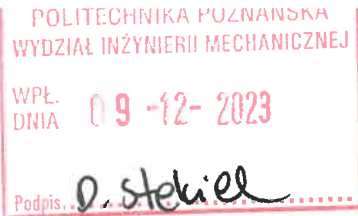




POLITECHNIKA
LUBELSKA
LUBLIN UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY



dr hab. inż. Jarosław Latański
prof. PL
Katedra Mechaniki Stosowanej
☎ 81-538-4893; 81-538-4197
✉ j.latański@pollub.pl

2 grudnia 2023

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Filipa Sarbinowskiego

pt. „Analiza sprawności urządzeń odzyskujących energię z galopowania poprzecznego”

wykonanej na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej

Podstawa opracowania

Recenzję rozprawy przygotowano na podstawie pisma Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej Pana dr hab. inż. Olafa Ciszaka, prof. PP (dokument nr DIM.0745.427.2023 z dnia 27 września 2023). Przedmiotem opinii jest rozprawa doktorska mgr inż. Filipa Sarbinowskiego pt. „Analiza sprawności urządzeń odzyskujących energię z galopowania poprzecznego”. Praca została wykonana pod kierunkiem dr hab. inż. Romana Starosty prof. PP, a promotorem pomocniczym jest dr inż. dr inż. Paweł Fritzkowski.

Recenzję wykonano zgodnie z wymogami ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

Charakterystyka ogólna rozprawy

Przedłożona do oceny praca doktorska zawiera 113 stron. Składa się ze streszczenia w języku polskim oraz angielskim, wykazu ważniejszych oznaczeń, spisu treści, pięciu numerowanych rozdziałów oraz wykazu bibliograficznego.

W rozdziale pierwszym Doktorant przedstawił krótki wywód uzasadniający podjęcie tematu badawczego. W rozważaniach poruszono temat technologii odzyskiwania energii z drgań mechanicznych i jej znaczenia w świetle współczesnych wyzwań w rozwoju techniki oraz racjonalnego wykorzysta-

nia odnawialnych źródeł energii. Krótko omówione zostały podstawowe typy przetworników elektromechanicznych stosowanych w systemach odzyskiwania energii, tj. przetworników elektromagnetycznych, piezoelektrycznych i elektrostatycznych.

W rozdziale drugim przedstawiono elementarny liniowy model matematyczny systemu odzyskiwania energii z drgań mechanicznych za pomocą przetwornika piezoelektrycznego. Omówiono też podstawowe parametry tego modelu i wprowadzono kluczowe wielkości opisujące charakterystykę sprawnościową systemu.

Kolejne dwa rozdziały stanowią najważniejszą część opracowania. Zawierają one analizę rozszerzonych modeli strukturalnych badanego układu. I tak w rozdziale trzecim Doktorant badał układ o dwu stopniach swobody (w różnych wariantach), natomiast w rozdziale czwartym układ o jednym stopniu swobody, ale rozbudowany o sprężynę o nieliniowej charakterystyce. Rozdziały te zawierają ocenę ilościową i jakościową wpływu wprowadzonych modyfikacji na szeroko rozumianą sprawność piezoelektrycznego systemu odzyskiwania energii.

W kolejnym rozdziale rozprawy przedstawiono podsumowanie i najważniejsze wnioski z przeprowadzonych badań. Opracowanie kończy wykaz bibliografii zawierający najistotniejsze pozycje dotyczące omawianej problematyki. Jest on reprezentatywny dla tematu rozprawy i zawiera łącznie 73 pozycje.

Ocena merytoryczna rozprawy

Struktura przedłożonej do oceny rozprawy Pana mgra inż. Filipa Sarbinowskiego jest zwarta i logiczna; odpowiada w tym zakresie klasycznemu układowi pracy doktorskiej w dziedzinie nauk inżynierjno-technicznych.

