



dr hab. inż. Mariusz Ptak, prof. uczelni
Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny
Katedra Konstrukcji Badań Maszyn i Pojazdów
ul. Łukasiewicza 7, 50-371 Wrocław

Wrocław, 30.12.2024

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana **mgr inż. Mariusza SOBIECHA** p.t.:

**Dobór optymalnego łańcucha kinematycznego oraz jednostek napędowych
egzoszkieletu kończyny górnej,**

której promotorem jest prof. dr hab. inż. Wojciech Wolański

a opiekunem pomocniczym dr inż. Aleksander Sobotnicki

1. PRZEDMIOT I ZAKRES ROZPRAWY

Przedmiotem rozprawy doktorskiej pt. *„Dobór optymalnego łańcucha kinematycznego oraz jednostek napędowych egzoszkieletu kończyny górnej”* jest dobór łańcucha kinematycznego oraz jednostek napędowych w konstrukcji egzoszkieletu rehabilitacyjnego dla kończyny górnej. Celem pracy jest opracowanie oryginalnego rozwiązania konstrukcyjnego egzoszkieletu, który może wspierać rehabilitację osób z niepełnosprawnością ruchową, szczególnie osób starszych lub po udarach mózgu, oraz poprawić efektywność procesów terapeutycznych. Praca ma charakter wdrożeniowy i jest realizowana w ramach projektu badawczo-rozwojowego, w którym Autor pełnił funkcję głównego konstruktora mechanika. Praca obejmuje szeroki zakres zagadnień, od analizy anatomii kończyny górnej i przeglądu stanu techniki, poprzez opracowanie założeń projektowych i koncepcji łańcucha kinematycznego, aż po dobór komponentów, badania wytrzymałościowe i budowę prototypu..

2. UWAGI OGÓLNE I SZCZEGÓŁOWE

Praca ma charakter interdyscyplinarny, łącząc zagadnienia z zakresu inżynierii mechanicznej, biomechaniki, robotyki i rehabilitacji. Autor wykazuje się szeroką wiedzą w tych dziedzinach. Rozprawa jest dobrze napisana, szczególnie w początkowej części, gdzie styl jest płynny i zrozumiały. Później pojawiają się pewne błędy i pomyłki gramatyczne, które jednak nie wpływają znacząco na odbiór treści. Jednakże, mimo dużej wartości praktycznej, praca zawiera liczne niedociągnięcia w zakresie formalnym, merytorycznym i językowym. Należy zauważyć, że chociaż praca wdrożeniowa powinna skupić się na implementacji wyników badań, to niektóre kwestie naukowe oraz badawcze są niewystarczająco rozwinięte. Wartość naukowa pracy jest trudniejsza do jednoznacznego określenia. Autor nie formułuje jasno problemu naukowego, który stara się rozwiązać. Praca skupia się na aspektach inżynierskich, a część naukowa jest bardzo słabo wyeksponowana. Brakuje głębszej analizy naukowej, która wykraczałaby poza standardowe procedury inżynierskie. Doktorat wdrożeniowy powinien nie tylko prezentować praktyczne rozwiązanie, ale także wносить nową wiedzę do dyscypliny naukowej i odpowiadać na postawione pytania badawcze. W tym przypadku tego elementu brakuje. Na uwagę zasługuje jednak fakt, że Autor jest autorem publikacji w międzynarodowych czasopismach naukowych, a także posiada patent i zgłoszenia patentowe.

Uwagi szczegółowe:

1. W rozprawie zdecydowanie brakuje tabeli skrótów i oznaczeń, część z nich nie jest w ogóle wyjaśnionych.
2. Należałoby dodać jednostki w tabelach, aby uniknąć powtarzania jednostek przy każdej z wartości (np. Tabela 1, Tabela 10).
3. Zamiast zapisywania symbolu stopnia jako 0 w indeksie górnym, powinien być zapisany poprawnie jako "°".
4. Błędy językowe – w pracy występują liczne błędy językowe, np. "Hubera-von Misesa", "est" zamiast "jest", " jej efektywość." „(...) łańcucha. z kolej". Warto zapamiętać, iż imiesłów przysłówkowy oddzielamy przecinkiem od reszty zdania (np. str. 41). Ilość i liczba – należy rozróżniać te dwa stwierdzenia (np. błędnie użyte „ilość osób”). Co więcej pauza (myślnik) i dywiz (łącznik, ćwierćpauza) są często nierozróżniane. W pracy technicznej należy zachować odpowiednią spójność w stosowaniu znaków ortograficznych.
5. Styl cytowania jest niejednorodny (przykład strona 26), brakuje również istotnych dat wejścia na strony internetowe, co powinno zostać poprawione.
6. Niektóre rysunki nie zostały przetłumaczone na język polski, a także zawierają nieczytelne skróty. Ponadto, niektóre rysunki są słabej jakości lub zbyt małe, co utrudnia ich analizę. Przykładowo:

- a. Rysunek 16: Zdecydowanie za niska jakość.
- b. Rysunek 64: Zawiera podkreślenia błędów wklejonych do dysertacji.
- c. Rysunek techniczny na stronie 119 jest po prostu nieczytelny.

Powinno to zostać zauważone i poprawione na etapie korekty pracy.

