

Kielce 25-05-2023 r.

dr hab. inż. Sebastian Różowicz, prof. uczelni  
Politechnika Świętokrzyska  
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki  
Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

POLITECHNIKA ŚLĄSKA  
Biuro Rady Dyscypliny  
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika  
i Technologie Kosmiczne  
wpłynęło dnia 01.06.2023  
nr 28 zał. ....

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Joanny Bijak

pt. *Przekształcenie jednorodne w analizie i modelowaniu układów odzyskiwania energii*

### Podstawa opracowania recenzji

Podstawą wykonania recenzji jest pismo Przewodniczącej Rady Dyscypliny Automatyki, Elektroniki, Elektrotechniki i Technologii Kosmicznych Politechniki Śląskiej, dr hab. inż. Moniki Kwoki, prof. PŚ, z dnia 27 marca 2023 r., numer sprawy: RDAEETK/18/2023 o powołaniu mojej osoby na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr inż. Joanny Bijak zatytułowanej *Przekształcenie jednorodne w analizie i modelowaniu układów odzyskiwania energii* (zgodnie z Uchwałą Nr 3/2023 Rady Dyscypliny Automatyki, Elektroniki, Elektrotechniki i Technologii Kosmicznych Politechniki Śląskiej z dnia 28 lutego 2023 r.).

### Przedmiot recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Joanny Bijak pt.: *Przekształcenie jednorodne w analizie i modelowaniu układów odzyskiwania energii*. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Tomasz Trawiński, prof. PŚ, a promotorem pomocniczym jest dr inż. Marcin Szczygieł z Politechniki Śląskiej. Recenzja została wykonana na zlecenie Przewodniczącej Rady Dyscypliny Automatyki, Elektroniki, Elektrotechniki i Technologii Kosmicznych Politechniki Śląskiej.

Rozprawa zawiera 199 stron (157 stron rozprawy i 42 strony zawierające 11 załączników) z podziałem na dziewięć rozdziałów, dziesiąty rozdział pracy stanowi bibliografia obejmująca 142 pozycje literatury krajowej i zagranicznej.

### Treść i zakres rozprawy doktorskiej

Licząca 157 stron praca została napisana poprawnie. Doktorantka rozprawę podzieliła na 10 logicznie następujących po sobie rozdziałów, poprzedzonych zestawieniem stosowanych oznaczeń. Rozdział pierwszy (wstęp –nie powinien być numerowany) przedstawia skromną analizę stanu wiedzy, która jest rozszerzona w rozdziale drugim, natomiast kolejne rozdziały (od 3. – 9.) pracy

zawierają badania własne. Taki układ pracy jest poprawny i pozwala na jednoznaczną ocenę własnych osiągnięć Autorki.

Rozprawa doktorska mgr inż. Joanny Bijak poświęcona jest analizie i modelowaniu układów odzyskiwania energii z takich elementów jak: boja odzyskująca energię z ruchu falowego wody, układ koła samochodowego z elementem odzyskującym energię z nierówności drogi oraz sprężyny magnetycznej, odzyskującej energię z drgań, które zostały przedstawione w postaci łańcuchów kinematycznych. Możliwe ruchy układów zaprezentowane zostały za pomocą przegubów pryzmatycznych i obrotowych. Doktorantka przeanalizowała siły zewnętrzne oraz siły wynikające z energii potencjalnej działające na określone układy. Opisane zagadnienia dotyczące układów odzyskiwania energii umożliwiają konwersję energii pochodzącej ze źródeł zewnętrznych na energię elektryczną, jednak ilość energii generowanej w takich układach jest bardzo niewielka. W związku z tym, układy takie powinny być optymalizowane, z wykorzystaniem symulacji komputerowych.