W rozdziale pierwszym Autor skupił się na zagadnieniu powstawania drgań poprzecznych struktur wiotkich w wyniku oddziaływań strug cieczy lub gazu opływających badany układ. Wskazano na dwa podstawowe mechanizmy wzbudzenia drgań w tego typu konstrukcjach – tj. oddziaływanie wirów Karmana oraz zjawisko powstawania siły nośnej w wyniku ruchu poprzecznego i zmiany kąta natarcia strugi względem struktury. Zjawisko to jest przyczyną efektu znanego jako galopowanie cięgien i może być obserwowane np. jako drgania przewodów napowietrznych linii elektroenergetycznych wywołane wiatrem lub drgania lin w konstrukcji mostów podwieszanych.

W dalszej części tego rozdziału Autor przedstawił krytyczny przegląd literatury dotyczący systemów odzyskiwania energii z drgań powstających w wyniku opływu struktury. Doktorant słusznie zauważył, że o ile literatura dotycząca drgań wzbudzanych wirami Karmana jest stosunkowo bogata, to brakuje pogłębionych analiz dotyczących efektywności odzyskiwania energii z drgań galopowania

ciągów. Mechanizmy powstawania obu wymienionych zjawisk dynamicznych są różne, różne są zatem i modele matematyczne ich opisu. Tym samym wyniki uzyskane dla jednej klasy zagadnień nie mogą być automatycznie ekstrapolowane na drugą grupę problemów.

Rozważania poczynione w tej części opracowania pozwoliły ostatecznie na sformułowanie celów rozprawy. Autor wyróżnił dwa cele główne tj. określenie uniwersalnego zestawu parametrów, który będzie w sposób wyczerpujący opisywał sprawność piezoelektrycznych systemów odzyskiwania energii galopowania ciągów oraz cel drugi, który zdefiniowano jako wskazanie ogólnego zestawu parametrów kryterialnych mogących służyć do jednoznacznego porównania sprawności różnych wariantów konstrukcyjnych analizowanych urządzeń odzyskiwania energii z drgań przewodów. Sformułowano także jeden cel dodatkowy, a mianowicie ustalenie zjawisk fizycznych i przyczyn powodujących ilościową i jakościową różnicę sprawności poszczególnych wariantów badanych układów odzyskiwania energii. W świetle dokonanej oceny rozwiązań systemów odzyskiwania energii i obecnego stanu wiedzy w tym zakresie należy uznać, że tematyka badawcza rozprawy jest aktualna, a postawione cele są istotne z poznawczego oraz z praktycznego punktu widzenia.

W rozdziale drugim Kandydat szczegółowo przedstawił model matematyczny podstawowego wariantu urządzenia do odzyskiwania energii galopowania ciągów. Zapis ten sprowadza się do układu dwu wzajemnie sprzężonych bezwymiarowych równań różniczkowych zwyczajnych. Są to równania drugiego i pierwszego rzędu opisujące odpowiednio dynamikę w zakresie domeny mechanicznej i elektrycznej systemu. W zaprezentowanym sformułowaniu przyjęto model mechaniczny zredukowany do jednego stopnia swobody. Zapisana po lewej stronie równania mechanicznego siła aerodynamiczna oddziaływania strugi jest przedstawiona za pomocą funkcji kwadratowej prędkości opływu i współczynnika siły nośnej opisanego funkcją trzeciego stopnia dynamicznej wartości kąta natarcia. Model ten jest powszechnie spotykany w literaturze przedmiotu i służy do opisu oddziaływań aerodynamicznych powodowanych opływem jednorodnym. Alternatywnym modelem spotykanym w publikacjach jest zredukowany model oddziaływania reprezentowany przez równanie van der Pola. Zjawisko galopowania przewodów wykazuje bowiem pewne podobieństwa do oscylatora tego typu. Należy jednak zauważyć, że ten drugi model jest rzadziej stosowany do opisu drgań galopowania, częściej natomiast stosuje się go do opisu drgań wzbudzanych powstawaniem wirów.

