

dr hab. inż. Damian Mazur

Rzeszów, 2023.05.22

Wydział Elektrotechniki i Informatyki

Politechnika Rzeszowska

POLITECHNIKA ŚLĄSKA  
Biuro Rady Dyscypliny  
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika  
Technologie Kosmiczne  
wpłynęło dnia 20.05.2023  
nr 26 zał.

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Joanny Bijak „Przekształcenie jednorodne w analizie i modelowaniu układów odzyskiwania energii”.**

Opracowana na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Śląskiej z dnia 28 lutego 2023 r.

### **Tematyka rozprawy**

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska poświęcona jest zagadnieniom związanym z modelowaniem matematycznym układów odzyskiwania energii. W rozprawie przedstawiono nowy sposób opisu ruchu układów odzyskiwania energii kinetycznej wykorzystujący notację Denavita-Hartenberga oraz przekształcenia jednorodne, a układy odzyskiwania energii zaprezentowano jako analogię do łańcuchów kinematycznych robotów.

Obecnie w Polsce i na świecie istnieje rosnące zainteresowanie badaniami i rozwojem układów odzyskiwania energii kinetycznej. W tym kontekście notacja Denavita-Hartenberga oraz przekształcenia jednorodne znajdują zastosowanie jako narzędzia matematyczne do opisu ruchu tych układów. Poniżej przedstawiam trendy związane z tymi zagadnieniami:

**Badania teoretyczne i symulacje:** Wielu badaczy skupia się na analizie teoretycznej i symulacjach układów odzyskiwania energii kinetycznej. Notacja Denavita-Hartenberga jest wykorzystywana do modelowania kinematyki i dynamiki tych układów, co umożliwia analizę ich charakterystyk ruchu oraz efektywności odzysku energii.

**Projektowanie i optymalizacja:** Projektowanie układów odzyskiwania energii kinetycznej staje się coraz bardziej popularne. Wykorzystanie notacji Denavita-Hartenberga i przekształceń jednorodnych pozwala na optymalizację parametrów tych układów w celu maksymalizacji odzysku energii. Badacze starają się znaleźć optymalne połączenia komponentów, takich jak sprzęgła, hamulce czy generator elektryczny, w celu efektywnego odzyskiwania energii kinetycznej.

**Przykłady zastosowań:** Układy odzyskiwania energii kinetycznej są coraz częściej prezentowane jako analogia do łańcuchów kinematycznych robotów. W praktyce, systemy odzyskiwania energii są stosowane w różnych dziedzinach, takich jak transport publiczny (np. tramwaje z odzyskiem energii

podczas hamowania), energetyka wiatrowa (np. odzyskiwanie energii z turbiny wiatrowej podczas niekorzystnych warunków wiatru) czy sektory przemysłowe (np. odzyskiwanie energii z ruchu maszyn przemysłowych). Przykłady te pokazują, że zastosowanie notacji Denavita-Hartenberga i przekształceń jednorodnych może przyczynić się do efektywnego projektowania i analizy takich układów.

Zrównoważony rozwój i efektywność energetyczna: W obliczu rosnących problemów związanych z energią i ochroną środowiska, istnieje coraz większe zapotrzebowanie na rozwiązania oparte na odzyskiwaniu energii kinetycznej. Zarówno w Polsce, jak i na świecie, rozwój układów odzyskiwania energii stanowi jeden z filarów zrównoważonego rozwoju i efektywności energetycznej. Notacja Denavita-Hartenberga i przekształcenia jednorodne są przydatnymi narzędziami do projektowania, analizy i optymalizacji tych układów w kontekście osiągnięcia efektywnego wykorzystania energii kinetycznej.

Ważne jest zrozumienie, że powyższe trendy mogą się różnić w zależności od konkretnych dziedzin i aplikacji, ale ogólnie można zauważyć rosnące zainteresowanie badaniami i rozwojem układów odzyskiwania energii kinetycznej, gdzie notacja Denavita-Hartenberga i przekształcenia jednorodne pełnią istotną rolę w analizie i modelowaniu ruchu tych układów.