7. Tabela 5 kończy przegląd robotów rehabilitacyjnych na 2013 roku. Dlaczego Doktorant nie prezentuje osiągnięć z ostatnich lat?
8. W pracy pojawia się określenie "znalezienie optymalnego łańcucha kinematycznego", bez podania kryteriów optymalizacji czytelnik nie wiem w jakich aspektach będzie on optymalny.
9. Na stronie 46 pracy pojawiają się założenia projektowe, jednak nie wiadomo, skąd pochodzą te wytyczne (np. czy były one ustalane przez pracodawcę, sponsorów projektu).
10. Rysunek 24 przedstawia układ współrzędnych, w którym oś Z nie jest osią działania grawitacji. Należy wyjaśnić, dlaczego przyjęto inny układ niż standardowy w inżynierii mechanicznej.
11. Czy Autor rozważał użycie wirtualnego, biozgodnego manekina do analizy odwrotnej zakresów ruchu?
12. Należy wyjaśnić, czym dla Autora jest parametr "skuteczność" w kontekście modyfikacji koncepcji.
13. Na stronie 84 Autor podjął decyzję o wyborze koncepcji K1, jednak brak jest szerszej analizy, kto podjął tę decyzję i dlaczego.
14. Na stronie 92 autor wspomina o założonym współczynniku bezpieczeństwa bez podania jego wartości – jaki zatem on jest?
15. Czym dla Autora jest „objętość/gęstość uproszczenia” w tab. 18?
16. Analiza wytrzymałościowa w pracy doktorskiej jest jej zdecydowanie najsłabszym punktem. Rysunki, takie jak rys. 73, są bardzo słabo opisane i niewidoczne są wyniki analizy, a brak jest również informacji o średniej długości elementu skończonego. Mapy przemieszczeń powinny być jasno opisane – można się tylko domyślać, że jest to przemieszczenie wypadkowe (np. rys. 70).

Szczególnym błędem, obniżającym wiarygodność przeprowadzonych analiz, jest bardzo niska jakość siatki elementów skończonych, zaprezentowanej na rysunku 67. Użycie elementów tetraedrycznych (*tetrahedral*) o tak niskiej jakości, z widocznymi dystorsjami, jest nieakceptowalne we współczesnych standardach analiz numerycznych. Co więcej, Autor popełnił błąd, stosując zgrubną siatkę tetraedryczną do dyskretyzacji elementów cienkościennych i smukłych. Takie podejście prowadzi do znacznych błędów w wynikach, zwłaszcza w obszarach koncentracji naprężeń. Sposób nałożenia siatki wskazuje na brak dogłębnego zrozumienia zasad metody elementów skończonych i sugeruje zastosowanie automatycznego generatora siatki bez jakiegokolwiek weryfikacji jej jakości. Takie podejście, określane mianem "siłowego", jest charakterystyczne dla ogólnych programów CAD/CAE, gdzie priorytetem jest szybkość i skuteczność generowania siatki, a nie jej jakość. W profesjonalnych analizach MES, kluczowe jest zachowanie odpowiednich

kryteriów jakościowych siatki, w tym kontrola parametrów geometrycznych, takich jak współczynnik kształtu elementu (Aspect Ratio) czy Jacobian. Wysoka dystorsja elementów skończonych widoczna na rys. 67, świadczy o złej jakości siatki i może prowadzić do znacznego zafałszowania wyników. Zastosowanie tak niskiej jakości siatki podważa wiarygodność przedstawionych wyników analiz numerycznych.

17. Wnioski z analizy statycznej na stronie 108 są zbyt ogólne i oczywiste, np. stwierdzenie o zależności sztywności od materiału. Wnioski nie wymaga przeprowadzania analizy metodą elementów skończonych, aby to stwierdzić.
18. Na stronie 112 Autor sugeruje zwiększenie sztywności elementu z rysunku 75 poprzez zmiany konstrukcyjne, jednak nie przedstawia żadnych analiz potwierdzających skuteczność tych modyfikacji.
19. Praca koncentruje się na badaniach statycznych, brak jest informacji dlaczego nie podjęto badań dynamicznych, które byłyby istotnym uzupełnieniem.
20. Zasadniczym pytaniem, które powinno zostać postawione w pracy, jest jaki problem naukowy został rozwiązany. Wydaje się, że praca skupia się głównie na aspekcie inżynierskim, a pytania naukowe są niewystarczająco rozwinięte.
21. Autor wskazuje, że sukcesem wdrożeniowym jest zaakceptowanie urządzenia przez partnera projektowego, jednak warto byłoby głębiej podkreślić znaczenie tego osiągnięcia oraz dodać więcej informacji o wdrożeniu urządzenia na rynek.
22. Należy uzasadnić, dlaczego zakres sił podczas prób obciążeniowych został ograniczony do 5-50N, a nie zastosowano szerszego zakresu, tj. większych wartości sił.

3. PODSUMOWANIE I WNIOSEK KOŃCOWY

Praca doktorska stanowi cenny wkład w dziedzinę inżynierii mechanicznej, a zaproponowane rozwiązania w zakresie konstrukcji egzoszkieletu rehabilitacyjnego wykazują wysoką wartość praktyczną. Autor skutecznie połączył teorię z praktyką, realizując projekt, który może przyczynić się do rozwoju technologii rehabilitacyjnych. Niemniej jednak, pomimo znacznego potencjału wdrożeniowego, praca zawiera liczne niedociągnięcia, zarówno w zakresie językowym, jak i merytorycznym. W szczególności brak odpowiedniej analizy naukowej oraz niewystarczające rozwinięcie kwestii związanych z numerycznymi badaniami wytrzymałościowymi stanowią ograniczenia pracy.

Pomimo wskazanych uwag, praca posiada dużą wartość wdrożeniową i zasługuje na uznanie. Proponuję dalsze doskonalenie pracy, zwłaszcza w zakresie aspektów naukowych oraz wytrzymałościowych, a także uwzględnienie uwag formalnych. Podsumowując, stwierdzam, że praca doktorska pt. *„Dobór optymalnego łańcucha kinematycznego oraz jednostek napędowych egzoszkieletu kończyny górnej”* spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz.U. z 2023 r. poz.742 z późn. zm.) oraz wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

dr hab. inż. Mariusz Ptak, prof. uczelni