W dalszej części omawianego rozdziału Doktorant zdefiniował parametry, które w rozszerzony sposób opisują charakterystyki sprawnościowe analizowanego systemu odzyskiwania energii. Wprowadzone wyróżniki zostały wykorzystane w dalszych częściach rozprawy jako wartości referencyjne do porównania różnych wariantów strukturalnych przetwornika. Ponadto, w toku analiz zaprezentowanych w tej części opracowania Autor wykazał, że obecność tłumienia strukturalnego w układzie uniemożliwia pracę systemu z optymalną sprawnością.

W rozdziale trzecim pracy Doktorant przedstawił rozszerzenie podstawowego modelu przetwornika. Zaproponowana modyfikacja polegała na wprowadzeniu do konstrukcji dodatkowej masy skupionej

zwiększając w ten sposób liczbę stopni swobody do dwóch. Dodatkowo rozważano opcjonalnie oddziaływanie strugi na jedną bądź na drugą masę skupioną; wskazano także różne warianty umiejscowienia przetwornika piezoelektrycznego. Wprowadzone modyfikacje pozwoliły na uzyskanie łącznie sześciu alternatywnych schematów strukturalnych systemu. Należy w tym miejscu zwrócić uwagę, że w dostępnej literaturze badane były dotychczas tylko modele, w których przetwornik piezoelektryczny był umiejscowiony pomiędzy podłożem a dolną masą drgającą. Nie były natomiast analizowane dostatecznie szczegółowo warianty, w których przetwornik byłby umieszczony pomiędzy masami drgającymi. Można zatem wnioskować, że przyjęty kierunek badań stanowi oryginalny pomysł badawczy Doktoranta.

W dalszej części tego rozdziału został zapisany układ równań ruchu dla zmodyfikowanej konstrukcji systemu. Celem zachowania ogólności rozważań wprowadzone zostały mnożniki binarne, które pozwoliły ujednocilić sformułowanie matematyczne i tok rozwiązania zagadnienia dla różnych wariantów konstrukcji. Przedstawione równania ruchu zostały rozwiązane metodą bilansu harmonicznych z wykorzystaniem klasycznych funkcji trygonometrycznych. Analizując szczegółowo wariant konstrukcji, w którym siła wymuszająca działa na dolną masę układu Autor wykazał, że rozwiązanie takie jest niekorzystne. W takim przypadku sprawność szczytowa układu o jednym stopniu swobody pozostanie bowiem większa od sprawności szczytowej badanego wariantu w całym spektrum prędkości strugi oraz niezależnie od realizowanego wariantu umieszczenia przetwornika piezoelektrycznego. Natomiast w przypadku wariantu urządzenia, w którym siła wymuszająca strugi jest przyłożona do górnej masy drgającej udowodniono, że możliwe jest dobranie takiego zestawu parametrów elektromechanicznych systemu, że układ będzie wykazywać większą sprawność niż układ referencyjny. Ustalenia te są zgodne z częściowymi wynikami prezentowanymi w literaturze przedmiotu.

W toku przeprowadzonej w tym rozdziale analizy wykazano także możliwość występowania wielu rozwiązań równań ruchu dla wybranych parametrów użytkowych systemu. Wspomniana własność jest jedną z cech charakterystycznych układów nieliniowych – w tym przypadku nieliniowość wynika z przyjętego modelu siły aerodynamicznej.

W rozdziale czwartym Doktorant analizował możliwość zastosowania w układzie sprężyny o nieliniowej charakterystyce sztywnościowej. Celem tych badań było sprawdzenie, czy taka zmiana konstrukcyjna może przyczynić się do poprawy sprawności urządzenia w stosunku do liniowego wariantu wzorcowego. Zapisany układ równań ruchu został rozwiązany – podobnie jak w poprzednim rozdziale – metodą bilansu harmonicznych. Jednakże z wagi na fakt, że badany w tej części pracy wariant konstrukcji jest układem zawierającym sprężyny nieliniowe to do reprezentacji przewidywanego rozwiązania zaproponowano zastosowanie funkcji eliptycznych Jacobiego. Funkcje te pozwalają bowiem w sposób ścisły wyznaczyć rozwiązania równań ruchu z nieliniowościami trzeciego stopnia (np. oscylator Duffinga).

