

Prof. dr hab. inż. Bogumił Wrana  
Państwowa Akademia Nauk Stosowanych  
38-400 Krosno  
Rynek 1

Kraków, 07.09.2023

**Recenzja**  
**Pracy doktorskiej mgr. inż. Michała Polaka pt.**  
**Analiza skuteczności działania strojonych tłumików wiskotyczno-wahadłowych i**  
**cieczowych kolumnowych**

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawę do oceny stanowi pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej prof. dra hab. inż. Andrzeja Szaraty z dnia 1 czerwca 2023 roku dotyczące powierzeniu mi przez Radę Naukową Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej wykonanie niniejszej opinii. Podstawę merytoryczną stanowi dostarczona praca doktorska.

2. Ogólna charakterystyka pracy doktorskiej

Przewód doktorski mgr. inż. Michała Polaka jest prowadzony na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej. Rozprawa doktorska została wydana do oceny w 2023 roku. Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Andrzej Flaga.

W opiniowanej pracy doktorant zajmuje się porównaniem działania dwóch modeli strojonych tłumików drgań w symulowanych warunkach wymuszenia zewnętrznego działania wiatru w Polsce. Rozprawa ma charakter doświadczalny. Autor porównuje skuteczność działania dwóch własnych rozwiązań konstrukcji tłumików drgań; strojony masowy tłumik wahadłowy oraz strojony kolumnowy tłumik cieczowy. Zaprojektował i wykonał modele laboratoryjne samej konstrukcji budowlanej wraz z proponowanymi konstrukcjami tłumików, umożliwiające zbadanie zagadnienia i potwierdzenie skuteczności podanych propozycji. Wykonał wiele serii badań laboratoryjnych w tunelu aerodynamicznym Politechniki Krakowskiej dla różnych przypadków konstrukcji tłumików i różnych przypadków wymuszeń, sumarycznie dla ok. 200 różnych przypadków badawczych.

Rozprawa składa się z wykazu często stosowanych oznaczeń, a następnie z dwunastu rozdziałów, literatury, spisu rysunków, wykazu tabel oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Opiniowana praca liczy łącznie 211 stron, 171 rysunków, 11 tabel i 3 załączniki. Bibliografia zawiera 137 pozycji. Pomocny dla czytelnika jest zamieszczony na dwóch stronach wykazu często stosowanych oznaczeń.

We wstępie, stanowiącym rozdział pierwszy przedstawiono: przedmiot i genezę pracy oraz cel i zakres pracy. Celem pracy jest porównanie działania dwóch modeli strojonych tłumików drgań w symulowanych warunkach wymuszenia zewnętrznego działania wiatru w Polsce. Rozprawa ma charakter doświadczalny przeprowadzono badania skuteczności dwóch propozycji rozwiązań tłumików drgań mechanicznych: 1) strojonym masowym tłumiku wahadłowym i 2) strojonym kolumnowym tłumiku cieczowym. Wykonano serię badań laboratoryjnych w tunelu

Wydziału Inżynierii Lądowej

Wpłynęło dnia

13.09.2023

L. dz.

10.510.6.3.2023

podpis

Uluu

aerodynamicznym Politechniki Krakowskiej. Wyniki badań były prezentowane na konferencjach naukowych. W pracy przedstawiono poziom skuteczności działania proponowanych strojonych tłumików drgań. Wykazano, że poziom skuteczności obu rozwiązań jest podobny.

Rozdziały drugi do piątego zawierają przegląd aktualnie stosowanych tłumików drgań w obiektach budowlanych. Rozdział drugi zawiera zestaw równań obecnie stosowanych teoretycznych modeli tłumienia drgań: a) modelu tarcowego Coulomba; b) modelu tłumienia wiskotycznego - aerodynamicznego oraz c) modelu tłumienia wiskotycznego - hydrodynamicznego. Następnie zamieszczono podział rodzajów tłumienia występujących w obiektach budowlanych oraz klasyfikację tłumików drgań z uwagi na obecność lub nie dodatkowego źródła zasilania i charakteru siły efektywnej generowanej przez tłumik. W rozdziale trzecim przedstawiono przegląd ogólny tłumików mechanicznych. W rozdziale czwartym zamieszczono podstawowe zagadnienia teorii strojonych tłumików masowych, wahadłowych i cieczowych. Natomiast w rozdziale piątym zaprezentowano opis dwunastu wybranych obiektów budowlanych wysokich budynków z całego świata, w których zastosowano tłumiki drgań.

Rozdział szósty poświęcony jest prezentacji zaproponowanych przez autora rozwiązań konstrukcyjnych strojonych tłumików mechanicznych. W szczególności rozwiązania konstrukcji tłumika V-kształtnego z wiskotyczną przepustnicą.