W dostępnej literaturze nie spotyka się pełnego opisu matematycznego zachowania (wielopłaszczyznowego ruchu) elementów, w których generator układu odzyskiwania energii pełni rolę końcówki roboczej manipulatora. Brak wyników badań w takim zakresie uniemożliwia prawidłowe określenie wartości uzyskanej energii. Zaproponowany przez Doktorantkę sposób modelowania zapewnia opis matematyczny układów odzyskiwania energii. Różnice między siłami rzeczywistymi, a uzyskanymi mogą wynikać zarówno z uproszczenia sił działających w osi  $x$  i  $y$ , a także  $z$ . Rozbieżności te są bardzo istotne przy optymalizacji układów odzyskiwania energii pod kątem wyznaczenia częstotliwości rezonansowych.

Tematyka badań podjętych w rozprawie doktorskiej mgr inż. Joanny Bijak jest w pełni uzasadniona, gdyż modelowanie układów odzyskiwania energii z źródeł odnawialnych staje się coraz bardziej popularne, a wykorzystanie notacji Denavita-Hartenberga i przekształceń jednorodnych pozwala na optymalizację parametrów analizowanych układów.

Określenie zakresu i tematyki poruszanego zagadnienia przez Doktorantkę, jest wynikiem analizy aktualnego stanu wiedzy przeprowadzonej w oparciu o obszerną literaturę, obejmującą 142 pozycje (w tym 4, to współautorskie publikacje Autorki). Dokonany przegląd literaturowy oraz przeprowadzona analiza stanu zagadnienia pozwoliły na określenie celów, tezy i zakresu pracy.

Doktorantka sformułowała w pracy dwie tezy:

- 1. 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.*

2. *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.*

W świetle przytoczonych badań literaturowych, zaprezentowanych przez Autorkę w rozdziałach wstępnych, postawione tezy rozprawy nie są oczywiste i wymagają udowodnienia.

Cel główny dysertacji nie został formalnie określony w rozprawie, dlatego Doktorantka sformułowała siedem celów szczegółowych. Wskazuje to na równorzędność analizowanych zagadnień.

1. *Identyfikacja i analiza łańcuchów kinematycznych wybranych układów odzyskiwania energii.*
2. *Wybór łańcuchów układów odzyskiwania energii o minimalnej liczbie stopni swobody.*
3. *Sformułowanie procedury opisu łańcuchów kinematycznych układów odzyskiwania energii.*
4. *Analiza sił zewnętrznych działających na wybrane elementy łańcuchów kinematycznych układów odzyskiwania energii.*
5. *Sformułowanie równań dynamiki dla układów odzyskiwania energii opisanych łańcuchami o minimalnej liczbie stopni swobody.*
6. *Implementacja modeli matematycznych analizowanych układów odzyskiwania energii.*
7. *Przeprowadzenie weryfikujących badań pomiarowych.*

Autorka określiła również założenia do pracy:

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

Po zaledwie wstępnej analizie stanu wiedzy literaturowej, w rozdziale pierwszym (we wstępie) zostały sformułowane cele i tezy pracy. Mgr inż. Joanna Bijak w poprawny sposób scharakteryzowała możliwości odzyskiwania energii kinetycznej (rozdział 2), przedstawiła różne układy odzyskiwania energii jako manipulatory robotów (rys.2.4). Spośród różnych przykładów zaprezentowanych w rozdziale 2.1, który przedstawia ogólny podział układów odzyskiwania energii.

Doktorantka szczegółowo opisała i przeprowadziła badania i analizy dla trzech różnych układów: kołyszącej się boi wykorzystującej fale morskie i pływy, odkształcanie i drgania opony na drodze oraz pracę sprężyny magnetycznej, działającej jako bezwładnościowy przetwornik elektromagnetyczny.

W rozdziale 2. pracy Doktorantka przedstawiła przykładowe układy odzyskiwania energii, oraz analizę ich ruchu. Ruch liniowy w pionie i poziomie przedstawiony został jako przeguby pryzmatyczne, a obrót, przechylenie się i kołysanie jako przeguby obrotowe. W celu ustalenia kolejności występowania przegubów w łańcuchu kinematycznym konieczne było przeanalizowanie ruchu elementów układu odzyskiwania energii pod kątem ich wzajemnego oddziaływania.