Warto zwrócić uwagę, że podejście takie jest stosunkowo rzadko stosowane w literaturze z uwagi na występowanie w równaniach bilansowych wyższych potęg funkcji eliptycznych bądź też ich wzajemnych iloczynów. Ich uwzględnienie w bilansie jest często niemożliwe lub prowadzi do rozwiązań trywialnych. Aby uniknąć tego typu komplikacji Autor zaproponował wykorzystanie znanych tożsamości trygonometrycznych, ale po uprzednim zastąpieniu funkcji eliptycznych funkcjami trygonometrycznymi z argumentem w postaci amplitudy Jacobiego. W efekcie zabieg ten pozwala na wyznaczenie nietrywialnych rozwiązań równań bilansowych. Należy w tym miejscu podkreślić, że zaproponowane podejście stanowi oryginalny pomysł Doktoranta i bez wątpienia osiągnięcie to powinno być wysoko ocenione. Zauważyć również należy, że zrealizowana w tej części analiza wymagała od Autora znajomości bardziej zaawansowanego aparatu matematycznego.

W toku symulacji przeprowadzonych w tym rozdziale wykazano m.in., że układ o bistabilnej charakterystyce sztywnościowej może wykazywać znacznie wyższą sprawność od układu liniowego, jednak wzmocnienie to może być osiągalne tylko przy prędkości pracy bliskiej prędkości nominalnej. W wyniku nawet niewielkiego odchylenia, urządzenie doznawać będzie intensywnego spadku sprawności, nawet poniżej sprawności referencyjnej układu liniowego. Wykazano także jakościowo inne zachowanie omawianych układów w stosunku do wariantu podstawowego – w tym m.in. możliwość występowania bifurkacji podkrytycznych Hopfa dla wybranych parametrów konstrukcyjnych urządzenia (przede wszystkim w przypadku dużej wartości współczynnika sztywności nieliniowej sprężyny).

Ostatni, piąty rozdział pracy zawiera syntetyczne zestawienie najważniejszych wyników uzyskanych w czasie realizacji badań oraz sformułowane na tej podstawie wnioski. Przedstawiono również przewidywane kierunki dalszych badań prowadzonych przez Doktoranta.

Podsumowując tę część opinii pragnę zaznaczyć, że choć praca ma charakter wyłącznie analityczny to zawiera istotne walory poznawcze, a także i utylitarne. Szkoda że Autor nie realizował badań doświadczalnych, które w pewnym zakresie lub też dla wybranych przypadków mogłyby potwierdzić słuszność uzyskanych wyników. Choć badania tego typu wymagałyby sporych nakładów inwestycyjnych, to jednak sądzę, że warto takie starania podjąć w przyszłości.

Pragnę także zauważyć, że w rozważaniach jako punkt wyjściowy przyjęto gotowy jednowymiarowy model analityczny dostępny w literaturze. Przyjęcie takiego założenia stanowi rozsądny kompromis pomiędzy z jednej strony złożonością zagadnienia a z drugiej strony możliwością scharakteryzowania zjawisk dynamicznych zachodzących w układach piezoelektrycznych systemów odzyskiwania energii oraz z wytyczonym na początku rozprawy zakresem badań. W perspektywie przyszłych analiz można by się jednak pokusić o np. wyprowadzenie od podstaw nieliniowego modelu matematycznego cięgna i wykorzystanie do obliczeń symulacyjnych np. projekcji dwu postaci drgań w warunkach rezonansu wewnętrznego.

Pytania i uwagi szczegółowe do rozprawy

Lektura rozprawy nasuwa kilka pytań i wątpliwości wymagających szczegółowego wyjaśnienia przez Autora. Sformułowano także kilka krytycznych spostrzeżeń dotyczących przedłożonej pracy i dostrzeżonych błędów.

