

RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Mirosława Wolskiego
pt. "Analiza wpływu cech konstrukcyjnych zastawy podatnej na efektywność procesu
sortowania"**

Opracowana na podstawie pisma z dnia 1.06.2021r.
Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna”
Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy
prof. dr hab. inż. Dariusza Borońskiego

1. Uwagi dotyczące tematu rozprawy, sformułowanego celu i hipotezy rozprawy

Aktualnie w świecie, a szczególnie w Polsce handel internetowy nabiera w życiu codziennym coraz większego znaczenia. Powstają nowe inwestycje z nowoczesnymi systemami sortującymi. Paczki czy ładunki jednostkowe sortowane na sorterach trafiają do odpowiednich ześlizgów lub przenośnika odbiorczego stanowiących początek dalszej drogi transportowej. Najważniejszym elementem sortera jest urządzenie rozdzielcze, zastawa o ruchu obrotowym, stanowi ona też główną treść rozprawy doktorskiej dotyczącej określenia wpływu cech konstrukcyjnych na efektywność procesu sortowania. W literaturze brakuje syntetycznej oceny popartej badaniami eksperymentalnymi wpływu masy, geometrii oraz materiału zastawy, a także podatności napędu na wartość przyspieszenia uzyskiwanego przez sortowane obiekty podczas zderzenia gwarantującego nie uszkodzenie paczek i właściwy ześlizg do sortownika.

Cel rozprawy został jasno sprecyzowany i dotyczy opracowania metody pozwalającej wyznaczyć cechy geometryczno-materiałowo-dynamiczne podatnej zastawy aktywnej, zapewniające zminimalizowanie reakcji dynamicznych wywieranych na zgarniane obiekty transportowane na przenośnikach, przy zachowaniu oczekiwanej wydajności i niezawodności procesu sortowania. Zaproponowany dziesięciopunktowy zakres pracy zagwarantował moim zdaniem pełną realizację założonych celów. Postawione hipotezy rozumiane jako tezy pracy to stwierdzenie, że wpływ cech konstrukcyjnych zastawy podatnej ze względu na kryterium minimalizacji oddziaływań dynamicznych można oszacować drogą symulacji modelu MES i uproszczonego modelu numerycznego Belki Eulera-Bernoulliego BEB oraz to, że uzyskać to można poprzez zastosowanie lekkiej i podatnej zastawy.

2. Struktura i ogólna charakterystyka rozprawy

Praca podzielona została na 10 podstawowych rozdziałów i napisana na 145 stronach, zawiera 64 rysunki w postaci wykresów, schematów i zdjęć oraz dwie tabele. Na początku

rozprawy przedstawiono po spisie treści wykaz najważniejszych oznaczeń, a w końcowej części wykaz wykorzystanej literatury obejmujący 135 pozycji literaturowych głównie zagranicznych i publikacji współautorskich Doktoranta. Rozprawa jest zakończona streszczeniem w języku polskim i angielskim. Pierwszy rozdział to wstęp, a drugi to cel, hipoteza i zakres pracy.

