

Dariusz Prostański

Instytut Techniki Górniczej KOMAG

ul. Pszczyńska 37, 44-101 Gliwice

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Bortnowskiego
pt. *„Modelowanie pracy taśmowego napędu pośredniego
z dodatkowym sprzężeniem ciernym taśm w ciągnie dolnym”*

1. Podstawa opracowania recenzji

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Piotra Bortnowskiego pt. *„Modelowanie pracy taśmowego napędu pośredniego z dodatkowym sprzężeniem ciernym taśm w ciągnie dolnym”* została opracowana na podstawie zawiadomienia nr RDN/D08/45/2024 Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej informującego o wyznaczeniu na Recenzenta w oparciu o uchwałę z dnia 9 października 2024 r.

2. Ogólna charakterystyka pracy

Przedłożona do recenzji rozprawa liczy łącznie 147 stron i stanowi szczegółowe i interdyscyplinarne studium obejmujące zagadnienia mechaniki, reologii, techniki transportu oraz inżynierii środowiska.

Praca składa się ze streszczenia w języku polskim oraz angielskim, słów kluczowych i jedenastu rozdziałów zawierających opracowanie tekstowe, rysunki, tabele, spis literatury, rysunków i tabel oraz listy oznaczeń matematycznych. Spis literatury zawiera 136 pozycji, w tym trzy publikacje współautorskie Doktoranta.

Praca koncentruje się na opracowaniu nowatorskiego modelu taśmowego napędu pośredniego z dodatkowymi sprzężeniami ciernymi w dolnym ciągnie taśmy. Głównym celem jest zwiększenie zdolności trakcyjnych napędu, redukcja naprężeń w taśmie transportowej i poprawa efektywności systemów przenośnikowych, szczególnie w zastosowaniach przemysłowych.

Praca jest uporządkowana i logicznie podzielona na rozdziały, co pozwala na płynne przeprowadzenie czytelnika przez problematykę.

3. Merytoryczna ocena pracy

Cel pracy doktorskiej jakim było zbadanie możliwości zwiększenia zdolności trakcyjnych w taśmowym napędzie pośrednim poprzez zastosowanie dodatkowego sprzężenia ciernego taśm w ciągnię dolnym jest dobrze umotywowany i osadzony w praktycznych wyzwaniach związanych z długimi trasami przenośników taśmowych.

Zakres pracy obejmuje między innymi modelowanie teoretyczne rozkładu sił i zmian prędkości w układach jednoczęnowym i dwuczęnowym taśmowych napędów pośrednich, które uwzględniało przygotowanie eksperymentalne, w tym projekt stanowiska badawczego, opracowanie systemu pomiarowego. Doktorant przewidział również stworzenie układu sterowania dla weryfikacji założeń teoretycznych a także walidację eksperymentalną w tym porównanie działania układów jedno- i dwuczęnowych w warunkach laboratoryjnych oraz analizę wpływu poślizgów sprężystych na efektywność przekazywania sił tarcia i sprawność układu. W ramach zakresu prac opracowano wnioski końcowe dotyczące wyników eksperymentu i zgodności prac teoretycznych z badaniami doświadczalnymi potencjału aplikacyjnego i ograniczeń nowego rozwiązania.

Doktorant zwrócił uwagę, że zastosowanie dodatkowego sprzężenia ciernego taśm może prowadzić do zmniejszenia naprężeń w taśmie pędzonej, zwiększenia zdolności trakcyjnych oraz ograniczenia kosztów eksploatacji i ograniczenia zużycia energii.

Zakres pracy został sformułowany w sposób kompleksowy, łącząc aspekty teoretyczne i eksperymentalne, co daje wiarygodną ocenę przedstawionych założeń i ich przyszłościowej użyteczności. Rozbudowanie eksperymentu o włączenie analizy sprężystych poślizgów i rozkładów sił umożliwi lepsze zrozumienie mechanizmów zachodzących w napędach pośrednich.

Rozdział „Reologia taśmy przenośnikowej” został poświęcony analizie właściwości reologicznych taśm transportowych, które są kluczowe w zrozumieniu ich zachowania w systemach napędowych. W rozdziale w sposób systematyczny omówiono kluczowe modele reologiczne (jednoparametrowy, dwuparametrowy Kelvina-Voigta, trójparametrowy SLS) oraz podkreślono znaczenie elastycznych deformacji taśmy w kontekście tarcia i napędu. Doktorant uwzględnił specyfikę budowy taśmy, w tym jej warstwowej struktury (okładka nośna, bieźnia i rdzeń), co jest istotne do oceny wpływu właściwości materiałowych na działanie układu przenośnik-napęd pośredni.

