

Recenzja

rozprawy doktorskiej magistra inżyniera **Piotra Bortnowskiego**, pt.:
**„Modelowanie pracy taśmowego napędu pośredniego z dodatkowym sprzężeniem
ciernym taśm w ciągnie dolnym”**

1. Wprowadzenie

Recenzji rozprawy doktorskiej dokonano na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka w Politechnice Wrocławskiej z dnia 09.10.2024, w oparciu o otrzymany egzemplarz rozprawy doktorskiej, przekazany wraz z pismem przewodnim, z dnia 14.10.2024r., sygnowanym przez Zastępcę Przewodniczącego RDN, dr hab. inż. Małgorzatę Wolską, prof. uczelni.

Opinię wykonano w oparciu o art.187 ust.1 i 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. z 2023. poz. 742; - Dz.U. z 2024 r. poz. 1571) .

2. Charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska pt.: **„Modelowanie pracy taśmowego napędu pośredniego z dodatkowym sprzężeniem ciernym taśm w ciągnie dolnym”** zawiera 147 stron i składa się z 11 rozdziałów, bibliografii, spisu rysunków oraz tabel, streszczenia w języku polskim i angielskim. Spis literatury zawiera 136 pozycji, w tym 3 prace z udziałem autora rozprawy, związane merytorycznie z jej tematem.

Rozprawa jest kompleksowym ujęciem problematyki sprzężenia ciernego, taśmowego napędu pośredniego, który stanowi dodatkowy przenośnik zabudowany pomiędzy ciągnami głównego przenośnika transportującego. Doktorant szczególną uwagę skoncentrował na modelowaniu oraz walidacji laboratoryjnej, koncepcji taśmowego napędu pośredniego z dodatkowym sprzężeniem ciernym w ciągnie dolnym. Według doktoranta, rozpatrywane rozwiązanie napędu, powinno pozwolić na zmniejszenie naprężeń w głównej taśmie transportującej urobek. W efekcie umożliwiać to powinno stosowanie taśm o mniejszej wytrzymałości nominalnej, redukcję ich masy, a tym samym wpływać korzystnie na opory ruchu przenośnika oraz zużycie energii elektrycznej.

2.1. Ocena zasadności wyboru tematu i zakresu pracy

Tematyka rozprawy koncentruje się na aspektach ciernego przekazywania siły tarcia do elastycznych cięgien w tym zwłaszcza poślizgu sprężystego na odcinkach ciernego sprzężenia taśm, który ma tu kluczowe znaczenie. Dotychczasowe ograniczenia układów sterowania i układów pomiarowych nie pozwalały na precyzyjny pomiar poślizgów sprężystych w rozpatrywanej strefie oraz pełniejsze ustalenie między innymi rozkładu sił we współpracujących taśmach. *Istniejące aktualnie modele oraz metody badawcze mają szereg istotnych ograniczeń, utrudniających wyjaśnienie przebiegu rozpatrywanego zjawiska. Stąd też jako zasadne należy uznać zaproponowaną tematykę rozprawy jak i jej zakres obejmujący między innymi opracowanie modelu rozkładu sił w taśmach pędzącej i pędzonej, ustalenie zmian prędkości taśm w pośrednim napędzie taśmowym oraz eksperymentalną weryfikację rozważań teoretycznych na unikalnym stanowisku badawczym wyposażonym w unikatowe: zestaw pomiarowy i układ sterowania.*

Konkludując uważam, że podjęta tematyka jest aktualna i ważna tak dla nauki jak i przemysłu, w tym zwłaszcza dla producentów taśm oraz użytkowników napędów taśmowych.

Cel pracy określony przez doktoranta to „wykazanie możliwości zwiększenia zdolności trakcyjnych w taśmowym napędzie pośrednim poprzez dodatkowe sprzężenie cierne taśm w cięgnię dolnym”.

Obiektem badań był doświadczalny przenośnik taśmowy z dodatkowym taśmowym napędem pośrednim.

Zakres pracy obejmował:

- opracowanie założeń teoretycznego rozkładu sił w taśmach pędzącej i pędzonej dla pośredniego napędu taśmowego pracującego w układzie jednocięgnowym i dwucięgnowym,
- opracowanie założeń teoretycznych zmian prędkości taśmy pędzącej i pędzonej dla pośredniego napędu taśmowego pracującego w układzie jednocięgnowym i dwucięgnowym,
- przygotowanie eksperymentu, stanowiska pomiarowego, systemu pomiarowego oraz układu sterowania w celu walidacji analiz teoretycznych pracy napędu,
- porównanie wyników badań laboratoryjnych pracy taśmowego napędu pośredniego w wariacie jednocięgnowym i dwucięgnowym,

- określenie wpływu poślizgów sprężystych taśm na odcinkach sprzężenia ciernego na wielkość przekazywanej siły tarcia i sprawność napędu dwucięgnowego.

