

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała Formeli  
pt. *Badania procesów tarcia w sprzęgle ciernym i ich optymalizacja pod względem niezawodności.*

Promotor: dr hab. inż. Jacek Łubiński, prof. PG

Recenzja została opracowana na prośbę prof. dr hab. Inż. Michała Wasilczuka, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Gdańskiej (nr pisma 007/WIMiO/2026 z dnia 21.01.2026)

### 1. TYTUŁ PRACY

Tytuł rozprawy „*Badania procesów tarcia w sprzęgle ciernym i ich optymalizacja pod względem niezawodności.*” wg recenzenta poprawnie określa zagadnienia opisane w pracy. Można jednak wskazać pewną istotną nieścisłość, tytuł sugeruje bowiem analizę całego sprzęgła ciernego jako układu funkcjonalnego, a więc również procesów tarcia zachodzących podczas zasadniczych faz jego pracy, takich jak załączanie czy rozłączanie sprzęgła. Tymczasem rzeczywisty zakres rozprawy jest wyraźnie węższy i koncentruje się przede wszystkim na ciernym tłumiku drgań skrętnych, stanowiącym jedynie część większego zespołu. W tym sensie tytuł rozprawy można uznać za zbyt szeroki względem rzeczywistego przedmiotu badań, ponieważ obejmuje pojęciowo szerszy obszar niż ten, który został faktycznie poddany analizie. Przedstawione w pracy badania, wyniki jak i przegląd literatury odnoszą się bezpośrednio do tematu pracy.

### 2. OCENA PODJĘTEGO TEMATU

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska, zatytułowana „*Badania procesów tarcia w sprzęgle ciernym i ich optymalizacja pod względem niezawodności*”, dotyczy tematu interesującego, istotnego z punktu widzenia tribologii oraz ważnego w obszarze eksploatacji układów przeniesienia napędu pojazdów samochodowych. Autor podjął problem badawczy związany z funkcjonowaniem układów ciernych w systemach przeniesienia momentu obrotowego silników spalinowych, a więc w obszarze, w którym zjawiska tarcia, zużycia oraz zmian charakterystyk eksploatacyjnych mają bezpośredni wpływ na trwałość, niezawodność i jakość pracy całego układu napędowego.

Temat rozprawy należy uznać za wartościowy również dlatego, że odnosi się on do zagadnień o charakterze szerszym niż tylko analiza konkretnego rozwiązania konstrukcyjnego. W swojej istocie dotyczy bowiem uniwersalnych problemów związanych z przenoszeniem napędu w warunkach zmiennego obciążenia, pulsacyjnego przebiegu momentu obrotowego oraz degradacji właściwości układów ciernych w czasie eksploatacji. Z tego względu podjęta

problematyka posiada nie tylko walor ogólnopoznawczy w zakresie analizy układów tribologicznych pracujących w zespołach napędowych, ale także znaczenie aplikacyjne.

Jednocześnie należy zauważyć, że na ocenę długofalowej aktualności podjętego tematu wpływają obecne kierunki rozwoju motoryzacji. Postępująca elektryfikacja transportu, wzrost znaczenia pojazdów hybrydowych i elektrycznych oraz stopniowe ograniczanie roli klasycznych pojazdów spalinowych powodują, że rozwiązania konstrukcyjne oparte na badanych w pracy ciernych tłumikach drgań skrętnych mogą w przyszłości tracić na znaczeniu rynkowym. W tym sensie praktyczny i perspektywiczny wymiar tematu, rozumiany w bardzo długim horyzoncie czasowym, jest ograniczony.

Nie zmienia to jednak faktu, że w aktualnych realiach technicznych i przemysłowych problem będący przedmiotem rozprawy pozostaje ważny i uzasadniony. Układy tego typu są nadal szeroko stosowane, a zagadnienia związane z ich niezawodnością, trwałością i optymalizacją parametrów pracy mają istotne znaczenie dla gospodarki. Z tego względu temat pracy należy ocenić pozytywnie jako dobrze osadzony w obszarze tribologii stosowanej i eksploatacji układów mechanicznych, choć równocześnie trzeba zaznaczyć, że jego perspektywa rozwojowa może być w przyszłości ograniczana przez zmiany zachodzące na rynku motoryzacyjnym.