W rozdziale siódmym doktorant analizuje za pomocą programu MatLab, teoretyczną redukcję drgań w modelu budowli wieżowych z tłumikiem wiskotyczno-wahadłowym. Budowla wieżowa reprezentowana jest przez układ o jednym stopniu swobody z postacią drgań odpowiadającą pierwszej gętej, postaci drgań własnych budowli wieżowych. Ponieważ w budowlach wieżowych pierwsza postać drgań własnych giętych ma największy udział w amplitudzie przemieszczenia. Wyniki symulacji od wymuszenia impulsowego przedstawiono na rys. 7.2, od wymuszenia harmonicznego na rys. 7.4 do 7.7, od działania wiatru na rys. 7.10 do 7.12.

W rozdziale ósmym doktorant analizuje za pomocą programu MatLab teoretyczną redukcję drgań poziomych w modelu kładki dla pieszych o dużej rozpiętości. Podobnie jak w modelu budowli wieżowych badana jest redukcja drgań układu o jednym stopniu swobody symulując przemieszczenia w czasie z pierwszą postacią drgań giętych. Autor przedstawił na rys. 8.4 zmianę przemieszczenia w czasie kładki od wymuszenia impulsowego bez tłumika, następnie z wahadłem, ale bez tłumika wiskotycznego oraz z wahadłem i tłumikiem wiskotycznym. Natomiast na rys. 8.5 pokazuje wpływ wielkości masy tłumika wahadłowego na redukcję przemieszczenia kładki a na rys. 8.6 wpływ długości wahadła. Podobna analiza prowadzona jest dla wymuszenia ruchem pieszych.

Rozdział dziewiąty zawiera kryteria podobieństwa tłumików dla analizowanych tłumików drgań. Autor, podobnie jak w rozdziale siódmym i ósmym, analizuje kryteria podobieństwa sprowadzając konstrukcje budowlaną do układu o jednym stopniu swobody. Przechodzi do równań o wielkościach bezwymiarowych uwzględniając wymiar samej konstrukcji jako  $L_s$ , jej okres drgań własnych jako  $T_0$ , prędkości uogólnionej  $v_0$  oraz uwzględniając bezwymiarowy parametr masy, kinematyczną liczbę Strouhala i prędkość zredukowaną. Ostatecznie w równaniu (9-16) przedstawia układ dwóch równań ruchu konstrukcji ze strojonym tłumikiem wiskotyczno-wahadłowym: pierwsze przemieszczenie i drugie kąt obrotu wahadła tłumika. Podobnie, równanie (9-23) przedstawia układ dwóch równań ruchu konstrukcji ze strojonym tłumikiem cieczowym kolumnowym. Ponadto doktorant rozważa skale podobieństwa rozważanego zagadnienia,



Rozdział dziesiąty poświęcony jest prezentacji samych modeli badawczych oraz stanowiska badawczego. Prace badawcze zostały przeprowadzone w tunelu aerodynamicznym, umożliwiającym symulację warstwy przyściennej, znajdującym się w Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej. Do przeprowadzenia pomiarów wykorzystano dwa systemy pomiarowe oparte na czujnikach przyspieszeń, akcelerometrów BKSv oraz czujników przemieszczeń  $\mu$ Epsilon. Stosowane były też czujniki optometryczne. Jako model fizyczny konstrukcji budynku przyjęto stalową ramę ścinaną z obudową polistyrenową, która jest odwzorowaniem laboratoryjnym budynku wieżowego o wysokości 250 m z żelbetowym rdzeniem i żelbetowymi stropami o podstawie zbliżonej do kwadratu o wymiarach 64 m x 64 m. Pierwsza giętą postać drgań własnych występuje przy częstotliwości 0,152 Hz. Model badawczy to układ o jednym stopniu swobody dynamicznej dla pierwszej postaci drgań własnych budowli. Tłumik wahadłowy został wykonany z okrągłych płytek aluminiowych i stalowych nałożonych na stalową śrubę. Tłumik cieczowy strojony kolumnowy z ramionami o kształcie litery V odpowiadający parametrami tłumikowi wahadłowemu wykonany z tworzywa sztucznego o nazwie ABS.

W rozdziale jedenastym zaprezentowano wyniki badań laboratoryjnych. Zamieszczono teoretyczne wartości częstotliwości drgań swobodnych fizycznego wahadła masowego oraz wartości pomierzone dla wybranych długości zawiesia wahadła zaproponowanego przez doktoranta. Podobne pomiary drgań swobodnych wykonano dla tłumika cieczowego za pomocą optometrów. Wykonano pomiary strugi powietrza oraz drgania własne konstrukcji ramy, która stanowiła model laboratoryjny budowli wieżowej. Wykonano badania skuteczności redukcji drgań dla proponowanych konstrukcji tłumików wahadłowych i cieczowych.

