

РОБОТИЗОВАНА КОЛІСНА ПЛАТФОРМА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАНЕТИ МАРС

І. М. Ніколенко, О. Р. Онисько*, В. Б. Коней

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
e-mail: onysko.oleg@gmail.com

Дослідження поверхні Марсу за допомогою рухомих колісних механізмів (роверів) є доволі актуальною темою сьогодення і найближчого майбутнього. Попередні дослідження поверхонь Місяця і Марса уже дали великий досвід щодо конструювання таких дослідницьких саморухомих платформ. Проаналізовано переваги і недоліки конструкцій відомих роверів. Увагу сконцентровано на ключових механічних елементах марсохода, а саме, на корпусі, підвісці, колесах і маніпуляторі, який є його складовою. Для виготовлення основних частин запропоновано дюралюміній, який є одним із найлегших конструкційних матеріалів, що здатний витримувати криогенні умови Марса. Недостатню міцність дюралюмінію компенсовано застосуванням амортизаторів та більш гнучким керуванням підвіскою з використанням додаткових двигунів. Маніпулятор і підвіска забезпечують розширену адаптивну функціональність, у тому числі пов'язану з автономним ремонтом і резервуванням надійності. Незалежна підвіска уможливорює значний вертикальний хід коліс, що разом із гібридними електромагнітними амортизаторами-двигунами та додатковими ступенями вільності підвіски дозволить полегшити подолання складних перешкод, зменшити ударно-втомні навантаження і забезпечить додаткову функціональність підвіски. При цьому розміри ємності корпусу є достатніми для розміщення на ньому елементів живлення і дослідницької апаратури, запасних вузлів та вузлів, що розширюють функціональність маніпулятора і підвіски. Проведений морфологічний аналіз показує, що існують комбінації конструкційних рішень, які можуть максимізувати адаптивність вузлів марсохода та ефективно забезпечити резервування надійності шасі.

Ключові слова: марсохід, підвіска, амортизатор, маніпулятор, дюралюміній, адаптивність, резерв, надійність.

In the present and near future, the use of mobile wheeled systems (rovers) to explore the surface of Mars is a matter of considerable relevance. Extensive experience in designing such exploratory automobile platforms has already been gained from previous explorations of the Moon and Mars landscapes. The designs of well-known rovers are examined for their benefits and drawbacks. The main mechanical components of the rover — its body, suspension, wheels, and manipulator — are the center of attention. Duralumin is proposed for the manufacture of the main parts, which is one of the lightest structural materials that can withstand the cryogenic conditions of Mars. The insufficient strength of duralumin is compensated by the use of shock absorbers and more flexible suspension control using additional engines. The manipulator and suspension provide extended adaptive functionality, including that associated with autonomous repair and reliability redundancy. Independent suspension enables significant vertical travel of the wheels, which together with hybrid electromagnetic shock absorbers-motors and additional degrees of freedom of the suspension will make it easier to overcome complex obstacles, reduce shock and fatigue loads and provide additional functionality of the suspension. At the same time, the housing capacity's dimensions are adequate to hold power cells, research apparatus, spare parts, and components that increase the manipulator and suspension's usefulness. The morphological study demonstrates that some design alternatives can successfully provide redundancy of the chassis reliability while optimizing the rover units' adaptability.

Keywords: rover, suspension, shock absorber, manipulator, duralumin, adaptability, reserve, reliability.

Вступ

Інтенсивний розвиток мехатроніки та робототехніки багато в чому завдячує багаторічному досвіду вчених та інженерів, які зайняті розробкою, виготовленням та експлуатацією космічних апаратів та засобів дослідження поверхні Місяця та планет. Такі рухомі засоби називають роверами, а найпопулярнішими з них є запроєктовані, виготовлені та навіть уже експлуатовані марсоходи і місяцеходи. З точки

зору механіки, такі апарати є цікавими насамперед конструкцією ходової частини та приладового контейнера, які, вочевидь, виробляють із легких конструкційних матеріалів. У цій статті основна увага приділена аналізу конструкції відомих планетоходів і розробці оригінального колісного шасі для рухомої роботизованої платформи марсохода.