1. Pomimo że praca ma charakter czysto teoretyczny to jednak szkoda, że w jednym z początkowych rozdziałów Autor nie przedstawił bliżej szczegółów technicznych faktycznych układów odzyskiwania energii z galopowania cięgien. Przykład takiego rozwiązania, wraz z omówieniem konstrukcji i zasady działania, z pewnością podniósłby walory pracy.
2. Zamieszczone w rozdziale 2 wzory (2.3a) i (2.3b) przedstawiają równania bezwymiarowe ruchu bazowego układu odzyskiwania energii tj. układu liniowego o jednym stopniu swobody. Równania te w postaci wymiarowej zostały zapisane w rozdziale pierwszym, a sposób skalowania zmiennych współczynników opisują zależności (2.1). Wydaje się, że wobec tak przyjętych skal równanie (2.3b) powinno mieć współczynnik różny od jedności przed składnikiem ij . W związku z tym uprzejmie proszę o wyjaśnienie tych wątpliwości i przedstawienie szczegółowego wyprowadzenia zależności bezwymiarowych.
3. W rozdziale trzecim na str. 32 Autor omawiając możliwości wykorzystania ogólnego sformułowania równań ruchu do analizy wszystkich wariantów systemu odzyskiwania energii stwierdza: „...Możliwe jest też przyjęcie wartości $\kappa_2 = 0$ lub $\kappa_1 = 0$, co spowoduje rozprężenie odpowiednio równania (3.1.1b) lub (3.1.1d), redukując w ten sposób model ogólny do modelu podwariantu z kolumny a lub b...”. Proszę zwrócić uwagę, że przyjęcie takiego uproszczenia istotnie spowoduje rozprężenie równań, jednak w równaniu mechanicznym pozostanie dodatkowy człon tłumiący stanowiący rozwiązanie równania (3.1.1b) lub (3.1.1d) – teraz będącego równaniem algebraicznym. Bez stosownej korekty tłumienia c_i w równaniach mechanicznych ta forma uproszczenia nie będzie poprawna.
4. Wyniki przedstawione na Rys. 3.2.2 potwierdzają możliwość występowania wielu wariantów rozwiązań równań stanu układu. Niestety, w opisie nie podano dla jakich parametrów uzyskano oba te przebiegi. Proszę także wyjaśnić, dlaczego w toku rozwiązania numerycznego uzyskano tylko punkty na górnej krzywej sprawności (tj. po przekroczeniu prędkości $u = 16$). Wydaje się, że rozwiązania z dolnej krzywej też powinny być możliwe do uzyskania na drodze symulacji numerycznych. Odpowiedź na to pytanie może też mieć związek z inną kwestią – tj. jak były przyjmowane warunki początkowe do kolejnych obliczeń? Czy stosowano metodę tzw. „*brute force*” czy też wybierano każdorazowo losowo punkt startowy? Obecność wielu rozwiązań potwierdza bowiem występowanie w dziedzinie rozwiązań wielu obszarów przyciągania. Dodatkowo, w opisie tej części badań nie wyszczególniono jaki algorytm (i ew. jakie oprogramowanie) został zastosowany do całkowania numerycznego równań ruchu. Podobne uwagi odnoszą się do rozważań zaprezentowanych na str. 47 i Rysunku 3.3.2.

5. W rozdziale czwartym, omawiając warianty charakterystyki nieliniowej sprężyny na stronie 48 Autor podaje: „... Należy zaznaczyć, że tak zdefiniowany model sprężystości ma sens fizyczny tylko przy drganiach pomiędzy punktami siodłowymi $\pm\sqrt{-2k/k_n}$. Jeśli odkształcenie układu przekroczy położenie punktu siodłowego, stanie się on niestabilny dynamicznie i tym samym fizycznie nierealizowalny.” Proszę zwrócić uwagę, że nie koniecznie tak musi być; przykładowo przy dużym tłumieniu układ może pozostać stabilny dynamicznie pomimo ujemnej sztywności dążąc do stanu równowagi np. $y = 0$.

I dalej na następnej stronie: „... Jeżeli $k < 0$ i $k_n > 0$ to układ ma bistabilną charakterystykę sprężystości i cechuje się on dwoma stabilnymi położeniami równowagi – dla odkształceń $\pm\sqrt{-2k/k_n}$ (punkty węzłowe) oraz jednym niestabilnym dla odkształcenia $y = 0$ (punkt siodłowy)”. Podano błędnie ponieważ położeniem stabilnym będzie minimum potencjału V odpowiadające wartościom $\pm\sqrt{-k/k_n}$.