#### **Teza i cele pracy :**

Możliwe jest opisanie ruchu elementu układów odzyskiwania energii z wykorzystaniem modeli matematycznych, bazujących na przekształceniu jednorodnym, po przedstawieniu układu odzyskiwania energii jako łańcucha kinematycznego robota i odwzorowania jego możliwych ruchów. Zapewnia to ujednoczenie i zwięzły opis matematyczny układów odzyskiwania energii. Poprzez opracowanie modeli matematycznych, wykonanie symulacji komputerowych i ich weryfikację z wybranymi, opracowanymi prototypami układów i wynikami badań laboratoryjnych, zostanie wykazane, że opis ruchu elementów układu odzyskiwania energii z wykorzystaniem przekształcenia jednorodnego jest możliwy i stanowi efektywne narzędzie analizy i projektowania układów odzyskiwania energii.

Sformułowano następujące cele rozprawy wraz z założeniami:

- Identyfikacja i analiza łańcuchów kinematycznych wybranych układów odzyskiwania energii.
- Wybór łańcuchów układów odzyskiwania energii o minimalnej liczbie stopni swobody.
- Sformułowanie procedury opisu łańcuchów kinematycznych układów odzyskiwania energii.
- Analiza sił zewnętrznych działających na wybrane elementy łańcuchów kinematycznych układów odzyskiwania energii.

- Sformułowanie równań dynamiki dla układów odzyskiwania energii opisanych łańcuchami o minimalnej liczbie stopni swobody.
- Implementacja modeli matematycznych analizowanych układów odzyskiwania energii.
- Przeprowadzenie weryfikujących badań pomiarowych.

Założenia:

- Wybrane zostały 3 układy odzyskiwania energii: boja odzyskująca energię z ruchu fal, koło samochodowe z elementem odzyskującym energię z nierówności drogi oraz tzw. sprężyna magnetyczna jako generator elektromagnetyczny.
- Analizowany ruch układów odzyskiwania energii jest ruchem uproszczonym liniowym, obrotowym lub złożeniem tych ruchów.
- Siły zewnętrzne i siły potencjalne działające na układy odzyskiwania energii są siłami przybliżonymi wynikającymi z działania środowiska w jakim znajdują się te układy.

Badania te zostały zrealizowane zarówno metodami obliczeniowymi jak i doświadczalnymi. Na podstawie tak określonego celu i zakresu pracy uważam że podjęte przez Doktoranta kwestie są aktualne i bardzo istotne. Dlatego uważam że wybrana tematyka badań oraz sformułowany cel prac jest oryginalny pod względem poznawczym i odpowiada poziomowi pracy doktorskiej w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne

### **Ogólnie omówienie rozprawy**

Wraz z załącznikami i zestawieniem literatury poprawiona praca liczy 199 stron i jest podzielona na 9 rozdziałów oraz bibliografię wraz z 11 załącznikami. Na początku zamieszczono wykaz oznaczeń oraz definicji i skrótów rozprawy doktorskiej. Treść pracy rozpoczyna się od przedstawienie motywacji do podjęcia badań w temacie układu odzyskiwania energii oraz sformułowania celu i tezy rozprawy.

We wstępie pracy przedstawiono tematykę badawczą oraz cele i tezę pracy. W rozdziale tym zawarto naświetlenie tematyki związanej z odzyskiwaniem energii oraz problemów występujących podczas odzyskiwania energii i modelowania układów odzyskiwania energii. Podkreślono, że układy odzyskiwania energii powinny być odpowiednio modelowane w celu zoptymalizowania ich pod kątem odzyskiwanej energii. W pracy zaproponowano w związku z tym, nowy, ujednoczony i zwięzły opis matematyczny układów odzyskiwania energii poprzez przedstawienie układów jako łańcuchów kinematycznych i zastosowanie przekształceń jednorodnych do wyprowadzenia równań ruchu.

W rozdziale 2 opisano w sposób ogólny rodzaje odzyskiwanej energii ze względu na jej źródło i pochodzenie. Przy opisie skupiono się głównie na energii kinetycznej, wymieniając istniejące i badane układy odzyskiwania tej energii oraz przetworniki tej energii na energię elektryczną.

