

Poznań, dn. 26.05.2023 r.

dr hab. inż. Leszek Kasprzyk, prof. PP
Politechnika Poznańska
Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki
Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej
ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań
tel. 61 665 23 88 (-89)

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Biuro Rady Dyscypliny
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne
wpłynęło dnia 07 06 2023
nr 28 zał.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Autor rozprawy: mgr inż. Joanna Bijak

Tytuł rozprawy: Przekształcenie jednorodne w analizie i modelowaniu układów odzyskiwania energii

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Tomasz Trawiński, prof. PŚ

Promotor pomocniczy: dr inż. Marcin Szczygieł

Dziedzina: nauki inżyniersko-techniczne

Dyscyplina: automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne

Podstawa prawna opracowania: ocenę rozprawy doktorskiej przygotowano na zlecenie dr. hab. inż. Moniki Kwoki, prof. PŚ, Przewodniczącej Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Śląskiej z dnia 27 marca 2023 r., zgodnie z uchwałą Rady Dyscypliny z dnia 28 lutego 2023 r.

Ocena tematyki rozprawy

Tematyka recenzowanej pracy doktorskiej dotyczy modelowania układów służących do odzyskiwania energii elektrycznej z szeroko rozumianego otoczenia – ze źródeł znanych, ale często pomijanych. Uważam, że zagadnienie to jest ważne i aktualne, ponieważ mimo wielu lat badań nad różnymi rodzajami systemów do wytwarzania energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych oraz metodami ich modelowania, odkrywania nowych zjawisk i rozwiązań, na świecie wciąż brakuje efektywnych i akceptowalnych cenowo systemów tego typu. W tym obszarze ważnym tematem jest poszukiwanie rozwiązań technicznych umożliwiających eliminację zewnętrznych źródeł zasilania, ograniczając w ten sposób potrzebę ich późniejszej obsługi. Dotyczy to w szczególności urządzeń o niewielkim zapotrzebowaniu energetycznym, np.

bezprzewodowych czujników, których liczba w dobie nanotechnologii oraz Internetu Rzeczy przyrasta w niespotykanym dotychczas tempie. Doktorantka postawiła sobie za cel ujednolicenie opisu modelu matematycznego układów odzyskiwania energii poprzez przedstawienie ich w formie łańcuchów kinematycznych manipulatorów i zastosowanie przekształcenia jednorodnego. Takie podejście może przyczynić się do rozwoju prac nad optymalizacją układów służących do wytwarzania energii, a w konsekwencji do poprawy ich wydajności.

Potwierdzeniem ważności i aktualności omawianego problemu jest również fakt, że na świecie istnieje wiele prac naukowych dotyczących nowatorskich i niekonwencjonalnych metod pozyskiwania energii elektrycznej. W bazie Web of Science z okresu zaledwie 3 ubiegłych lat w grupie "engineering, electrical, electronics" znaleźć można ponad 4 tysiące artykułów naukowych zawierających zwrot "energy harvesting", z czego znaczna większość dotyczy ich modelowania.

W związku z powyższym stwierdzam, że tematykę rozprawy podjętej przez mgr inż. Joannę Bijak **można zaliczyć do dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne**. Ponadto uważam, że jest ona istotna z punktu widzenia rozwoju nauki oraz **wymagała przeprowadzenia badań o charakterze naukowym odpowiednim dla poziomu stawianego pracom doktorskim**.

Ocena układu rozprawy oraz jej celu i tezy

Praca doktorska złożona została w formie 199 stronicowej rozprawy. Zasadnicza jej część składa się ze 157 stron i jest podzielona na 10 rozdziałów. Oprócz spisu treści oraz wykazu oznaczeń, definicji i skrótów, składa się z wstępu (rozdział 1), rozdziałów zawierających opis metod i układów pozyskiwania energii oraz metod ich modelowania (rozdziały 3 i 4), opisu przeprowadzonych symulacji i badań doświadczalnych oraz ich analizy (rozdziały 5 – 8), a także podsumowania (rozdział 9) i bibliografii (rozdział 10). Ponadto do pracy dołączono jedenaście załączników zawierających m.in. szczegółowe parametry analizowanych obiektów oraz wyniki dodatkowych badań. Układ pracy jest poprawny, poszczególne rozdziały są jasno wyróżnione, a rysunki, tabele oraz zależności matematyczne poprawnie opisane i ponumerowane. Wykaz cytowanej literatury obejmuje 142 pozycje, w tym 4 autorstwa Doktorantki. Uważam, że liczba i jakość cytowanych materiałów świadczą o tym, że Doktorantka ma dobre rozeznanie w prezentowanym obszarze, a przedstawiona literatura i jej obszerność jest wystarczająca.

