Warszawa 28.08.2024

prof. dr hab. inż. Krzysztof Badyda
Instytut Techniki Cieplnej
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Politechnika Warszawska

Recenzja rozprawy doktorskiej autorstwa mgr inż. Przemysława Rumina, zatytułowanej ***„Wspomaganie utrzymania i obsługi taśmociągów za pomocą sztucznej inteligencji oraz wydajnych algorytmów analitycznych"***

1. Podstawa formalna. Sylwetka Doktoranta

Recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej z dnia 8.08.2024 r. w wyniku uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska Górnictwo i Energetyka tej uczelni z dnia 11.07.2024 r. Rozprawa powstała w ramach programu Doktorat Wdrożeniowy. Doktorant jest pracownikiem firmy BEUMER, w której przeprowadził badania.

2. Cel pracy, zasadność podjęcia tematu

W przedstawionej do oceny pracy zadaniem podjętym przez Doktoranta było stworzenie innowacyjnych narzędzi służących do wspomagania monitorowania przenośników taśmowych oferowanych przez zatrudniającą go firmę.

Będące przedmiotem rozprawy przenośniki taśmowe do transportu materiałów sypkich są powszechnie stosowane w obiektach przemysłowych, w tym w obiektach energetycznych. W górnictwie i energetyce służą przede wszystkim do transportu węgla, często na znaczące odległości. Na przykład w należących do PGE Górnictwo i Energetyka Konwencjonalna kopalni i elektrowni Bełchatów system taśmociągów liczy dziesiątki kilometrów długości. Cały wydobyty w tym obiekcie węgiel, w ilości ponad 30 mln ton rocznie transportowany jest z miejsca wydobycia, odkrywki na dużej głębokości, do elektrowni. Awaria taśmociągu, tym samym zakłócenie jego funkcjonowania, stanowi krytyczne zagrożenie dla pracy elektrowni mogące prowadzić do braku dostaw paliwa. Bardzo ważne jest tu utrzymanie wysokiej dyspozycyjności przenośników, zapobieganie awariom. Wykorzystanie do monitorowania bieżącego stanu technicznego oraz predykcji zagrożeń awaryjnych nowoczesnych narzędzi informatycznych, w tym sztucznej inteligencji wpisuje się we współczesne trendy w technice i badaniach naukowych.

Doktorant wybrał interesującą z inżynierskiego i naukowego punktu widzenia problematykę rozprawy, ważną dla Jego pracodawcy i stwarzającą możliwość spełnienia potrzeb związanych z poprawą niezawodności przenośników taśmowych drogą realizacji zadania badawczego. Politechnika Śląska, a w szczególności Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki tej uczelni to kluczowy w Polsce ośrodek akademicki, w którym rozwijane są od lat szerokie kompetencje w zakresie technologii powiązanych z energetyką. Wybór problematyki badawczej dokonany przez mgr inż. Przemysława Rumina uważam za trafny, stwarzający możliwości realizacji intersującej, mającej charakter utylitarny pracy badawczej z obiecującą perspektywą wdrożenia w praktyce przemysłowej jej rezultatów.

3. Charakterystyka i ocena rozprawy

Oceniana rozprawa, jest dość obszerna, podzielona została na 11 ponumerowanych rozdziałów, w tym trzy o charakterze wprowadzenia.
„Wprowadzenie" obejmujące na początku prezentację wyników ankiety przeprowadzonej wśród pracowników macierzystej firmy dotyczącej badania opinii dotyczącej znaczenia monitorowania i wykrywania awarii taśmociągów, krótkiego omówienia budowy oraz systemów wykrywania ich rozdarcia i detekcji uszkodzeń oraz monitorowania stosowanych w praktyce światowej. Na końcu wprowadzenia przedstawione zostały cel i zakres pracy.

„Przemysł 4.0" rozdział drugi, w którym dokonano wprowadzenia w problematykę rozwoju technologii informatycznych w praktyce przemysłowej. Doktorant objaśnił używane w pracy pojęcie Cyfrowego Bliźniaka i krótko omówił zagadnienie profilaktyki awarii w odniesieniu do przenośników taśmowych.