Pewne wątpliwości opiniującego budzą też przyjęte w tym opisie nazwy punktów charakterystycznych wykresu funkcji potencjału $V(y)$. Wydaje się, że w pierwszym skojarzeniu jako punkty siodłowe należałoby określić punkty o odciętej $y = 0$ i $y = \pm\sqrt{-k/k_n}$, zaś jako węzły punkty dla których $V = 0$. Termin „punkt siodłowy” może bowiem wskazywać na formę bifurkacji (która oczywiście nie ma tutaj miejsca).

6. Również w rozdziale czwartym występuje też pewna niekonsekwencja dotycząca konwencji zapisu funkcji eliptycznych. W powszechnym obiegu funkcjonują dwie równoważne notacje argumentów tych funkcji – tj. oprócz pierwszej zmiennej podawany jest albo parametr albo podawany jest moduł funkcji eliptycznej. I tak we wzorze (4.1.6) Autor podał wartość całki eliptycznej za pomocą funkcji odwrotnej cosinus modalny oraz parametru, w tym przypadku $\frac{b}{\sqrt{a^2+b^2}}$. Natomiast w dalszych zależnościach (np. 4.1.11 itd.) jako argument zapisywany jest moduł funkcji eliptycznej (we wzorze (4.1.11) $\frac{b^2}{a^2}$ zamiast $\frac{b}{a}$). Podobny błąd pojawia się w zależności (4.1.16).

Pewne zamieszanie w tej sprawie może być powodowane faktem, że do oznaczenia modułu Doktorant przyjął symbol m , podczas gdy w wielu opracowaniach – jak np. w dokumentacji systemu Wolfram MathWorld czy w cytowanej monografii P.Byrda i M.Friedmana – moduł jest oznaczany literą k , zaś symbol m oznacza parametr.

Ponadto w rozdziale tym błędnie zapisano rozwiązanie równania różniczkowego (4.14) – w zależności (4.1.5) powinno być