W pierwszym rozdziale, po krótkim wprowadzeniu zawierającym motywację podjęcia badań, Doktorantka przedstawiła zbiór celów pracy oraz tezę. Celem rozprawy było:

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.*

Natomiast teza została sformułowana następująco:

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 ujednolicenie 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.

Uważam, że teza jest zbyt długa. Jej drugi akapit jest częściowym powtórzeniem pierwszego, a częściowo mógłby stanowić cele lub zadania szczegółowe pracy. Wskazane uwagi nie mają istotnego znaczenia merytorycznego, dlatego stwierdzam, że **układ pracy jest poprawny, a cel i teza pracy prezentują poziom odpowiedni dla rozpraw doktorskich.**

Analiza zawartości rozprawy

Na początku rozprawy znaleźć można szczegółowy wykaz wykorzystanych oznaczeń symboli (str. 5 – 8) oraz definicji i skrótów (str. 9 – 11). Następnie (w rozdz. 1) Doktorantka przedstawiła krótki przegląd stanu wiedzy na temat systemów służących do pozyskiwania energii z otoczenia (nazywanych w rozprawie harwesterami) oraz metod ich modelowania, a także tezę pracy, jej cel i ogólne założenia wraz z graficznym planem pracy (schematem blokowym przedstawiającym etapy pracy).

W rozdziale drugim Doktorantka dokonała podziału postaci energii możliwej do pozyskania. Przedstawiła szczegółowy przegląd literatury na temat metod i układów do przetwarzania różnych form energii na energię elektryczną. Opisała swoją koncepcję prezentacji układów do pozyskiwania energii jako manipulatory robotów. Następnie przedstawiła modele tych układów jako łańcuchy kinematyczne, skupiając się na obiektach służących do odzyskiwania energii, zaprezentowanych w pracy, tj.: boi wodnej, koła samochodowego, sprężyny magnetycznej. Łańcuchy kinematyczne powyższych obiektów przedstawione były w różnych konfiguracjach i różnych rozwiązaniach, związanych z poziomem szczegółowości uwzględnianych ruchów (liczbą stopni swobody).

W rozdziale trzecim Doktorantka zaprezentowała metodologię formułowania równań ruchu elementów układów odzyskiwania energii, przedstawiając w postaci zależności matematycznych pozycje, orientacje i prędkość elementów przetwarzających energię – przedstawiła modele wybranych układów jako łańcuchy kinematyczne, których ruchy opisała z wykorzystaniem macierzy przekształcenia jednorodnego, wykorzystując znaną w robotyce notację Denavita-Hartenberga. Opisała także siły zewnętrzne jakie mogą oddziaływać na takie obiekty oraz zasady formułowania parametrów macierzy bezwładności i Christofela.

W kolejnym rozdziale Doktorantka opisała łańcuchy kinematyczne, siły zewnętrzne i dynamikę ruchu rozpatrywanych w pracy układów odzyskiwania energii, tj.:

- a) boi morskiej o jednym, dwóch oraz trzech stopniach swobody,
- b) koła o trzech stopniach swobody z elementem odzyskującym energię,
- c) sprężyny magnetycznej o jednym stopniu swobody.

Wszystkie wymienione modele zaimplementowała w autorskiej aplikacji przygotowanej w środowisku Matlab Simulink, co opisała w rozdziale 5. Następnie, wykorzystując opracowane modele, przeprowadziła 3 serie badań symulacyjnych analizując:

1. ruch boi o jednym, dwóch oraz trzech stopniach swobody (m.in. w zależności od: wysokości fali, okresu fali, promienia podstawy boi, masy boi, współczynnika sztywności sprężyny akumulującej energię, współczynnika tłumienia sprężyny akumulującej energię),
2. ruch koła i harwestera energii (w zależności od: nierówności drogi, prędkości pojazdu, typu drogi, współczynnika sztywności opony, współczynnika tłumienia opony, momentu napędowego koła),
3. ruch magnesu lewitującego w sprężynie magnetycznej umieszczonej na wstrząsarce (m.in. w zależności od: amplitudy sinusoidalnego prądu płynącego przez cewkę wstrząsarki, geometrii magnesów zewnętrznych sprężyny magnetycznej).