Rozdział trzeci o łącznej liczbie stron 39 (największy w pracy) to analiza aktualnego stanu wiedzy w temacie realizowanej rozprawy. Sklasyfikowano w nim urządzenia rozdzielcze jak manipulatory potokowe, stacjonarne o charakterze pracy udarowej i bezudarowej oraz przedstawiono ich wady i zalety. W rozdziale tym omówiono także zjawiska fizyczne dominujące w procesie sortowania tj. tarcie oraz zderzenie. Przedstawiono znany w literaturze opis analityczny tarcia w ruchu płaskim z pojęciem środka tarcia i koncepcją powierzchni granicznej pozwalającej na przybliżone szacowanie sił i momentów tarcia w ruchu sortowanych obiektów. Pokazano również autorskie rozwiązanie w szacowaniu sił i momentów tarcia, bazujące na dokładnym kształcie powierzchni granicznej dla prostokątnego kontaktu i stałego rozkładu nacisku. W zagadnieniu tarcia przedpoślizgowego i identyfikacji początku poślizgu, wskazano mechanizmy zerwania przyczepności oraz metodę wyznaczania punktu, względem którego obiekt ulega przedpoślizgowemu mikroprzemieszczeniu. Współrzędne tego punktu są konieczne do oszacowania wartości granicznej siły mimośrodowej, przy której obiekt przechodzi w tarcie ślizgowe. W podrozdziale dotyczącym zderzenia skoncentrowano się na analizie wzajemnego wpływu masy i podatności konstrukcji zastawy oraz masy obiektu i podatności kontaktu na wartość siły dynamicznej, działającej na sortowany obiekt. Rozpatrzono następujące modele uderzenia w nieważką belkę, z uwzględnieniem masy belki, zderzenia oparte na drganiach wymuszonych czy uderzenia plastycznego. Sformułowano wnioski z przeprowadzonej analizy dotyczące elementu sortującego zastawy, która powinna być tak konstruowana, by jej masa była jak najmniejsza, podatność natomiast na tyle duża by eliminować udział sił sprężystych konstrukcji w zderzeniu ze sztywnym obiektem oraz łagodzić siłę zderzenia z obiektem podatnym. Wskazano również, iż na ogół podatność lokalna jest bardziej istotna niż podatność ogólna, stąd powszechne jest stosowanie materiałów przeciwwstrząsowych w transporcie ładunków jednostkowych. Doktorant stwierdza, że do dokładnego szacowania maksymalnego ugięcia konstrukcji belki podczas zderzenia wystarczy zastosowanie modelu zderzenia plastycznego. Ponadto, gdy masa belki w stosunku do masy uderzającego obiektu jest mała, dobrym przybliżeniem w szacowaniu maksymalnego ugięcia może być założenie w obliczeniach nieważkości belki. Natomiast do szacowania przyspieszeń bezwzględnych zderzenia ładunku jednostkowego z zastawą aktywną dobrym przybliżeniem jest model MES.

Rozdział czwarty o objętości 20 stron poświęcony został dwóm modelom procesu sortowania. Pierwszy wywodzi się z modelu nieważkiej belki Eulera Bernuliego (BEB), a drugi model jest to model MES w środowisku LS-DYNA. W pierwszym modelu podzielono proces sortowania na trzy etapy: etap I to ruch obiektu do chwili zaistnienia kontaktu z zastawą, etap II to ruch obiektu w kontakcie z zastawą przed poślizgiem na przenośniku i etap III to poślizg obiektu na przenośniku. Wyznaczenie współrzędnych kontaktu, siły normalnej od zastawy i kąta wychylenia zastawy wymagało od doktoranta znajomości złożonych opisów matematycznych. Model numeryczny MES umożliwił Doktorantowi wyznaczenie przyspieszeń sortowanego ładunku. W modelu odwzorowano numerycznie zastawę, paczkę, taśmociąg oraz ześlizg przyjmując dla nich konkretne materiały i wile przypisanych do nich typów elementów ze środowiska LS-DYNA.

W rozdziale piątym czterostronicowym przedstawiono metodykę wyznaczania kinetycznego współczynnika tarcia pomiędzy zastawą i obiektem oraz kinetycznego i statycznego między obiektem i powierzchnią nośną przenośnika. Współczynniki tarcia obiekt–powierzchnia nośna przenośnika oraz obiekt–powierzchnia ześlizgu wyznaczono

eksperymentalnie na stanowisku badawczym. Natomiast współczynnik tarcia pomiędzy zastawą i obiektem określono ze wzoru zależnego od prędkości taśmy przenośnika, prędkości obiektu wzdłuż zastawy oraz kąta wychylenia zastawy. Wymienione współczynniki tarcia były niezbędne Doktorantowi do uwzględnienia zjawiska tarcia w opisywanych modelach procesu sortowania.

Rozdział szósty siedmiostronicowy zawiera opis metody cyfrowego przetwarzania obrazu rejestrowanego kamerą szybkoklatkową, niezbędną do śledzenia rzeczywistych torów ruchu zastawy oraz sortowanego obiektu. Współrzędne charakterystycznych punktów torów ruchu określono podczas cyfrowego przetwarzania zarejestrowanego obrazu w środowisku MATLAB z wykorzystaniem metody detekcji BLOB bazującej na zdefiniowanej właściwości zastosowanych kolorowych znaczników naklejanych na zastawie i obiekcie. Przedstawiono także nowatorskie rozwiązanie minimalizowania błędu wyznaczania rzeczywistego położenia, dzięki zastosowaniu szablonu skalującego kadr kamery.