W rozdziale dwunastym autor podaje wnioski końcowe i kierunki dalszych prac.

### 3. Omówienie istotnych elementów rozprawy doktorskiej

Doktorant podjął pracę naukową nad propozycjami konstrukcji tłumików wahadłowych i cieczowych. Zagadnienie to jest, aktualnie bardzo ważnym problemem występującym szczególnie w konstrukcjach smukłych o niskich podstawowych częstotliwościach drgań własnych. W tych konstrukcjach pod obciążeniem dynamicznym pochodzącym od wiatru lub obciążeniu sejsmicznym lub parasejsmicznym występuje zjawisko dużych przemieszczeń, co prowadzi często do przekroczenia warunku Stanu Granicznego Użytkowalności.

Doktorant zaproponował i przebadał w Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej własne konstrukcje tłumików podając poziom redukcji drgań w czasie obciążenia dynamicznego.

### 4. Uwagi merytoryczne do rozprawy doktorskiej

Rozdział 10. Modele i stanowisko badawcze.

- W rozdziale 10.3 zaznaczono, że analizowany będzie model teoretyczny budowli wieżowej o wysokości 250 m. Model tego budynku zredukowany do jednego stopnia swobody opisany jest następującymi parametrami:  $\omega_s = 6,39 \text{ rad/s}$  ( $f_s = 1,017 \text{ Hz}$ );  $M_s = 25,6 \text{ kg}$ ;  $m_d = 172 \text{ g}$ ;  $\mu = 0,7\%$ ;  $l = 0,07 \text{ m}$ ;  $\omega_d = 6,24 \text{ rad/s}$  ( $f_s = 0,993 \text{ Hz}$ );  $\gamma_s = 0,017$ . Doktorant zaznaczył, że będzie proponował model laboratoryjny w postaci ramy stalowej obudowanej płytami styropianowymi o parametrach zbliżonych do wartości pierwszej giętej częstotliwości drgań własnych budowli. Dla rzeczywistych konstrukcji budowlanych widmo drgań własnych ma

nieskończenie wiele częstotliwości. Jakie jest widmo częstotliwości drgań własnych proponowanego modelu z tłumikiem i bez tłumika?

- Warunkiem zgodności modelu teoretycznego o jednym stopniu swobody i modelu laboratoryjnego jest, by w modelu laboratoryjnym odseparować jak najdalej wszystkie następne częstotliwości począwszy od drugiej. Jaka jest metoda poszukiwania takiego modelu konstrukcji?
- Warunkiem sukcesu badań laboratoryjnych jest by widmo własne konstrukcji laboratoryjnej było zbliżone do widma konstrukcji budowlanej. Jak budować takie modele laboratoryjne by nie tylko pierwsza podstawowa częstotliwość drgań własnych była podobna do podstawowej częstotliwości, ale pozostałe druga, trzecia...?

## Rozdział 11. Badania laboratoryjne.

- Pytania do strugi powietrza:
  - a) Czy widmo częstotliwościowe było zawsze stałe w czasie dla danej prędkości wiatru?
  - b) Czy widma częstotliwościowe były takie same dla różnych prędkości wiatru?
- Na rys. 11.11 pokazano częstotliwości rezonansowe o wartościach ok. 2,1 Hz do ok. 1,6 Hz. Natomiast w rozdziale 10 podano częstotliwości teoretyczną modelu  $f_s = 0,993$  Hz ?
- Na rys. 11.13 oraz 11.14 przedstawiono wyniki modelu laboratoryjnego FFT przy prędkości napływu powietrza 6 m/s, gdzie pierwsza częstotliwość pomierzona wynosi  $f = 1,6833$  (w modelu teoretycznym  $f_s = 0,993$  Hz)?
- Na rys. 11.18 przedstawiono wyniki modelu laboratoryjnego FFT dla prędkości napływu powietrza 5 m/s, gdzie pierwsza częstotliwość pomierzona wynosi  $f = 1,7167$  (w modelu teoretycznym  $f_s = 0,993$  Hz) ?
- Punkt 11.6. Skuteczność tłumika wahadłowego można było pokazać przez porównanie amplitud przyspieszenia, np. przy prędkości powietrza 6 m/s mierzona akcelerometrem A6, modelu bez tłumika (rys. 11.14 – amplituda przyspieszenia ok. 0,033 m/s<sup>2</sup>) z wartością drgań z tłumikiem (rys. 11.30 – amplituda przyspieszenia ok. 0,012 m/s<sup>2</sup>). Dlaczego doktorant nie przedstawił skuteczności tłumika dla pozostałych akcelerometrów i dla optometrów dla różnych prędkości wiatru?
- Punkt 11.7. Podobne porównanie można uzyskać dla skuteczności tłumika cieczowego?