Szczegółowe parametry modelowanych obiektów Doktorantka przedstawiła w tabelach (częściowo w załącznikach), a uzyskane podczas symulacji wyniki, dla każdego z badanych układów, zaprezentowała w postaci przebiegów przedstawiających położenie przegubów modelowanych łańcuchów kinematycznych w czasie.

W rozdziale 7 Doktorantka przedstawiła badania doświadczalne. Jako pierwsze (rozd. 7.1) zaprezentowała wyniki pomiarów ruchu boi, przeprowadzonych na Uniwersytecie w Edynburgu, które – jak skomentowała – służyły do porównania z wynikami przeprowadzonych przez nią symulacji. Przedstawione wyniki pomiarów dotyczyły ruchu boi w trzech osiach i obrotach wokół tych osi oraz sił na nią działających, wynikających z regularnych fal oraz prądów morskich.

W drugiej części rozdz. 7 opisała badania laboratoryjne ruchu koła samochodowego poruszającego się na nierównej nawierzchni. Ruch koła analizowała rejestrując ruch znajdującego się na niej markera z wykorzystaniem szybkiej kamery firmy Krontech Chronos. Koło napędzane było silnikiem elektrycznym poprzez wałek z zamocowanymi progami akrylowymi, odzwierciedlającymi nierówności drogi. Badania przeprowadzono zasilając silnik ze stałą częstotliwością 10 Hz oraz 15 Hz. Do analizy trajektorii ruchu markera umieszczonego na obrzeżu koła wykorzystano Matlab Computer Vision Toolbox.

W rozdziale 7.3 Doktorantka przeprowadziła badania ruchu zbudowanej przez siebie sprężyny magnetycznej, składającej się z dwóch unieruchomionych magnesów zewnętrznych oraz jednego ruchomego magnesu wewnętrznego. Wykorzystała do tego trzy jednakowe cylindryczne magnesy neodymowe. Badania wykonała na zbudowanym przez siebie stanowisku pomiarowym, służącym do pomiaru siły oddziaływania między dwoma magnesami, składającym się z miernika siły Lutron FG-5000A i stolika mikrometrycznego o regulowanym położeniu, na którym umieszczono magnes zewnętrzny. Zależność wyznaczonych sił oddziaływania między magnesami przedstawiła na wykresie w funkcji odległości między nimi oraz aproksymowała funkcją wielomianową. W kolejnej części pracy badała ruch magnesów znajdujących się na elektromagnetycznym

generatorze drgań (tzw. wstrząsarce). Drgania magnesów rejestrowała z wykorzystaniem laserowych czujników przemieszczenia LK-G32 firmy KEYENCE oraz oprogramowania LK-Navigator 2. Wyniki pomiaru przemieszczenia dla kilku różnych wymuszeń (w postaci założonego natężenia prądu o częstotliwości od 0 Hz do 140 Hz) przedstawiła w formie charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych. Dokonała także próby oszacowania częstotliwości rezonansowych układu, które mogą być istotne przy projektowaniu urządzeń do wytwarzania energii.

Następnie Doktorantka przedstawiła analizę porównawczą wyników badań symulacyjnych i doświadczalnych. W rozdz. 8.1 wykazała ogólne podobieństwo ruchu boi, wyznaczonego na podstawie pomiarów oraz symulacji. Jednoznaczna ocena tych badań (zarówno dla Doktorantki jak i Recenzenta) jest trudna do zweryfikowania, ponieważ dotyczyły one boi o różnych kształtach, sposobie mocowania oraz masie. Także kształt fali wprawiającej w ruch boje był różny. Nasuwa się pytanie, dlaczego Doktorantka nie próbowała przeprowadzić symulacji dla podobnych boi, dla której znalazła pomiary? Co więcej, Doktorantka nie zastosowała żadnego mierzalnego wskaźnika, za pomocą którego możliwe byłoby określenie zbieżności wyników uzyskanych podczas modelowania i pomiarów. W pracy znaleźć można jedynie ogólne stwierdzenie, że wyniki „różnią się w nieznaczny sposób”.