$$\sqrt{\frac{2}{\beta}} \int_y^A \frac{dy}{\sqrt{(a^2 + y^2)(b^2 - y^2)}} = t$$

podobnie w zależności (4.1.10) powinno być

$$\sqrt{\frac{2}{\beta}} \int_y^A \frac{dy}{\sqrt{(a^2 - y^2)(b^2 - y^2)}} = t$$

7. Na stronie 57 Doktorant przedstawił interpolację iloczynu funkcji eliptycznych sn i cn za pomocą mnożników $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$ i Γ_4 wyznaczonych metodą najmniejszych kwadratów. Proszę podać jaka była dyskretyzacja dziedziny (liczba punktów) przy wyznaczaniu wartości tych współczynników. Ponadto, poniżej we wzorach (4.2.5a) do (4.2.5d) podano przybliżone zależności na ww współczynniki. Warto było może rozważyć pokazanie tych aproksymacji na załączonych rysunkach 4.2.1a i 4.2.1b. Pozwoliłoby to ocenić jakość tych przybliżeń.
8. Proszę o informację, czy rozwiązując w rozdziale czwartym równania ruchu metodą bilansu harmonicznego za pomocą funkcji eliptycznych Doktorant brał pod uwagę możliwość rozwinięcia funkcji modularnych sinus i cosinus w szeregi? Przykładowo sinus modułarny może być rozwinięty $\text{sn}(x, m) \approx x - \frac{1}{3!}x^3(1+k^2) + \frac{1}{5!}x^5(1+14k^2+k^4)$ itp. Może to podejście również pozwoliłoby wyznaczyć nietrywialne rozwiązania równań bilansowych?
9. Na stronie 65 podano informację, że równanie charakterystyczne układu dane wielomianem trzeciego stopnia nie może mieć trzech rozwiązań. Proszę o wyjaśnienie dlaczego nie ma takiej ewentualności.
10. Proszę o szczegółowe wyjaśnienie podanego na stronie 67 stwierdzenia „... dla $k_N = 1$, część gałęzi stabilnej oraz cała gałąź niestabilna funkcji modułu eliptycznego przyjmuje wartości $m < 0$...”. Z rysunku 4.2.13 wynika, że krzywa pomarańczowa odpowiadająca wartości $k_N = 1$ w całości jest stabilna i zawsze moduł m jest dodatni. Rozpatrywanie potencjalnego zakresu $m < 0$ nie ma żadnego uzasadnienia fizycznego.
11. W kilku miejscach natrafiono na błędy w zapisie zależności matematycznych. Oczywiście przy tak dużym nagromadzeniu wzorów w rozprawie pewne uchybienia są nieuniknione. Pozostaje jednak ufać, że są to tylko błędy o charakterze edytorskim, a zamieszczone obliczenia i symulacje zostały wykonane poprawnie. Listę najważniejszych zauważonych usterek pozwalam sobie zamieścić poniżej:
- zależność (2.9b) – brak κ w liczniku
 - zależność (2.13) – brak κ^2 w liczniku w końcowej postaci wzoru
 - zależność (3.1.a) – brak indeksów dolnych $(\)_1$ przy tłumieniu c i zmiennej y
 - w równaniach bilansu harmonicznego na stronach 33 i 34 do oznaczeń amplitud mechanicznych użyto małych liter a, b ; powyżej w prognozowanym rozwiązaniu (3.2.1a) są użyte litery wielkie A i B . Podobnie proszę sprawdzić oznaczenia g_1, g_2 i h_1, h_2 i potencjalny konflikt oznaczeń z wielkościami zdefiniowanymi bezpośrednio po zależnościach (3.2.7b)
 - na stronie 34 jest $e^{li2} = \frac{r}{1+r^2\kappa_1^2\omega_2^2}$; prawdopodobnie winno być $e^{li2} = \frac{r\kappa}{1+r^2\kappa_1^2\omega_2^2}$

- proszę dokładnie sprawdzić zależność (3.2.10c) – po podstawieniu wartości liczbowych podanych na stronie 22 nie uzyskuje się tej samej wartości kwadratu amplitudy co z zależności (3.2.10a) lub (3.2.10b)
- na ilustracji Rys. 3.2.1. proszę poprawić oznaczenie prędkości krytycznej u_{cr}^I . Ta sama uwaga dotyczy Rys. 3.3.1
- zależność (4.1.7) – prawdopodobnie powinno być $\frac{\beta A}{2\beta A^2 + 2\alpha^2}$. Prawdopodobnie błędnie też podana jest wartość częstości eliptycznej $\Omega = \sqrt{2\alpha^2 + \beta A^2}$
 $\rightarrow \Omega = \sqrt{\alpha^2 + \beta A^2}$
- zależność (4.2.2a) – brak końcowej części równania = 0
- Tabela 4.2.2 – brak końcowej części równania = 0 w prawej kolumnie, 3 wiersz
- Tabela 4.2.3 – zestawienie harmonicznym dla $\cos(\Phi)$ w równaniu mechanicznym jest błąd. W obecnej wersji tekstu w komórce jest zapis przekopiowany z poprzedniej tabeli tzn. bez uwzględnienia przyjętego podstawienia
- zależność (4.2.8c) – brak końcowej części równania = 0
- 4.2.14 – proszę sprawdzić, czy na pewno w liczniku w pierwszym wyrazie po aproksymacji powinna być κ
- na str. 67 są odwołania do wzorów (1.15) i (1.17); powinno być (2.15) i (2.17)
- zależność (4.3.4c) – brak końcowej części równania = 0
- zależność (4.3.4d) – brak κ przed składnikiem A_v

Ocena redakcyjna i edycyjna pracy

Praca jest starannie opracowana pod względem językowym, choć Autor nie ustrzegł się kilku drobnych błędów najczęściej interpunkcyjnych. Zdarzają się również bardzo nieliczne błędy literowe. Oceniając styl pisania rozprawy mogę stwierdzić, że jest on precyzyjny i zrozumiały dla czytelnika. Zachowany jest logiczny ciąg rozumowania i wnioskowania, a zdania są formułowane w sposób zwięzły i spójny.