Doktorant wyjaśnił, jak reologia wpływa na tarcie, poślizgi sprężyste i współpracę taśmy z innymi elementami napędu oraz opisał modele teoretyczne, które mogą być bezpośrednio użyte w kolejnych etapach analizy, m.in. w modelowaniu pracy napędu.

Rozdział dobrze wprowadza w problematykę zachowań materiałowych taśm w systemach napędowych. Główną wartością rozdziału są solidne podstawy teoretyczne, które mogą służyć jako fundament dla dalszej analizy.

Rozdział drugi "Sprężenie taśmy i bębna napędowego" koncentruje się na mechanice i dynamice interakcji pomiędzy taśmą transportową a bębniem napędowym, które są kluczowe dla efektywnego przekazywania siły tarcia w systemach napędowych przenośników taśmowych.

W rozdziale Doktorant omówił i szczegółowo wyjaśnił mechanizm wpływu sił równoważących na funkcjonowanie systemu napędowego i uwzględnił analizę siły normalnej i sił tarcia, które determinują efektywność sprzężenia ciernego. Przedstawił również kluczowe modele analizy sprzężenia ciernego, takie jak równanie Eulera-Eytelweina, które opisuje zależność pomiędzy napięciem taśmy a siłą tarcia w zależności od kąta opasania oraz uwzględnił modele tarcia ślizgowego oraz modele adhezji.

W rozdziale Doktorant opisał, w jaki sposób kształt bębna, rodzaj materiału taśmy oraz warunki pracy wpływają na skuteczność przekazywania siły oraz omówił zagadnienia związane z deformacjami taśmy, poślizgiem sprężystym oraz strefami ślizgowymi i adhezyjnymi. W rozdziale zostały omówione różne podejścia do modelowania, w tym model Grashofa, Firbanka i inne, uwzględniające deformacje podłużne oraz ścinające taśmy. Doktorant poruszył również tematykę zjawisk dynamicznych, takich jak tarcie zależne od prędkości oraz wpływ temperatury.

Rozdział w sposób wyczerpujący omawia kluczowe aspekty interakcji taśmy z bębniem, uwzględniając zarówno aspekty teoretyczne, jak i praktyczne z uwzględnieniem wielu modeli teoretycznych i ich porównania choć mógłby być zakończony ogólnym wnioskiem, który syntetyzowałby wpływ różnych modeli na efektywność sprzężenia ciernego w rzeczywistych systemach.

Rozdział „Aktualny stan badań napędów bębnowych” koncentruje się na przeglądzie dotychczasowych badań oraz rozwoju technologii związanych z napędami stosowanymi w przenośnikach taśmowych.

W rozdziale Doktorant omówił problemy związane z rozkładem naprężeń w taśmach i ich wpływem na trwałość oraz zużycie komponentów. Opisał badania nad technologiami sterowania w tym w zakresie, synchronizacji pracy wielu napędów oraz redukcji przeciążeń i niedociążeń.

Doktorant przedstawił zastosowanie liniowych napędów pośrednich oraz ich potencjalne zalety w kontekście optymalizacji rozkładu sił na taśmach przenośników a także uwzględnił znaczenie rozwiniętych modeli matematycznych i symulacji komputerowych w przewidywaniu krytycznych punktów systemu oraz optymalizacji jego pracy. Skoncentrował się na badaniach systemów dwucięgowych oraz ich potencjalnym wpływie na zwiększenie zdolności trakcyjnych oraz redukcję zużycia energii i kosztów eksploatacji.

Doktorant w rozdziale wyjaśnia mechanizm przekazywania siły tarcia pomiędzy taśmą pędzącą a taśmą pędzoną w napędzie pośrednim. Podkreśla, że efektywne przekazywanie energii zależy od różnicy prędkości oraz naprężeń w taśmach. Przedstawił w nim modele opisujące sprzężenie cierne w systemie taśma-taśma. Omówił ogólną postać modeli matematycznych, uwzględniając uproszczenia i ograniczenia wynikające z założeń teoretycznych a także opisał dwa główne warianty napędów pośrednich: jednocięgnowy i dwucięgnowy. Dla obu wariantów przedstawił strefy poślizgu i adhezji oraz analizę rozkładu sił w taśmach pędzącej i pędzonej. Wykazał korzyści wynikające ze stosowania dodatkowego cięgna dolnego, w tym zmniejszenie naprężeń w taśmie pędzonej, co daje możliwości stosowania taśm o niższej wytrzymałości nominalnej, a także redukcję kosztów energii i zużycia elementów mechanicznych.