Rozdział trzeci: *„Opis badanego przenośnika"* stanowi prezentację podstawowego obiektu rozważań w dalszych rozdziałach, dużego taśmociągu (długość 12461 m, skomplikowana geometria) powstałego w Chinach w roku 2008. Z uwagi na wielkość, zróżnicowany przebieg trasy oraz doświadczenia eksploatacyjne jest to obiekt szczególnie dogodny do badań.

W rozdziale czwartym *„Zbieranie danych"* Doktorant przedstawił rozwiązania służące do zbierania i agregacji danych pomiarowych. Dane przesyłane oraz przetwarzane były z zastosowaniem rozwiązań klasy Internet Rzeczy. Zarządzanie danymi wykonywane było z wykorzystaniem aplikacji Apache Kafka. Informacje przesyłane były do systemu Elastisearch korzystającego z języka zapytań DSL oraz interfejsu graficznego Kibana. Zastosowane rozwiązania pozwoliły na integrację danych z różnych źródeł oraz kompleksową ich analizę. W konsekwencji stworzone zostały warunki do zastosowania zaawansowanych metod profilaktyki awarii omawianych w dalszych rozdziałach rozprawy.

Rozdział piąty „Tworzenie modelu" stanowi omówienie narzędzi służących do projektowania i tworzenia trójwymiarowych modeli przenośników taśmowych. Model taki budowany był w dwóch etapach. W pierwszym, w środowisku aplikaji typu CAD, powstawały modele głównych elementów oraz opis geometrii trasy przenośnika. W drugim wprowadzane były, z wykorzystaniem autorskiej aplikacji Doktoranta, szczegółowe parametry - w tym parametry taśmy, rozmiary elementów takich jak krążniki, koła pasowe, moc poszczególnych silników i ich lokalizacja.

Treść rozdziału szóstego „Obliczenia analityczne" stanowi opis algorytmu obliczeń wykorzystanych do wyznaczenia parametrów związanych z wytrzymałością oraz stopniem zużycia elementów przenośnika taśmowego. Bazę stanowiła tu specjalistyczna wiedza wynikająca z doświadczeń projektowych oraz operacyjnych firmy zatrudniającej Doktoranta. Opisany algorytm stanowi bazę do wyznaczenia oporów, sił oraz naprężeń w rozważanym obiekcie, zarówno na etapie projektowania jak i w bieżącej eksploatacji. Opory zostały sklasyfikowane jako: główne (wynikające z obrotu krążników, wgniatania oraz zginania taśmy); drugorzędne (powstające w miejscu podawania materiału sypkiego oraz lokalne opory tarcia – w strefie przyspieszania punktu załadunkowego i powodowane przez elementy czyszczące pas); związane ze zmianą geometrii – wysokości położenia; opory specjalne, wynikające głównie z pochylenia zestawu krążników na którym przemieszcza się taśma. W

końcowej części tego rozdziału przedstawiony został schemat blokowy algorytmu do wyznaczania sił, oporów i naprężeń występujących na przenośnikach. Ich ilustrację stanowią dwa rysunki (rys.6.4 oraz rys.6.5). Zgodnie z podpisami mają one ilustrować przebieg naprężeń na badanym przenośniku w funkcji pozycji, dla przypadku pracy z pełnym obciążeniem (ładunek około 1700 ton – rys.6.4) oraz bez obciążenia (rys.6.5). Zwraca uwagę, że Doktorant używa pojęcia „naprężenia" w stosunku do wielkości wyrażanej w kN, a więc w jednostkach siły. Ma to miejsce zarówno w przypadku wspomnianych wykresów jak i w wielu innych miejscach w pracy. Będę zobowiązany za przedstawienie wyjaśnienia w tej sprawie.

Rozdział siódmy *„Dopasowanie modelu przenośnika za pomocą mechanizmów uczenia maszynowego"* dotyczy walidacji oraz dopasowania wartości obliczeniowych i pomiarowych. Wykorzystana została do tego celu opisana na początku rozdziału metoda gradientu. W dalszej części przedstawiona została strategia dopasowania związana z pomiarami przesunięcia taśmy, bębna napinającego, mocy chwilowej silników. Ilustrację autorskiej metody zastosowanej w tych przypadkach stanowią schematy blokowe przyjętych do tego celu procedur.