Аналіз існуючих публікацій щодо рухомих апаратів для дослідження поверхонь Місяця та Марса

Ранні апарати для дослідження поверхонь планет не були мобільними [1, 2]. Першим колісним апаратом для дослідження іншої планети став місяцехід «Апарат 8ЕЛ» [2, 3], доставлений на поверхню супутника Землі в 1970 році (рис. 1). Створена автоматична самохідна машина була поєднанням космічного корабля і позашляховика. До його двох основних частин входило восьмиколісне шасі та герметична приладова ємність. Усі вісім коліс були із власними електродвигунами. Ємність мала форму конуса, причому верхня основа конуса, яка служила радіатором-охолоджувачем для відведення тепла, мала більший діаметр, аніж нижня. Під час місячної ночі радіатор зачинявся верхньою кришкою, внутрішня поверхня якої обладнувалася сонячними фотоелементами, які забезпечували підзарядку батареї упродовж місячного дня. Ця сонячна панель для оптимізації освітлення оберталася в діапазоні 0-180 градусів відносно місячного горизонту [2]. Маса ровера-місяцехода становила 756 кілограмів, а довжина – 4,42 метра. Він працював на поверхні Місяця до 29.11.1971.



Рисунок 1 – Загальний вигляд місяцехода Апарат 8ЕЛ [4]

По завершенню успішної місії першого місяцехода з'явилися інші інноваційні проекти. Успішні висадки на Місяць та тривалі подорожі його ландшафтами надихнули наукову спільноту до моторизованого дослідження поверхні «Червоної планети». Освоєння поверхні Марса з температурним режимом від -142°C до $+20^{\circ}\text{C}$ стало пріоритетним завданням, оскільки всі марсоходи повинні мати можливість працювати у всьому кліматичному діапазоні. На користь застосування легкосплавних конструкцій пра-

цює сила тяжіння планети Марс, яка становить 0,38 у порівнянні із земною. Проте відстань до Марсу від Землі коливається від 56 до 400 мільйонів кілометрів. Ця планета також схильна до високого рівня іонізуючої радіації та інтенсивних піщаних бур. Вперше на Марсі побував ровер Sojourner [3, 5, 6] (рис. 2).



Рисунок 2 – Загальний вигляд марсохода Sojourner [7]

Посадку Sojourner на поверхню планети було здійснено в 1997 році за програмою Mars Pathfinder [5, 6]. Його маса становила 11,5 кг, а розміри – $0,65 \times 0,48 \times 0,3$ (м). Марсохід був розроблений для місії 7-сол (сол – марсіанський день), однак функціонував він 83 марсіанські доби. У той момент марсохід віддалився від станції приблизно на 100 метрів. Він мав 11 двигунів постійного струму. Шість з них застосовувалися для обертання коліс діаметром 13 см, чотири – для задання напрямку руху, і один – для переміщення спектрометра. Ровер був здатний без перекидання здійснювати /нахил на 45° та долати перешкоди висотою до 20 см.

Найвідомішим апаратом, який сів на поверхню Марса, вважається Curiosity (рис. 3) [8, 9].



Рисунок 3 – Загальний вигляд марсохода Curiosity [9]

Цей робот-марсохід був виготовлений у рамках програми NASA Mars Science Laboratory (MSL). Його запустили з мису Канаверал 26 листопада 2011 року о 10:02 ранку на борту космічного корабля Mars Science Laboratory [8]. Посадка відбулася у кратері Гейл на Марсі 6 серпня 2012 року о 5:17 ранку. Основною метою дослідження було встановити, чи кратер, в якому здійснив посадку марсохід, був придатним для життя в минулому [9]. Щоб з'ясувати це, марсохід зібрав зразки гірських порід, ґрунту та атмосфери для аналізу на борту [9]. Великі розміри Curiosity (як у легкового автомобіля) дали змогу помістити значний арсенал наукового обладнання та пристроїв, а саме: лазер для випаровування та дослідження невеликих ділянок гірських порід, бур для збору порошкоподібних зразків гірських порід, 17 відеокамер спостереження та інше [9].