O ile lektura dwóch pierwszych rozdziałów prezentuje wiedzę ogólnodostępną, tak kolejny rozdział poszerza zasób informacji o formułowaniu równań ruchu w układach z odzyskiwaniem energii.

W rozdziale 3. przedstawiane zostały procedury opisu łańcuchów kinematycznych, kinematyki prostej, kinematyki środków ciężkości i kinematyki prędkości środków ciężkości stosowanej w robotyce. Opisane siły pochodzą ze środowiska, w jakim znajduje się badany obiekt. Siły zewnętrzne wyrażone w bazowym układzie współrzędnych zostały przekształcone w taki sposób, aby uwzględnione było ich działanie na dany przegub. Siły sprężystości i siły tłumienia elementów sprężystych, działają tylko w danym przegubie. Ogólne równania dynamiki dla łańcucha kinematycznego układu przedstawiono po obliczeniu macierzy bezwładności oraz macierzy Christoffela. Należy uznać, że informacje zawarte w tym rozdziale porządkują i systematyzują wiedzę czytelnika, uzasadnia to podjęcie pracy badawczej w tym kierunku.

Brak badań w takim zakresie uniemożliwia prawidłowe określenie wartości uzyskiwanej energii. Skłoniło to Autorkę do podjęcia badań w tym zakresie.

W rozdziale 4. Doktorantka zaprezentowała charakterystykę łańcuchów kinematycznych układów odzyskiwania energii o najmniejszej liczbie swobody. Jak wykazała przeprowadzona analiza każdemu przegubowi przedstawiającemu ruch wykonywany przez układ odzyskiwania energii przypisała układ współrzędnych i określiła parametry kinematyczne łańcucha, takie jak: długości członów, odsunięcia przegubów, kąty skręcenia członów i kąty przegubów – odpowiadające parametrom elementów układu odzyskiwania energii. Dzięki takiemu podejściu, określone zostały pozycje i orientacje poszczególnych układów współrzędnych w postaci macierzy przekształceń jednorodnych. Przeprowadzona analiza sił działających w wybranych układach odzyskiwania energii, potwierdziła, że są to siły oddziaływania grawitacyjnego, siły unoszenia i wyporu, sztywności, tłumienia oraz siły zewnętrzne wprawiające układy w ruch. Dla każdego z wybranych układów odzyskiwania energii wyprowadzone zostały równania ruchu.

Implementacja równań różniczkowych, w programie Matlab Simulink w postaci kanonicznej odzwierciedlających ruch w układzie odzyskiwania energii reprezentowanym przez łańcuch kinematyczny o  $n$  stopniach swobody została przedstawiona w rozdziale 5. Wyprowadzenie równań dynamiki i przedstawienie ich w postaci kanonicznej umożliwiły opracowanie modeli matematycznych ruchu układów odzyskiwania energii.

Znaczącym dla wartości naukowej rozprawy jest rozdział 6. poświęcony badaniom symulacyjnym ruchu każdego z układów odzyskiwania energii przeprowadzonych na sformułowanych modelach matematycznych, dla różnych parametrów charakteryzujących te układy, takich jak: masy, wymiary geometryczne, czy siły zewnętrzne wprawiające układ w ruch. Badania te potwierdziły poprawności przyjętej metody modelowania.

W rozdziale 7. pracy przedstawione zostały badania doświadczalne ruchu układów odzyskiwania energii. Podrozdział 7.1 opisuje badania doświadczalne ruchu boi, niestety, badania te nie zostały przeprowadzone przez Doktorantkę, a wykorzystanie zostały dane dostępne na stronie Uniwersytetu w Edynburgu, gdzie w zbiorniku wodnym badana, w zakresie odzyskiwania energii, była boja o kształcie sfery. Badania doświadczalne ruchu koła (opony) przeprowadzone zostały na zbudowanym stanowisku badawczym. Badania doświadczalne ruchu sprężyny magnetycznej zostały przeprowadzone z wykorzystaniem wstrząsarki elektromagnetycznej oraz laserowych czujników odległości również na autorskim stanowisku.

