

Częstochowa, 11.07.2023

dr hab. inż. Dawid Cekus prof. PCz
Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki
Politechnika Częstochowska
ul. Dąbrowskiego 69
42-201 Częstochowa

OPINIA

**o rozprawie doktorskiej mgr inż. Anny Mackojć
pt. „Analytical approach to modelling, analysis and dynamics studies on parametrically
induced payload pendulation in offshore lifting operations”**

**Promotor pracy: prof. dr hab. inż. Robert Zalewski
Promotor pomocniczy: dr inż. Bogumił Chiliński**

Podstawa formalna wykonania opinii:

- pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej prof. dr. hab. inż. Roberta Sitnika z dnia 10.05.2023 r., sygnowane RND/M.521.22.2023,
- umowa o dzieło Nr 1150/0000/2023 na wykonanie recenzji dotyczącej spełnienia przez rozprawę doktorską Pani mgr inż. Anny Mackojć pt. „Analytical approach to modelling, analysis and dynamics studies on parametrically induced payload pendulation in offshore lifting operations” wymagań określonych w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

1. Charakterystyka rozprawy

Pani mgr inż. Anna Mackojć jako swoją rozprawę doktorską przedłożyła zbiór pięciu opublikowanych i powiązanych tematycznie publikacji naukowych zatytułowany „Analytical approach to modelling, analysis and dynamics studies on parametrically induced payload pendulation in offshore lifting operations”. Wszystkie prace są współautorskie, a udział Opiniowanej wynosi odpowiednio 45% (A2), 50% (A1, A4, A5) i 60% (A3), co zostało potwierdzone stosownymi oświadczeniami. Cztery artykuły zostały opublikowane w czasopismach uwzględnionych w bazie Journal Citation Reports, a jedna praca to rozdział w monografii. Sumaryczny Impact Factor prac z bazy JCR wynosi 11,744. Zgodnie z bazą Web of Science liczba cytowań oraz indeks Hirsha w dniu składania pracy wynosiły 1. Na dzień pisania niniejszej opinii liczba cytowań wzrosła do 6 (bez autocytowań 4).

Na podstawie wskazanych publikacji:

A1 Chiliński B, Mackojć A.: Analytical solution of parametrically induced payload nonlinear pendulation in offshore lifting, Ocean Engineering, 2022, vol. 259, pp.111835,

A2 Mackojć A., Chiliński B., Zalewski R.: Preliminary research of a symmetrical controllable granular damper prototype, Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, 2022, vol. 70, no. 3, pp.1-9,

A3 Mackojć A., Chiliński B.: Preliminary modelling methodology of a coupled payload-vessel system for offshore lifts of light and heavyweight objects, Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, 2021, vol. 70, pp.9,

A4 Chiliński B., Mackojć A., Zalewski R.: Proposal of the 3-DOF model as an approach to modelling offshore lifting dynamics, Ocean Engineering, 2020, vol. 203, pp.107235

A5 Chiliński B., Mackojć A.: Proposal of the Coupled Thermomechanical Model of a Crank Mechanism, In: Transdisciplinary Engineering for Complex Socio-technical Systems – Real-life Applications / Pokojski Jerzy [et al.] (eds.), 2020, vol. 12, IOS Press,

Opiniowana przygotowała skrócony opis osiągnięcia naukowego, który udokumentowano na 48 stronach i podzielono na siedem rozdziałów.

W pierwszym rozdziale nakreślono fazy operacji podnoszenia ładunków podejmowanych na morzu i związane z tym problemy.

Rozdział drugi i trzeci zawierają przegląd i ocenę dostępnych na rynku rozwiązań sprzętowych kompensujących kołysanie statku podczas przenoszenia ładunku oraz zarys uproszczonych modeli numerycznych opartych na normach i oprogramowania komercyjnego do dynamicznej analizy systemów morskich.