Szczegól­n­ą uwag­ę po­święcono energii odzyskiwanej z ruchu falowego wody oraz energii z drga­ń. Przy opisie tych energii przeanalizowano mo­żliwy ruch ukł­ad­ów odzyskiwania tych energii: boi, koła samochodowego z elementem odzyskuj­ącym energ­ię oraz spr­ężyny magnetycznej, kt­ór­ą w pracy przedstawiono jako przetwornik energii kinetycznej na energ­ię elektryczn­ą. W rozdziale tym zobrazowano r­ównie­ż przedstawienie ruchu poszczeg­ólnych element­ów ukł­adu odzyskiwania energii za pomoc­ą przegub­ów pryzmatyczny i obrotowych. Zaprezentowano tak­że podział ukł­ad­ów odzyskiwania energii ze wzgl­ędu na opisuj­ące je ła­ncuchy kinematyczne i przykładowy ła­ncuch kinematyczny.

Procedur­ę opisu ła­ncuch­ów kinematycznych i metodolog­ię formułowania równa­ń ruchu ukł­ad­ów odzyskiwania energii przedstawiono w rozdziale 3. Ukł­ad odzyskiwania energii przyr­ównano do ła­ncuch­ów kinematycznych robot­ów i skorzystano z notacji Denavita-Hartenberga i przekszta­le­ń jednorodnych do ich opisu. Przeanalizowano tak­że siły i momenty dział­ające na ukł­ad i zaprezentowano przekszta­lenie, dzi­ęki kt­óremu wyznaczono siły i momenty dział­ające na ka­żdy element ła­ncucha kinematycznego ukł­adu odzyskiwania energii. Siły i momenty zale­ż­ą od środowiska w jakim znajduje si­e ukł­ad oraz jego parametr­ów takich jak współczynniki sztywno­ści i tłumienia. Do wyprowadzenia równania ruchu z przekształconego równania Eulera-Lagrange'a przedstawiono formułowanie macierzy bezwładno­ści i Christoffela, korzystaj­ąc z przeprowadzonych wcze­śniej przekszta­le­ń.

Procedur­ę opisu ła­ncuch­ów kinematycznych i formułowania równa­ń ruchu ukł­ad­ów odzyskiwania energii zaprezentowano na wybranych ukł­adach odzyskiwania energii: boi, koła i spr­ężyny magnetycznej w rozdziale 4. Ukł­ad boi przedstawiono jako ła­ncuch kinematyczny o 1,2 i 3 stopniach swobody. W przypadku ukł­adu koła skupiono si­e na 3 stopniach swobody, uznaj­ąc wyst­ępuj­ące odkszta­lenia i ruch obrotowy jako g­ł­ówne elementy ruchu. W ukł­adzie spr­ężyny magnetycznej uwzgl­ędniono wył­acznie ruch liniowy magnesu wewn­ętrznego, tym samym spr­ężyn­ę magnetyczn­ą w pracy potraktowano jako generator bezwładno­ściowy. Dla ka­żdego z powy­żej wymienionych ukł­ad­ów przeprowadzono analiz­ę sił i moment­ów dział­ających na ukł­ad, były to m.in. siły oddziaływania grawitacyjnego, siły sztywno­ści i tłumienia oraz siły i momenty nap­ędzaj­ące ukł­ad. Stosuj­ąc si­e do metodologii formułowania równa­ń wyprowadzono równania ruchu element­ów przykładowych ukł­ad­ów odzyskiwania energii. Równania ruchu element­ów ukł­adu sprowadzono do postaci kanonicznej, co uł­atwiło wyznaczenie przemieszcze­ń.

Równania ruchu zaimplementowano w postaci blokowej w rozdziale 5. Umo­żliwiło to zamodelowanie ukł­ad­ów w programie Matlab/Simulink. W modelach uwzgl­ędniono siły zewn­ętrzne dział­ające na

układy odzyskiwania energii, liczbę stopni swobody układu oraz ograniczenia w elementach całkujących wynikające z oddziaływania środowiska na układ.

Dla każdego z analizowanych układów odzyskiwania energii przeprowadzono symulację ruchu zmieniając parametry układu np. masy, wymiary geometryczne, siły zewnętrzne oraz współczynniki sztywności i tłumienia. Wyniki badań symulacyjnych przedstawiono w rozdziale 6. Symulowany ruch elementów układu odzyskiwania energii pod wpływem zmiany parametrów jest zgodny z oczekiwaniami, co potwierdziło prawidłowość metody modelowania tych układów.