W rozdziale 8. Autorka zaprezentowała uzyskane wyniki przeprowadzonej weryfikacji modeli matematycznych. Wyniki badań symulacyjnych i badań doświadczalnych potwierdziły, że możliwe jest opisanie ruchu elementu układów odzyskiwania energii za pomocą modeli matematycznych, bazujących na przekształceniu jednorodnym.

W rozdziale 9. (podsumowanie) Doktorantka przedstawiła podsumowanie wyników uzyskanych w poszczególnych rozdziałach. Opisana metoda analizy wybranych układów pozwoliła na zbudowanie blokowych modeli matematycznych zaimplementowanych w Matlab Simulink celem przeprowadzenia symulacji komputerowych. Szkoda, że Autorka nie zapisała równań matematycznych dla opracowanych modeli układów odzyskiwania energii. Autorka pracy stwierdziła, że analiza sił zewnętrznych jest bardzo istotna w procesie wyznaczania ruchu elementu układu odzyskiwania energii. Rozbieżności uzyskanych wyników badań na obiektach rzeczywistych w stosunku do analiz symulacyjnych mogą być kluczowe przy optymalizacji układów odzyskiwania energii pod kątem wyznaczenia częstotliwości rezonansowych.

Postawione zadanie mgr inż. Joanna Bijak rozwiązała poprawnie. Jako oryginalne osiągnięcia Autorki uważam:

1. Opracowanie modeli matematycznych ruchu układów odzyskiwania energii w programie Simulink/Matlab.
2. Przeprowadzenie procesu badawczego wraz z analizą porównawczą wyników badań symulacyjnych z wynikami na wybranych obiektach rzeczywistych.
3. Wykonanie szerokiej analizy sił zewnętrznych oraz sił wynikających z energii potencjalnej działających na układy.
4. Opisanie ruchu elementu układów odzyskiwania energii z wykorzystaniem modeli matematycznych, bazujących na przekształceniu jednorodnym.

Przyjęte w rozprawie założenia są uzasadnione, a poprawny dobór metod badawczych i pomiarowych oraz wnioski wynikające z wykonanej pracy pozwalają stwierdzić, że postawione Autorce zadanie zostało rozwiązane poprawnie, a cel rozprawy osiągnięty. Godne uwagi jest też to, że Autorka zdaje sobie sprawę, że uzyskane wyniki badań nie wyczerpują zrealizowanej tematyki i widzi kierunki dalszych badań.

#### **Uwagi ogólne**

1. Zdecydowana większość rozprawy napisana jest w formie bezosobowej, co utrudnia w wielu miejscach rozdzielenie rezultatów badań Autorkę od wyników zawartych w literaturze.
2. Rysunki pracy są mało czytelne, a wielkość czcionki w opisie powinna być dostosowana do czcionki tekstu podstawowego – utrudnia to analizę wyników.

#### **Uwagi krytyczne**

1. Proszę o wyjaśnienie i uzasadnienie zasadności wyboru obiektów badań, liczności próby i sposobu jej doboru.
2. Jak w ocenie Doktoranta dobór próby mógłby wpłynąć na wyniki zamieszczone w rozprawie?
3. Czy wykonana została przed pomiarem kalibracja narzędzi i czujników pomiarowych? Jeśli była wykonana to według jakiego wzorca?
4. Badania symulacyjne wykonane zostały dla boi o promieniu podstawy wynoszącym 2,5 m i wysokości 2 m, natomiast badania doświadczalne zaczerpnięte z źródeł zewnętrznych pokazują wyniki dla boi o kształcie sfery o promieniu 12cm – czy można porównywać w takim przypadku wyniki?

