

Michał LASAK, Kamil MOSZUMAŃSKI, Maja RUDNICKA,
Tomasz GRZEJSZCZAK
Politechnika Śląska

SYNTEZA HYBRYDOWEGO SYSTEMU STEROWANIA I OPTYMALIZACJA STRUKTURALNA MOBILNEGO ROBOTA EKSPLORACYJNEGO MPER

Streszczenie. Artykuł opisuje projekt łazika MPER (ang. *Multi-Purpose Exploration Rover*), łączący aktywny system samopoziomowania podwozia ze zoptymalizowanym strukturalnie manipulatorem 4DOF. Zastosowanie siłowników liniowych sterowanych algorytmem Bang-Bang z histerezą $\pm 0,5^\circ$ umożliwia stabilizację bazy na nachyleniach do 20° , co eliminuje szkodliwe siły ścinające podczas wiercenia. Dzięki optymalizacji topologicznej i wykorzystaniu druku 3D z kompozytu PCTG-CF10 uzyskano 40% redukcję masy elementów nośnych przy zachowaniu udźwigu 5 kg.

SYNTHESIS OF A HYBRID CONTROL SYSTEM AND STRUCTURAL OPTIMIZATION OF THE MPER MOBILE EXPLORATION ROVER

Summary. This paper presents the MPER (*Multi-Purpose Exploration Rover*), integrating an active self-leveling chassis with a structurally optimized 4DOF manipulator. Linear actuators controlled by a Bang-Bang algorithm with $\pm 0,5^\circ$ hysteresis allow platform stabilization on slopes up to 20° , effectively minimizing shear forces during drilling operations. Topology optimization and 3D printing using PCTG-CF10 composite resulted in a 40% mass reduction while maintaining a 5 kg payload capacity.

1. Wstęp

Współczesna eksploracja ciał niebieskich, takich jak Mars czy Księżyc, ewoluowała od misji opartych wyłącznie na zdalnej obserwacji do złożonych operacji naukowych wymagających bezpośredniej, fizycznej interakcji z otoczeniem. Kluczowym elementem tych misji są mobilne łaziki eksploracyjne, które wykorzystują zaawansowane technologie do przemieszczania się w trudnym, niedostępnym terenie w celu pobierania wartościowych próbek do analizy. Głównym narzędziem umożliwiającym tę interakcję jest ramię manipulatora, które musi spełniać surowe wymagania dotyczące precyzji pozycjonowania przy jednoczesnej minimalizacji masy własnej konstrukcji.

Istotnym wyzwaniem inżynierskim jest prowadzenie precyzyjnych operacji, takich jak wiercenie głębinowe, na powierzchniach nachylonych. Teren planetarny rzadko jest płaski; obecność kraterów, wydm i formacji skalnych stanowi stałe wyzwanie nawigacyjne. W przypadku mechanizmu wiertniczego zamontowanego na sztywno do podwozia łazika, kąt nachylenia platformy bezpośrednio przekłada się na kąt penetra-

cji gruntu. Wiercenie w regolicie pod kątem wprowadza szkodliwe siły boczne, zwane siłami ścinającymi, które mogą prowadzić do zacinania się wiertła, nadmiernego zużycia energii, a nawet katastrofalnej awarii narzędzia. Zdolność do odizolowania orientacji podwozia od nachylenia terenu jest zatem krytycznym wymogiem operacyjnym, pozwalającym na skierowanie pełnej siły nacisku wzdłuż wektora grawitacji.

W niniejszym artykule przedstawiono projekt i implementację łazika MPER (ang. *Multi-Purpose Exploration Rover*), którego koncepcję zilustrowano na rysunku 1. Praca koncentruje się na syntezie aktywnego systemu samopoziomowania podwozia z zaawansowaną optymalizacją strukturalną komponentów wykonanych w technologii druku 3D.