W rozdziale ósmym zatytułowanym *„Architektura systemu"* przedstawiona została struktura modułowa oprogramowania pozwalającego na wspomaganie monitorowania przenośnika taśmowego. Rozdział dziewiąty „Cyfrowy bliźniak przenośnika taśmowego" zawiera opis sposobu wymiany danych w oparciu o pomiary, model przenośnika oraz obliczenia analityczne, z zastosowaniem rozwiązań umożliwiających profilaktykę awarii. Stanowiło to podstawę do zbudowania systemów ekspertowych poszerzających zdolności diagnostyczne, które opisano w kolejnym rozdziale pracy.

Sposób wykorzystania opracowanego aparatu narzędziowego przedstawiony został w kluczowym dla rozprawy rozdziale 10, noszącym tytuł *„Przewidywane ryzyka awarii"*. W pierwszej części tego rozdziału Doktorant przedstawił, w oparciu o metody uczenia maszynowego oraz historyczne dane pomiarowe autorską procedurę szacowania wymaganej mocy silników napędowych. Kolejne podrozdziały dotyczą kolejno detekcji: ryzyka obrotu pasa, ryzyka zbyt dużego przesunięcia pasa, oraz rozwinięcia metod kwalifikacji rolek podlegających wymianie. W tym ostatnim przypadku algorytm podejmowania decyzji został uzupełniony o parametry operacyjne krążników, uwzględniony został czas ich montażu, wprowadzony został mechanizm dopasowania modelu z wykorzystaniem wiedzy historycznej dotyczącej czasu pracy krążników.

Rozdział 11 rozprawy „Podsumowanie i wnioski" stanowi starannie przygotowaną, ujętą w szesnastu punktach syntezę przeprowadzonych prac badawczych. W ostatnim wniosku Doktorant stwierdził, że: praca potwierdziła tezę o możliwości stworzenia mechanizmów wspomagających utrzymanie przenośnika poprzez wprowadzenie jego modelu, powiązanych z nim obliczeń analitycznych uzupełnionych o metody uczenia maszynowego. W pracy brak jest jawnie zdefiniowanej tezy o takiej treści, choć można uznać że została ona postawiona w nieco innej formie w ostatnim akapicie rozdziału 1.3 (Cel i zakres pracy).

Struktura pracy stanowi logicznie skomponowaną sekwencję zrealizowanych zadań badawczych obejmujących wszystkie istotne dla rozwiązywanego problemu elementy. Praca ma niewątpliwy charakter aplikacyjny. Rozwiązano w niej, z użyciem nowatorskich metod ciekawe zadanie o charakterze naukowym, z istotnym aspektem inżynierskim. Dużym atutem rozprawy jest, moim zdaniem, starannie przygotowany przegląd literatury. Przedmiotem

cytowań jest 101 pozycji, z których istotną część stanowią dokumenty powstałe w ostatnich kilku latach. Doktorant jest współautorem dwóch cytowanych prac (opublikowanych w czasopismach Rynek Energii oraz Measurement, odpowiednio 70 oraz 200 pkt na liście ministerialnej). Trzecia ze wskazanych na liście cytowań publikacji przygotowana dla Measurement z Jego udziałem była w momencie publikacji rozprawy w trakcie recenzji. Wysoka ranga publikacji, zbieżnych tematycznie z problematyką poruszaną w rozprawie, świadczy o znaczącej randze naukowej tej problematyki oraz tej części prac nad rozprawą, które były przedmiotem tych publikacji,

Obok wspomnianych zalet w rozprawie pojawiły się jednak również usterki. Są one miejscami dość liczne, choć mają głównie charakter drobnych.

Strona redakcyjna rozprawy została oceniona w kolejnym rozdziale niniejszej opinii.

3. Uwagi krytyczne, uwagi redakcyjne

Liczba zauważonych przeze mnie w trakcie lektury usterek redakcyjnych w pracy jest, jak to zostało wspomniane, dość znaczna. Sam tekst napisany został w sposób wzbudzający zainteresowanie czytelnika. Napotyka się jednak dość dużo literówek, niespójności w doborze słów i konstrukcji niektórych zwrotów. Są również zdania w których widać brak spójności. Przykładowe usterki, w tym redakcyjne wymieniam poniżej.