Na podstawie danych z rozdziału trzeciego, dotyczącego analizy stanu wiedzy w zakresie zjawiska zderzenia, w rozdziale siódmym na 19 stronach sformułowano warunki optymalizacji konstrukcji zastawy. Określono wpływ liczby stopni swobody w optymalizacji wymiarów oraz ograniczeń wymiarowych na uzyskane wyniki minimalizacji masy zastawy. Zoptymalizowano geometrię zastawy podatnej o kształcie ceownika przy zmiennych decyzyjnych dotyczących wysokości i ukształtowania zarysu bocznego oraz grubości ścianek profilu otrzymując zarysu boczny stałonaprężeniowy, przedziałami liniowy i trapezowy. Sformułowano również kryterium oceny istotności wybranych właściwości materiału w konstrukcji zastawy dla osiągnięcia jak największej zaabsorbowanej energii bez zniszczenia jej konstrukcji z zachowaniem minimalnej masy. Kryterium to stanowi moduł rezyliencji U_R odniesiony do gęstości materiału. Przeanalizowano zasadność zastosowania na konstrukcję zastawy dwóch grup materiałowych, tj. stopów metali oraz tworzyw. Największe wartości wskaźnika U_{Rp} reprezentującego zdolność pochłaniania energii zderzenia w przeliczeniu na jednostkę masy posiadały tworzywa sztuczne. Przeanalizowano zatem 22 rodzaje materiałów z tworzyw sztucznych dla zastawy o zarysie trapezowym i stałonaprężeniowym wybierając do dalszej analizy tworzywo Poliamid PA6. Dla tego tworzywa przeprowadzono optymalizację przekroju i zarysu wzdłużnego ze względu na wartość masy uderzającej oraz długości belki wspornikowej o zarysie trapezowym i stałonaprężeniowym w celu osiągnięcia jak najmniejszej masy przy uwzględnieniu ograniczenia naprężeń dopuszczalnych i maksymalnego ugięcia.

W rozdziale ósmym na 11 stronach przedstawiono stanowisko do badań laboratoryjnych, oparte o wykonany na potrzeby tej pracy przenośnik taśmowy z zabudowaną na nim zastawą aktywną. Opisano najważniejsze komponenty konieczne do przeprowadzenia eksperymentu procesu sortowania, jak układ sterujący, barierę świetlną, obiekt do testów sortowania o wymiarach podstawy 200x200mm i masie 4 kg wykonany z profili aluminiowych zaopatrzone w znaczniki kolorowe i rejestrator przyspieszeń, całość owinięta pianką polietylenowa i pokryta tektura stanowiąca modelowaną podatność kontaktu oraz zastawę w kształcie ceownika o grubości ścianek 4mm, długości 1221mm wykonaną metodą klejenia z Poliamidu PA6. Badania eksperymentalne weryfikujące opracowane modele procesu sortowania BEB i MES przeprowadzono dla przyjętego czasu maksymalnego wychylenia zastawy, prędkości taśmy, początkowego położenia paczki. Otrzymane wyniki w postaci ugięcia zastawy, kąta obrotu końca zastawy, kąta obrotu członu sztywnego zastawy, kąta ugięcia sprzęgła, prędkości obiektu, trajektorii ruchu obiektu i przyspieszenia obiektu pozwoliły uznać Doktorantowi, że modele BEB i MES są odpowiednimi narzędziami do oceny doboru konstrukcji zastawy i parametrów eksploatacyjnych w kontekście skuteczności przebiegu procesu sortowania.

Wykorzystując opracowane modele procesu sortowania wykonano szereg optymalizacji procesu sortowania w różnych warunkach, których wyniki zawarto w rozdziale dziewiątym na 17 stronach. Celem optymalizacji było uzyskanie jak najmniejszej wartości siły wywieranej na sortowany obiekt w modelu BEB dla zadanej wydajności procesu sortowania i długości zastawy. Optymalizacje przeprowadzono dla obiektu i przenośnika oraz wymiarów zastawy wcześniej rozpatrywanych dla napędu sztywnego i charakteryzowanego proporcjonalną sprężystością skrętną.