Wyniki badań doświadczalnych ruchu wybranych układów odzyskiwania energii zaprezentowano w rozdziale 7. W związku z brakiem dostępu do zbiornika wodnego skorzystano z dostępnych w artykułach wyników badań ruchu boi. W przypadku badań ruchu koła i sprężyny magnetycznej zastosowano odpowiednio przygotowane stanowiska. Badania ruchu koła przeprowadzono na stanowisku do badania układu hamulcowego koła samochodowego rejestrując ruch za pomocą kamery. Sprężynę magnetyczną zbadano wprawiając ją w ruch za pomocą wstrząsarki elektromagnetycznej i mierząc przemieszczenie wykorzystując laserowe czujniki odległości.

Badania symulacyjne przeprowadzono powtórnie wykorzystując dane z badań doświadczalnych. Wyniki badań doświadczalnych i powtórzonych badań symulacyjnych porównano w celu sprawdzenia wyprowadzonych modeli matematycznych wybranych układów odzyskiwania energii w rozdziale 8. Weryfikacja modeli matematycznych potwierdziła ich poprawność i wykazała, że przedstawione układy odzyskiwania energii mogą zostać poprawnie zamodelowane poprzez przyrównanie ich do łańcuchów kinematycznych robotów.

Podsumowanie pracy zostało opisane w rozdziale 9. W podsumowaniu przedstawiono również kierunki dalszych badań.

W ogólnej ocenie merytorycznej praca podejmuje nowe podejście do analizowania układów odzyskiwania energii analogicznie jak dla łańcuchów kinematycznych robotów przy wykorzystaniu notacji Denavit-Hartenberga oraz przekształcenia jednorodnego. Doktorantka podjęła tematykę pracy w sposób rzeczowy poprzez szeroki przegląd literatury, analizę problemu, postawienie tezy, opracowanie modeli, przeprowadzenie badań symulacyjnych i ich weryfikację z badaniami laboratoryjnymi. Jak słusznie zauważono analiza sił w procesie wyznaczania ruchu dla układu odzyskiwania energii jest bardzo istotna i może mieć znaczący wpływ na amplitudę ruchu tego elementu jak też na częstotliwość rezonansową układu. Prezentowane analiza i przedstawione wyniki potwierdzają założenia, że możliwe jest wykorzystanie do opisu ruchu elementów układów odzyskiwania energii z wykorzystaniem modeli matematycznych, bazujących na przekształceniu

jednorodnym a prezentowane układy odzyskiwania energii mogą być modelowane przez zastosowaniu odpowiedniego wyboru kombinacji i kolejności przegubów łańcucha kinematycznego.

### Ocena merytoryczna rozprawy

Za mocne strony pracy można uznać:

- Gruntowne przedstawienie tematyki badawczej.
- Przeprowadzenie wnikliwej analizy modeli wybranych układów odzyskiwania energii przedstawionych w literaturze.
- Skrupulatna analiza ruchu i sił w prezentowanych układach oraz precyzyjne przedstawienie nowej metody formułowania opisu ruchu układów odzyskiwania energii.
- Odpowiednie dobranie przykładowych układów odzyskiwania energii, które dobrze obrazują przedstawioną metodologię.
- Przeprowadzanie starannych badań doświadczalnych i symulacyjnych weryfikujących poprawność modeli matematycznych z poprawnym zastosowaniem metod badawczych.
- Przeprowadzenie dogłębnej i przejrzystej analizy wyników wraz z rzetelną interpretacją rozbieżności między modelem a obiektem rzeczywistym.
- Potwierdzenie tezy przedstawionej na początku pracy, że możliwe jest opisanie ruchu układów odzyskiwania energii z wykorzystaniem przekształceń jednorodnych.

Za słabe strony pracy można uznać:

- Scharakteryzowanie wszystkich rodzajów energii podczas gdy praca skupia się tylko na modelach układów odzyskiwania energii z energii kinetycznej.
- Istniejące modele boi odzyskującej energię z ruchu fal podane zostały w rozdziale o badaniach doświadczalnych, podczas gdy pozostałe modele podane zostały w rozdziale 2 dotyczącym charakterystyki źródeł energii i analizy ruchu układów odzyskiwania energii.
- Badania symulacyjne w celu weryfikacji z badaniami doświadczalnymi należało powtórzyć z wykorzystaniem parametrów wykorzystanych w badaniach doświadczalnych. Należałoby najpierw przedstawić badania doświadczalne, a następnie w badaniach symulacyjnych od razu uwzględnić odpowiednie parametry.
- W pracy mało uwagi poświęcono odzyskanej energii. W modelowaniu skupiono się głównie na opisie ruchu elementów układów odzyskiwania energii.
- Brakuje zwięzłego podsumowania metody formułowania równań ruchu np. graficznego przedstawienia.

