

Dr hab. inż. Włodzimierz Adamski

2024.08.02

w_adamski@poczta.onet.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej*Mgr inż. Andrzej JAŁOWIECKI***zatytułowanej:*****Optymalizacja parametrów konstrukcyjno-funkcjonalnych
mobilnej platformy eksploracyjnej*****1. Cel, zakres i charakter rozprawy**


Celem rozprawy, zdefiniowanym na stronie 13 jest przeprowadzenie procesu optymalizacji mobilnej platformy eksploracyjnej Phoenix III powodującej zredukowanie masy całkowitej platformy, aby uzyskać wymierne korzyści, które zwiększą konkurencyjność platformy w czasie realizacji zadań na zawodach Rover Challenge, a celem naukowym rozprawy jest optymalizacja cech konstrukcyjnych oraz funkcjonalnych nowo projektowanej mobilnej platformy eksploracyjnej Phoenix III.

Autor przedstawia na stronie 11 w niniejszej dysertacji doktorskiej problem badawczy jakim jest przeprowadzenie procesu optymalizacji parametrów konstrukcyjno-funkcjonalnych mobilnej platformy eksploracyjnej Phoenix. Główny cel procesu optymalizacji jaki postanowiono uzyskać to zredukowanie masy platformy jezdnej. Minimalizacja masy jest głównym celem prowadzonej optymalizacji i jest związana z obserwacją Autora w jaki sposób ten właśnie parametr pośrednio lub bezpośrednio wpływa na postać konstrukcyjną poszczególnych układów mobilnej platformy eksploracyjnej Phoenix.

Rozprawa ujawnia naukowy charakter badań, ale także duży wkład pracy i kompetencje Autora w zakresie projektowania i wytwarzania wspomaganego komputerem, prowadzenia badań symulacyjnych. Biorąc pod uwagę obecny stan i potrzeby eksploracji Marsa łaziki marsjańskie są kluczowe nie tylko dla zrozumienia warunków samej planety, ale także dla rozwoju technologii i nauki, które mogą mieć zastosowanie również w innych dziedzinach.

Biuro Dziekana

1



wpłynęło dnia 07.08.2024
RDJMe 11361 511 2024.
nr zał.

Wspierają one ambicje ludzkości dotyczące eksploracji Kosmosu i możliwego zamieszkania na innych planetach. Biorąc także pod uwagę złożoność przedstawionego problemu, układ i właściwą treść pracy, podporządkowanej weryfikacji sformułowanym tezom uważam, że cel i tezy badawcze rozprawy nie budzą zastrzeżeń w ogólnej ocenie pracy.

2. Zawartość i wyniki rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa zawiera wszystkie niezbędne elementy pracy naukowej.

Praca została napisana na 140 stronach i zawiera: stronę tytułową, spis treści, sześć rozdziałów stanowiących zasadniczą część merytoryczną pracy z wnioskami końcowymi, spis literatury, spis rysunków, spis tabel i Dodatek A „Analiza drgań fizycznej platformy Phoenix III”. W tekście rozprawy jest jej streszczenie zarówno w języku polskim jak i angielskim.

Rozdział 1 to Wstęp w którym Autor przedstawia dane z eksploracji przestrzeni kosmicznej oraz innych planet i kierunki rozwoju europejskiego programu kosmicznego. Zapotrzebowanie na łaziki marsjańskie oraz rozwiązania techniczne z nimi związane stały się impulsem do organizowania zawodów klasy Rover Challenge oraz European Rover Challenge. Są one corocznym wydarzeniem mającym na celu sprawdzenie wiedzy i umiejętności zespołów z całego świata w zakresie projektowania, budowania oraz operowania mobilnymi platformami jezdnyimi, przystosowanymi do działania w trudnych warunkach terenowych, mających symulować te znajdujące się na powierzchni Marsa. Z wymaganiami tego konkursu Autor zmierzył się w rozprawie doktorskiej.

Rozdział 2 to analiza stanu dotychczasowej wiedzy na temat mobilnych platform eksploracyjnych tworzonych przez studenckie zespoły biorące udział w zawodach z serii Rover Challenge, stanowiących główny obiekt prowadzonych badań. Poza omówieniem poszczególnych modułów tworzących platformę, dokonano również przeglądu metod optymalizacji, które znalazły zastosowanie w ramach prowadzonych badań. Autor na tle przedstawionego przeglądu literatury opisuje możliwości swojej pracy badawczej. W rozdziale 3 przedstawiono główną część opisu realizowanych prac badawczych. W rozdziale tym zaprezentowano proces optymalizacji poszczególnych podzespołów układu jezdnego, od opracowania metodyki optymalizacji po wyniki przeprowadzonych działań. Opisane w nim zostały założenia projektowe, a także zaprezentowano w nim pole możliwych rozwiązań i analizowane koncepcje pojazdu.

W kolejnym rozdziale 4 rozprawy Autor poddał analizie porównawczej uzyskane efekty optymalizacji z pierwotnym projektem opracowanym dla platformy Phoenix III na początku 2020 roku. W rozdziale 5 przeprowadzono analizę porównawczą własności funkcjonalnych



pierwotnej oraz zoptymalizowanej postaci konstrukcyjnej platformy eksploracyjnej. Ostatni rozdział 6 zawiera dyskusję wyników oraz wnioski z nich płynące.

Na końcu rozprawy znajdują się: spis cytowanej literatury liczący 102 pozycje (w tym 2 prace, w których Autor miał swój udział) oraz Spis rysunków liczący 112 pozycji i Spis tabel liczący 26 pozycje. Prace Autora są tematycznie powiązane z problematyką ocenianej rozprawy doktorskiej.