Doktorant zwrócił uwagę na konieczność precyzyjnego doboru parametrów konstrukcyjnych, takich jak długość sprzężenia cierne, aby zapewnić optymalną efektywność napędu. Podkreślił również rolę eksperymentalnej weryfikacji wyników modeli teoretycznych.

Rozdział dostarcza szerokiego przeglądu literatury i badań, które dobrze ilustrują ewolucję napędów bębnowych. W rozdziale zostały uwzględnione zarówno aspekty historyczne, jak i nowoczesne technologie, co daje pełen obraz stanu wiedzy i pokazuje jak wyniki badań laboratoryjnych i symulacji są przekładane na rzeczywiste systemy, co zwiększa praktyczną wartość rozdziału.

Rozdział w dużej mierze opiera się na analizie literatury i teoretycznych modelach. Uzupelnienie o konkretne wyniki badań mogłoby zwiększyć wartość całej pracy. Rozdział ten jest ważnym elementem pracy, przedstawiającym kompleksowe podejście do analizy zagadnienia sprzężenia cierne.

Rozdział „Walidacja laboratoryjna” szczegółowo opisuje proces weryfikacji teoretycznych założeń dotyczących napędów taśmowych w warunkach eksperymentalnych. W rozdziale Doktorant opisuje specjalnie przygotowane stanowisko badawcze, składające się z dwóch współpracujących przenośników taśmowych, z czego główny ma długość 12 metrów, a napęd pośredni 5 metrów. Konstrukcja uwzględnia elementy wspomagające, takie jak bębny odchylające i krążniki, co zapewnia odpowiednie odwzorowanie rzeczywistych warunków pracy. Stanowisko zostało wyposażone w dodatkowe urządzenia pomiarowe takie jak tensometryczne czujniki siły, enkodery inkrementalne oraz system akwizycji danych. Doktorant w rozdziale podkreślił dokładność pomiarów poprzez przeprowadzenie kalibracji urządzeń, celem otrzymania wysokiej wiarygodności wyników pomiarowych.

Zaplanował eksperyment z uwzględnieniem niezależnych czynników, takich jak siła napięcia taśmy i docisk cięgna oraz mierzonych parametrów, takich jak siła tarcia i prędkość poślizgu. Zastosował

analizę ANOVA oraz testy statystyczne w celu oceny wpływu poszczególnych parametrów na otrzymane wyniki.

Wyniki dla wariantów jednociegnowego i dwuciegnowego napędu pośredniego obejmują ocenę zdolności trakcyjnych, efektywności sprzężenia ciernego oraz porównanie sprawności systemu. Doktorant podkreślił znaczenie różnic w naprężeniach pomiędzy taśmami pędzącą i pędzoną dla stabilności pracy napędu wykazując również negatywne, dla efektów, stany pracy układu przenośnik-dwuciegnowy napęd pośredni

Eksperymenty wskazały, że optymalne warunki pracy występują przy dużej różnicy sił w taśmach oraz odpowiednio dobranym docisku, co jest istotne dla implementacji w warunkach przemysłowych.

Rozdział dostarcza szczegółowych informacji na temat każdego etapu walidacji, od opisu stanowiska po analizę statystyczną wyników. Eksperymenty zostały zaplanowane przez Doktoranta z myślą o rzeczywistych zastosowaniach, a wnioski mogą być przydatne dla inżynierów projektujących systemy napędowe.

Rozdział „Walidacja laboratoryjna” to dobrze przygotowana część pracy, która w sposób szczegółowy dokumentuje proces eksperymentalny oraz uwzględnia analizę otrzymanych wyników.

Rozdział „Weryfikacja teorii na podstawie eksperymentów” koncentruje się na weryfikacji teoretycznych założeń przedstawionych wcześniej w pracy doktorskiej poprzez porównanie ich z wynikami uzyskanymi w trakcie badań laboratoryjnych.

W rozdziale zostały uwzględnione jedynie te założenia teoretyczne, które można zweryfikować na podstawie mierzalnych parametrów pracy napędu. Niektóre aspekty, takie jak wielkość strefy adhezji i poślizgu, zostały pominięte z uwagi na trudności w ich bezpośrednim pomiarze.

