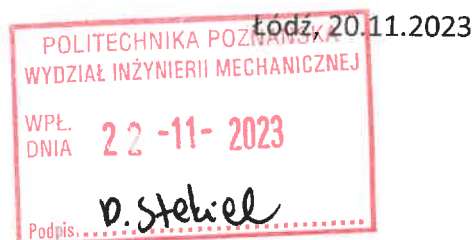


Dr hab. inż. Grzegorz Kudra, prof. uczelni  
Katedra Automatyki, Biomechaniki i Mechatroniki  
Wydział Mechaniczny  
Politechnika Łódzka



**Recenzja**  
**rozprawy doktorskiej mgra inż. Filipa Sarbinowskiego**  
**pt. „Analiza sprawności urządzeń odzyskujących energię z galopowania**  
**poprzecznego”**

## 1 Podstawa opracowania

Podstawą opracowania niniejszej recenzji jest pismo DIM.075.427.2023 Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej w Politechnice Poznańskiej, dr hab. inż. Olafa Ciszaka, prof. PP, z dnia 27 września 2023 roku i dołączona do niego rozprawa doktorska mgra inż. Filipa Sarbinowskiego pt. „Analiza sprawności urządzeń odzyskujących energię z galopowania poprzecznego” napisana pod kierunkiem dra hab. inż. Romana Starosty (promotora pracy) i dra inż. Pawła Fritzkowskiego (promotora pomocniczego).

## 2 Ogólna charakterystyka i zawartość rozprawy

Przedstawiona do recenzji praca doktorska zawiera 113 stron i składa się z 5 rozdziałów, w tym „Wstępu” i „Podsumowania i wniosków”. Po spisie treści zamieszczono streszczenia w języku polskim i angielskim, a następnie spis najważniejszych oznaczeń. Pracę kończy spis literatury, który obejmuje 73 pozycje.

Rozdział pierwszy stanowi Wstęp, który zawiera przegląd zagadnień dotyczących odzyskiwania energii, w szczególności z drgań wzbudzonych przepływem. Największy nacisk położono na odzyskiwanie energii z drgań wzbudzonych galopowaniem poprzecznym. Rozdział kończy się sformułowaniem celów pracy jako próby wypełnienia luki wskazanej podczas przeprowadzonego przeglądu literatury, dotyczącej niewystarczającego przebadania i usystematyzowania elementarnych konfiguracji urządzeń odzyskujących energię z galopowania poprzecznego. W szczególności cele te mają dotyczyć zdefiniowania uniwersalnych zestawów parametrów opisujących sprawność i określenia zjawisk wywołujących różnicę sprawności elementarnych wariantów tego typu urządzeń, takich jak układy z liniową charakterystyką sztywności o jednym i dwóch stopniach swobody oraz układy o nieliniowej sprężystości.

W rozdziale drugim przeprowadzono analizę wariantu podstawowego, którym jest urządzenie o jednym stopniu swobody i liniowej charakterystyce sztywności. Rozwiązanie układu uzyskano metodą bilansu harmonicznego. Następnie wyprowadzono zależność określającą sprawność układu odzyskiwania energii. Zdefiniowano również najważniejsze parametry kryterialne charakteryzujące sprawność. Ponadto przeprowadzono pogłębioną analizę sprawności układu podstawowego i sposobów jej kształtowania poprzez odpowiedni dobór parametrów układu.

Rozdział trzeci rozpoczyna się od klasyfikacji wariantów urządzeń do odzyskiwania energii o dwóch stopniach swobody i liniowej charakterystyce sztywności. W dalszej jego części ponownie zastosowano metodę bilansu harmonicznym w celu wyznaczenia rozwiązań okresowych układów i analitycznych wyrażeń określających ich sprawność. Przeprowadzono dogłębną analizę sprawności w odniesieniu do sprawności wariantu podstawowego o jednym stopniu swobody.

W rozdziale czwartym rozprawy dokonano analizy urządzenia odzyskującego energię o jednym stopniu swobody i nieliniowej charakterystyce sztywności typu Duffinga. Rozwiązania analityczne układu wyznaczono metodą bilansu harmonicznym eliptycznym. Analizę przeprowadzono osobno dla progresywnej, degresywnej i bistabilnej charakterystyki sztywności. Wyznaczono wyrażenia określające sprawność i przeprowadzono analizę sprawności w odniesieniu do wcześniej badanych wariantów urządzenia odzyskującego energię.

W rozdziale piątym dokonano podsumowania przeprowadzonych badań oraz zebrano wynikające z nich wnioski. Przedstawiono również perspektywy kontynuacji badań urządzeń odzyskujących energię z galopowania poprzecznego.

### 3 Ocena rozprawy

Podjęty w rozprawie doktorskiej temat badawczy uważam za naukowo interesujący i ważny ze względu na potencjalne zastosowania w obszarze odzyskiwania energii. Cele pracy zostały sformułowane w sposób jasny i w mojej ocenie są ambitne. Dotyczą one próby określenia uniwersalnego zestawu parametrów, który opisywał będzie sprawność urządzeń odzyskujących energię z galopowania poprzecznego oraz parametrów kryterialnych, pozwalających porównać sprawność dla wybranych podstawowych wariantów tego typu urządzeń.