Rys. 1. Koncepcyjny projekt systemu MPER. Aktywne podwozie zostało zaprojektowane w celu stabilizacji centralnej platformy roboczej, na której zamontowano manipulator oraz moduł wiertniczy.

Główne cele badawcze opisane w pracy obejmują:

- **Stabilizację bazy roboczej:** Wykorzystanie czterech niezależnych wahaczy sterowanych siłownikami liniowymi DC do aktywnej korekcji nachylenia platformy.
- **Optymalizację masy:** Zastosowanie technik optymalizacji topologicznej, które pozwoliły na redukcję masy krytycznych komponentów manipulatora o 40% przy zachowaniu wymaganej sztywności strukturalnej.
- **Integrację hybrydowego sterowania:** Połączenie dyskretnej logiki sterowania poziomowaniem z precyzyjnym pozycjonowaniem manipulatora o czterech stopniach swobody (4DOF).

Opracowane rozwiązanie demonstruje, że wykorzystanie nowoczesnych metod wytwarzania przyrostowego oraz algorytmicznego projektowania struktur pozwala na

stworzenie lekkich i wydajnych systemów robotycznych, zdolnych do pracy w ekstremalnych warunkach terenowych bez konieczności stosowania ciężkich komponentów metalowych.

2. Przegląd literatury

Rozwój mobilnej robotyki eksploracyjnej jest ściśle powiązany z ewolucją systemów zawieszenia, które muszą zapewniać stabilność w ekstremalnie trudnym terenie. Tradycyjne rozwiązania, takie jak pasywne mechanizmy typu rocker-bogie, są szeroko opisane w literaturze jako standard dla łazików planetarnych ze względu na ich zdolność do kopiowania nierówności terenu [11]. Niemniej jednak, modele matematyczne i analizy kinematyczne tych układów wykazują ograniczenia w aktywnym utrzymywaniu poziomu platformy roboczej [1]. W literaturze coraz częściej pojawiają się badania nad pasywnymi i aktywnymi systemami gąsienicowymi oraz kołowymi dedykowanymi dla robotów pracujących w terenie zurbanizowanym i naturalnym [4].

Systemy samopoziomujące stanowią kluczowy element stabilizacji nie tylko w robotach mobilnych, ale także w lądownikach księżycowych, gdzie precyzyjne ustawienie bazy jest niezbędne do bezpiecznego osadzenia jednostki na pochyłym gruncie [10]. Wykorzystanie siłowników liniowych w aktywnym zawieszeniu pozwala na skuteczne odizolowanie orientacji podwozia od gradientu terenu [12]. Badania nad stabilnością boczną robotów mobilnych wskazują, że aktywne zawieszenie znacząco redukuje ryzyko wywrócenia się jednostki oraz zmniejsza naprężenia mechaniczne podczas operacji na zboczach [6]. W kontekście sterowania takimi układami, popularne stają się rozwiązania oparte na mikrokontrolerach i systemach wbudowanych o niskim poborze mocy, co jest istotne dla platform edukacyjnych i prototypowych [7]. Bardziej zaawansowane podejścia sugerują wykorzystanie sterowania adaptacyjnego w celu poprawy parametrów dynamicznych zawiesznień półaktywnych i aktywnych [5].

W dziedzinie projektowania manipulatorów dla łazików planetarnych, standardem opisu geometrii wieloosiowych układów pozostaje konwencja Denavita-Hartenberga [3]. Kluczowym wyzwaniem pozostaje optymalizacja stosunku sztywności do masy. Współczesne badania wskazują na optymalizację topologiczną jako skuteczną metodę poprawy niezawodności ramion robotycznych przy jednoczesnej redukcji ich masy [2]. Wykorzystanie metodologii projektowania generatywnego oraz optymalizacji strukturalnej w połączeniu z technologiami wytwarzania przyrostowego (AM) pozwala na tworzenie lekkich struktur o charakterze organicznym, niemożliwych do wykonania metodami tradycyjnymi [8, 15].