Doktorant w rozdziale przeanalizował dodatkowo zdolności trakcyjne wariantów napędu jednociegnowego i dwuciegnowego, z naciskiem na wpływ parametrów takich jak moduły sprężystości taśm pędzącej i pędzonej oraz stosunki sił w taśmach. Zweryfikował teoretyczne wartości prędkości poślizgu w górnym i dolnym ciągnięciu, porównując je z danymi eksperymentalnymi.

Ocecił także efektywność sprzężenia ciernego w układzie napędu pośredniego dla obu wariantów, z uwzględnieniem długości stref sprzężenia i pracy sił tarcia.

Rozdział dostarcza szczegółowych wniosków w zakresie optymalnych warunków pracy napędów oraz wskazuje ograniczenia teoretycznych modeli w porównaniu do wyników eksperymentalnych. Rozdział opiera się na wyraźnym powiązaniu między modelami teoretycznymi a eksperymentem, co podkreśla naukową wartość pracy a wykorzystanie narzędzi statystycznych, takich jak analiza interakcji między parametrami, zwiększa wiarygodność przedstawionych wyników.

Autor pracy w tym rozdziale w sposób szczegółowy i naukowo uzasadniony weryfikuje kluczowe założenia teoretyczne.

Doktorant w rozdziale „Wnioski końcowe” podsumowuje wyniki pracy, dzieląc je na dwie główne części:

- Wnioski oparte na założeniach teoretycznych, gdzie omówił mechanizm sprzężenia ciernego, w tym występowanie stref poślizgu i adhezji oraz ich zależność od obciążeń w cięgnach a także zwrócił uwagę na to, że w uproszczonej analizie teoretycznie można pominąć niektóre odkształcenia, takie jak postaciowe, ponieważ ich wpływ jest mniejszy niż odkształceń sprężystych.
- Wnioski oparte na walidacji eksperymentalnej, gdzie badania laboratoryjne potwierdziły, że napęd dwucięgnowy poprawia zdolności trakcyjne dzięki wprowadzeniu dodatkowego cięgna dolnego, choć zidentyfikowano ograniczenia, takie jak większe straty mechaniczne wynikające z rozszerzenia strefy tarcia i odkształceń sprężystych.

We wnioskach doktorant stwierdził, że rozwiązanie wymaga precyzyjnego doboru parametrów, takich jak rozmieszczenie napędu oraz siły docisku, aby zminimalizować straty energetyczne i zoptymalizować wykorzystanie sprzężenia ciernego.

Doktorant we wnioskach umiejętnie łączy aspekty teoretyczne i praktyczne, wskazując na osiągnięcie głównego celu pracy tj. poprawie zdolności trakcyjnych napędu pośredniego w kontekście wpływu parametrów eksploatacyjnych na efektywność pracy napędu, co jest cenną wiedzą do praktycznego wykorzystania w przyszłości. Jednak wnioski końcowe nie odnoszą się szczegółowo do wyników badań, przez co ich potencjalna wartość dla praktyki inżynierskiej jest pomniejszona.

Podsumowując, praca doktorska prezentuje dobrze ugruntowane podejście teoretyczne i eksperymentalne do analizy napędów pośrednich w systemach przenośników taśmowych, ze szczególnym uwzględnieniem zwiększenia zdolności trakcyjnych przez zastosowanie dodatkowego sprzężenia ciernego. Stanowi ona znaczący wkład w rozwój napędów przenośnikowych, szczególnie w kontekście optymalizacji pracy, stosowanych mocy napędowych oraz wydłużenia tras przenośnikowych poprzez zastosowanie dwucięgnowych napędów pośrednich.

Analiza napędów dwucięgnowych oraz propozycja nowych modeli sprzężenia ciernego to obszar o dużym badawczym i praktycznym potencjale, szczególnie w górnictwie podziemnym.

Praca dobrze ujmuje połączenie modelowania teoretycznego, analiz numerycznych i eksperymentu laboratoryjnego, co ułatwia wielopłaszczyznowe zrozumienie badanego zjawiska. Wyniki badań wskazują na możliwość redukcji naprężeń i zwiększenia efektywności energetycznej, co

może znaleźć zastosowanie w przemyśle. Uwzględnienie aspektów takich jak poślizg sprężysty, rozkład sił oraz wpływ naprężeń na sprzężenie cierne zwiększa wartość naukową pracy.