Przeanalizowano - wpływ położenia ładunku w chwili zadziałania zastawy (na wydajność i przyspieszenie sortowanego ładunku),

- wpływ czasu cyklu roboczego zastawy oraz jej długości na proces sortowania (na kat maksymalnego wychylenia zastawy, prędkość przenośnika rozdzielczego, prędkość sortowanego obiektu, odległość punktu kontaktu od utwierdzonego końca zastawy, wydajność procesu sortowania, siłę wywierana przez zastawę na obiekt),
- wpływ elementu podatnego w układzie napędowym na ograniczenie ryzyka uszkodzenia sortowanego obiektu (na maksymalne ugięcie względne końca zastawy wg modelu BEB i maksymalne przyspieszenie obiektu wyznaczone modelem MES dla obiektu poruszającego się środkiem przenośnika i największej odległości od manipulatora),
- wpływ sztywności zastawy na wartość maksymalnego przyspieszenia sortowanego obiektu dla dwóch modułów Younga,
- wpływ konstrukcji zastawy na maksymalne przyspieszenie obiektu dla zastawy o zarysie trapezowym i przekroju ceowym oraz dla zastawy prostopadłościennej,
- wpływ parametrów eksploatacyjnych tj. prędkości przenośnika rozdzielczego i maksymalnego kąta wychylenia zastawy na proces sortowania,
- wpływ odsunięcia płaszczyzny roboczej zastawy od jej obrotu na proces sortowania (dotyczy to prędkości przenośnika rozdzielczego, maksymalnego kąta wychylenia zastawy, maksymalnego ugięcia względnego końca zastawy, względnej odległości punktu kontaktu od utwierdzonego końca zastawy na maksymalne przyspieszenie obiektu).

W rozdziale dziesiątym przedstawiono wnioski wynikające z przeprowadzonych analiz, symulacji i badań a w tym:- podsumowanie głównej części rozprawy, ograniczenia i krytyczna refleksja na temat zaproponowanego rozwiązania, wkład do rozwoju wiedzy i perspektywa dalszych badań.

3. Ogólna ocena merytoryczna

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Mirosława Wolskiego cechuje wysoki poziom naukowy i profesjonalizm dotyczący prezentacji zarówno rezultatów badań jak i przeprowadzonej analizy. Cechuje ją również kompleksowość przeprowadzonych badań zarówno numerycznych jak i eksperymentalnych oraz trafność doboru literatury. Przykładem tu może być monografia autorstwa Ashby M.F. 2011r. „Materials selection in mechanical design” co pozwoliło Doktorantowi na wprowadzenie wskaźnika oceny przydatności materiału w konstrukcji zastawy. W rozprawie zarówno naukowy jak i użytkowy cel pracy został sformułowany w sposób dość szeroki, dzięki temu było możliwe uogólnienie wszystkich celów cząstkowych jakie zostały sformułowane w każdym z rozdziałów pracy. Zakres pracy jest imponujący, a jej układ edytorski poprawny. Przedstawione wyniki całości badań naukowych i badawczych zaprezentowano w możliwie zwartej formie zwłaszcza te dotyczące procesów optymalizacyjnych. Przedstawiają one nowatorskie podejście w doborze konstrukcji zastawy aktywnej o ruchu obrotowym oraz nastaw eksploatacyjnych urządzenia rozdzielczego minimalizujących ryzyko uszkodzenia sortowanego obiektu dla określonej wydajności sortowania. Wyniki te przedstawiono w szerokim zakresie długości zastawy i czasu jej ruchu roboczego. Przyjęte przez Doktoranta modele procesu sortowania Belka

Eulera-Bernulliego i model MES w środowisku LS-DYNA pozwoliło uznać je jako odpowiednie narzędzia oceny doboru konstrukcji zastawy i parametrów eksploatacyjnych w kontekście skuteczności przebiegu procesu sortowania. Opracowane przez Doktoranta algorytmy wyznaczania współrzędnych kontaktu, siły normalnej od zastawy, kąta wychylenia członu sztywnego zastawy oraz kąt ugięcia zastawy świadczą o dobrej znajomości zagadnień mechaniki takiego kontaktu. Zaproponowano nowe równania dla analitycznego wyznaczania siły i momentu tarcia w ruchu płaskim oraz oryginalną metodę wyznaczania takiej siły zewnętrznej przyłożonej do obiektu mimośrodowo, która powoduje przejście obiektu ze stanu tarcia statycznego w kinetyczne.