Przegląd obecnego stanu wiedzy zamieszczono w rozdziale czwartym, przy czym zaznaczono, że bardziej szczegółowa analiza literaturowa została przybliżona we wskazanych do oceny publikacjach.

W rozdziale piątym sformułowano cel pracy oraz przedstawiono motywację podjęcia tematyki dysertacji.

Rozdział szósty podzielono na siedem podrozdziałów, w których omówiono najważniejsze elementy osiągnięcia naukowego. W pierwszym podrozdziale przybliżono metodykę modelowania fal oraz funkcję przenoszenia (RAO - Response Amplitude Operator) wpływu stanu morza na ruchy statku, w tym na ruch końcówki żurawia. Drugi podrozdział to scharakteryzowanie opracowanej nowatorskiej metodyki modelowania operacji podnoszenia na morzu, która kompensuje wady modeli i rozwiązań dostępnych na rynku. Wybrane przykłady przeprowadzonych badań symulacyjnych wykazujące wszechstronność i uniwersalność zaproponowanych modeli przedstawiono w podrozdziale trzecim.

W podrozdziale czwartym rozszerzono zaproponowaną metodykę na podnoszenie obiektów ciężkich oraz pokazano zakresy jej stosowalności. W podrozdziale piątym omówiono analityczny model nieliniowy opisujący dynamiczne zachowanie ładunku. Badania potwierdzające prawidłowość zaproponowanej metody analitycznej zilustrowano w podrozdziale szóstym, w którym uzyskane wyniki porównano z rezultatami otrzymanymi na podstawie badań numerycznych. Podrozdział siódmy to uzasadnienie wieloaspektowości opracowanego i wykorzystywanego podczas recenzowanych badań naukowych środowiska modelowania i symulacji opartego na darmowych bibliotekach i języku Python.

Opis osiągnięcia naukowego uzupełniono streszczeniem w języku polskim i angielskim, słowami kluczowymi, podsumowaniem dorobku naukowego, bibliografią (66 pozycji), a także informacjami dotyczącymi uzyskanych przez Panią mgr inż. Annę Mackoję dyplomów, zatrudnienia w instytutach badawczych, osiągnięć dydaktycznych i organizacyjnych, opieki w roli konsultanta i recenzenta w pracach inżynierskich i magisterskich, recenzowania publikacji w czasopismach o zasięgu międzynarodowym, udziału w projektach oraz w konferencjach międzynarodowych, uzyskanych nagród i wyróżnień. Zgodnie z ustawą w przypadku rozpraw doktorskich ocenie podlega oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej w postaci monografii naukowej lub zbioru opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych, dlatego elementy z tego akapitu nie będą brane pod uwagę w dalszej części recenzji.

2. Analiza i ocena rozprawy

Wybór tematyki rozprawy i rozważanych w niej zagadnień uważam za w pełni zasadny i aktualny. Obecnie wzrasta popyt na usługi operacji na morzu związane z podnoszeniem i przenoszeniem różnego rodzaju ładunków, które muszą być realizowane w sposób bezpieczny, niezawodny, dokładny, bez przestojów i stosunkowo tanio. Wszystko to powoduje, że firmy często zwiększają ryzyko operacyjne, co może prowadzić do wzrostu liczby wypadków i urazów z tym związanych, a incydentalnie ofiar śmiertelnych. Na rynku dostępne jest kilka narzędzi wspomagających takie czynności, jednak mają one ograniczenia eksploatacyjne i jedną wspólną cechą, są zbyt drogie. W przypadku rozwiązań sprzętowych pojawiają się problemy związane z ich montażem, który wymaga kilku dni, zajmuje część powierzchni statku i zwiększa jego masę, lub ingeruje w konstrukcję żurawia, co nie zawsze jest możliwe, a nawet dozwolone, a ponadto wymaga przeszkolenia personelu lub zatrudnienia doświadczonego operatora zewnętrznego. Natomiast dostępne oprogramowanie

jest albo zbyt proste i dostosowane do analizy prostych przypadków, albo zbyt skomplikowane i wymaga przestudiowania obszernej dokumentacji, aby móc sprawnie je obsługiwać. Zatem opracowanie kompleksowego narzędzia (metodologii) do planowania eksploatacji procesu podnoszenia, który będzie alternatywą zarówno dla nadmiernie uproszczonych, jak i wysoce złożonych rozwiązań, stanowi wyzwanie i jest ważne pod względem teoretycznym i praktycznym.