Zakres pracy jest adekwatny do podjętego problemu badawczego i wystarczający dla potwierdzenia przyjętych hipotez badawczych.

2.2. Ogólna charakterystyka pracy, ocena układu pracy

Układ pracy jest poprawny, zbieżny z ogólnie przyjętą konwencją w tym obszarze.

W początkowej części rozprawy doktorant zamieścił streszczenie w języku polskim i angielskim.

W rozdziale pierwszym (wstęp) doktorant charakteryzuje oraz dokonał oceny dotychczasowych rozwiązań napędów przenośników taśmowych.

Rozdział drugi (motywacja) przedstawia genezę tematu oraz charakteryzuje wcześniej prowadzone rozważania doktoranta, które były inspiracją do podjęcia tematu rozprawy.

Rozdział 3 to cel i zakres pracy.

Cel pracy to (jak już wspomniano) „wykazanie możliwości zwiększenia zdolności trakcyjnych w taśmowym napędzie pośrednim poprzez dodatkowe sprzężenie cierne taśm w ciągnie dolnym”.

Rozdział 4 dotyczy tematyki reologii taśm przenośnikowych.

Doktorant podkreśla, że większość materiałów stosowanych do budowy taśm wykazuje silną nieliniowość fizyczną oraz dużą zdolność tłumienia. Stąd też charakterystyka odkształceniowo-naprężeniowa, determinująca sprężystość, wykazuje wyraźne cechy reologiczne oraz histerezę. Biorąc pod uwagę te właściwości oraz stopień skomplikowania budowy, taśmy przenośnikowe klasyfikowane są jako kompozyty o silnie nieliniowym charakterze odkształcalności, co znacząco utrudnia modelowanie ich zachowania pod wpływem zróżnicowanych obciążeń, którym poddawane są w czasie obiegu wokół przenośnika. Doktorant stwierdza, że ma to wpływ na trudności w modelowaniu taśm przenośnikowych a w efekcie na istnienie szeregu modeli mechanicznych taśm (od jedno do trójparametrowych), pozwalających na opis ich właściwości (z określonym przybliżeniem). Doktorant szczegółowo opisuje dotychczas funkcjonujące modele przedstawiając ich ograniczenia i zalety.

W rozdziale nr 5, opiniowany przedstawił zagadnienia związane ze zjawiskiem sprzężenia ciernego taśmy i bębna napędowego. Rozpatrzył warunki równowagi sił w taśmie opasującej bęben napędowy, przywołał równanie Eulera- Eytelweina i wykazał jego

ograniczenia. W konkluzji analizy tego aspektu opiniowany podkreślił, że poślizg sprężysty jest niezbędny do ciernego przenoszenia napędu na kołach napędowych a w przypadku przenośników taśmowych, poślizg taki ma miejsce na bębnach napędowych. W dalszej części analizy doktorant omówił aspekty teoretycznych podstaw poślizgu sprężystego w ciernym przekazywaniu napędu. Omówił istotę modeli Firbanka, Belofsky'go, Kim – Marshek – Naji, Leamy – Wasfy'ego. Scharakteryzował modele uwzględniające efekty wiskotyczne, modele oparte Metodę Elementów Skończonych - MES oraz modele tarcia zależnego od prędkości i temperatury. W konkluzji rozdziału zauważył, że poślizg sprężysty musi występować w każdym systemie wykorzystującym tarcie do przekazywania napędu na elastyczne ciągnąco. Bez tego zjawiska nie byłoby możliwe kompensowanie różnic w prędkościach między bębniem a taśmą, co jest warunkiem koniecznym do przenoszenia momentu obrotowego.

W rozdziale 6 doktorant scharakteryzował aktualny stan badań napędów pośrednich. W konkluzji rozdziału stwierdził, że dotychczasowe prace badawcze skupione są głównie na analizie możliwej do przekazania siły tarcia na odcinku sprzężenia taśm, awaryjności systemu napędowego oraz problematyce sterowania. W zakresie analizy siły tarcia na odcinku sprzężenia taśm, badania koncentrują się na efektywności przekazywania siły napędowej oraz redukcji napięć w taśmach. Modele matematyczne i symulacje komputerowe są wykorzystywane do prognozowania zachowań systemu i identyfikacji potencjalnych punktów krytycznych. Wprowadzenie zaawansowanych systemów sterowania, takich jak sterowanie wektorowe czy zastosowanie sprzęgieł hydrokinetycznych, pozwala na lepszą koordynację działania silników i minimalizację ryzyka awarii. Badania wskazują na konieczność precyzyjnego dostrajania parametrów sterowania, aby zapewnić równomierne rozłożenie mocy i minimalizować zużycie komponentów.