W tekście często używane jest słowo „*krążniki*". W liczbie pojedynczej sprowadzane jest ono do formy żeńskiej, na przykład w wyrażeniu „*awaria krążniki*" na str. 8 (druga linia od dołu zamieszczonego tam akapitu), czy w podpisach pod rys. 1.5 oraz rys. 1.6. W liczbie mnogiej mowa jest o „*krążnikach*", ale w dopełniaczu pojawia się wyrażenie „*krążników*" (na przykład w podpisie pod rys. 1.4, czy w tytule rozdziału 1.2 - „*Monitorowanie krążników*") co wskazuje na formę męską. Na str. 40, w objaśnieniach do wzoru (6.4) znajduje się zapis: „*siła normalna odziaływująca na krążnik środkową*" Wydaje się to niekonsekwencją wartą rozstrzygnięcia i ujednolicenia formy.

Przykładowe literówki pojawiają się: na str. 16 „*Analogiczne badanie zostały*" (przedostatnia linia pierwszego akapitu), na początku kolejnego akapitu „*Praca koncertuje się*", na str.18, ostatnim zdaniu przed rozdziałem 2.1 w zdaniu: „*Kolejnym z podjeść jest cyfrowy bliźniak opisany w punkcie 2.1*". Liczba tego typu potknięć miejscami jest znaczna, chociaż z reguły nie utrudnia w istotny sposób lektury.

W tabeli 3.1 (str. 21. do 23), w ostatniej kolumnie używane są ujemne oraz dodatnie wartości średnicy łuku. W tekście lub w objaśnieniach pod tabelą zabrakło wyjaśnienia odnośnie przyjętej konwencji znaków. Wyjaśnienie wskazujące na to że w geometrii pojawiają się łuki wypukłe oraz wklęsłe można odnaleźć na str. 36, albo w tabeli 10.2 na str. 89. Tam jednak już Doktorant nie wskazał wartości ujemnych.

Na str. 24 w tekście: „*Naprężenie taśmy mierzone jest za pomocą połączonych równolegle tensometrów przyłączonych do MP30 poprzez terminala VKK. Temperatura mierzona jest za pomocą SOC-T1*" pojawiają się symbole, które nie zostały objaśnione. Proponuję przedstawienie bliższych informacji w trakcie prezentacji na obronie.

Na str. 26, w ostatnim akapicie opisany został, podzielony na fazy proces uruchamiania i napełniania materiałem przenośnika. Mam prośbę o odpowiedź na pytanie, czy rozważany był

proces uruchomienia przenośnika który jest napełniony i na przykład z powodu wyłączenia napędu został zatrzymany. W momencie takiego uruchomienia na taśmociągu znajduje się ładunek o masie około 1700 ton. Interesujące wydaje się, jakie są warunki dla takiego rozruchu.

Na str. 31 rozprawy zamieszczone zostały rysunki do których w tekście nie przedstawiono odniesienia ani komentarzy.

Na str. 43 brak jest objaśnienia dla wielkości ρ (wzór (6.8).

Na str. 64 oraz str. 65 przydatny jest moim zdaniem poszerzony komentarz do wzoru (10.2) oraz do rys. 10.1 (brak odniesienia wprost do numeru rysunku w tekście). Komentarz bezpośrednio nad rysunkiem kończy się zdaniem: *„Jądro RBF można przedstawić w następujący sposób:"*. Podpis pod rysunkiem to: *„Opis algorytmu SVR"*.

Na str. 67, w centralnej części dolnego akapitu można odnaleźć zdanie: *„W rozpatrywanym okresie łączne wartości mocy silników wahały się od 134 MW do 285 MW"*. Pozostaje to w istotnej rozbieżności do mocy zainstalowanej silników rozważanego tu przenośnika, deklarowanej wcześniej na str. 24. *„Na początku przenośnika zamontowano cztery silniki o mocy 450kW każdy, natomiast na końcu trzy silniki o mocy 615kW każdy oraz jeden o mocy 450kW"*. Mam prośbę o skomentowanie bilansu mocy oraz źródła niespójności.