3. Uwagi ogólne

Przedstawiony problem badawczy i proces projektowo-konstrukcyjny zostały wykonane na dobrym poziomie, zgodnie ze współczesnymi standardami. Zaprezentowany bogaty przegląd literatury oraz wstęp wskazują, że Autor dobrze poznał omawianą w rozprawie tematykę. Logicznie umotywowował zasadność podjętych badań opisanych w rozprawie. Tematyka optymalizacji parametrów konstrukcyjno-funkcjonalnych mobilnej platformy eksploracyjnej jest często podejmowana w literaturze fachowej, stąd tak liczne konkursy organizowane na całym świecie. Współczesna robotyczna eksploracja Kosmosu to zaawansowane technologicznie misje i pełne sensorów ruchome laboratoria. Pojazdy autonomiczne eksplorujące dziś powierzchnię Marsa, jak Perseverance, posiadają instrumenty umożliwiające pozyskanie próbek i ich podstawową analizę.

Ponadto należy docenić fakt, że Autor używa poprawnie pojęć konstrukcyjnych stosowanych w zapisie konstrukcji i wprowadzonych przez prof. Janusza Dietrycha poz. 24.

Został przez Autora osiągnięty Poziom Gotowości Technologicznej danego rozwiązania **TRL 7** (czyli **Technology Readiness Level**) – dokonano demonstracji prototypu systemu w otoczeniu operacyjnym. Bardzo wysoko oceniam świadomość Autora o potrzebie weryfikacji oraz walidacji wyników badań po dokonanej ich analizie, poprzez przeprowadzenie testów fizycznych w celu zweryfikowania rzeczywistego poziom drgań występujących na platformie w trakcie jazdy.

Podstawą działalności operacyjnej łazika jest jego niezawodność. Lecąc w przestrzeń kosmiczną traci się możliwość interwencji, jeśli coś pójdzie nie tak jak zostało to zaplanowane. Zaprojektowany moduł musi wytrzymać trudne warunki transportu oraz warunki panujące na planecie i musi być niezawodny w czasie operacji.

Stwarza to kolejną trudność, mianowicie zwiększenie niezawodności i solidności konstrukcji powoduje m.in. zwiększenie masy. Potrzebne również będzie więcej materiału, żeby zrobić trwalszą konstrukcję, a w misjach kosmicznych dąży się do jak najmniejszych mas ładunków z powodu ograniczeń zdolności nośnych rakiet. Wyzwaniem więc jest zachowanie równowagi pomiędzy niezawodnością i masą rozwiązania.

Dlatego taki konkurs to świetny sposób na to, by rozwijać pomysły, sprawdzać co zadziała a co nie. Tak więc tak samo użyteczne jest wpadanie na dobre jak i na złe pomysły.

Testowanie łożnika zajmuje tyle samo pracy, co jego projektowanie i budowa.

Projekt, będący wynikiem tej pracy, realizowany był według podstawowych etapów procesu projektowania i uwzględniał: wybór koncepcji układu zawieszenia, dobór parametrów geometrycznych ze względu na wybrany typ zawieszenia, dobór układu przeniesienia napędu i układu stabilizującego z uwzględnieniem węzłów łożyskowania i punktów mocowania poszczególnych komponentów, dobór materiałów zapewniający założoną wytrzymałość konstrukcji oraz wykonanie modelu **CAD** i analizę numeryczną wybranego komponentu.

Elementem wyróżniającym omawiany łożnik jest główny materiał, z którego wykonano elementy jego obudowy, czyli kompozyt węglowo-epoksydowy. Większość tego typu studenckich konstrukcji (*z całego świata*) jest wykonana głównie z różnego rodzaju stopów metali. Autor postanowił postawić na materiały przyszłości, jakimi są kompozyty. Łączą one w sobie dwie cechy, jakimi są: duża wytrzymałość przy zachowaniu bardzo małej masy.

W ramach pracy przeprowadzono analizę literatury dotyczącą optymalizacji konstrukcji pojazdów, zarówno z zakresu redukcji masy, jak i zwiększania wydajności. Następnie przeprowadzono analizę obecnej konstrukcji platformy eksploracyjnej oraz przeprowadzono symulacje numeryczne, aby ocenić wpływ zmian w konstrukcji na jej masę całkowitą oraz parametry techniczne.

Interesujące jest to, że w procesie projektowania mobilnej platformy eksploracyjnej w celu osiągnięcia jak najmniejszego ciężaru Autor otrzymał kształt obudowy zbliżony do kształtów krabów morskich co było dodatkowym celem procesu projektowo-konstrukcyjnego i pozwoliło na uzyskanie nowoczesnej formy projektowanej platformy. Wstępnie przeprowadzone testy prototypu platformy eksploracyjnej, pokazały, że wykorzystanie kształtu kraba morskiego wpływa pozytywnie na jego wydajność i efektywność.

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz wybrano optymalne rozwiązania konstrukcyjne, które pozwoliły na redukcję masy platformy przy minimalnej utracie

wydajności. Poza nietypowym wyglądem, uzyskana w ramach optymalizacji postać konstrukcyjna, cechuje się niezwykle niską wagą, wynoszącą według modelu wirtualnego około 18 kg. Korzystając z numerycznych technik optymalizacji, Autor mógł szybko analizować różne warianty kształtu korpusu i dokonywać odpowiednich modyfikacji, aby uzyskać optymalne rozwiązanie. Dodatkowo, dzięki wykorzystaniu kompozytów, możliwe było osiągnięcie lepszych parametrów wytrzymałościowych przy zachowaniu niskiej masy. Opracowane strategie optymalizacji postaci konstrukcyjnej obejmują m.in. zmiany w układzie zawieszenia oraz zastosowanie nowych materiałów kompozytowych o wyższych parametrach wytrzymałościowych.

Dodatkowo, opracowano zbiór kryteriów oceny dla poszczególnych podukładów platformy, które pozwalają na obiektywną analizę i porównanie różnych rozwiązań konstrukcyjnych. Dzięki temu możliwe jest szybkie i skuteczne wprowadzanie zmian w konstrukcji platformy, które przyczyniają się do zwiększenia jej konkurencyjności na rynku.

W rezultacie przeprowadzonych badań udało się osiągnąć znaczącą redukcję masy całkowitej platformy eksploracyjnej wynoszącej 61% tj. 28,50 kg (*korpus, układ zawieszenia, układ skręcania i układ napędowy*), co przyczyniło się do zwiększenia jej manewrowości oraz osiągnięcia na trudnym terenie. Platforma jest teraz bardziej konkurencyjna w czasie realizacji zadań na zawodach Rover Challenge, co potwierdza skuteczność przeprowadzonych działań optymalizacyjnych.