### **3. CHARAKTERYSTYKA OGÓLNA PRACY**

Praca liczy łącznie 101 stron tekstu i obejmuje: stronę tytułową (1 strona), oświadczenie Doktoranta (1 strona), opis rozprawy doktorskiej ze streszczeniami po polsku i angielsku (1 strona), spis treści (2 strony), wykaz ważniejszych oznaczeń (1 strona), sześć rozdziałów merytorycznych podzielonych na zwarte tematycznie podrozdziały (88 stron) oraz rozdział siódmy - *Literatura* (3 strony, 55 pozycji). Praca oprócz tekstu zawiera 87 rysunków oraz 5 tabel.

### **4. CEL I TEZA PRACY**

Cel pracy został przez Autora sformułowany w sposób zasadniczo czytelny i powiązany z praktycznym problemem badawczym. Zgodnie z treścią rozprawy, celem pracy jest *analiza zmian parametrów elementu tłumiącego, określanego jako pakiet cierny w ciernym tłumiku drgań skrętnych, w przewidywanym okresie eksploatacji oraz ocena wpływu tych zmian na generowany przez tłumik moment tarcia*. Tak określony cel należy uznać za poprawny z punktu widzenia ogólnego ukierunkowania rozprawy, ponieważ łączy on zagadnienie zmian zachodzących w układzie ciernym z oceną ich konsekwencji funkcjonalnych dla pracy całego tłumika.

Pozytywnie należy ocenić także to, że Autor nie ograniczył się wyłącznie do ogólnego wskazania obszaru badań, lecz podjął próbę jego doprecyzowania poprzez przedstawienie hipotez badawczych. Autor wyznaczył trzy hipotezy, odnoszące się kolejno do wzrostu momentu tarcia w początkowym okresie eksploatacji wskutek procesu docierania, do stabilizacji współczynnika tarcia po okresie docierania oraz do późniejszego spadku momentu tarcia wywołanego zmianami siły zacisku elementów ciernych, wynikającymi z niekontrolowanego zużycia w rejonie podparcia sprężyny talerzowej. Sam fakt takiego

uporządkowania problemu badawczego należy uznać za zaletę rozprawy, gdyż ułatwia on śledzenie toku rozumowania Autora i ocenę poprawności późniejszego wnioskowania.

Pierwsza hipoteza sformułowana przez Doktoranta zakłada, że **moment tarcia ciernego tłumika drgań skrętnych ulega zwiększeniu na wczesnym etapie eksploatacji w wyniku wzajemnego docierania się warstw wierzchnich elementów ślizgowych, co prowadzi do kilkukrotnego wzrostu współczynnika tarcia tłumika, którego stabilizacja kończy ten etap eksploatacji**. Hipoteza ta odnosi się więc do początkowej fazy pracy układu i akcentuje znaczenie procesu docierania jako głównego czynnika odpowiedzialnego za wzrost momentu tarcia.

Druga hipoteza zakłada, że **wartość współczynnika tarcia w kontaktach ślizgowych ciernego tłumika drgań skrętnych stabilizuje się po okresie docierania tłumika, co oznacza, że późniejsze zmiany momentu tarcia wynikają ze zmieniającej się siły zacisku elementów ciernych**. Hipoteza ta stanowi pewne rozwinięcie pierwszej i przenosi punkt ciężkości z problemu zmian współczynnika tarcia na zagadnienie zmian siły docisku w dalszym etapie eksploatacji.

Trzecia hipoteza zakłada, że **moment tarcia ciernego tłumika drgań skrętnych ulega zmniejszeniu w wyniku niekontrolowanego zużycia w rejonie podparcia talerzowej sprężyny dociskowej. Zużycie ściernie sprężyny prowadzi do jej rozprężania w złożeniu tłumika, a w konsekwencji powoduje zmianę punktu pracy na charakterystyce sprężyny, skutkując spadkiem siły zacisku elementów ciernych**. Hipoteza ta ma najbardziej szczegółowy charakter i wskazuje konkretny mechanizm konstrukcyjno-eksploatacyjny odpowiedzialny za pogorszenie funkcjonalności badanego układu.

Sam sposób sformułowania hipotez należy ocenić pozytywnie, ponieważ są one powiązane z rzeczywistym problemem technicznym i odpowiadają układowi przeprowadzonych badań. Pewne zastrzeżenie budzi jedynie to, że druga i trzecia hipoteza są do siebie treściowo zbliżone, przez co ich rozróżnienie nie jest od razu w pełni dostrzegalne.