5. Czy zbudowane stanowisko badawcze do pomiarów odkształcenia opony posiada 3 płaszczyzny jak to opisane zostało w analizie i założeniach?
6. Czy stanowisko badawcze do pomiarów odkształcenia opony zostało zbudowane przez Doktorantkę czy zostało wypożyczone/udostępnione jak można przeczytać w podziękowaniach? Modyfikacja opisana w podrozdziale 7.2 nie wносиła żadnych istotnych zmian w gotowe stanowisko.
7. Dlaczego wybrano w badaniach prędkości koła 10, 30 i 50 km/h?
8. Sprężyny magnetyczne są elementami nieliniowymi a ich modelowanie jest bardzo trudne. W obliczeniach modelowych założona została liniowość tych elementów. Jaki wpływ na wynik mam takie uproszczenie?
9. Jaką przyjęto średnią liczbę próbek dla danego badania i czy brany został pod uwagę błąd pomiarowy? Nie został on w pracy określony.
10. Niewyliczony został błąd średniokwadratowy dla wykonanych badań.
11. Zdawkowo Autorka opisuje wyciągane wnioski z zamieszczonych wyników badań.

Proszę Doktorantkę o pisemne odniesienie się do zgłoszonych powyżej uwag i wątpliwości.

Recenzowana rozprawa ma charakter teoretyczno-praktyczny. Do wykonania jej niezbędna była znajomość zagadnień związanych z elektrotechniką, fizyką i zagadnieniami mechaniki.

Rozprawa doktorska jest napisana językiem komunikatywnym. Strona edycyjna pracy reprezentuje średni poziom i świadczy o słabej znajomości techniki składu komputerowego. Niestety wzory zapisane w pracy nie są ujednolicone i wyglądają mało estetycznie (przykład sąsiadujące wzory 4.35 i 4.36). Drobnymi mankamentami są nieliczne błędy edytorskie, które nie wpływają na odbiór treści merytorycznej przez odbiorców.

Korzystne dla czytelnika byłoby zamieszczenie w rozprawie takich elementów jak: streszczenia w języku polskim i angielskim, spis rysunków, spis tabel, tytuł w języku angielskim, słowa kluczowe zarówno w języku polskim, jak i w angielskim.

**Zawarte w recenzji uwagi i zastrzeżenia nie wpływają w sposób znaczący na wartość merytoryczną rozprawy. Praca nie wymaga w związku z tym zmian ani uzupełnień.**

## Wniosek końcowy

Oceniana rozprawa doktorska dotyczy ciekawego i aktualnego zagadnienia badawczego, stanowiąc rozwiązanie problemu naukowego o znaczeniu praktycznym, z udokumentowanym aspektem nowości.

Uważam, że Doktorantka wykazała się samodzielnością oraz umiejętnością zaplanowania eksperymentu i rozwiązania postawionego problemu badawczego. Przedłożoną do recenzji rozprawę doktorską oceniam pozytywnie. Dotyczy to zarówno jej strony naukowej, jak i formalnej. Obie nie wzbudzają wątpliwości. Na szczególną uwagę zasługuje duży wkład pracy Autorki podczas wykonania wielu pracochłonnych i czasochłonnych badań laboratoryjnych i analiz w zakresie rejestracji przemieszczenia przegubu obrotowego i pryzmatycznego, oraz trajektorii ruchu środka ciężkości dla grupy określonych obiektów. Praca doktorska stanowi rozwiązanie problemu naukowego, dotyczącego dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Doktorantka wykazała się znajomością wiedzy teoretycznej w zakresie dyscypliny naukowej. Mimo pewnych usterek zapisanych w uwagach krytycznych, przedstawiona do oceny rozprawa stanowi samodzielne rozwiązanie postawionych zadań przy użyciu właściwych do tego celu metod.

Stwierdzam, że przedłożona do zaopiniowania rozprawa doktorska Pani mgr inż. Joanny Bijak pt. *Przekształcenie jednorodne w analizie i modelowaniu układów odzyskiwania energii* 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.

*Sebastian Różowicz*

.....  
dr hab. inż. Sebastian Różowicz, prof. uczelni