Precyzyjne opisy stanowisk badawczych, aparatury pomiarowej oraz procedur eksperymentalnych świadczą o staranności autora w podejściu do realizacji pracy.

Choć praca posiada pewne drobne niedociągnięcia i brak w niej osobnego rozdziału z opisem kierunków dalszych prac, to jest to dobre opracowanie pod względem merytorycznym, łącząc innowacyjne podejście do analizy napędów taśmowych z solidnym fundamentem teoretycznym i eksperymentalnym i niewątpliwie zasługuje na pozytywną ocenę.

4. Uwagi krytyczne

Mimo, że praca posiada dużą wartość dodaną w dziedzinie badań naukowych, to doktorant nie ustrzegł się pewnych błędów zarówno w obszarze piśmiennictwa jak i merytorycznym.

Jeśli chodzi o błędy piśmiennicze, edytorskie i stylistyczne to:

- w całej pracy na początku każdego akapitu należy konsekwentnie stosować wcięcie,
- str. 51 – literówka „siłę dociski” oraz „dwucięgnowy pośrednich napędach”,
- str. 55 – powinno być „Dodatkowe uproszczenie”,
- str. 56 – „występuje sprzężenia cierne taśm”,
- str. 57 – błąd „odcinak sprzężenia taśm”,
- str. 58 – „napęd pośrednie”,
- str. 62 – „całkowitego oporu zewnętrznych...?”,
- str. 63 – taki sam podpis rysunku 8.5 jak przy rysunku 8.4,
- str. 68 – używanie zamiennie sił/siły,
- str. 86 – może zamiast 9.5.3. *Plan eksperymentu* użyć innego sformułowania, np. harmonogram, ponieważ rozdział 9.5 ma tytuł *Planowanie eksperymentu*.
- str. 90 – zamiast odcinka czasowym lepiej brzmi interwale 60-sekundowym,
- str. 92 – nieczytelne wykresy,
- str. 112 – „Zdolności trakcyjne ciągną dolnego zmniejszają się wraz z czasem stopniowego obciążania napędu”. Czas chyba jest tutaj niewłaściwym słowem?
- str. 119 – zamiast włączenie w ruch, wprowadzenie w ruch,
- str. 105, 106, 119, 130 - wyrażenie „najbardziej optymalny” jest powtórzeniem, powinno być najbardziej odpowiedni, optymalny, najbardziej korzystny w danych warunkach.

Ww. drobne błędy nie mają wpływu na wartość naukową pracy.

W rozdziałach z zakresu stanu wiedzy (rozdziały 4-8) nie zamieszczono ilustracji (rozdział 6) lub zamieszczano je sporadycznie, ale nie utrudnia to zrozumienia zagadnienia (rozdziały 4,5,7,8).

W zakresie niedociągnięć merytorycznych doktorant w części teoretycznej pracy operował jedynie zależnościami matematycznymi, nie posługując się żadnymi wartościami ani adekwatnymi do wartości osiągniętych w napędach taśmowych stosowanych w przemyśle ani takimi porównywalnymi z obiektem laboratoryjnym. Nie umniejsza to jednak wartości pracy choć utrudnia zrozumienie zagadnienia.

Uważam, że we wnioskach końcowych powinno się położyć większy nacisk na zamieszczenie wyników badań, które są istotne dla efektów pracy.

Brak ostatniego rozdziału „Kierunki dalszych prac/badań” pozostawia pracę z pytaniem: co dalej? Choć w pracy doktorant sygnalizował pewne potrzeby prowadzenia dalszych prac, to czytelnikowi trudno je wychwycić w tekście.

Pytanie, na które oczekuję również odpowiedzi doktoranta, to jakie deformacje ogniwo powodują niejednorodną podziałkę łańcucha, co utrudnia współpracę z kołem łańcuchowym, zgodnie ze stwierdzeniem zamieszczonym na stronie 13 i przypisem [60].

5. Końcowa ocena pracy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Bortnowskiego pt. „*Modelowanie pracy taśmowego napędu pośredniego z dodatkowym sprzężeniem ciernym taśm w ciągnie dolnym*” prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie inżynierii środowiska, górnictwo i energetyka oraz dowodzi umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych przez Doktoranta, co kwalifikuje go do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora. Jego praca spełnia wszelkie wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (tj. Dz.U. z 2024 r. poz. 1571). Biorąc pod uwagę wartość merytoryczną pracy, z pełnym przekonaniem rekomenduję dopuszczenie Pana mgr inż. Piotra Bortnowskiego do obrony doktoratu.