Doktorant jako jeden z nielicznych potrafił przeprowadzić krytyczną ocenę na temat zaproponowanego rozwiązania ustalając w optymalizacji założony ceowy kształt przekroju poprzecznego zastawy i dlatego jak określa minimalizacja masy nie ma charakteru ogólnego. Podobnie jest dla przyjętego modelu obiektu sortowanego w postaci prostopadłościanu, bo przecież obiekty sortowane mogą mieć inną postać, co wymagałoby opracowania nowych warunków kontaktu z zastawą w modelu BEB. W przyjętym obiekcie w modelu MES założono, że w zderzeniu z zastawą odkształceni ulegał tylko materiał przeciwwstrząsowy zewnętrznej warstwy. Skrajny przypadek dotyczący odkształcenia całej konstrukcji obiektu wymagałby bardziej skomplikowanego modelu numerycznego.

Należy podkreślić, iż oprócz dorobku naukowego i badawczego jaki został zaprezentowany w rozprawie jego pozostały dorobek jest znaczący. Obejmuje on trzy artykuły wysoko punktowane w czasopiśmie Mechanism and Mechine Theory (IF:3.312, punktacja MEIN 200 pkt za 2019, 2021 oraz 35 pkt za 2018r) oraz 27 publikacji na konferencjach krajowych i zagranicznych w tym 12 indeksowanych w bazach Web of Science i Scopus.

4. Uwagi szczegółowe

1. Na rysunku 7.3 linie zarysu bocznego zastawy dla zarysu stałonaprężeniowego i przedziałami liniowego pokrywają się, co znaczyłoby, że ukształtowanie końców zastawy powinno być jednakowe. Nie widać tego w zoptymalizowanej belce wspornikowej zarysu przedziałami liniowego na rysunku 7.1. Poza tym ukształtowanie zarysu stałonaprężeniowego końca zoptymalizowanej zastawy może mieć małe znaczenie praktyczne, ponieważ na długości $b=4\text{mm}$ zmienia się grubość środnika ceownika i jest on bez półek bocznych, dalej następuje uskok na grubości środnika i przejście do zarysu ceowego.
2. W badaniach eksperymentalnych procesu sortowania obiektów zastosowano zastawę klejoną z Poliamidu PA6. Doktorant nie odnosi się do tego, czy ma to wpływ na rezultaty otrzymanych wyników badań. Zastawę można było wykonać z tego tworzywa jako jednolitą techniką druku 3D.
3. W podpisie pod rysunkiem 7.1 i 7.3 podano niewłaściwą jednostkę gęstości materiału.
4. Doktorant używa zamiennie nazwy dotyczącej zastawy – zastawa podatna i zastawa aktywna.

5. Końcowa ocena rozprawy

Oceniając całość recenzowanej rozprawy należy podkreślić istotną wagę poznawczą i badawczą analizowanych w pracy zagadnień, które obejmowały zarówno problemy z zakresu inżynierii mechanicznej, budowy i eksploatacji maszyn, mechaniki i wytrzymałości materiałów elementów urządzeń rozdzielczych transportu bliskiego. Na każdym etapie pracy, począwszy od sformułowania celu, poprzez przegląd literatury opisany najszerzej z wszystkich rozdziałów, uzasadnienie wyboru obiektu badań, sposób ich realizacji

i interpretacji wyników, Doktorant wykazał się wysokim opanowaniem warsztatu naukowego i badawczego.

Wobec spełnienia wszystkich wymogów Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna. Biorąc pod uwagę całość przedstawionego do zrecenzowania materiału, oryginalność i kompleksowość zaprezentowanych metod i rezultatów badań poznawczych wnioskuję o jej wyróżnienie.