Moim zdaniem meritum głównego osiągnięcia naukowego i sformułowanego celu pracy jako: *„Opracowanie kompleksowego modelu analitycznego układu ładunek-statek dla operacji podnoszenia na morzu, zapewniającego możliwość sformułowania rozwiązania w oparciu o metodę wielu skal czasowych w zamkniętej postaci analitycznej, umożliwiającej planowanie procesu podnoszenia i modelowanie dynamicznego zachowania ładunku”* stanowią jedynie prace *A1*, *A3* i *A4*.

W pracy *A4* zaproponowano kompleksowy model o trzech stopniach swobody (3-DOF) opisujący operację (na morzu) podnoszenia i transportu ładunku w powietrzu. Model obejmuje drgania osiowe z elementem kompensującym, drgania wahadła, sprzężenie pomiędzy nimi, oraz wzbudzenia dwukierunkowe (wzajemnie prostopadłe). Do określenia ruchu końcówki żurawia, który jest wywoływany falami morskimi wykorzystano operatory amplitudy odpowiedzi (RAO) w dziedzinie częstotliwości. Zaproponowana metodologia została zweryfikowana poprzez porównanie z rezultatami uzyskanymi w oprogramowaniu komercyjnym uzyskując zadowalającą zbieżność dla różnych scenariuszy poddanych określonym wzbudzeniom w formie regularnej lub nieregularnej fali. Prostota i elastyczność zaproponowanej metodologii zawierającej wszystkie istotne zjawiska stanowi równowagę między zbyt prostymi modelami (w literaturze nie występują modele, które pozwalają na jednoczesną kompensację kołysania bocznego i pionowego, co ma istotny wpływ na odpowiedź układu) i oprogramowaniem komercyjnym (które pozwala na analizę układów o nieskończonej liczbie stopni swobody).

Z uwagi na fakt, iż przedstawiona metoda, w której falowanie statku jest opisywane za pomocą RAO, obowiązuje tylko w przypadku operacji w kategorii przenoszenia lekkich ładunków (dla stosunku masy ładunku do wyporności statku do 3%÷3,5%), dlatego transport ciężkich ładunków wymaga sprzężenia tego modelu z modelem statku o 6 stopniach swobody (6-DoF), co pokazano w artykule *A3*. W publikacji tej przyjęto, że statek będzie traktowany jako ciało sztywne, a jego drgania zostaną pominięte. Wzbudzenie statku wywoływano falami jednokierunkowymi (rozchodzącymi się do przodu). Analizowano wzajemne oddziaływanie układu ładunek-statek podczas unoszenia w powietrzu obiektów o różnych masach (od 1% do

10% wyporności statku). Zaproponowany model (posiadający 5 stopni swobody) jest bardziej uniwersalny i wszechstronny w stosunku do modelu z pracy *A4*, co stanowi jego główną zaletę i stanowi jeszcze ciekawszą alternatywę dla oprogramowania dostępnego na rynku.