Rozdział 7 zawiera opis/rozwińnięcie stanu wiedzy dotyczącej zjawiska poślizgu sprężystego ciągnięć elastycznych. Opiniowany analizował dwa główne aspekty badań, tj. badania pasów przekładniowych oraz taśm przenośnikowych. W konkluzji stwierdził, że opublikowane wyniki badań nad pomiarem poślizgu sprężystego w systemach przenośnikowych i napędowych z elastycznymi ciągnami, jednoznacznie wykazują, że pomiar ten jest możliwy do realizacji w warunkach laboratoryjnych, przy użyciu precyzyjnych urządzeń pomiarowych. Ponadto, badania wykazują, że wzrost prędkości liniowej i obciążenia taśmy powoduje proporcjonalne zwiększenie wartości poślizgu sprężystego, co jest zgodne z teoretycznymi przewidywaniami dotyczącymi dynamicznych deformacji taśmy.

Rozdział 8 zawiera analizę kształtowania się sprzężenia ciernego taśm na długości przenośnika taśmowego, w tym aspekty modelowania ciernego przekazywania napędu

w systemie taśma – taśma. Dla taśmowego napędu pośredniego, na bazie opracowanego modelu, przeanalizował rozkład sił w taśmie pędzącej i pędzonej. Rozpatrzył aspekty kształtowania się strefy poślizgu i adhezji. Podobnie w przypadku taśmowego napędu pośredniego dwucięgnowego zbudował stosowny model i przeanalizował kształtowanie się sił w taśmach. Rozwinął problematykę sił tarcia w cięgnach oraz kształtowanie się sprawności napędu. Z dokonanych przez doktoranta wyprowadzeń teoretycznych wynika między innymi, że ocena poprawności działania napędu pośredniego, zarówno w wariacie jednocięgnowym, jak i dwucięgnowym, jest możliwa jedynie na podstawie znanych, mierzonych wartości siły w taśmach pędzącej i pędzonej na bębnach zwrotnych dwóch przenośników oraz sił obwodowych na tych bębnach, przy znanym rozkładzie oporów ruchu w cięgnach napędu pośredniego.

W rozdziale 9 zostały przedstawione procedury i wyniki walidacji laboratoryjnej wyników rozważań analitycznych opartych o opracowane modele teoretyczne. Według opisu, konstrukcja stanowiska składała się z dwóch wzajemnie połączonych przenośników taśmowych, odzwierciedlających typową konfigurację taśmowych napędów pośrednich. Zastosowanie generatorów obciążenia w postaci silników klatkowych umożliwiło sztuczne odzwierciedlenie warunków eksploatacyjnych, w których taśmy przenośnikowe są poddawane różnym obciążeniom jednostkowym wynikającym z transportu urobku. W pierwszej fazie badań oszacowano parametry materiałowe stosowanych taśm. Pomiaru sił obwodowych na bębnie napędowym i bębnach hamujących, oraz pomiaru siły w taśmach, dokonano za pomocą tensometrycznych czujników siły. Do pomiaru liniowej prędkości taśmy w różnych punktach na odcinkach sprzężenia ciernego, wykorzystano enkodery inkrementalne. Dla każdego układu napędowego zastosowano sterowanie pracą silnika, znane jako wektorowa kontrola strumienia, której główną zaletą jest możliwość precyzyjnego sterowania momentem obrotowym i prędkością silnika niezależnie od siebie, poprzez kontrolowanie strumienia magnetycznego wytwarzanego przez uzwojenia silnika.

Na uwagę zasługuje bardzo skrupulatne zaplanowanie eksperymentu, gdzie wykorzystano frakcyjny plan eksperymentu jak i bardzo obszerna metodyka badawcza. Ilość pozyskanych danych pomiarowych oraz przeprowadzonych analiz przekrojowych jest imponująca.

W konkluzji, w oparciu o uzyskane wyniki, doktorant stwierdził, że kluczowym czynnikiem determinującym efektywność stosowania dwucięgnowych napędów pośrednich jest odpowiedni stosunek sił w taśmach pędzącej i pędzonej, który bezpośrednio wpływa na dynamiczny moduł sprężystości taśm oraz na wielkość prędkości poślizgu. Optymalne funkcjonowanie tego rodzaju

napędów wymaga więc precyzyjnego doboru obciążeń w ciągnach, co jest zgodne z przyjętymi założeniami teoretycznymi.