## 5. ZAKRES PRACY

Rozprawa doktorska została podzielona na sześć zasadniczych rozdziałów oraz rozdział siódmy obejmujący spis literatury. Układ pracy jest przejrzysty i odpowiada klasycznemu schematowi rozprawy o charakterze badawczo-doświadczalnym, obejmując kolejno: wprowadzenie do problematyki, analizę stanu wiedzy, praktyczną genezę tematyki badawczej, badania doświadczalne, wnioski oraz kierunki dalszych badań.

W rozdziale pierwszym - *Wstęp*, Autor sformułował tematykę badawczą, przedstawiając wprowadzenie oraz uzasadnienie podjęcia problemu. Rozdział ten ma charakter ogólny i obejmuje przede wszystkim podstawowe informacje dotyczące budowy tłumików ciernych i sprzęgieł oraz podstawowych cech tych układów. Jako główne przesłanki podjęcia tematyki wskazano współczesne wymagania stawiane układom napędowym, związane ze wzrostem skuteczności i niezawodności ich działania. Autor przywołuje również trzy istotne kierunki rozwojowe współczesnych jednostek napędowych, tj. *Downspeeding*, dezaktywację cylindrów oraz *Long Distance Luxury*, wskazując, że zjawiska te prowadzą do zwiększenia nieliniowości momentu obrotowego wychodzącego z wału silnika, a tym samym do wzrostu znaczenia elementów tłumiących drgania skrętne. Rozdział ten stanowi poprawne

wprowadzenie do ogólnej problematyki pracy, choć jego zawartość pozostaje w dużej mierze na poziomie informacji podstawowych.

Rozdział drugi, zatytułowany *Analiza stanu wiedzy oraz przegląd literatury*, obejmuje omówienie podstawowych charakterystyk oraz modeli matematycznych opisujących działanie ciernego tłumika drgań skrętnych. Przedstawiono tu również warunki eksploatacyjne tłumików drgań oraz podstawowe charakterystyki stosowane do oceny ich właściwości ciernych. Na uwagę zasługuje uwzględnienie zagadnień związanych z pomiarem charakterystyk ciernych, co stanowi interesujący element z punktu widzenia tribologii eksperymentalnej. W rozdziale tym znalazły się także krótkie informacje o procesach tribologicznych zachodzących w tłumiku drgań skrętnych, jednak ich zakres nie wykracza poza wiedzę podstawową. Pewnym mankamentem tego rozdziału jest oparcie wywodu w dużym stopniu na literaturze starszej, w części przypadków liczącej kilkanaście, a nawet kilkadziesiąt lat. Brakuje wyraźniejszego odniesienia do najnowszych publikacji naukowych dotyczących zagadnień ciernych w tłumikach drgań skrętnych, jak również do współczesnych niuansów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych tych układów. Podsumowanie stanu wiedzy prowadzi Autora do wniosku, że na charakterystykę cierną tłumika zasadniczy wpływ wywierają wartość siły normalnej oraz współczynnik tarcia, co z jednej strony jest stwierdzeniem poprawnym, z drugiej zaś ma charakter dość podstawowy co zauważa sam Doktorant.

W rozdziale trzecim, zatytułowanym *Praktyczna geneza tematyki badawczej*, Autor przechodzi od ujęcia ogólnego do praktycznych przesłanek podjęcia badań. W tej części pracy określono cel oraz zakres rozprawy. W rozdziale tym przedstawiono również trzy hipotezy badawcze. Należy podkreślić, że zostały one wyodrębnione i opisane w sposób czytelny, co stanowi istotną zaletę tej części pracy. Jednocześnie niektóre kwestie związane z samym sformułowaniem celu i zakresu pracy budzą wątpliwości merytoryczne, które zostały omówione w części siódmej niniejszej recenzji poświęconej uwagom merytorycznym.

Rozdział czwarty obejmuje opis *Badań doświadczalnych* i uzyskanych wyników. Stanowi bardzo interesującą i zasadniczą część rozprawy. Autor szczegółowo opisuje w nim metodykę badań, stanowiska pomiarowe, procedury badawcze oraz materiał badawczy w postaci analizowanych sprzęgieł i układów tłumików ciernych. Na podkreślenie zasługuje fakt wykorzystania dwóch niezależnych laboratoriów badawczych: jednego zlokalizowanego na Politechnice Gdańskiej oraz drugiego funkcjonującego w przedsiębiorstwie Eaton, w którym zatrudniony jest Autor. Przedstawiono wyniki pomiarów i testów, a następnie poddano je analizie opisowej, pokazując zmienność momentu tarcia, współczynnika tarcia oraz zmian związanych z dociskiem sprężyny w czasie procesu docierania i dalszej eksploatacji. Szczególnie wartościowy jest podrozdział poświęcony dyskusji wyników badań, w którym Autor podejmuje próbę odniesienia uzyskanych rezultatów do postawionych hipotez badawczych. W mojej ocenie jest to najciekawsza i najsilniejsza część rozprawy, przygotowana starannie i metodycznie poprawnie.