Wytwarzanie przyrostowe z polimerów staje się pełnoprawną metodą produkcji w robotyce przemysłowej i kosmicznej, umożliwiając szybkie prototypowanie i optymalizację procesów wytwórczych [16]. Przykładem zaawansowanych systemów operacyjnych dla łazików są modułowe układy zbierania i przechowywania próbek, które integrują precyzyjną mechanikę z zaawansowanym sterowaniem [13]. Analizy oparte na metodzie elementów skończonych (MES) oraz badania modalne są niezbędne do weryfikacji stabilności takich hybrydowych konstrukcji pod obciążeniem [9, 14].

3. Metodologia

W niniejszym rozdziale opisano syntezę systemów sterowania oraz proces projektowania strukturalnego łoża MPER. Metodologia prac opiera się na integracji dyskretnych algorytmów stabilizacji, zaawansowanych technik optymalizacji topologicznej oraz technologii wytwarzania przyrostowego (AM).

3.1. Dyskretna strategia sterowania poziomowaniem podwozia

Głównym zadaniem układu poziomowania jest utrzymanie platformy roboczej w pozycji horyzontalnej względem wektora grawitacji, co jest kluczowe dla minimalizacji sił ścinających podczas wiercenia [12, 10]. System wykorzystuje cztery niezależne siłowniki liniowe DC, tworzące zamknięte łańcuchy kinematyczne, w których siłownik pełni rolę ogniwa o zmiennej długości.

Do wyznaczenia orientacji łoża w przestrzeni wykorzystano 6-osiową jednostkę inercyjną (IMU), umieszczoną w geometrycznym środku podwozia. Ze względu na podatność akcelerometru na szумы wysokoczęstotliwościowe generowane przez silniki trakcyjne, zastosowano filtr komplementarny, wyznaczający estymowany kąt nachylenia wedle zależności:

$$\theta_{est} = \alpha \cdot (\theta_{gyro} + \omega \cdot dt) + (1 - \alpha) \cdot \theta_{accel} \quad (1)$$

gdzie α jest współczynnikiem wagowym (przyjęto 0,98), θ_{gyro} to kąt wyznaczony przez żyroskop, ω – prędkość kątowna, dt – czas próbkowania, natomiast θ_{accel} oznacza kąt nachylenia wyznaczony na podstawie pomiaru składowych wektora grawitacji przez akcelerometr.

Sterowanie siłownikami oparto na zasadzie „Bang-Bang” z histerezą. Algorytm porównuje aktualny błąd nachylenia zadaną strefą martwą (deadband) wynoszącą $\pm 0,5^\circ$. Zastosowanie histerezy jest niezbędne do eliminacji zjawiska oscylacji układu wokół punktu równowagi (tzw. hunting). W przypadku osiągnięcia założonej tolerancji, system przechodzi w stan *Hold State*, w którym zasilanie silników zostaje odłączone. Dzięki wykorzystaniu śrub trapezowych o wysokim tarcu, siłowniki utrzymują pozycję mechanicznie, co znacząco zwiększa efektywność energetyczną platformy mobilnej.

3.2. Optymalizacja topologiczna i nowoczesne metody produkcji

W celu spełnienia rygorystycznych wymagań dotyczących masy w misjach eksploracyjnych, podzespoły manipulatora zostały poddane optymalizacji topologicznej. Proces ten polega na algorytmicznym wyznaczaniu najbardziej efektywnego rozkładu materiału w zadanej przestrzeni projektowej przy uwzględnieniu założeń obciążeniowych i więzów konstrukcyjnych.

Zastosowana metoda pozwoliła na automatyczne usuwanie materiału z obszarów o najniższych naprężeniach, tworząc struktury o charakterze organicznym, niemożliwe do wykonania metodami ubytkowymi. Wyniki optymalizacji, zweryfikowane przy pomocy metody elementów skończonych (MES), wykazały redukcję masy komponentów o 25–40% przy jednoczesnym obniżeniu naprężeń w punktach krytycznych o 41%.