W rozdziale 10 doktorant dokonał weryfikacji wyników rozważań teoretycznych w oparciu o wyniki badań eksperymentalnych. W konkluzji analizy opiniowany między innymi stwierdza, że zarówno w napędzie jednocięgowym, jak i dwucięgowym kluczową rolę w przekazywaniu siły tarcia odgrywają moduły sprężystości współpracujących taśm, które wpływają na rozkład naprężeń i odkształceń sprężystych w układzie. W napędzie jednocięgowym wpływ modułów sprężystości, a więc naprężeń w taśmach, jest istotny, ale bardziej przewidywalny z uwagi na mniejszą liczbę zmiennych. W napędzie dwucięgowym, z uwagi na obecność dodatkowego ciągu, interakcje między taśmami są bardziej złożone, co prowadzi do bardziej zróżnicowanego rozkładu sił tarcia. Ponadto, wyniki eksperymentalne potwierdziły istotny wpływ prędkości poślizgu sprężystego na zdolności trakcyjne napędu. Przenoszenie większych sił tarcia powodowało wzrost prędkości poślizgu sprężystego. Zależność siły tarcia od prędkości poślizgu w zakresie odkształceń sprężystych mogła być interpolowana liniowo, co jest zgodne z modelem teoretycznym. Jednakże, wartości prędkości poślizgu sprężystego uzyskane na drodze obliczeń teoretycznych były zdecydowanie mniejsze niż te uzyskane w testach laboratoryjnych. Według doktoranta, taki wynik może być spowodowany błędnym oszacowaniem dynamicznego modułu sprężystości, szczególnie w zakresie jednostkowych sił rozciągających, które w badaniu były stosunkowo niskie.

Rozdział 11 zawiera wnioski końcowe, w tym wynikające z rozważań teoretycznych oraz walidacji eksperymentalnej.

W zakończeniu rozprawy załączono bibliografię, spis rysunków i tabel.

2.3. Ocena zastosowanego piśmiennictwa

Strona edytorska rozprawy.

W rozprawie zauważyłem nieliczne błędy edytorskie („literówki”). Przykłady:

Str. 18₁₄ – jest „...trwały, ..”, powinno być „trwałych”,

Str. 20⁷ – jest „połączonych szeregowo”, powinno być „połączonych równolegle” (jak wynika z rysunku 4.2),

Str. 25₁₇ – jest „jako giętki „, „jako giętka”

....

Ponadto zauważyłem używanie formy osobowej, w rodzaju „uzyskujemy”, „otrzymujemy” (np. str. 26^{2,6} – powinna być forma bezosobowa.

Opisy w rysunkach wyników są mało czytelne z uwagi na wielkość zastosowanej czcionki (np. rys. 9.19, i dalsze. *W przypadku wydania rozprawy drukiem warto zmienić te opisy.* Uwagi zostały przekazane doktorantowi.

2.4. Ocena realizacji celu naukowego pracy

Doktorant realizował podjęty problem naukowy między innymi poprzez opracowanie modelu teoretycznego rozkładu sił w taśmach pędzącej i pędzonej w napędzie pośrednim pracującym w układzie jednocięgnowym oraz dwucięgnowym, uwzględniając wpływ sprężystych odkształceń taśmy a także wyprowadził równanie opisujące sprawność sprzężenia ciernego w taśmowym napędzie pośrednim. W laboratoryjnych badaniach stanowiskowych dokonał porównania pracy napędu w wariacie jednocięgnowym i dwucięgnowym, oceniając przy tym efektywność przekazywania siły tarcia oraz stabilność działania układu. Szczególną uwagę poświęcił analizie wpływu poślizgów sprężystych na wartość przekazywanej siły tarcia oraz sprawność nowej koncepcji napędu dwucięgnowego.

Cele rozprawy wynikające z przyjętego jej zakresu zostały w całości zrealizowane tak w zakresie analiz teoretycznych jak i walidacji eksperymentalnej.

Należy zatem uznać, że cel naukowy rozprawy polegający na wykazaniu możliwości zwiększenia zdolności trakcyjnych napędu pośredniego poprzez zastosowanie dodatkowego sprzężenia taśm w ciągu dolnym, został osiągnięty a przyjęte hipotezy zostały pozytywnie zweryfikowane.