Zoptymalizowany korpus wykonany jest z kompozytu epoksydowo-węglowego oraz polimeru termoplastycznego polilaktydu. Zastosowane materiały umożliwiły opracowanie korpusu w postaci struktury samonośnej składającego się z trzech elementów głównych. Rozwiązanie to znacząco przyspiesza proces składania platformy, co jest dość istotne w warunkach zawodów, gdzie zaoszczędzony czas można wykorzystać np. na dodatkowe testy systemów łazika.

Dzięki zastosowaniu w procesie konceptowania metody **TRIZ** Autor mógł znaleźć optymalne rozwiązania, które spełniły zarówno wymagania zmniejszenia masy obiektu ruchomego, jak i zwiększenia jego niezawodności.

Łaziki marsjańskie inspirują nowe pokolenia naukowców i inżynierów. Umożliwiają im rozwój zainteresowania naukami przyrodniczymi oraz technologią, a także pomagają w zrozumieniu wartości badań kosmicznych.

4. Uwagi szczegółowe

Czytający nie zna pojazdów **Phoenix I** oraz **II**, historii decyzji dotyczących konstrukcji oraz problemów występujących na poszczególnych etapach tych projektów, jest to informacja której brakuje w treści pracy, gdyż Autor powołując się na te projekty, powinien przynajmniej pobieżnie i skrótowo zapoznać Czytelnika ze znajomym sobie tematem, jeżeli wpływa on istotnie na temat niniejszej pracy i decyzje w niej podjęte, przykładowo co do optymalizacji np. str. 11 zbyt lakoniczny opis, nie wiadomo co Autor ma na myśli odnośnie zmian w projekcie **Phoenix III** w odniesieniu do poprzednich. Na str. 22 jest sformułowanie "W celu uniknięcia problemów, które miały miejsce w poprzednich wersjach lazików". Warto byłoby wymienić przykłady jakich tych problemów. Dotyczy to także zapisu na str. 30 „W ramach zawodów wymaga się, aby robot miał możliwość wejścia w interakcję z elementami otoczenia, takimi jak przełączniki, pokrętła czy zawory”.

Na str. 45 Autor pisze „Bazując na opracowanej tablicy morfologicznej wyselekcjonowano sześć wariantów możliwych do zastosowania rozwiązań. Na wstępie ze względu na największą gęstość odrzucono rozwiązane bazujące na stali”. Brak jest tutaj uzasadnienia odrzucenia innych wariantów np. A2 - B2 - C2; A2 - B2 - C1; A4 - B1 - C2.

Na str. 46 w Tab. 3.3: Zunitaryzowane wartości poszczególnych kryteriów dla wybranych wariantów - wartość parametru K4 w wariacie W6 powinna wynosić **0,63** a nie **0,65**.

Na str. 48 Rys. 3.6: Fragment macierzy sprzeczności technicznych metody TRIZ. Na przecięciu masy i niezawodności (współrzędne 1R w tabeli, x=1, y=R) Autor podaje opis parametr **38Ae**, inne źródła (<https://www.triz.oditk.pl/triz39>, lub https://www.triz40.com/aff_Matrix_TRIZ.php) podają wartości **3,8,10,40**. Skąd się biorą te różnice?

Na str. 55 brak jednoznaczności, czy chodzi o jedną czy więcej anten w uchwycie.

"Dodatkowo **uchwyt anteny**, który pierwotnie był połączony ze środkowym pasem, został wydzielony jako osobny element w celu zoptymalizowania procesu wykonania elementów. Montaż **uchwyty anten** będzie realizowany za pomocą połączeń śrubowych ze środkowym pasem. Postać zmodyfikowanych elementów środkowego pasa przedstawiono na rys. 3.13."

Str. 55 Rys. 3.13 a i d "**uchwyty anten**"

Str. 60 Tab. 3.5 "**Uchwyt anteny**"



Przedstawione Rys. 3.25 i 3.26 na str. 63-64 nie zawierają wyniku analizy dla przemieszczeń wzdłuż kierunku osi X, podobnie jak Rys. 3.32 i 3.33 na str. 70-71. Przemieszczenia w kierunku osi X są pokazane w tabeli Tab. 3.7: Zestawienie wyników dla zmodyfikowanego ramienia zawieszenia.

Autor wykazał się dobrym i sensownym zmysłem inżynierskim wprowadzając praktyczny podział (str. 53) "W pierwszej kolejności autor podjął decyzję o podzieleniu uzyskanego kształtu na trzy obiekty: pokrywę górną, pokrywę dolną oraz środkowy pas. Taki podział umożliwi łatwy montaż elementów w całość, jednocześnie zapewniając dostęp do wnętrza korpusu." i (str. 66) "Podział ramienia na dwie połówki podyktowany został względami technologicznymi. Dzięki takiemu zabiegowi możliwe jest wykonanie wszystkich czterech połówek ramienia za pomocą jednej formy, co znacząco upraszcza proces produkcji jednocześnie znacząco redukując koszty."

Na str. 102 w Tab. 4.1: Zestawienie mas dla obu projektów platformy Phoenix III zaokrąglenia % po przecinku powinny wynosić następująco:

- wiersz drugi 72%
- wiersz trzeci 68%
- wiersz trzeci 66%

Autor często odwołuje się do "poprzedniej wersji" łazika, poszczególnych jego elementów, ich budowy, analizy, wad, itp., ale rzadko konkretyzuje której dokładnie wersji używa do danego porównania, czy chodzi o ramię aluminiowe, czy ramię Phoenix II, czy ramię kompozytowe niespełniające kryterium obciążenia siłą 650 N, należy to opisywać bardziej precyzyjnie (np. str. 68).