W procesie produkcji wykorzystano technologię FDM (ang. *Fused Deposition Modeling*). Kluczowe elementy nośne oraz uchwyty siłowników wykonano z kompozytu PCTG-CF10 (polimer wzmocniony 10% włóknem węglowym), który charakteryzuje się wyjątkowym stosunkiem sztywności do masy oraz wysoką udurowalnością. Zastosowa-

nie druku 3D umożliwiło także integrację wewnętrznych kanałów na okablowanie oraz produkcję monolitycznych obudów przekładni.

3.3. Architektura hybrydowego manipulatora (4DOF)

Manipulator łazika MPER został zaprojektowany jako struktura o 4 stopniach swobody (4DOF) z pięcioma przegubami. Wybór 4DOF zamiast cięższej konfiguracji 6DOF pozwolił na skrócenie łańcucha kinematycznego, co bezpośrednio redukuje bezwładność układu i niepożądane ugięcia ramion.

Do opisu geometrii układu wykorzystano konwencję Denavita-Hartenberga [3]. Układ bazowy (zerowy) manipulatora $O_0x_0y_0z_0$ jest sztywno związany z geometrycznym środkiem platformy roboczej, pokrywając się z punktem pomiarowym czujnika IMU. Kolejne układy współrzędnych przypisano poszczególnym członom zgodnie z klasyczną konwencją D-H, co ułatwia rozwiązanie zadania kinematyki odwrotnej. Sztywna orientacja bazy manipulatora względem układu pomiarowego IMU pozwala na bezpośrednią kompensację nachylenia terenu w algorytmie pozycjonowania ramienia. W procesie sterowania zaimplementowano model kinematyki odwrotnej, wyznaczający nastawy silników dla pożądanej pozycji efektora. System charakteryzuje się hybrydową architekturą sterowania ruchem, wykorzystującą:

- Trzy silniki krokowe (NEMA 17) do pozycjonowania głównych osi ramienia.
- Dwa serwomechanizmy do sterowania końcówką roboczą (efektorem).

System sterowania koncentruje się na aktywnej stabilizacji poziomu bazy oraz precyzyjnym pozycjonowaniu członów manipulatora, podczas gdy napęd trakcyjny realizowany jest niezależnie. Kluczowym elementem układu napędowego są w pełni wydrukowane w 3D przekładnie, dobrane pod kątem optymalnego stosunku momentu obrotowego do masy. W pierwszym stopniu ramienia zastosowano wielostopniową przekładnię planetarną z materiału PETG o przełożeniu 1:125. Drugi stopień wykorzystuje polimerową przekładnię cykloidalną o przełożeniu 1:40. Integracja tych wysokosprawnych mechanizmów pozwoliła na stabilizację ładunku o masie 5 kg przy pełnym wysięgu manipulatora, całkowicie eliminując potrzebę stosowania ciężkich, metalowych przeciwwag.