Wysoko oceniam stronę edycyjną rozprawy – skład tekstu nie budzi żadnych zastrzeżeń. Wszystkie tabele i ilustracje zawarte w opracowaniu są czytelne i zostały odpowiednio wyróżnione i dobrze opisane. Załączony na początku wykaz najważniejszych oznaczeń jest sporym ułatwieniem dla czytelnika, przede wszystkim z uwagi na mnogość zastosowanych wielkości fizycznych i często bardzo zbliżonych oznaczeń literowych. Wykaz literatury jest przygotowany właściwie i z zachowaniem standardów prac naukowych. Wszystkie wyszczególnione w nim pozycje są przytaczane w tekście rozprawy.

Podsumowanie

Jako końcowe wnioski z przedłożonej opinii mogę stwierdzić, że:

1. Przedstawiona w pracy mgr. inż. Filipa Sarbinowskiego tematyka badawcza, podane cele oraz treść opracowania bezsprzecznie mieszczą się w dziedzinie nauk inżynierjno-technicznych i obejmują zagadnienia związane z dyscypliną inżynieria mechaniczna.
2. Podjęta tematyka badawcza jest bardzo aktualna i znakomicie wpisuje się we współczesne trendy rozwoju techniki, w tym przede wszystkim w problematykę efektywnego wykorzystania energii ze źródeł odnawialnych.
3. Materiał zawarty w pracy w pełni odpowiada podanemu na początku zakresowi opracowania. Również tytuł przedłożonej do oceny dysertacji został właściwie sformułowany i dobrze oddaje jej zawartość.
4. Sformułowane w rozdziale pierwszym cele pracy zostały w pełni osiągnięte. W szczególności zdefiniowano ogólny zestaw parametrów służących do jednoznacznego porównania badanych wariantów systemu odzyskiwania energii oraz w sposób wyczerpujący ustalono wpływ analizowanych zjawisk fizycznych na sprawność badanych układów.
5. Treść rozprawy, a przede wszystkim opis przeprowadzonych badań analitycznych oraz przedstawiona pogłębiona analiza możliwości rozwiązania sformułowanych równań, jasno wskazuje co jest oryginalnym i autorskim wkładem Doktoranta.
6. Kandydat wykazał się umiejętnościami analizy i modelowania analitycznego układów mechatronicznych. Ponadto Doktorant wykazał się dobrą znajomością metod przybliżonego rozwiązywania nieliniowych równań różniczkowych. Wykorzystany został do tego celu zaawansowany aparat matematyczny znacznie wykraczający poza zakres standardowych kursów matematyki; Doktorant wykazał się także znajomością oprogramowania do symulacji numerycznych.
7. Wyniki uzyskane w toku realizacji przedłożonej rozprawy stanowią istotną wartość poznawczą i z całą pewnością są dobrym punktem wyjściowym do dalszego kontynuowania podjętych badań.

Przedstawione powyżej argumenty świadczą o wysokich kompetencjach Doktoranta do prowadzenia samodzielnej pracy badawczej. Kandydat wykazał się znaczną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna oraz umiejętnościami interpretacji i krytycznej analizy otrzymanych wyników oraz prawidłowego i syntetycznego formułowania wniosków.

W związku z powyższym uważam, że oceniana rozprawa Pana mgr. inż. Filipa Sarbinowskiego pt. „Analiza sprawności urządzeń odzyskujących energię z galopowania poprzecznego” (promotor dr hab. inż. Roman Starosta prof. PP, promotor pomocniczy dr inż. Paweł Fritzkowski) *spełnia wymaga-*

nia stawiane rozprawom doktorskim w myśl ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Wniosuję o dopuszczenie do dalszego procedowania w postępowaniu.



dr hab. inż. Jarosław Latański, prof. PL.