Rozdział piąty zawiera *Wnioski* sformułowane na podstawie przeprowadzonych badań. Autor ponownie przywołuje najważniejsze obserwacje eksperymentalne oraz przeprowadza proces wnioskowania prowadzący do identyfikacji przyczyn zmian momentu tarcia w czasie eksploatacji. Autor odnosi się również do postawionych wcześniej hipotez badawczych. Pewnym mankamentem tego rozdziału jest jedynie mało chronologiczny układ odniesień do hipotez, ponieważ najpierw omawiane są hipotezy druga i trzecia, a dopiero później powraca

się do hipotezy pierwszej i ponownie do drugiej. Nie zaburza to jednak istotnie odbioru całości, ponieważ po uważnej lekturze tok rozumowania pozostaje zrozumiały.

Rozdział szósty poświęcono *Kierunkom dalszych badań*. Autor opisuje w nim zmiany konstrukcyjne oraz działania wdrożeniowe, które zostały podjęte na podstawie przeprowadzonych badań, pomiarów i walidacji. Wskazuje także dalsze możliwe kierunki prac związanych z poprawą stabilności momentu tarcia oraz odnosi się do zgłoszenia patentowego opracowanego w rezultacie realizacji rozprawy. Rozdział ten dobrze pokazuje aplikacyjny wymiar przeprowadzonych badań i potwierdza, że wykonana praca w ramach doktoratu wdrożeniowego ma nie tylko walor poznawczy, ale również praktyczny.

Rozdział siódmy obejmuje spis literatury. Zestawienie bibliograficzne budzi jednak pewne zastrzeżenia. Jest dosyć skromne, zawiera tylko 55 pozycji. Znaczna część pozycji ma charakter wyraźnie przestarzały i przekracza wiek dziesięciu lat, a część z nich jest jeszcze starsza, sięgając nawet ponad trzydziestu lat. Pozycje 46 i 47 nawet ponad 500 lat. Jedynie nieliczne cytowane prace można uznać za względnie aktualne. Dodatkowo w wykazie pojawiają się źródła opisane w sposób niepełny, w tym materiały wewnętrzne firmy bez wskazania autora, formy dokumentu czy pełnych danych bibliograficznych.

## **6. UKŁAD I REDAKCJA PRACY**

Układ rozprawy jest zasadniczo poprawny i odpowiada klasycznemu schematowi pracy doktorskiej o charakterze badawczo-doświadczalnym. Autor zachował logiczny podział na część wprowadzającą, przegląd stanu wiedzy, część dotyczącą genezy tematyki i hipotez badawczych, część eksperymentalną, wnioski oraz kierunki dalszych badań. Taka kompozycja ułatwia śledzenie toku wywodu i pozwala na stosunkowo łatwe przejście od problemu badawczego do wyników oraz ich interpretacji.

Za mocną stroną pracy należy uznać jej ogólną redakcję. Rozprawa została przygotowana starannie, język wywodu jest na ogół poprawny, a liczba błędów językowych i literówek jest niewielka (znalazłem dwie). Pracę czyta się dobrze, a sposób przedstawiania wyników badań, wykresów, fotografii oraz zestawień należy ocenić wysoko. Strona graficzna rozprawy została opracowana estetycznie i w większości przypadków bardzo czytelnie.

Pewne zastrzeżenia budzi jednak nazewnictwo części podrozdziałów. Podrozdziały 3.2.1, 4.1.1, 4.2.1, 4.3.1 posiadają identyczny tytuł. Analogicznie podrozdziały 3.2.2, 4.1.2, 4.2.2, 4.3.2 oraz podrozdziały 3.2.3, 4.1.3, 4.2.3, 4.3.3. Być może jest to zabieg celowy ale bardziej prawdopodobne jest że wystąpił błąd redakcyjny. Powoduje to, w każdym razie, problemy w poruszaniu się po treści pracy.