## Rozdział 12. Wnioski końcowe i kierunki dalszych badań.

- Autor często stosuje określenie „obliczenia numeryczne” w domyśle, że są to obliczenia dokładniejsze, lepsze, dlaczego? Jeśli program komputerowy np. MatLab podaje wyniki obliczeń, to oznacza, że wykonuje obliczenia zgodnie z podanymi wzorami analitycznymi w ramach teorii mechaniki budowli. Zatem program nie dokłada nic ponadto, tylko liczy bardzo szybko.
- Skuteczność redukcji drgań zależy głównie od zgodności widma samego obciążenia dynamicznego z widmem drgań własnych konstrukcji budowli. Jeśli dana częstotliwość w widmie wymuszenia jest blisko częstotliwości drgań własnych konstrukcji z tłumikiem, to stopień redukcji drgań dla tej częstotliwości będzie duży bo jest tłumik tej częstotliwości, w przeciwnym przypadku będzie mniejszy. Zatem jak dopasowywać tłumik do danej konstrukcji wiedząc, że widmo własne konstrukcji budowli zależy nie tylko od sztywności konstrukcji



(która nie zmienia się) ale też od masy konstrukcji budowli (budynek może być pusty albo w pełni obciążony, tzn. zmienia się masa = zmienne widmo własne).?

### 5. Uwagi szczegółowe

- Strona 7. Załącznik B zawiera Spis tabel, rysunków oraz wykresów na str. 202. W przekazanej pracy brak jest spisu rysunków na str. 202. Streszczenia polskie i angielskie nie są oznaczone jako załącznik C i D. W przekazanej pracy nie ma opisu pozycji bibliotecznej.
- Strona 12. Autor podaje „Pojawiające się w niniejszej dysertacji rozwiązania autorskie...” lecz w tekście pracy nie ma powołania się na pozycje podane w spisie literatury.
- Strona 17 we wzorze ogólnym (2-1) nie ma zmiennej  $\gamma$ , na którą powołuje się we wzorach (2-2) do (2-4).
- Strona 20, rys. 2.2. podano wykres przemieszczeń, lecz nie podano równania sygnału.
- Strona 26, autor podaje trudności w teoretycznym opisie zagadnienia tłumienia w konstrukcjach budowlanych i podaje, że „Zagadnienie jednak jest bardzo złożone i dopiero rozwój komputerowych metod obliczeniowych pozwolił na jego lepsze poznanie”? Komputer jest bardzo szybkim liczydłem i nie może proponować równań opisu zjawiska.
- Strona 32. „...prognozując w oparciu o zaawansowaną sztuczną inteligencję...”, co to takiego?
- Strona 38 tabela 4-1. Brak określenia definicji zmiennej „ $\mu$ ”.
- Strona 52 wzór (4-33) po lewej stronie skalar, po prawej stronie wektor kolumnowy.
- Strona 54 wzór (4-44) po lewej stronie skalar, po prawej stronie wektor kolumnowy.
- Strona 55 „Sam tłumik cieczowy opisany jest wzorem analogicznym do równania (4-61)”, nie ma wzoru (4-61)

### Podsumowanie

Przedstawione wyżej uwagi szczegółowe nie umniejszają merytorycznej wartości pracy. Po zapoznaniu się z pracą, która powstała na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej pod kierunkiem profesora Andrzeja Flagi, stwierdzam, że Autor przedstawił oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazując się wiedzą teoretyczną i praktyczną z zakresu badań laboratoryjnych obiektów budowlanych. Stwierdzam, że

- a) Cel pracy został osiągnięty, rozprawa napisana jest poprawnie.
- b) Autor wykazał się szeroką wiedzą z zakresu badań modeli laboratoryjnych obiektów budowlanych.
- c) Doktorant zaproponował konstrukcje tłumików wahadłowych i cieczowych o dużej skuteczności drgań.
- d) Doktorant wzorowo wykonał badania laboratoryjne przeprowadził odpowiednie analizy. Z tej perspektywy patrząc na sylwetkę Doktoranta można powiedzieć, że jest On osobą, która może samodzielnie prowadzić dalsze badania naukowe (ma odpowiednią wiedzę i kompetencje).

W konkluzji stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska pt. „Analiza skuteczności działania strojonych tłumików wiskotyczno-wahadłowych i cieczowych kolumnowych” spełnia wymagania Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku (wraz z późniejszymi jej zmianami), Ustawy zatytułowanej „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki” i wnoszę o dopuszczenie mgr. inż. Michała Polaka do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Bogumił Umana