Autor często w pracy pomija zależność logiczną kolejnych elementów analizy, przechodząc od razu dalej po kilka kroków. Niewątpliwie Autor wie o czym pisze, natomiast dla Czytelnika lepiej byłoby tych pewnych kroków wyjaśnień nie pomijać, aby zachować ciągłość opisu np. warto byłoby jednym zdaniem nawiązać o zależności URES i sztywności str. 69 "Wyniki przeprowadzonego przeszukiwania zestawiono w tab. 3.8, natomiast na rys. 3.31 przedstawiono wykres ukazujący tempo zmiany stosunku wypadkowego przemieszczenia elementu (URES) do jego masy. Uzyskane wyniki zostały odczytane z symulacji MES wykonanej w środowisku PrePoMax. Jak można zauważyć na rys. 3.31 w okolicach grubości kompozytu równej około 3 mm wykres zaczyna się zauważalnie wywłaszczać, a co za tym idzie wraz z dalszym zwiększaniem grubości kompozytu nie obserwuje się znacznego wzrostu sztywności elementu." W tejże tabeli są drobne nieścisłości liczbowe. W 6 kolumnie tabeli 3.8 (masa) przy przyjętej gradacji ścianki każdej warstwy laminacji o 0.5mm dla grubości ścianki

$g=3,5\text{mm}$ masa powinna wynosić **1,05** kg, jeżeli różnica masy wynosi 0,15, w tabeli jest podana wartość **1,06** kg. Tak samo w ostatniej kolumnie tabeli 3.8 (stosunek przemieszczenia URES do masy) powinno być:

$2,26/0,3=7,53$ (wiersz pierwszy) a jest **7,50**

$0,92/0,45=2,04$ (wiersz drugi) a jest **2,02**

$0,25/0,9=0,28$ (wiersz piaty) a jest **0,27**

W podpisie na str. 72 "Rys. 3.34: *Postać konstrukcyjna ramienia wykonanego z kompozytu węglowego*". Na str. 62 i 65 Autor pisze o ramieniu zawieszenia, że zostało wykonane z kompozytu **węglowo-epoksydowego**. Należy to uściślić **węglowego** czy **węglowo-epoksydowego**?

"Masa tak opracowanego mechanizmu, zgodnie z wyliczeniami oprogramowania CAD, powinna wynosić 2, 17 kg, natomiast komplet wszystkich czterech osi skrętnych to **8,69** kg." Powinno być $2,17 \times 4 = 8,68$

Podobnie jak przy poprzedniej tabeli morfologicznej Autor nie precyzuje na jakiej podstawie zdecydował się wybrać trzy podane rozwiązania (str. 73-74, tabela 3.10). Przedstawione słowne opisy poszczególnych rozwiązań 1, 2 i 3 nie są wystarczająca odpowiedzią na to pytanie. "W ramach opracowanej tablicy, wyselekcjonowano trzy rozwiązania które poddano dalszej analizie, są to:

- Rozwiązanie nr 1 - A1-B3-C1-D2
- Rozwiązanie nr 2 - A3-B2-C1-D1
- Rozwiązanie nr 3 - A4-B3-C2-D2"

Na str. 78 w tabeli 3.14 podano masę pojedynczego zestawu jako 0,706 kg.

1) jeżeli Autor chce zaokrąglić wartość masy pojedynczego elementu do 0,7kg w kolejnym zdaniu, to warto byłoby dopisać "około, w przybliżeniu", podobnie jak dopisano do masy zestawu np. na str. 91 jest poprawnie opisane choć wartości są inne (65% i 66%) $7,124/20,80=0,3425$, czyli $1-0,3425=0,6575$ czyli po zaokrągleniu to 66%.

"Jak można zauważyć opracowany układ waży 7,124 kg co jest o około 65% mniej od pierwotnego projektu, którego masa całkowita wynosiła 20,80 kg".

2) w technice należy precyzyjnie przedstawiać obliczenia, jeżeli masa pojedynczego elementu po optymalizacji wynosiła 0,706kg, a przed optymalizacją miała wartość 2,17kg, to różnica procentowa po zaokrągleniu wynosi **33%**, a nie **32%**. Wartość **32%** zgadzałyby się w przypadku analizy porównawczej całego zestawu ($2,824\text{kg}/8,69\text{kg} = 32\%$), jednak Autor pisze o porównywaniu pojedynczych elementów, a nie zestawu.



Na str. 81 Celem głównym wielokrotnie przywoływanym przez Autora w treści pracy jest znaczna redukcja masy przedmiotowego łożnika. Dlaczego zatem jeżeli w Tab. 3.15 masa pojedynczego zespołu układu napędowego wynosi 5,2 kg, jako kryterium przyjęto max. 5,5 kg? Porównywalnie przy układzie skręcania (str. 72-73), masa wynosiła 2,17 kg, natomiast do kryterium przyjęto mniejsza wartość 2,0 kg? Na str. 61 dla ramienia zawieszenia była masa 2,6kg, przyjęto <2,6kg, a na str. 40 dla korpusu masa wynosiła 6,5 kg, jako kryterium przyjęto <6,5kg. Czym się Autor kierował wybierając takie a nie inne wartości kryterium przy poszczególnych elementach?

Na str. 84 na Rys 3.44 widoczna jest inna wartość 1047g=1,047kg niż przytoczona w opisie. W tekście Autor pisze "Ze względu na zastosowane tworzywo, wykonanie koła zajmuje sporo czasu, na rys. 3.44 zaprezentowano informacje z oprogramowania do wygenerowania kodu na drukarkę 3D z widocznym czasem procesu (97 godzin 55 minut) oraz ilością zużytego materiału (1,07 kg)."

Na str.89-90 na Rys. 3.50 i 3.51

Przedstawiając graficzną reprezentację wyników tego etapu analizy MES, Autor przyjął kolejność:

- naprężenia zredukowane według Hubera-Misesa
- oś X
- oś Y
- oś Z

W poprzednich etapach analizy MES przedstawiano inną kolejność i pomijając oś X (str. 63-64 Rys. 3.25, 3.26 str. 70-71 Rys.3.32 i 3.33)

- oś Y
- oś Z
- naprężenia zredukowane według Hubera-Misesa

Czy nie warto byłoby przyjąć jednolitą formę dla wszystkich przedstawianych wyników?