4. Wyniki i weryfikacja

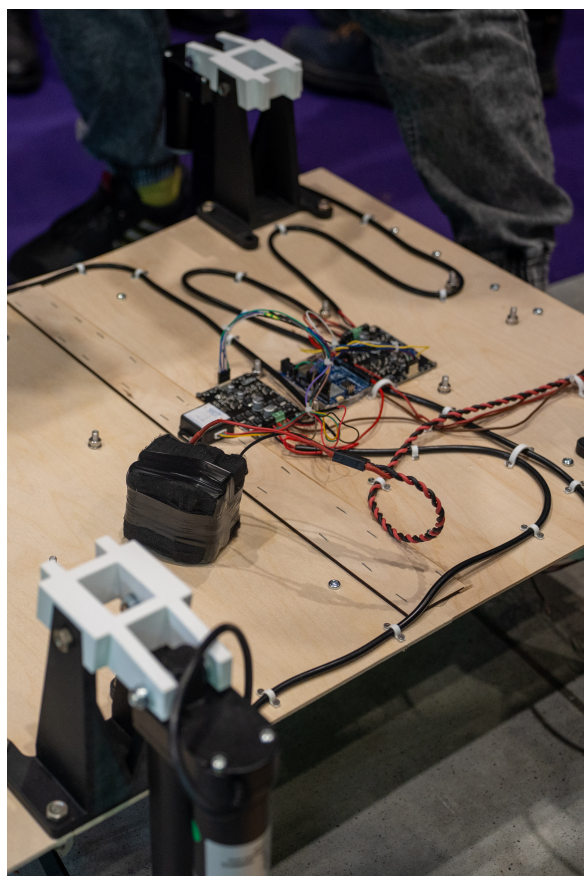
W celu walidacji założeń projektowych oraz skuteczności algorytmów sterowania, prototyp łazika MPER został poddany testom funkcjonalnym w warunkach laboratoryjnych. Badania koncentrowały się na dwóch obszarach: stabilizacji platformy na nachylonym terenie oraz wytrzymałości zoptymalizowanej struktury manipulatora.

4.1. Eksperymentalna analiza układu poziomowania

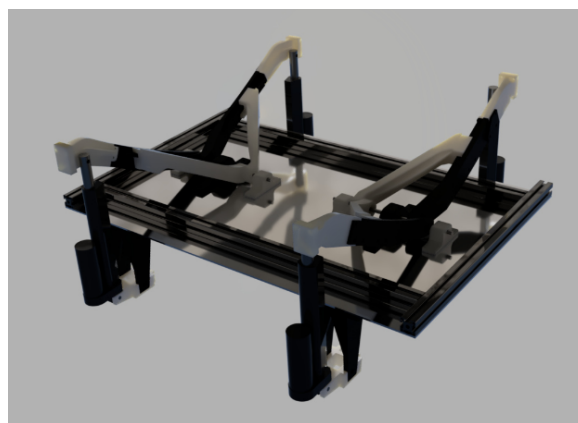
Proces weryfikacji algorytmu poziomowania przeprowadzono na rampie o regulowanym nachyleniu w zakresie 0° – 25° . Zastosowana logika Bang-Bang z histerezą $\pm 0,5^\circ$ pozwoliła na skuteczne utrzymanie poziomu platformy.

Kluczowe obserwacje z testów:

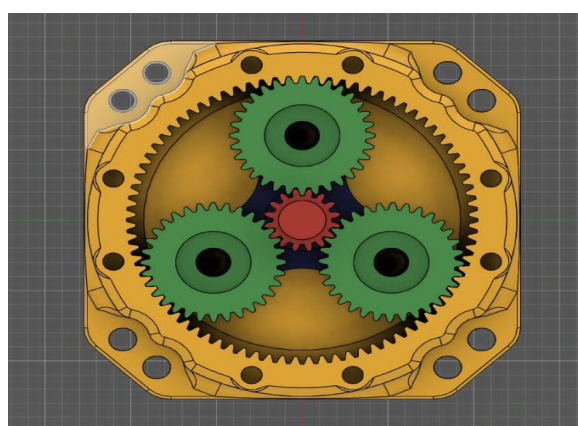
- **Zakres kompensacji:** System był w stanie w pełni wypozymować bazę przy nachyleniu terenu do ok. 20° . Powyżej tej wartości ograniczeniem stał się maksymalny skok siłowników liniowych wynoszący 150 mm.



(a) Fizyczna platforma testowa podwozia łazika MPER. Widoczny układ sterowania z jednostką IMU, sterownikami Cytron MDD10A oraz siłownikami liniowymi w wydrukowanych wspornikach, wykorzystany do eksperymentalnej weryfikacji algorytmu samopoziomowania.