Analityczne rozwiązanie dynamicznej odpowiedzi ładunku stosując metodę perturbacji (metodę wielu skal czasowych) pozwalającą na reprezentację równania ruchu przez superpozycję składowych liniowych (mogą być wykorzystane do oceny obszarów występowania rezonansu) i nieliniowych sformułowano w publikacji *A1*. Dokładność zaproponowanej metodologii zweryfikowano numerycznie dla dwóch scenariuszy - oscylacji ładunku poza obszarem rezonansowym i na krzywej rezonansowej, oraz dla różnych parametrów układu. Układ wzbudzano jednokierunkową falą regularną (wzbudzenie statku) powodując dwukierunkowy ruch eliptyczny końcówki żurawia. Tak sformułowany model analityczny i jego zamknięta forma rozwiązania dla równania ruchu ma szereg zalet: może być wykorzystany w procesie projektowania systemu sterowania ładunkiem; do wstępnych obliczeń w procesie projektowania systemu podnoszenia; do szczegółowego badania zachowania rzeczywistego ładunku i projektowania postępowania na morzu; umożliwia rozpoznanie ograniczeń na wczesnych etapach planowania operacji w celu jej optymalizacji; w prostszych przypadkach może całkowicie zastąpić podejście numeryczne, które wymaga dużych zasobów obliczeniowych i znacznie więcej czasu; nie wymaga pełnej analizy dynamiki rozpatrywanego systemu do wyznaczenia obszarów niestabilności dynamicznej.

Publikacje *A2* i *A5*, którym w autoreferacie poświęcono jedynie 2 strony, rozmiągają się z tematem i celem dysertacji, dlatego w moim przekonaniu nie było potrzeby ich umieszczania jako części osiągnięcia naukowego, tym bardziej, że prace *A1*, *A3* i *A4* spełniają wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Jediną cechą wspólną *A2* i *A5* z tematyką doktoratu jest zastosowanie w celu prowadzenia badań analitycznych i numerycznych układów dynamicznych tej samej metodologii modelowania oraz wykorzystania przygotowanego współautorskiego oprogramowania opartego na języku Python.

Artykuł *A2* dotyczy problemu badań empirycznych i modelowania matematycznego nowego tłumika sterowalnego z wykorzystaniem cząstek pakowanych próżniowo. W celu odwzorowania dynamicznego zachowania i zmian charakterystyk dyssypacyjnych badanego urządzenia zaproponowano zastosowanie modelu Bouc-Wena z dalszym procesem identyfikacji parametrów. Weryfikacji odpowiedzi modelu dokonano na podstawie danych eksperymentalnych.

W pracy *A5* zaproponowano transdyscyplinarne podejście do modelowania mechanizmu korbowego silników. Analityczny sprzężony model termomechaniczny układu

wału korbowego umożliwił ocenę wzajemnych zależności pomiędzy zjawiskami termodynamicznymi i mechanicznymi zachodzącymi w silnikach. Badanie obejmowało analizę analityczną i numeryczną wyłącznie w celu umożliwienia wiernego odwzorowania sprzężeń i interakcji między zmiennymi stanu.

Podsumowując, mogę stwierdzić, że recenzowane osiągnięcie naukowe zawiera wartościowe wyniki badań i stanowi oryginalne osiągnięcie naukowe Autorki w obszarze inżynierii mechanicznej. Postawione i zrealizowane zgodnie ze sformułowanym celem zadania są aktualne oraz mają znaczenie zarówno poznawcze, jak i użyteczne. Ich wykonanie wymagało od Opiniowanej umiejętności operowania warsztatem naukowym oraz swobodnym poruszaniem się w obszarze tematycznym związanym z szeroko rozumianą analizą układów dynamicznych i zastosowaniem w tym celu metod komputerowych mechaniki. Doktorantka wykazała się trafnością postępowania badawczego i poprawnością wnioskowania, co świadczy o wiedzy i umiejętności samodzielnego prowadzenia prac naukowych. Dowodem na to, jest wkład Pani mgr inż. Anna Mackojć w powstanie publikacji (na podstawie przedstawionych oświadczeń), który obejmował: opracowanie pomysłu badań, opracowanie przeglądu literatury, opracowanie modeli analitycznych i ich rozwiązań numerycznych, analizy teoretyczne przedstawionych problemów, opracowanie nowatorskich metodologii badawczych, opracowanie scenariuszy symulacji numerycznych, przygotowanie przypadków analizowanych badań, wykonanie symulacji, przygotowanie analitycznych i numerycznych narzędzi programistycznych, przetworzenie wyników eksperymentalnych, walidacje modeli, analizy i interpretacje wyników, badania statystyczne, sformułowanie wniosków, a także edycję i formatowanie tekstu artykułów przed i po recenzjach.