Na str. 91 podobnie jest z tabelami w Tab. 3.19 kolejność: **naprężenia zredukowane według Hubera-Misesa X Y Z**, tymczasem poprzednie tabele mają inną kolejność prezentacji wyników str. 66 Tab. 3.7 (**X Y Z naprężenia zredukowane według Hubera-Misesa**), str. 72 Tab. 3.9 (**X Y Z naprężenia zredukowane według Hubera-Misesa**).

Autor przedstawił bardzo dobry i przemyślany plan sekwencji optymalizacji wg określonej przez niego hierarchii (*pierwszym optymalizowanym układem będzie korpus,*

następnie układ zawieszenia i na koniec układ napędowy) czyli wymienione trzy układy, które są ze sobą powiązane, korpus jest układem do którego mocowane są pozostałe układy, w tym układ zawieszenia. Stąd też optymalizując korpus Autor przewidział sposób montażu elementów układu zawieszenia, tak aby umożliwiło poprawną pracę układu. Do elementów zawieszenia montowane są układy jezdne. Tutaj również przewidziano odpowiedni sposób łączenia tych układów. Mając na uwadze te zależności, Autor postanowił przeprowadzić proces optymalizacji w sposób sekwencyjny. Oznacza to, że poszczególne układy będą optymalizowane pojedynczo w określonej kolejności. Autor wykazał się dobrym pomysłem, uwzględniając praktyczne podejście przy zaprojektowaniu koła.

"W związku z tym, postanowiono zaprojektować koło, które będzie optymalne pod względem wytwarzania i pozwoli na szybsze i prostsze wytwarzanie elementów zamiennych. W celu osiągnięcia tego, autor postanowił podzielić koło na elementy składowe i wykonać je jako pojedyncze elementy. Podejście to powinno zapewnić możliwość wymiany pojedynczego elementu koła w przypadku uszkodzenia, jak również wytwarzanie mniejszych elementów również jest szybsze i prostsze w porównaniu z pojedynczym dużym elementem."

W kierunkach dalszych prac należy zwrócić szczególną uwagę na testy praktyczne w różnych warunkach terenowych, które dostarczą bardzo cennych informacji do dalszych usprawnień lub modyfikacji łożyska marsjańskiego. W ramach zrealizowanych badań przedstawiono proces optymalizacji czterech podzespołów tworzących układ jezdny platformy mobilnej, który jest jednym z wielu układów tworzących łożyska marsjańskiego. Można także zaplanować badania zmęczeniowe, które zweryfikują wytrzymałość zastosowanych materiałów, jak i kształt konstrukcji mający znacząco wpływać na trwałość zmęczeniową zastosowanych materiałów łożyska.

W kontekście optymalizacji czterech podzespołów łożyska ważne jest, aby wziąć pod uwagę zarówno właściwości mechaniczne stosowanych materiałów, jak i ich interakcje w różnych warunkach. Badania zmęczeniowe, jakie będą zaplanowane, będą istotnym krokiem w procesie weryfikacji projektu, ponieważ pozwolą na zidentyfikowanie potencjalnych słabości konstrukcyjnych zanim łożysko wyruszy w dalszą misję.

Dodatkowo, wykorzystanie zaawansowanych symulacji komputerowych może wspierać proces testowania, umożliwiając przewidywanie zachowania układu jezdny w skrajnych warunkach, a także optymalne rozmieszczenie masy i stref zgniotu, co z kolei wpłynie na bezpieczeństwo i niezawodność całego systemu łożyska.



5. Uwagi redakcyjne

W pracy znalazły się mało istotne błędy redakcyjne:

Na str. 8 jest "Na rys. 1.3 został pokazany łazik Perseverance aktualnie *realizującego* misję na Marsie." Powinno być *realizujący*.

Na str. 9 warto dodać słowo *organizacji non-profit* przy pierwszym użyciu tej nazwy w tekście, zamiast dopiero kilka zdań niżej.

"Rosnące zapotrzebowanie na łaziki marsjańskie oraz rozwiązania techniczne z nimi związane stały się impulsem do zawiązania się *The Mars Society*, którego celem jest rozpowszechnianie wiedzy i rozwiązań technicznych związanych z podbojem Marsa."

(...)

"Początki zawodów sięgają roku 2006 kiedy to *organizacja non-profit The Mars Society* po raz pierwszy zorganizowała zawody na pustyni w stanie Utah na terenie *the Mars Society's Mars Desert Research Station*."

Warto byłoby opisać także w kilku słowach co to generalnie są zawody klasy Rover Challenge przed wymienieniem rodzajów tych zawodów oraz sposobu ich organizacji. Jest "Zawody *University Rover Challenge* są corocznym wydarzeniem mającym na celu sprawdzenie wiedzy i umiejętności zespołów z całego świata w zakresie projektowania, budowania oraz operowania mobilnymi platformami jezdnymi przystosowanymi do działania w trudnych warunkach terenowych, *mających symulować te znajdujące się na powierzchni Marsa*." Lepiej napisać inaczej *symulujących powierzchnię Marsa* lub *symulujących warunki znajdujące się na powierzchni Marsa*

Na str. 10 występuje powtórzenie

"Kolejną mobilną platformą z serii *Phoenix* był łazik *Phoenix II*. W odróżnieniu od swojego poprzednika *Phoenix II* stanowił rozwiązanie *bazujące* na sześciokołowym układzie jezdny *bazującym* na zawieszeniu typu *rocker-buggy*"

Na str. 11

"Ponadto wzrost masy wymaga zastosowania *większych przekrojów elementów nośnych*, co również *dokłada dodatkową masę*." Lepsze byłoby następujące sformułowanie: *Ponadto wzrost masy wymaga zastosowania elementów nośnych o większych przekrojach*, co również *dokłada dodatkową masę*.

Nie podano jakiego użyto sytemu CAD?

"Zgodnie z wyliczeniami przeprowadzonymi z wykorzystaniem systemu CAD, główna część platformy, tj. platforma bez układu (...)"

"Stosowanie większych napędów oraz duża masa całkowita platformy wymaga określonej ilości energii do przemieszczania się."