W rozdziale 8.2 porównała badania symulacyjne i doświadczalne ruchu harwestera zamontowanego w kole samochodowym. Doktorantka wykazała duże podobieństwo położenia przegubów harwestera o 3-DoF, wyznaczonego na podstawie obliczeń, do rzeczywistej pozycji opony, której ruch zarejestrowała przy różnych prędkościach obrotowych. Podobnie jednak jak w poprzednim podrozdziale Doktorantka nie wyraziła w mierzalny sposób zbieżności obu tych przebiegów, a jedynie przedstawiła na jednym rysunku wybrane przebiegi prezentujące położenie opony wyznaczone na podstawie pomiarów oraz położenie harwestera wyznaczone na podstawie obliczeń.

W kolejnym rozdziale porównała wyniki obliczeń sił sprężystości (wykonanych w programie ANSYS) i badań eksperymentalnych ruchu sprężyny magnetycznej (z nowymi i używanymi magnesami trwałymi). Mimo podobnego kształtu wyznaczonych zależności sił w funkcji odległości między magnesami, wartości maksymalne i minimalne sił istotnie się od siebie różnią. W tej części rozprawy Doktorantka uzasadnia możliwe przyczyny niezgodności, co jest dość trudne w ocenie ze względu na brak informacji na temat niektórych parametrów modelu, np. właściwości wykorzystanych magnesów (nowych i używanych). Następnie porównała charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe przemieszczenia stołu wstrząsarki, wyznaczonego podczas symulacji, w których wymuszeniem była:

- a) siła obliczona w programie ANSYS,
- b) siła zmierzona, gdy wstrząsarkę zasilano prądem o natężeniu: 0,35, 0,6 oraz 0,75 A.

Pracę kończy rozdział 9, w którym Doktorantka przedstawiła krótkie podsumowanie oraz wnioski końcowe, komentując zalety i wady opracowanej przez siebie metody modelowania układów odzyskiwania energii poprzez zastosowanie odpowiedniej kombinacji przegubów łańcucha kinematycznego, a następnie przekształcenia jednorodnego.

Uwagi krytyczne

1. Doktorantka, porównując rezultaty badań symulacyjnych i doświadczalnych, nie stosowała mierzalnych wskaźników, które jednoznacznie wyraziłyby zbieżność uzyskanych wyników oraz umożliwiły rzetelną ocenę zaproponowanych modeli. Zamiast tego dokonywała porównywań opisowych (np. pisząc „różnią się nieznacznie”).
2. W pracy zauważyć można, że część badań doświadczalnych nie w pełni odpowiada badaniom przeprowadzonym podczas symulacji (w szczególności część dotycząca boi wodnej). Sprawia to, że porównywanie niektórych wyników jest trudne lub nawet niemożliwe. Czytając pracę, niekiedy ma się wrażenie, że Doktorantka najpierw przeprowadziła badania symulacyjne, a później poszukiwała obiektów, do których mogłaby porównać wyniki. Tymczasem przemyślana procedura badawcza wymaga porównywania obiektów o możliwe podobnych parametrach.
3. W rozprawie zbyt mało uwagi poświęcono problematyce odzyskania energii. W modelowaniu oraz badaniach symulacyjnych i doświadczalnych skupiono się na opisie ruchu elementów układów odzyskiwania energii lub układów z nimi powiązanych, np. koło samochodu.
4. W pracy brakuje podsumowania na temat metodyki formułowania równań ruchu.
5. Doktorantka wielokrotnie odnosi się do gęstości energii wyrażając ją w $[W/cm^2]$. Ta jednostka nie ma związku z energią. Gęstość energii wyraża się w $[J/m^3]$ (dla gęstości wolumetrycznej) lub $[J/kg]$ (dla gęstości grawimetrycznej).
6. Przegląd metod badania ruchu boi wodnych został przedstawiony w rozdz. 7, podczas gdy pozostałe analizy literaturowe, dotyczące innych układów pozyskiwania energii, zostały przedstawione w rozdz. 1 i 2.
7. W podziale energii na rys. 2.1 str. 17 pominięto energię elektryczną (w tym energię pola elektrycznego i magnetycznego).
8. Odwołania do niektórych rysunków występują dopiero po rysunku (np. rys. 2.5, 2.10, 4.3 i wiele w rozdz. 6).
9. Niepotrzebnie w niektórych częściach pracy wybrane wyrazy są tłumaczone na angielski (np. na str. 25).