## **7. OCENA I UWAGI MERYTORYCZNE**

Po przeczytaniu recenzowanej rozprawy doktorskiej sformułowane zostały najważniejsze kwestie dotyczące zagadnień merytorycznych. Mają one charakter uwag ogólnych jak również zapytań wymagających odpowiedzi. Zostały one przedstawione poniżej.

1. W rozdziale 1.1 str. 14 wskazano, że temat „Badanie procesów tarcia w sprzęgłach ciernych i ich optymalizacja pod względem niezawodności” stanowił jedynie roboczy tytuł

rozprawy, sformułowany na etapie wstępnych założeń badawczych. Jednocześnie w dalszej części rozprawy stwierdzono, że ostateczna wersja tematu została doprecyzowana i przyjęła inne brzmienie, odnoszące się do wpływu zużycia eksploatacyjnego wybranych elementów ciernego tłumika drgań skrętnych na zmianę charakterystyki tarcia tłumika. W rzeczywistości ostateczny tytuł rozprawy nie odpowiada temu drugiemu sformułowaniu. Powoduje to istotną nieścisłość formalno-merytoryczną już na poziomie zdefiniowania przedmiotu pracy.

2. Rozdział pierwszy poświęcony sformułowaniu tematyki badawczej i wprowadzeniu zawiera głównie skrót podstawowych informacji dotyczących budowy i funkcjonowania ciernych tłumików drgań skrętnych. Brakuje natomiast wyraźnego wejścia w główny problem rozprawy, czyli w zagadnienie zmienności sprzężenia ciernego, zmian procesów tarcia i zużycia oraz ich wpływu na charakterystyki tribologiczne badanego układu. Podobnie podrozdział 2.4 poświęcony procesom tribologicznym zachodzącym w ciernym tłumiku drgań skrętnych zawiera w znacznej części treści elementarne, stanowiące skrót podstaw tribologii. W mojej ocenie jest to zakres zbyt podstawowy jak na rozprawę doktorską. Zamiast ogólnego przypomnienia wiedzy podręcznikowej należało skoncentrować się na szczegółowych mechanizmach tarcia, zużycia, docierania, zmian topografii powierzchni oraz wpływu czynników materiałowych i eksploatacyjnych na pracę badanego układu.

3. Przegląd literatury zakończono wskazaniem jako zasadniczej luki badawczej faktu, że zużywanie elementów prowadzi do zmniejszenia siły docisku. Jest to obserwacja dość oczywista z punktu widzenia mechaniki i tribologii. Tak sformułowany wniosek sugeruje, że wykonany przegląd literatury nie doprowadził do identyfikacji rzeczywiście pogłębionego, nowego problemu naukowego, albo że przegląd ten został przeprowadzony zbyt pobieżnie i zawężony do literatury podstawowej.

4. Zakres badań ograniczono do rodziny modeli tłumików o średnicy zewnętrznej 254 mm, jednak nie przedstawiono przekonującego uzasadnienia takiego zawężenia. Z naukowego punktu widzenia należałoby wyjaśnić, dlaczego właśnie ten zakres geometryczny uznano za reprezentatywny oraz w jakim stopniu uzyskane wyniki mogą być uogólniane na inne konstrukcje tłumików. Proszę o odpowiedź.

5. Do analiz wykorzystano w znaczącej części elementy pochodzące z napraw gwarancyjnych i zwrotów reklamacyjnych. Taki dobór materiału badawczego może prowadzić do tzw. *błędu przeżywalności*, czyli do formułowania wniosków na podstawie danych niereprezentatywnych dla całej populacji obiektów. Analizie poddano egzemplarze uszkodzone lub problematyczne, w tej samej ilości co te, które pracowały poprawnie. W konsekwencji obraz badanych zjawisk tribologicznych może być zniekształcony.

6. W pracy praktycznie brak jest pogłębionych informacji o materiałach trących występujących w badanym urządzeniu, zwłaszcza o materiałach okładzin ciernych. Tymczasem właśnie skład materiałowy, struktura, stan warstw powierzchniowych oraz ich interakcja z powłokami ochronnymi mają kluczowe znaczenie dla przebiegu procesów tribologicznych. Jest to jeden z poważniejszych braków rozprawy. Proszę o odpowiedź uzupełniającą te dane.