W tabeli 10.1 na str. 72 wskazana została liczba zmiennych niezależnych dla trzech rozpatrywanych przypadków podziału taśmociągu na sekcje. Liczba tych zmiennych jest wyższa każdorazowo o 3 od liczby sekcji. W podpisach pod dotyczącymi związanych informacji rys. 10.2 do rys. 10.8 Doktorant wskazywał na liczbę sekcji na które w analizie podzielony został przenośnik. Na rys. 10.8 oraz rys. 10.9 pojawia się liczba zmiennych niezależnych. W tekście rozprawy nie odnalazłem informacji o związku pomiędzy liczbą zmiennych niezależnych w modelu oraz liczbą analizowanych sekcji. Mam prośbę o wyjaśnienie.

Na str. 93, akapit pod wzorem (9.4), pogubiłem się w lekturze opisu sposobu wyznaczania układu sił oddziałujących na krążniki. Pojawiły się siły pochodzące od taśmy i od paska. Będę zobowiązany za przedstawienie szczegółów budowy taśmociągu, ze wskazaniem lokalizacji i roli paska oraz analizowanego układu sił.

Na str. 93, drugi akapit od góry, druga linia, pojawiło się odwołanie o treści *„zgodnie z punktem 3.4"*. Autor zapewne miał na myśli rozdział 3.4 rozprawy. W spisie treści taki rozdział nie figuruje.

Pełną listę ze wskazaniem wszystkich zauważonych usterek przekazuję Doktorantowi do dyspozycji, celem wykorzystania przy ewentualnych dalszych publikacjach.

4. Ostateczna ocena pracy

Do najważniejszych osiągnięć własnych Doktoranta w przedstawionej do recenzji pracy należy, według mojej oceny, zaliczyć:

- opracowanie nowatorskiej, opartej na Internecie Rzeczy, zbudowaniu cyfrowego bliźniaka metody monitoringu i poprawy efektywności eksploatacji przenośników taśmowych przeznaczonych do transportu materiałów sypkich;

- weryfikację modelu na obiektach wielkoskalowych oraz wskazanie możliwości ograniczenia, z jego wykorzystaniem, liczby zdarzeń awaryjnych, na przykład obrotu czy zbyt dużego przesunięcia taśmy na przenośniku.

W podsumowaniu opinii informuję, że przedstawione uwagi krytyczne nie podważają pozytywnej oceny rozprawy. Doktorant zrealizował przedstawiony w rozdziale 1.4 rozprawy cel pracy. Uważam, że należy podkreślić utylitarny oraz wieloaspektowy charakter przeprowadzonych prac.

Autor rozprawy, mgr inż. Przemysław Rumin, wykazał się wiedzą praktyczną i teoretyczną w dyscyplinie Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, niezbędną do przygotowania rozprawy. Wynika to w jasny sposób z treści ocenianej pracy doktorskiej.

Na podstawie przedstawionej do recenzji rozprawy stwierdzam, że jej Autor, mgr inż. Przemysław Rumin wykazał umiejętność formułowania zadania naukowego, opanowanie podstaw teoretycznych badanego problemu, znajomość stanu osiągnięć w obszarach wiedzy związanych z pracą oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia badań.

Będąca przedmiotem oceny rozprawa doktorska mgr inż. Przemysława Rumina **pt.: *„Wspomaganie utrzymania i obsługi taśmociągów za pomocą sztucznej inteligencji oraz wydajnych algorytmów analitycznych”*** stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, spełnia wymogi określone w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki a także w Ustawie Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce. W oparciu o powyższe stawiam wniosek o skierowanie rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.

Biorąc pod uwagę:
- istotne walory rozprawy wynikające z weryfikacji praktycznej modelu na obiektach wielkoskalowych, ze wskazaniem możliwości istotnej poprawy efektywności ich pracy oraz perspektywę wykorzystania praktycznego we wdrożeniach;
- wysoką rangę publikacji których mgr inż. Przemysław Rumin jest pierwszym autorem,

wnioskuję o rozważenie możliwości wyróżnienia rozprawy.

Podpisał Krzysztof Badyda