### Za najbardziej istotne osiągnięcia Doktoranta uważam:

Potwierdzenie tezy przyjętej w pracy a mianowicie, że możliwe jest opisanie ruchu elementu układów odzyskiwania energii z wykorzystaniem modeli matematycznych, bazujących na przekształceniu jednorodnym, po przedstawieniu układu odzyskiwania energii jako łańcucha kinematycznego robota i odwzorowania jego możliwych ruchów. Ponadto merytoryczną i rzeczową analizę rozpatrywanych przypadków zarówno w badaniach symulacyjnych jak i badaniach laboratoryjnych.

### **Lista potencjalnych uwag krytycznych**

1. W jaki sposób obciążenie prądowe cewki harwestera wpływa na jego charakterystykę ?
2. Czy i w jaki sposób obciążenie elektryczne cewki harwestera wpływa na dynamikę badanych układów? Czy można obciążać harwester małą impedancją (praca na zwarcie) ?
3. Przy wyprowadzaniu wzorów na dynamikę układów była stosowana notacja Denavita-Hartenberga oraz przekształcenia jednorodne. Jaką rolę w obliczeniach i badaniach układów spełnia metoda Lagrange'a ?
4. Dokładność pomiarów w badaniach doświadczalnych związanych z odzyskiem energii jest kluczowa. Kalibracja czujników i narzędzi pomiarowych jest niezbędna, aby zapewnić dokładność i wiarygodność wyników. Proszę określić złożoność pomiaru, wielkość błędów pomiarowych, jakie znaczenie na wynik miały zakłócenia zewnętrzne?
5. Dane zbierane podczas badań doświadczalnych ruchu w układach odzyskiwania energii mogą być złożone i wymagać zaawansowanych technik analizy. Czy były trudności w Interpretacji wyników, identyfikacji wzorców czy wyodrębnieniu istotnych informacji?
6. Sprężyny magnetyczne są często nieliniowe w swoim działaniu, co oznacza, że ich siła i charakterystyka zależą od położenia i prędkości. Modelowanie tych nieliniowości może być trudne i wymagać zaawansowanych technik, takich jak rozwinięcie w szereg Taylora, metody numeryczne czy uczenie maszynowe, aby osiągnąć dokładne odwzorowanie rzeczywistego zachowania sprężyny magnetycznej. Jak duży wpływ na wyniki miało założenie liniowości sprężyny magnetycznej?
7. Obliczenia drgań, wyznaczanie sił magnetycznych, przemieszczeń, określenie współczynnika sztywności obiektów można było wykonać za pomocą programów opartych o metody elementów skończonych. Czy wykonywała Pani próbne obliczenia, symulacje w Ansysie?
8. Pomiar strat energii, takich jak straty mechaniczne, elektryczne czy termiczne, również może być trudny i wymaga odpowiednich narzędzi i technik pomiarowych. Czy mogła by Pani określić ich poziom w zależności od rozważanego obiektu.

Należy podkreślić, że Doktorantka w rozprawie doktorskiej wykazała, że posiadała wiedzę i umiejętności samodzielnej pracy naukowej wymagane na tym stopniu rozwoju naukowca. Poprzez zaproponowanie i opracowanie nowych metod oraz ich dogłębne przetestowanie Autorka wniosła istotny wkład w rozwój dyscypliny naukowej, co jest podstawą do wystąpienia o stopień doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Automatyka, elektronika i elektrotechnika i technologie kosmiczne. W mojej ocenie przedmiot rozprawy doktorskiej jest oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego i zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej, co wyczerpuje wymagania stawiane przez właściwą Ustawę. Uważam, że cele założone w pracy zostały spełnione a teza potwierdzona.

Sformułowane w recenzji uwagi mają w większości charakter dyskusyjny i nie umniejszają w żaden sposób wysokiej wartości recenzowanej rozprawy.

#### Wniosek końcowy

Stwierdzam, że przedłożona do zaopiniowania rozprawa doktorska Pani mgr inż. Joanny Bijak spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określonym w artykule 187 ust. 1 i ust. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz.U. z 2018 poz. 1668 z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