W tym miejscu należałoby zaznaczyć o jakim rodzaju energii pisze Autor w odniesieniu do platformy mobilnej (energia elektryczna?), w dalszej części pracy wtedy nie jest mylące używanie skróconej wersji "energia" (należy pamiętać, że energia jest wartością fizyczna różnego rodzaju, należałoby więc tutaj doprecyzować). Zdanie ze str. 34 nie budzi już wątpliwości o jakim rodzaju energii pisze Autor "To jak duża bateria potrzebna będzie do zasilenia platformy, w dużej mierze uzależnione jest od zapotrzebowania poszczególnych modułów na energię" jednak kolejne zdanie również ze str. 34 już nie jest jednoznaczne.

"Jak wynika z równania na siłę toczenia 2.3, wraz z wzrostem masy układu będzie wzrastała siła oporu toczenia, a tym samym zapotrzebowanie na energię, aby ją pokonać."

Nie jest to błąd, jednak doprecyzowanie takich kwestii ułatwiłoby zrozumienie zakresu pracy osobie zapoznającej się z jej treścią.

Na str. 12 jest zdanie niefortunne sformułowane

"Stanowi to istotny problem ponieważ masa ta nie obejmuje masy, który dobierany jest na podstawie zapotrzebowania energetycznego platformy, które to wzrasta wraz ze wzrostem masy platformy". Lepiej będzie: **Podana powyżej masa całkowita nie uwzględnia dodatkowej masy źródła zasilania w postaci pakietu baterii dobieranego na podstawie zapotrzebowania energetycznego platformy, które to wzrasta wraz ze wzrostem masy platformy.**

Jest "postanowiono o wstrzymaniu etapu produkcji i rozpoczęciu poszukiwań alternatywnych rozwiązań...", lepiej byłoby **postanowiono wstrzymać i rozpoczęto** albo **podjęto decyzję o wstrzymaniu i rozpoczęciu**

Jest „jest określenie zakresu optymalizacji, kryteriów oceny uzyskanych rozwiązań oraz **sposób** w jaki będzie...” Lepiej będzie **sposobu**

Jest „kwestie związane z inżynierią formy i szeroko pojętym designem, również powinny stanowić kryterium, które jest **brane** w procesie projektowo konstrukcyjnym”, powinno być **brane pod uwagę**

Na str. 13

Jest "Pobocznymi celami realizowanymi w ramach prowadzonych badań są **między innymi**"
Powinno być **między**

Jest „Rozdział pierwszy *stanowiący* wprowadzenie”. Powinno być *stanowi*

Jest "Poza omówieniem poszczególnych *modłów* tworzących platformę". Powinno być *modułów*

Na str. 15 Jest "W ramach tego rozdziału *aktor* dokonuje badań literaturowych". Powinno być *Autor*

Na str. 16 Jest "Gradientowe metody *optymalizacji* stanowią ważny zestaw technik wykorzystywanych w problemach *optymalizacyjnych*, zwłaszcza w kontekście uczenia maszynowego czy zadań *optymalizacji* [70, 80]." czyli *optymalizacja używana do optymalizacji?*

Metoda gradientowa jest powszechnym i konwencjonalnym podejściem do rozwiązywania problemów optymalizacyjnych, które polega na skonstruowaniu odpowiedniej funkcji błędu dla problemu optymalizacyjnego.

Jest „Oznacza to, że każda składowa gradientu określa, jak bardzo funkcja zmienia się w kierunku jednej zmiennej przy *trzymaniu, pozostałych zmiennych stałymi*. "Jest to niefortunne określenie, czy zmienna może być stała? Lepiej napisać: przy *zachowaniu pozostałych wartości jako niezmiennie, lub przy zachowaniu stałych wartości pozostałych zmiennych równania*.

Jest "Istotną cechą tych metod jest *iteracyjne*.. ". Lepiej będzie: Istotną cechą *gradientowych metod optymalizacji* jest *iteracyjne*..

Na str. 17 i str. 25 przywoływanie pozycji literatury nie jest chronologicznie

Str. 17 "metody *optymalizacyjne* mogą napotykać na trudności [78, 55]."

Str. 25 "Roboty kroczące radzą sobie również lepiej w momencie poruszania się w dół po *pochyłym terenie* [15, 8, 54, 84]."

Na str. 20 na Rys. 2.3 zaznaczone jest w tabeli A3-B2-C1-...-N2 a w podpisie jest "Rozwiązanie A3-B3-C1-...-N2"

Metoda ta znalazła zastosowanie między innymi w procesie *optymalizacji korpusu* *czy* (rozdział 3.2) *osi skrajnej* (rozdział 3.4). Słowo *czy* powinno być przestawione.

Na str. 21 na Rys. 2.4

opis w kółku do poprawy: Jest *Światowy* rozwiązanie *konceptualne*. Powinno być *Światowe*

Na str. 23 na Rys. 2.5 opis w zielonym prostokącie, Jest "UKŁAD *ZAISLANIA*". Powinno być *ZASILANIA*.

Jest "W związku *z autor* zdecydował," Powinno być *z tym autor*

Jest "Jest to rodzaj układu *nośnego*, w którym to już *same* poszycie *stanowi* strukturę *nośną*." Powinno być *samo*

Na str. 24 jest niejasny opis rysunku 2.6, zamiast "*W przypadku platform mobilnych stosowane są trzy podstawowe typy układu przeniesienia napędu: gąsienicowy (2.6a) kołowy (2.6b) oraz kroczący (2.6c). Na rys. 2.6 zaprezentowano wymienione typy układów.*"

lepiej byłoby napisać:

Na rys. 2.6 zaprezentowano trzy podstawowe typy układów przeniesienia napędu stosowane w przypadku platform mobilnych: gąsienicowy (2.6a) kołowy (2.6b) oraz kroczący (2.6c).

Na str. 25 Jest "...sprawność takiego układu drastycznie spada *gdy poruszania się po innych rodzajach nawierzchni [62, 79, 84].*" Może dodać *podczas poruszania się*

Na str. 27 następująca sentencja jest mało zrozumiała

"Poza tym, w *trakcie skręcania różnicowego* musi dojść do zerwania przyczepności, co wiąże się z wprowadzaniem do układu dużych sił skręcających cały pojazd. *Podobnie* jak w przypadku *zastosowania skręcania różnicowego* konieczne jest zapewnienie odpowiednich warunków geometrycznych związanych z rozstawem kół."