Ponadto w pracy można znaleźć kilka drobnych błędów językowych, które nie mają istotnego wpływu na ogólną **pozytywną ocenę stylu pracy i zastosowanego piśmiennictwa**.

Pytania pracy

1. W rozdz. 2 rozprawy jest napisane, że energia może być aktywna i pasywna. Co Doktorantka miała na myśli?
2. W pracy skupiono się na wymuszeniach, np. sile wynikającej z fali morskiej lub nawierzchni drogi, opisanych funkcją sinusoidalną. Czy Doktorantka próbowała przeprowadzić analizy, w których wymuszeniem są inne funkcje, np. rzeczywiste kształt fali (zarejestrowany)?
3. Niektóre obiekty były dużych rozmiarów. Czy dla takich obiektów można było przyjąć założenie, że opisywane układy składają się z elementów sztywnych?
4. W pracy nie uwzględniono nieliniowości i sprężystości członów badanych układów? Jaki może mieć to wpływ na uzyskane wyniki?

5. W rozprawie zabrakło informacji na temat ilości energii uzyskanej z boi morskiej oraz koła samochodowego. Czy Doktorantka próbowała wyznaczyć ilość energii możliwej do uzyskania z badanych obiektów?
6. Nad rysunkiem 5.1 jest napisany komentarz, że przedstawiony na rysunku model wynika z zależności (3.20), tymczasem na rysunku brakuje wektora sił (F_{cp}). Analogicznie na kolejnych rysunkach. Z czego wynika ta niezgodność?
7. Dlaczego do badań symulacyjnych wybrano metodę Rungego-Kutty 4 rzędu?
8. W rozdziale 6.3 siłę działającą na magnes lewitujący aproksymowano wielomianem 9 rzędu. W jakim celu dokonano aproksymacji, skoro znana jest funkcja opisująca tę siłę? Dlaczego wybrano właśnie tę funkcję aproksymującą? Dlaczego, prezentując funkcję po aproksymacji (rys. 6.24), nie przedstawiono na tym samym rysunku również funkcji aproksymowanej? Ułatwiłoby to porównanie i ocenę dokładności tej aproksymacji.
9. W rozdziale 7.3 badano ruch elementów sprężyny magnetycznej za pomocą laserowych czujników przemieszczenia firmy KEYENCE, rejestrując pomiary z okresem próbkowania 200 μs (5 kHz), natomiast amplitudę drgań wyznaczano na podstawie analizy FFT. Czy to było konieczne, skoro częstotliwość drgań nie przekraczała 140 Hz?
10. Z tab. 2.1 wynika, że z drgań można odzyskać 300 $\mu W/cm^2$. Jak to należy rozumieć? Czy na pewno ta wartość jest poprawna?
11. Jak należy rozumieć jednostkę koercji [k/m]?

Ocena merytoryczna rozprawy

W przedłożonej do oceny rozprawie doktorskiej mgr inż. Joanna Bijak podjęła się rozwiązania zadania istotnego i złożonego od strony naukowej, związanego z dyscypliną naukową *automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne*. **Założone cele pracy zostały osiągnięte, a postawiona teza udowodniona** na drodze przeprowadzonych badań symulacyjnych i doświadczalnych.

Do najważniejszych osiągnięć przedstawionych w rozprawie należy zaliczyć:

1. Gruntowne przedstawienie tematyki badawczej i przeprowadzenie wnikliwej analizy modeli wybranych układów odzyskiwania energii.
2. Przeprowadzenie analizy sił działających na elementy wybranych układów odzyskiwania energii kinetycznej oraz ich ruchu.
3. Przedstawienie nowej metody formułowania opisu ruchu układów odzyskiwania energii wraz z przykładami takich układów.
4. Opracowanie modeli matematycznych układów odzyskiwania energii.
5. Przeprowadzenie badań symulacyjnych i doświadczalnych weryfikujących poprawność opracowanych modeli matematycznych.
6. Przeprowadzenie analizy wyników wraz z interpretacją rozbieżności między modelem a obiektem rzeczywistym.

Wniosek końcowy

Uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Joanny Bijak dotyczy ważnego i aktualnego zagadnienia, mieszczącego się w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, dyscyplinie *automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne*, stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz **spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym** (Dz.U. 2018 poz. 1668 z późn. zm.), w związku z tym **wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Joanny Bijak do publicznej obrony.**