(b) Widok podwozia łazika ilustrujący niezależną konfigurację wahaczy sterowanych siłownikami.



(c) Wielostopniowa przekładnia planetarna wykonana z materiału PETG.

Rys. 2. Projekt i realizacja platformy

- **Stabilność i udźwig:** Układ napędowy oparty na sterownikach Cytron MDD10A bez trudności podnosił masę prototypu (ok. 10 kg). Dzięki zastosowaniu śrub trapezowych w siłownikach, po osiągnięciu poziomu system przechodził w stan wstrzymania (Hold State) bez konieczności dalszego poboru energii.
- **Sztywność konstrukcji:** Zastosowane wsporniki wykonane z kompozytu PCTG-CF10 (polimer wzmocniony włóknem węglowym) nie wykazały odkształceń podczas pracy pod pełnym obciążeniem.

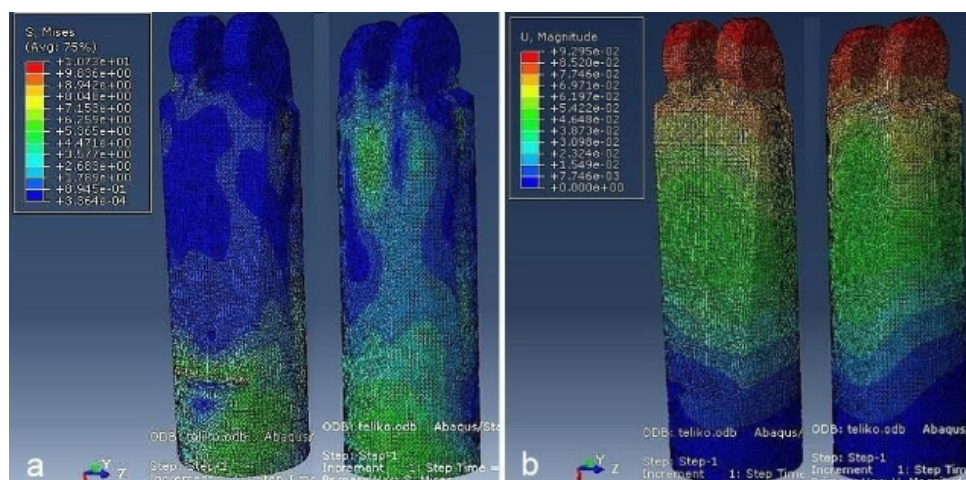
Konstrukcję podwozia z widocznym układem wahaczy i siłowników przedstawia rysunek 2b, natomiast fizyczną platformę testową wykorzystaną do eksperymentalnej weryfikacji algorytmu samopoziomowania zaprezentowano na rysunku 2a.

4.2. Weryfikacja optymalizacji manipulatora

W ramach prac nad manipulatorem 4DOF (ang. *Degrees of Freedom*) przeprowadzono analizy MES oraz testy fizyczne wydrukowanych podzespołów. Zastosowanie optymalizacji topologicznej pozwoliło na redukcję masy członów o ok. 25–40% przy jednoczesnym obniżeniu naprężeń w punktach krytycznych o maksymalnie 41%.

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki symulacji dla najbardziej obciążonego stanu pracy. Potwierdzono, że manipulator jest w stanie stabilnie operować ładunkiem o masie

5 kg przy pełnym wysięgu. Wysoki moment obrotowy niezbędny do tego zadania uzyskano dzięki autorskim przekładniom planetarnym (rys. 2c) o przełożeniu 1:125 oraz cykloidalnym o przełożeniu 1:40, wykonanym w całości w technologii druku 3D.



Rys. 3. Analiza rozkładu naprężeń von Misesa w zoptymalizowanym członie manipulatora pod obciążeniem 5 kg.