4. Uwagi, sugestie i spostrzeżenia

Oceniając formę pracy stwierdzam, że opis osiągnięcia naukowego jest przedstawiony poprawnym i zrozumiałym językiem, a materiał ilustracyjny jest dobrze dobrany. Niemniej jednak Autorka wprowadziła drobny chaos zestawiając publikacje w rozdziale 4.2 od najnowszej do najstarszej, a w dodatku, gdzie umieszczono ich pełną treść w bardziej logicznej kolejności, tzn. w porządku formułowania kolejnych, coraz bardziej złożonych modeli obliczeniowych.

Podczas czytania rozprawy nasunęły się także pewne pytania i spostrzeżenia, które w celu lepszego wyjaśnienia i uzupełnienia treści merytorycznej chciałbym postawić Opiniowanej:

1. W rozdziale 5.6 napisano “..., co dowodzi postawionej w rozprawie tezy ...”), jednak w treści dysertacji nie doszukałem się sprecyzowanej „wprost” tezy pracy. Czy w takim razie można sformułować tezę pracy i jak wówczas by brzmiała?
2. Dlaczego w pracy analizuje się ruch układu linowego w jednym kierunku ($\varphi(t)$)? Czy ruchy morza nie generują także falowania w płaszczyźnie prostopadłej do analizowanego przypadku?
3. Dlaczego w modelu analitycznym pominięto zjawisko parcia wiatru?
4. Jaki wpływ będzie miało uwzględnienie w modelu analitycznym takich właściwości, jak odkształcalność wysięgnika żurawia, czy tarcie w przegubach?
5. Czy jeżeli ładunek opiszemy jako bryłę sztywną (nie jako punkt materialny, jak jest w rozprawie), to czy zmiana ulegnie odpowiedź dynamiczna układu i trajektoria ruchu ładunku? Czy wprowadzenie takiego opisu bardzo skomplikuje rozwiązanie analityczne?

5. Podsumowanie i wniosek końcowy

W mojej opinii, materiał naukowy zgromadzony we wskazanych publikacjach pozwala stwierdzić, że do najważniejszych osiągnięć Autorki należy zaliczyć między innymi:

- powiązanie drgań osiowych z elementem kompensującym z drganiami oscylacyjnymi z możliwością wzbudzenia eliptycznego,
- opracowanie innowacyjnego modelu planowania operacji do symulacji zachowania przenoszonego obiektu w układzie ładunek-statek,
- opracowanie modelu sprzężonego układu ładunek-statek do podnoszenia na morzu obiektów lekkich i ciężkich oraz określenie zakresu stosowalności ww. układu,
- wyprowadzenie analitycznego rozwiązania postaci zamkniętej proponowanego modelu na podstawie metody perturbacyjnej z nieliniowej teorii drgań.

Wartość naukową i poznawczą oraz znaczenie aplikacyjne pracy oceniam bardzo pozytywnie, a zaproponowane rozwiązania zrealizowane z twórczym udziałem Opiniowanej można uznać za dowód wiedzy i wartościowych osiągnięć w zakresie dyscypliny inżynieria mechaniczna w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych. Ponadto przedstawione w powyższych punktach uwagi i pytania mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na ocenę rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny Mackojć.

Konkludując stwierdzam, że opiniowana rozprawa doktorska mgr inż. Anny Mackojć pt. „Analytical approach to modelling, analysis and dynamics studies on parametrically

induced payload pendulation in offshore lifting operations” stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowo-inżynierskiego i spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim, określone w obowiązującej Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Stanowi zatem podstawę do dopuszczenia jej Autorki do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

David Cokus