7. Autor wskazuje, że badane elementy były pokryte środkiem antykorozyjnym na bazie oleju, a następnie warstwę tę usuwano przed częścią badań. Nie opisano jednak dokładnie sposobu oczyszczania powierzchni ani nie przeanalizowano wpływu zastosowanego środka oraz procesu jego usunięcia na proces docierania. Jest to istotne, ponieważ usunięcie środka

ochronnego oznacza ingerencję w jeden z podstawowych czynników kształtujących warunki styku i proces tarcia. Proszę o opis procesu oczyszczania i odpowiedź.

8. Skoro proces docierania badano zarówno dla powierzchni pokrytych środkiem na bazie oleju, jak i po jego usunięciu, należało szerzej omówić, na ile uzyskane wyniki odzwierciedlają rzeczywiste warunki eksploatacji tłumików. Warunki tarcia dla układu z warstwą ochronną i bez niej są istotnie różne, dlatego porównywanie takich stanów bez głębszej analizy może prowadzić do wniosków o ograniczonej reprezentatywności.

9. W pracy nie rozważono dostatecznie możliwości zmian materiałowych w sprężynach dociskowych elementów poeksploatacyjnych. Brak wiedzy o historii eksploatacji badanych sprzęgieł, w tym o ewentualnych przegrzaniach, nie pozwala wykluczyć zmian struktury materiału sprężyny, a tym samym zmian jej charakterystyki siłowej. Taki czynnik może mieć bezpośredni wpływ na interpretację wyników dotyczących siły docisku i momentu tarcia.

10. W schemacie pokazującym czynniki wpływających na zmianę momentu tarcia tłumika podczas eksploatacji (rys. 3.1) ujęto jedynie część potencjalnie istotnych zjawisk. Pominięto między innymi zmiany chropowatości i geometrii powierzchni, wpływ temperatury, prędkości poślizgu czy nacisku jednostkowego. Nawet jeśli nie było możliwe doświadczalne zbadanie wszystkich tych czynników, należało je przynajmniej wskazać i omówić jako element rzeczywistego obrazu tribologicznego badanego układu.

11. W pracy użyto określenia „skokowy wzrost współczynnika tarcia”, nie precyzując, w jakiej skali czasowej lub eksploatacyjnej ma on zachodzić. Pojęcie to wymaga doprecyzowania, ponieważ bez określenia interwału obserwacji pozostaje niejednoznaczne i może prowadzić do nadinterpretacji dynamiki badanego zjawiska.

12. W podrozdziale 3.2.3 (str. 48) użyto określenia „pasożytnicze niekontrolowane zużycie”, co wskazuje że zużycie powstaje kosztem przyrostu materiału na innym elemencie. Termin ten nie został osadzony ani w języku technicznym, ani w ramach wcześniej przyjętej terminologii pracy. Wymaga to wyjaśnienia, ponieważ w obecnym kształcie sformułowanie jest nieprecyzyjne i może budzić wątpliwości interpretacyjne.

13. Nie wyjaśniono, z czego wynika przyjęty podział badań docierania na 16 etapów oraz czas 52 minut. W pracy o charakterze doświadczalnym tego rodzaju parametry programu badawczego powinny być uzasadnione albo fizyką zjawiska, albo wcześniejszymi doświadczeniami, albo ograniczeniami stanowiska badawczego.

14. W rozdziale 3.2.2 autor pisze, że „w kolejnym etapie docierania warstwa wierzchnia pierścieni ciernych (wynikająca z procesu hartowania), jest systematycznie usuwana, a tarcie odbywa się częściowo na materiale rodzimym...”. W tym miejscu pojawia się pytanie, czy tarcie podlegały procesowi hartowania powierzchniowego? Ewentualnie można interpretować to jako że po procesie hartowania elementy nie były poddawane dalszej obróbce wykańczającej – szlifowaniu. Kwestia ta wymagałaby doprecyzowania. Proszę o wyjaśnienie.

15. Dobór sprzęgieł badanych po okresie docierania wydaje się w dużym stopniu przypadkowy, a liczebność próby jest niewielka. Widać to również w rozproszeniu uzyskanych wyników i ich nieciągłości. Dla wyciągania bardziej wiarygodnych wniosków naukowych należałoby zastosować większą liczbę próbek oraz lepiej kontrolować historię ich eksploatacji.

16. W badaniach po okresie docierania jedna z próbek #3 wykazuje odmienny sposób nitowania tarczy zabierakowej (rys. 4.7). W pracy nie wyjaśniono przyczyny tej różnicy ani jej potencjalnego wpływu na przebieg eksploatacji i wyniki badań. Tego rodzaju odmienność konstrukcyjna może być istotną zmienną zakłócającą.