4.3. Podsumowanie wyników

Zastosowanie hybrydowego sterowania oraz zaawansowanej optymalizacji topologicznej umożliwiło stworzenie lekkiego i sprawnego systemu eksploracyjnego. Tabela 1 podsumowuje kluczowe parametry uzyskane podczas weryfikacji.

Tabela 1

Zestawienie parametrów technicznych prototypu MPER

Parametr	Wartość
Maksymalny kąt samopoziomowania	20°
Dokładność poziomowania (histereza)	$\pm 0,5^\circ$
Masa udźwigu manipulatora (pełny wysięg)	5 kg
Redukcja masy dzięki optymalizacji	do 40%

Praca została zrealizowana przy wsparciu finansowym Fundacji ORLEN im. Ignacego Łukasiewicza w ramach programu „TURBOgrant” (DKN/00059/2025).

LITERATURA

1. Alexandrov A.: Mathematical model and kinematic analysis of rocker-bogie suspension design for ugv applications, Bulgarian Academy of Sciences, 2025.
2. Alshihabi M., Ozkahraman M., Kayacan M. Y.: Enhancing the reliability of a robotic arm through lightweighting and vibration control with modal analysis and topology optimization, Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2025 vol.53, (3), p. 1950–1974.

3. Corke P. I.: A simple and systematic approach to assigning denavit–hartenberg parameters, *IEEE Transactions on Robotics*, 2007 vol.23, (3), p. 590–594.
4. Gao J., Li Y., Jin J., Jia Z., Wei C.: Design, analysis and control of tracked mobile robot with passive suspension on rugged terrain, *Actuators*, 2025 vol.14, (8), p. 389.
5. Jain S., Nigam M. J.: Adaptive control of semi-active suspension systems in autonomous ground vehicles, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022 vol.23, (11), p. 21157–21167.
6. Jiang H., Xu G., Zeng W., Gao F., Chong K.: Lateral stability of a mobile robot utilizing an active adjustable suspension, *Applied Sciences*, 2019 vol.9, (20), p. 4410.
7. Kim D., Lee S.: Design of a modular terrain-adaptive rover using low-cost embedded systems, *IEEE Access*, 2022 vol.10, p. 56213–56224.
8. Kumaran M., Senthilkumar V.: Generative design and topology optimization of analysis and repair work of industrial robot arm manufactured using additive manufacturing 2technology, In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* volume 1012 IOP Publishing, 2021.
9. Liu Z., others : Comparison of finite element and experimental modal analysis of multi-joint flexible robotic arm, In: *2017 International Conference on Mechanical, System and Control Engineering (ICMSC)* IEEE, 2017.
10. Manca R., Puliti M., Circosta S., Galluzzi R., Salvatore S.: Design and optimization of an active leveling system actuator for lunar lander application, *Actuators*, 2022 vol.11, (9), p. 263.
11. Rajath S., Shivakumar N. D.: Rovers with rocker-bogie mechanisms: A review of progress and innovations in design, manufacturing, and control, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C*, 2024.
12. Ravi S., Krishnan V.: Self-leveling suspension design for autonomous exploration rovers using linear actuators, *IEEE Access*, 2023 vol.11, p. 67214–67226.
13. Rudnicka M., Lasak M., Puchała I., Bartosz P., Bereta D., Myszor D.: Sample collection and containment system for a compact planetary exploration rover, In: *International Students Scientific Conference TalentDetector2024_Summer Gliwice-Szczyrk*, Poland 2024.
14. Santosh L. P. S., others : Design and analysis of a robotic arm under different loading conditions using fea simulation, *Materials Today: Proceedings*, 2022 vol.50, p. 759–765.
15. Tsirogiannis E., Vosniakos G.-C.: Redesign and topology optimization of an industrial robot link for additive manufacturing, *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, 2019 vol.17, (3), p. 415–424.
16. Walia K., Khan A., Breedon P.: Polymer-based additive manufacturing: Process optimisation for low-cost industrial robotics manufacture, *Polymers*, 2021 vol.13, p. 2809.