2.5. Ocena wyników badań

Uzyskane wyniki badań są unikatowe, bardzo interesujące, poszerzają i dostarczają nowej wiedzy w tematyce napędów pośrednich. Wcześniej recenzent zwrócił już uwagę na bardzo skrupulatne zaplanowanie eksperymentu, bardzo obszerną metodykę badawczą, imponującą ilość pozyskanych danych pomiarowych oraz przeprowadzonych analiz przekrojowych. To dzisiaj rzadkość w opracowaniach naukowych.

Wybiegając nieco poza zakres niniejszej pracy należy jednak postawić pytanie jak zdaniem Doktoranta, występujące w praktyce, zanieczyszczenie taśm, wpłynie na odpowiedź badanego układu przeniesienia mocy?

2.6. Aspekty praktycznego wykorzystania wyników badań

Obiecujące wyniki prowadzonych przez Doktoranta badań, mają bardzo duże szanse na praktyczne zastosowanie w przemyśle z uwagi duże zainteresowanie potencjalnych producentów i eksploatorów przenośników/taśm przenośnikowych, wynikające z aktualnych problemów z eksploatacją przenośników taśmowych o znacznych długościach i wydajnościach/mocach.

2.7. Ocena oryginalności rozprawy

Praca zawiera szereg oryginalnych elementów, do których można zaliczyć np. opracowane modele analityczne, zweryfikowane zależności opisujące zachowanie taśm w taśmowych napędach pośrednich, koncepcję stanowiska i metody pomiarowej oraz toru pomiarowego.

2.8. Ocena ogólnej wiedzy teoretycznej oraz umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej Kandydata

Szereg prowadzonych analiz wymagało zastosowania bardzo zaawansowanego aparatu informatycznego (np. przetwarzanie sygnałów pomiarowych) czy optymalnego planowania eksperymentu, co wykazuje dobre przygotowanie Doktoranta w tym zakresie. Wieloaspektowość badań i analiz podjętych przez opiniowanego świadczy o dużych zasobach wiedzy technicznej związanej z realizowanym tematem. Eksperymenty z użyciem zaproponowanej metody pomiarowej oraz skonstruowanego stanowiska badawczego z dedykowanym układem pomiarowym i sterowania wykazują, że opiniowany posiada umiejętności samodzielnego prowadzenia prac naukowo – badawczych. Zaproponowane modele empiryczne, wyniki uzyskane na bazie analiz teoretycznych i zwalidowane doświadczalnie oraz ostrożność we wnioskowaniu w konfrontacji do niepewności przebiegu niektórych zjawisk potwierdzają dobre przygotowanie teoretyczne i umiejętność prowadzenia badań analitycznych i laboratoryjnych, przez Doktoranta.

3. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa zawiera wartościowe wyniki badań, stanowi oryginalne rozwiązanie przez doktoranta problemu naukowego, ma duże znaczenie aplikacyjne i poznawcze a uzyskane wyniki mogą być wykorzystywane w dalszych pracach, nad doskonaleniem konstrukcji napędów

27

jak i całych konstrukcji przenośników o dużych wydajnościach i długościach. Praca stanowi dobre podwaliny do dalszego rozwoju naukowo- badawczego opiniowanego.

Biorąc pod uwagę całość pracy, tj. jej wartość naukową i poznawczą oraz wkład własny uważam, że Doktorant rozwiązał ważny problem z zakresu dyscypliny naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka (opracował stosowne modele mechaniczne, autorską metodę pomiarów poślizgu taśm, zbudował dedykowany system pomiarowy, przeprowadził planowe badania laboratoryjne, weryfikując ostatecznie postawione założenia i hipotezy).

Stąd też stwierdzam, że rozprawa doktorska magistra inżyniera Piotra Bortnowskiego, pt.: „Modelowanie pracy taśmowego napędu pośredniego z dodatkowym sprzężeniem ciernym taśm w ciągnie dolnym” spełnia wymogi stawiane w art.190 ust.3 ustawy z dnia 20 lipca 2018r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (oraz Dz. U. z 2021. poz. 478 z późn. zm. w tym Dz.U. z 2024 r. poz. 1571).

Wnioskuje zatem o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

Ponadto, wnioskuje o wyróżnienie opiniowanej rozprawy z uwagi na wartość naukową wyników uzyskanych na bazie opracowanych modeli i zweryfikowanych pozytywnie w badaniach stanowiskowych, unikatowe wyniki badań stanowiskowych, obszerność poruszanych zagadnień, staranność i zakres przeprowadzenia eksperymentów oraz rzetelność opracowania wyników.

prof. J. Jonaś