. Veroniki Kharina podjęto interesujący i aktualny naukowo temat ukierunkowany na opracowanie algorytmu oceny złączy kablowych M12 z uwzględnieniem ich właściwości mechanicznych i elektrycznych, w szczególności analizy cyklicznych obciążeń, siły zrywania oraz wpływu powłok galwanicznych na trwałość i niezawodność połączeń. Ponadto, przy rozwiązywaniu problemu naukowego Autorka rozprawy wykazała się umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Veroniki Kharina pt. „Algorytm oceny złączy kablowych M12 pod kątem mechanicznym i elektrycznym: analiza cyklicznych obciążeń, siły zrywania oraz powłok galwanicznych” spełnia wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018r. (Dz.U.2024.1571 t.j. z dnia 2024.10.24) Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Wnioskuje zatem do Rady Naukowej Politechniki Opolskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.