17. Na fotografiach przedstawiających zużyte tłumiki (rys. 4.15 i 4.16) widoczne są duże pęknięcia i uszkodzenia elementów. Nie przeprowadzono jednak dyskusji, czy uszkodzenia te są skutkiem patologicznego zużycia tribologicznego i poluzowania układu, czy też przeciwnie – stanowią pierwotną przyczynę dalszej degradacji. Bez ustalenia kierunku zależności przyczynowo-skutkowej wykorzystanie takich próbek do weryfikacji hipotez pozostaje problematyczne.

18. W podrozdziale 4.3.2 poświęconemu wnioskowi z badań po okresie docierania pierwszy wniosek (str. 80) dotyczy jednak etapu docierania.

19. Jednym z najpoważniejszych zarzutów merytorycznych jest przyjęcie w praktyce założenia, że współczynnik tarcia pozostaje stały i niezależny od nacisku jednostkowego. Tymczasem wiadomo, że w rzeczywistych węzłach tribologicznych współczynnik tarcia zależy od nacisku, stanu powierzchni, temperatury i prędkości poślizgu. Skoro sama rozprawa pokazuje zmiany siły docisku wynikające z pracy sprężyny, to pominięcie wpływu tych zmian na wartość współczynnika tarcia stanowi poważne uproszczenie modelu interpretacyjnego. Wykorzystany tribometr MFT-5000 do badań wyizolowanej pary ślizgowej dawał możliwość zmiany siły docisku, a więc również określenia wpływu nacisku jednostkowego na współczynnik tarcia. Autor nie podjął jednak takiej próby, mimo że byłby to bardzo istotny element wyjaśniający mechanizmy zmian momentu tarcia. W razie trudności badania takie mogły również zostać przeprowadzone na prostszych testerach tribologicznych, na wycinkach materiału ciernego.

20. W dyskusji wyników autor wskazuje, że bardziej intensywne zużycie przy porównywalnym poziomie współczynnika tarcia może wynikać z większej koncentracji nacisków lub mniejszej powierzchni rzeczywistego styku. W istocie są to dwa opisy tego samego zjawiska. Taki sposób argumentacji pokazuje, że problem rozkładu nacisków i rzeczywistego pola kontaktu nie został w pracy dostatecznie uporządkowany pojęciowo.

## **8. UWAGI SZCZEGÓŁOWE**

Należy stwierdzić, że strona edytorska pracy jest na wysokim poziomie. Poniżej zebrano nieliczne przykładowe mankamenty odnalezione w treści recenzowanej rozprawy doktorskiej. Część z nich ma charakter drobny, jednak niektóre utrudniają lekturę i obniżają przejrzystość rozprawy.

Pewne zastrzeżenia budzi stosowane w niektórych miejscach nazewnictwo. Przykładowo na stronie 11 autor używa sformułowania „kompleksowa analiza produktu, jakim jest zestaw sprzęgła głównego”. W ocenie recenzenta określenie „produkt” nie jest w tym miejscu najważniejsze, ponieważ rozprawa dotyczy obiektu badań technicznych, a nie zagadnienia stricte z zakresu wytwarzania czy zarządzania produktem. Lepsze byłoby zastosowanie bardziej precyzyjnego języka technicznego.

Kolejna uwaga dotyczy strony graficznej części rysunkowej. W kilku przypadkach wykorzystano ilustracje będące połączeniem renderu przestrzennego i rysunku

technicznego, to znaczy obrazów zawierających jednocześnie cieniowanie charakterystyczne dla modelu 3D, oznaczenia wymiarowe oraz kreskowanie przekrojów. Dotyczy to m.in. rysunków 2.13, 2.14, 2.23, 2.24, 3.5, 3.6, 4.3 oraz 4.21. Takie rozwiązanie nie zawsze zwiększa czytelność przekazu. W mojej opinii w przypadku rozprawy technicznej bardziej przejrzyste byłyby klasyczne rysunki techniczne wykonane w rzutach Monge'a. Jednocześnie należy wyraźnie podkreślić, że ogólna strona graficzna pracy zasługuje na uznanie. Wykresy, fotografie i większość rysunków zostały przygotowane bardzo starannie, są estetyczne, czytelne i dobrze wspierają odbiór pracy.