Praca dotyczy opracowania analitycznych zależności opisujących sprawność elementarnych wariantów urządzeń odzyskujących energię z galopowania poprzecznego, pozwalających na ich dogłębną analizę, porównanie i określenie sposobów kształtowania charakterystyk sprawności. Pomimo bogatej literatury dotyczącej analizy różnych szczególnych przypadków urządzeń, istnieje wyraźny brak prac próbujących usystematyzować problematykę i w sposób kompleksowy porównać najprostsze warianty urządzeń odzyskujących energię. W tym sensie podjęty temat próbuje wypełnić tę lukę, a jego realizacja niewątpliwie stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Do najważniejszych osiągnięć rozprawy zaliczam:

1. Wyznaczenie przybliżonych analitycznych rozwiązań okresowych elementarnych wariantów urządzeń odzyskujących energię z galopowania poprzecznego i wyrażeń określających ich sprawność.
2. Zastosowanie metody bilansu harmonicznym eliptycznym, z autorskimi rozszerzeniami dotyczącymi przybliżeń niektórych funkcji eliptycznym, do analizy urządzenia o nieliniowej sztywności typu Duffinga.
3. Przeprowadzenie kompleksowej i ogólnej analizy oraz porównania sprawności wybranych wariantów urządzeń odzyskujących energię.

Zadanie dotyczące badań porównawczych sprawności różnych typów urządzeń odzyskujących energię, nie powołujących się do szczególnych przypadków i zestawów parametrów, było bardzo ambitne ze względu na trudności związane z różnymi i nieporównywalnymi cechami poszczególnych układów. Pomimo wysokiego poziomu trudności, zadanie to zostało zrealizowane i zostały wskazane ogólne wnioski dotyczące sprawności energetycznej tych układów. Stanowi to istotny wkład w badania teoretyczne układów odzyskujących energię z galopowania poprzecznego.

W związku z tym, uwzględniając wyżej wymienione uwagi stwierdzam, że Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, a przygotowana przez Niego rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Ponadto uzyskane wyniki mogą być wykorzystane w projektowaniu i badaniu urządzeń występujących w praktyce inżynierskiej.

Przeprowadzenie opisanych w rozprawie badań naukowych wymagało bardzo szerokiej i w niektórych miejscach dogłębnej wiedzy teoretycznej z zakresu matematyki, dynamiki nieliniowej i teorii bifurkacji. W szczególności Doktorant wykazał się pogłębioną wiedzą i umiejętnościami w zakresie wyznaczania przybliżonych rozwiązań analitycznych nieliniowych układów dynamicznych występujących w inżynierii mechanicznej lub mechatronice.

#### 4 Pytania i uwagi krytyczne

Uwagi, które wymagają odpowiedzi Doktoranta:

1. Na jakiej podstawie przyjęto domyślne wartości parametrów podane w rozdziale 1.5 i czy mogą mieć one wpływ na wyniki badań i wnioski z nich płynące.
2. Czy próbowano zweryfikować otrzymane w rozdziale 4.1 analityczne rozwiązania zachowawczego układu Duffinga poprzez ich porównanie z rozwiązaniami numerycznymi?
3. Rozwiązanie 4.1.12 dla układu z degresywną charakterystyką sztywności zawiera funkcję sinus eliptyczny  $sn$ , która powoduje, że nie spełnia ono założonych warunków początkowych  $y(0) = A$  i  $\dot{y}(0) = 0$ .
4. W jaki sposób określano stabilność poszczególnych rozwiązań okresowych?

Inne drobne usterki:

1. Na str. 2 jest „Wartości tych parametrów silnie zależy...”, powinno być „Wartości tych parametrów silnie zależą...”.
2. W równaniu 1.2.1b kropka oznaczająca pochodną po czasie powinna być nad zmienną  $x$ , a nie nad iloczynem  $\theta x$ .
3. Na str. 10 jest „funkcja”, powinno być „funkcja”.
4. Na str. 12 jest „... oddzielające się wury...”, powinno być „... oddzielające się wiry...”.
5. Na str. 13 jest „... sprężystością sprężyny...”, powinno być „... sztywnością sprężyny...”.
6. Na str. 14 jest „Baldeless”, powinny być „Bladeless”.
7. Na str. 15 jest „... wymiar charakterystycznych...”, powinno być „... wymiar charakterystyczny”.
8. Na str. 17 jest „opisującemożliwość”, powinny być „opisujące możliwość”.

9. Na str. 17 napisano, że publikacja [46] była podstawą opracowania artykułu [47], podczas gdy zgodnie ze spisem literatury, praca [47] została opublikowana wcześniej.
10. Na str. 19 jest „... wpływu nieliniowej sprężystości...”, powinno być „... wpływu nieliniowej sprężystości...”.
11. We wzorach 3.2.2-3 użyto małych zamiast dużych liter oznaczających amplitudy drgań oscylatora mechanicznego.
12. Na str. 40 w opisie rys. 3.2.2 podano, że układ posiada dwa rozwiązania dla prędkości przepływu  $u \approx 6,6$ , podczas gdy wydaje się to nieprawdą.
13. Na str. 45 jest „... analizę stosunek sprawności...”, powinno być „... analizę stosunku sprawności...”.
14. Na str. 67 w opisie rys. 4.4.13 jest napisane, że moduł  $m$  przyjmuje wartości mniejsze od zera, co nie jest widoczne na rysunku.

## 5 Wniosek końcowy

Opierając się na uzasadnieniu przedstawionym w p. 3 niniejszej recenzji i pomimo uwag krytycznych wymienionych w p. 4 stwierdzam, że zawartość ocenianej rozprawy doktorskiej dowodzi szerokiej wiedzy jej Autora w zakresie dynamiki nieliniowej układów spotykanych w inżynierii mechanicznej. Uważam, że praca ta stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a jej Autor wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań.

Uważam zatem, że rozprawa doktorska mgra inż. Filipa Sarbinowskiego pt. *„Analiza sprawności urządzeń odzyskujących energię z galopowania poprzecznego”* mieści się w obszarze dyscypliny naukowej Inżynieria Mechaniczna i spełnia wszystkie warunki stawiane w Ustawie w odniesieniu do prac doktorskich. Wnioskuje zatem o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

*Gregorz Kudła*