Na str. 29 Jest "Rola układu zawieszenia w łożach marsjańskich jest zapewnienie stałego kontaktu kół z podłożem niezależnie od ukształtowania terenu, jak również *umożliwić pokonywanie przeszkód terenowych.*" Powinno być jak również *umożliwienie łożowi pokonywanie przeszkód terenowych.*

Na str. 34 Brakuje nawiasów "*Jak wynika z równania na siłę toczenia 2.3*"

Dwa razy literówka "Na wykresie przedstawionym na rys. 2.16 można zaobserwować zależność pomiędzy masą łoża, *ma* zapotrzebowaniem na energię, jedynie biorąc pod uwagę układ jezdny oraz *masą* samego źródła energii."

W równaniu (2.3) brakuje opisu *m- masa*

Na str. 35 jest "*punkty dostępu (ang. acces point)*" "*Nvida Jetson*". Powinno być *access, Nvidia.*

Na str. 35 jest "*Przykładowa* strukturę systemu komunikacji i sterowania zaprezentowano na rys. 2.17." powinno być *Przykładową*

Na str. 46 brak jest "*rys.*" przy 3.4a i 3.4b jednak tu akurat można się domyśleć, że chodzi o rysunek ale przy 3.4, skąd ma być wiadomo czy chodzi o rysunek, wzór czy tabelę o numerze 3.4, tym bardziej, że Autor w pracy powołując się na równania używa tylko liczb, natomiast powołując się na rysunki, używa skrótu jak dla rys. 3.5?

- *K1 - masa - określana na podstawie gęstości tworzywa (3.4),*
- *K2 - wytrzymałość - określana na podstawie właściwości tworzywa (3.4a),*
- *K3 - sztywność - określana na podstawie właściwości tworzywa (3.4b),*
- *K4 - koszt - szacowany koszt wykonania układu na podstawie rys. 3.5*

Na str. 48 brakuje litery "z" "W każdej iteracji algorytm losuje wartości współrzędnych poszczególnych punktów kontrolnych, na podstawie których wyrysowywana jest krzywa **zgodnie równaniem** wielomianu Bernstein'a (3.1) [40]."

Zamiast **Bernstain'a** powinno być **Bernstein'a**

Na str. 50, 51 na Rys. 3.8 i 3.9 zamiast "**wynik o długości krzywej**" lepiej wyniki dla (przyjętej) **krzywej o długości** lub wyniki dla krzywej o (przyjętej) **długości**

Na str. 56 jest "W tym celu dokonano analizy pochyłeń, aby określić czy zaprojektowane elementy będą możliwe do **odformowania** w procesie laminowania." Lepiej brzmiałoby: W tym celu dokonano analizy pochyłeń, aby określić czy zaprojektowane elementy będą **możliwe do wyjęcia z formy** w procesie laminowania.

Na str. 63 Rys 3.25, str. 64 Rys. 3.26, str. 70 Rys. 3.32, str. 71 Rys. 3.33 jest podany opis: (c) Wyniki naprężeń **zredukowany** według Hubera-Misesa. Powinno być Wyniki naprężeń **zredukowanych** według Hubera-Misesa

Na str. 73 jest "możliwość kontrolowania osi za pośrednictwem standardowych układów jednopłytkowych takich jak Arduino czy **Rarpberry Pi**". Powinno być **Raspberry**.

Na str. 74 jest "Aby umożliwić kontrolę nad silnikiem konieczne jest zastosowanie odpowiedniego kontrolera, który umożliwi kontrolę zarówno kierunku obrotów jak również **prędkość** z jaką będzie poruszał się silnik." Powinno być **...prędkości obrotowej** z jaką będzie...

Na str. 75 lepiej byłoby sformułować inaczej to zdanie "Głównie na rynku można znaleźć **dedykowane przekładnie planetarne o kompaktowej budowie**."

"**Na rynku można znaleźć głównie dedykowane przekładnie planetarne o kompaktowej budowie**."

Na str. 77 w Tab. 3.12: *Zunitaryzowane wartości oceny koncepcji* Autor nie przedstawił sposobu obliczeń unitaryzacji destymulanty: K1, K2, K4.

Na str. 88 jest "Zgodnie z wymaganiami element ten musi być w stanie **przenieś** obciążenie co najmniej 650 N, jednocześnie autor starał się zachować spójną formę z pozostałymi elementami platformy. " Powinno być **przenieść**.

Na str. 93 jest „Natomiast głównym celem przeprowadzonej optymalizacji było zredukowanie masy korpusu. W pierwotnym projekcie szacowana masa korpusu **mailaby** wynosić 6,5 kg, natomiast według wirtualnego modelu, optymalizowany korpus powinien ważyć 5,0 kg." Powinno być **miałaby**.

Na str. 96 Zdanie jest niespójne

"Tutaj ponownie *różnice* w masie pomiędzy elementami fizycznymi i wirtualnymi *związana jest z możliwościami* przypisania wirtualnemu modelowi dokładnych cech materiałowych."

Na str. 98 następujące zdanie jest nielogiczne "Z przeprowadzonych testów wynika, że opracowany układ spełnia wszystkie opisane stawiane w rozdziale 3.4."