W części podpisów pod rysunkami pojawiają się drobne niedociągnięcia redakcyjne. Przykładowo w podpisach pod rysunkami 2.13, 2.14 oraz 2.16 występują podwójne nawiasy kwadratowe, co wynika najpewniej z połączenia informacji typu „opracowanie własne” z odwołaniem literaturowym. Nie jest to uchybienie istotne, ale wpływa na redakcyjną staranność opracowania.

W hipotezie pierwszej autor posługuje się sformułowaniem „wzrost współczynnika tarcia tłumika”. Określenie to wymaga doprecyzowania, ponieważ współczynnik tarcia odnosi się do konkretnej pary trącej lub kontaktu ślizgowego, a nie do „tłumika” jako całości. W obecnym brzmieniu pojęcie to może być interpretowane niejednoznacznie i dobrze byłoby je wyjaśnić lub zastąpić bardziej precyzyjnym terminem.

Niektóre fotografie zamieszczone w rozprawie wydają się zbędne z punktu widzenia jej wartości poznawczej. Przykładem jest rysunek 4.5 przedstawiający wagę. W przypadku zdjęć stanowisk badawczych, urządzeń specjalnych czy elementów testowych ich zdjęcia rzeczywiście wnoszą istotne informacje o konstrukcji lub metodzie pomiarowej. Natomiast w przypadku standardowego przyrządu, jakim jest waga laboratoryjna, fotografia nie wnosi dodatkowej treści technicznej, a jedynie zwiększa objętość pracy.

W rozdziale 4.1.1, przy opisie parametrów stanowiska, autor podaje, że stosowano „*poczwórny czujnik siły 8000 N i rozdzielczości 150 Nm*”. Taki zapis jest niejasny i trudny do interpretacji, ponieważ łączy wielkości odnoszące się do siły i momentu w sposób niespójny. Wymaga to korekty redakcyjnej lub doprecyzowania parametrów układu pomiarowego.

Na podkreślenie zasługuje natomiast fakt, że w pracy występuje bardzo niewiele typowych błędów językowych i literówek. Redakcyjnie rozprawa została przygotowana starannie, a całość czyta się dobrze i z dużą swobodą. Pomimo wskazanych powyżej uchybień szczegółowych, ogólny poziom opracowania edytorskiego należy ocenić pozytywnie, a nawet wysoko.

## 9. WNIOSEK KOŃCOWY

Recenzowana **rozprawa doktorska pt. *Badania procesów tarcia w sprzęgle ciernym i ich optymalizacja pod względem niezawodności***, jest aktualnym i interesującym **opracowaniem Doktoranta** dotyczącym procesów tribologicznych zachodzących w elementach ciernego tłumika drgań skrętnych. Praca podejmuje problem istotny zarówno z poznawczego, jak i aplikacyjnego punktu widzenia, odnosząc się do zmian momentu tarcia w czasie eksploatacji oraz do wpływu zużycia wybranych elementów układu na niezawodność jego działania. Materiał badawczy zawarty w rozprawie stanowi wartościowy dorobek Doktoranta, mający znaczenie zarówno naukowe, jak i praktyczne i **wpisuje się w zakres dyscypliny inżynieria mechaniczna.**

Przedstawione w pracy informacje, badania i analizy w zakresie podejmowanej tematyki wskazują, że **mgr inż. Michał Formela orientuje się w literaturze przedmiotu oraz posiada wiedzę w tym obszarze**. Zakres badań jest uzasadniony z naukowego punktu widzenia, i pozwala na potwierdzanie postawionych tez. Uzyskane wyniki stanowią wartość w zakresie aplikacyjnym co jest istotą doktoratu wdrożeniowego. Stanowią również przyczółek do kontynuowania prac i opracowywania w przyszłości nowych rozwiązań konstrukcyjnych tłumików ciernych.

Wiele z przedstawionych w niniejszej recenzji uwag merytorycznych ma charakter dyskusyjny i nie wpływają na ocenę merytorycznego poziomu rozprawy doktorskiej. Należy je traktować jako zalecenia przy opracowywaniu przyszłych prac naukowych.

Na podstawie przedstawionej recenzji **stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Formeli pt. *Badania procesów tarcia w sprzęgle ciernym i ich optymalizacja pod względem niezawodności*, spełnia wymagania ustawowe stawiane rozprawom doktorskim i proponuję Radzie Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Gdańskiej dopuszczenie mgr. inż. Michała Formeli do publicznej obrony, a po jej pozytywnym przebiegu o nadanie stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.**