Na str. 102 jest "Szacowany zysk w ramach zawodów związany *z zredukowaną* masą łożnika, będzie stanowił istotny element *strategii* dla zespołu." Powinno być *ze zredukowaną, strategii*
Jest „Dla przykładu w przypadku *Kanadyjskiej* rundy zawodów, zespół może liczyć na około 30% dodatkowych punktów *wyzyskanych* w ramach konkurencji, z faktu masy o ponad 30 kg niższej niż regulaminowa waga łożnika”. Powinno być *kanadyjskiej, uzyskanych*

Na str. 103 jest "Zwiększony rozstaw powoduje, że naciski generowane przez platformę nie są skupione na niedużym obszarze powierzchni, co zmniejsza ryzyko zakopania się w osypującej się nawierzchni. Dodatkowo mniejsza masa platformy również *na wpływ* na zjawisko zakopywania się kół w trakcie jazdy". Powinno być *ma wpływ*

Na str. 104 jest "W celu *porównanie* stabilności obu wirtualnych modeli, ze środowiska CAD odczytano położenie środka ciężkości." Powinno być *porównania*

Na str. 108 w Tab. 5.1: Zestawienie wyników analizy stabilności dla obu modeli platformy jest wiersz piąty "Rozstaw *wzdłużny* kół". Powinno być *wzdłużny*

Na str. 110 jest "Dzięki zastosowaniu stałej wartości próbkowania, możliwym jest wyliczenie dokładnej wartości δt , *a co pozwala* na przeliczenie wartości prędkości na korespondujące im wartości przyspieszeń w danej chwili czasu." Powinno być *dokładnej wartości δt , co pozwala*

Jest "zebrane na dystansie 10 m *z średnią prędkością* przejazdu". Powinno być *ze*

Na str. 112 powtórzenia

"Wykorzystując ten sam scenariusz symulacji *uzyskano* wyniki dla modelu platformy *uzyskanego* w wyniku przeprowadzonego procesu optymalizacji."

Na str. 113 Jest podział wyrazu (nazwy własnej) na Rys. 5.11: Wykresy *uzyskanych* przyspieszeń dla czujnika S5 dla zoptymalizowanego modelu platformy *Phoenix III*

Na str. 114 Jest powtórzenie "Oznacza *to to*, że w przypadku nieruchomej platformy"

Styl zdania „*W celu* dokonania dokładniejszego porównania, autor przeprowadził, na *uzyskanych* przebiegach sygnału drganiowego, szybką transformatę Fouriera (FFT ang. Fast Fourier Transform) *w celu* uzyskania widma częstotliwościowo-amplitudowego, które *to* powinno pozwolić na określenie *poszczególne częstotliwości składowe oraz ich amplitudy*.”



Na str. 117 jest "*Wykonania* każdego połączenia śrubowego *jest czasochłonne*, stąd też ograniczenie ich liczby powinno przelożyć się na krótszy czas przygotowania łazika." Powinno być *Wykonanie*

Na str. 119 jest "*Poza dokumentacją platformy efektem przeprowadzonych badań jest opracowanie zbioru metod i narzędzi, które mogą posłużyć do optymalizacji podzespołów platform robotycznych, a które jak zaprezentowano w niniejszej pracy doktorskiej mogą przynieść korzyści w postaci redukcji masy robota, zwiększenie jego stabilności czy poprawa własności eksploatacyjnych.*" Powinno być *zwiększenia, poprawy*

Literatura

Generalnie Autor zachowuje kolejność alfabetyczną i na ogół trzyma się przyjętego formatu zapisu. Zdarzyło się kilka nieścisłości nie wpływających na całość np.: wielkość liter *monte carlo, Technical innovation center, b'eziera, Engineering design optimization, Cambridge university press.*

Na str. 134 jest "*Z wszystkich* przeprowadzonych porównań wynika, że nowa postać konstrukcyjna platformy Phoenix III uzyskuje lepsze wyniki, co powinno się przelożyć na lepsze wyniki w trakcie zawodów." Powinno być *Ze wszystkich*

Na str. 136 Styl "*Dotyczy się to głównie brakiem możliwości odwzorowania takiego samego profilu terenu.*"

Autor konsekwentnie stosuje w treści pracy przyjęte formatowanie tytułów rozdziałów, podrozdziałów, rysunków oraz tabel.

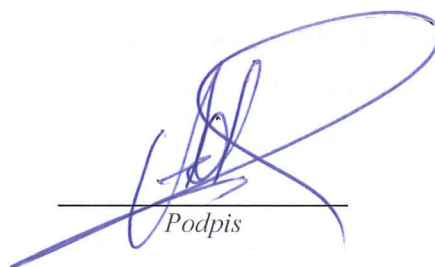
Błędy i drobne niedociągnięcia korektorskie nie wpływają na wartość użyteczną pracy, znajomość tematyki przez Autora jest wysoka, jednakże przy publikacjach pisemnych należy dochować należytej staranności edytorskiej oraz dokładności inżynierskiej w obliczeniach (szczególnie chodzi o zaokrąglenia liczb po przecinku).

6. Podsumowanie i wnioski końcowe

Podsumowując, praca ta stanowi istotny wkład w rozwój mobilnych platform eksploracyjnych, szczególnie w kontekście udziału w zawodach Rover Challenge. Autor przedstawił skuteczne metody optymalizacji konstrukcji, które przyczynią się do poprawy parametrów funkcjonalnych i konstrukcyjnych platformy Phoenix III. Otrzymane rezultaty mogą znaleźć zastosowanie nie tylko w konkurencjach technicznych, ale także w pracy eksploracyjnej i badawczej w trudnych warunkach terenowych. Praca ta stanowi cenne źródło

wiedzy dla inżynierów i konstruktorów zajmujących się rozwijaniem mobilnych platform eksploracyjnych.

Biorąc pod uwagę całość rozprawy można wyrazić opinię, że przedstawione tutaj wyniki mają wartość nie tylko naukową, a co należy szczególnie podkreślić także użyteczną. Uważam, że przedstawiony dorobek badawczo-rozwojowy mgr. inż. Andrzeja JAŁOWIECKIEGO jest wartościowy. W świetle obowiązującej ustawy „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” z dnia 20 lipca 2018 roku (Dz. U. 2018 poz. 1668) wraz z późniejszymi zmianami (Ustawa z dnia 13 stycznia 2023 r. o zmianie ustawy - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce oraz niektórych innych ustaw Dz.U.2023.212, Dz. U. z 2023 r. poz. 742 z dnia 20.04.2023) stwierdzam, że przedłożona rozprawa stanowi podstawę merytoryczną do ubiegania się o stopień doktora nauk technicznych. Stawiam wniosek o dopuszczenie mgr. inż. Andrzeja JAŁOWIECKIEGO do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.



Podpis