Шасі марсоходів виготовляють зі сплавів алюмінію і титану. Такі марсоходи, як Curiosity, використовують кінематичну схему підвіски «Rocker-bogie» [10, 11, 12] з шістьма колесами, які мають незалежні електродвигуни. Ця схема дозволяє долати високі перешкоди, рівномірно розподіляє навантаження на колеса, і навіть на крутих схилах та є надійною. Два передні і два задні колеса можуть повертатися, що дозволяє марсоходу виконувати повороти на місці. Амортизацію алюмінієвих коліс забезпечують вигнуті титанові спиці. Шість електродвигунів і спеціальне програмне забезпечення керування ними забезпечують резервування надійності. Однак ця підвіска не призначена для високої швидкості руху, має значну вагу та більш складна у керуванні. Особливість конструкції підвіски, недостатня амортизація і наявність гострих каменів на шляху призвело до того, що алюмінієві колеса зносилися і зруйнувалися від втоми [13]. Експлуатація Curiosity показала необхідність планування маршруту і акуратного керування, потребу збільшити рівень адаптивності, зокрема, передбачити можливість безпроблемно рухатись заднім ходом [13]. Конструкція колеса повинна бути одночасно і легкою і зносостійкою, а також витримувати удари. Для цього необхідна його параметрична оптимізація з використанням FEA. Варто навіть розглянути можливість автономної заміни зношених коліс.

Частково це було враховано в наступних конструкціях. Наприклад Perseverance має більш міцні колеса та більшу функціональність маніпулятора [14]. Загалом існує чимало проблем проєктування надійних платформ таких роботів, і їх намагаються вирішити різними ме-

тодами. Такі проблеми пов'язані зі функціями «пробудження» та «засинання» [15], контактом коліс з ґрунтом [16], новими видами підвісок [17], амортизацією підвіски [18], розробкою і тестуванням шасі шляхом симуляції [19], механізмами резервування надійності шасі [20]. Недоступність марсохода для обслуговування і ремонту вимагає ефективних методів забезпечення і резервування надійності. Перспективними можуть бути такі рішення, як запас міцності відповідальних деталей та їхнє паралельне резервування, наявність додаткових двигунів, адаптивні системи, що змінюють конфігурацію або призначення, наявність механізмів для перемикання руху між справними і несправними ланками [20].

Постановка завдання

1. Космічне транспортування марсохода на понад 56 млн. км диктує застосування для основних його частин легкосплавних конструкційних матеріалів, найлегшими із яких є, вочевидь, сплави на основі алюмінію. Недостатню міцність цих матеріалів потрібно компенсувати додатковими конструкторськими рішеннями.

2. Рельєф Марса є доволі складним, тому підвіска повинна бути енергоємною і незалежною, кожне колесо повинно мати окремий рушій для високої прохідності. З метою зменшення ударно-втомних навантажень на колесо необхідно продумати ефективну систему амортизації.

3. Невід'ємною частиною марсоходу повинен бути маніпулятор для переміщення досліджуваних об'єктів. Маніпулятор повинен бути довшим за сам марсохід, щоб можна було дістатися до об'єктів в щілинах і заглибленнях. Функціональність маніпулятора потрібно максимально розширити, у тому числі для резервування надійності.

4. Корпус платформи повинен мати достатній об'єм, щоб у ньому розмістити елементи живлення та дослідне приладдя з максимально адаптивним його використанням.

5. Необхідно ґрунтовно проаналізувати методи резервування надійності шасі марсохода та вибрати найбільш перспективні.

Виклад основного матеріалу

Вибір марки конструкційного матеріалу для головних частин рухомої платформи. Запропоновано для основних конструкційних елементів застосувати дюралюміній марки Д16Т [21] з таким хімічним складом:

- алюмінію (Al) – від 90,9 до 94,7%;
- міді (Cu) – від 3,8 до 4,9%;

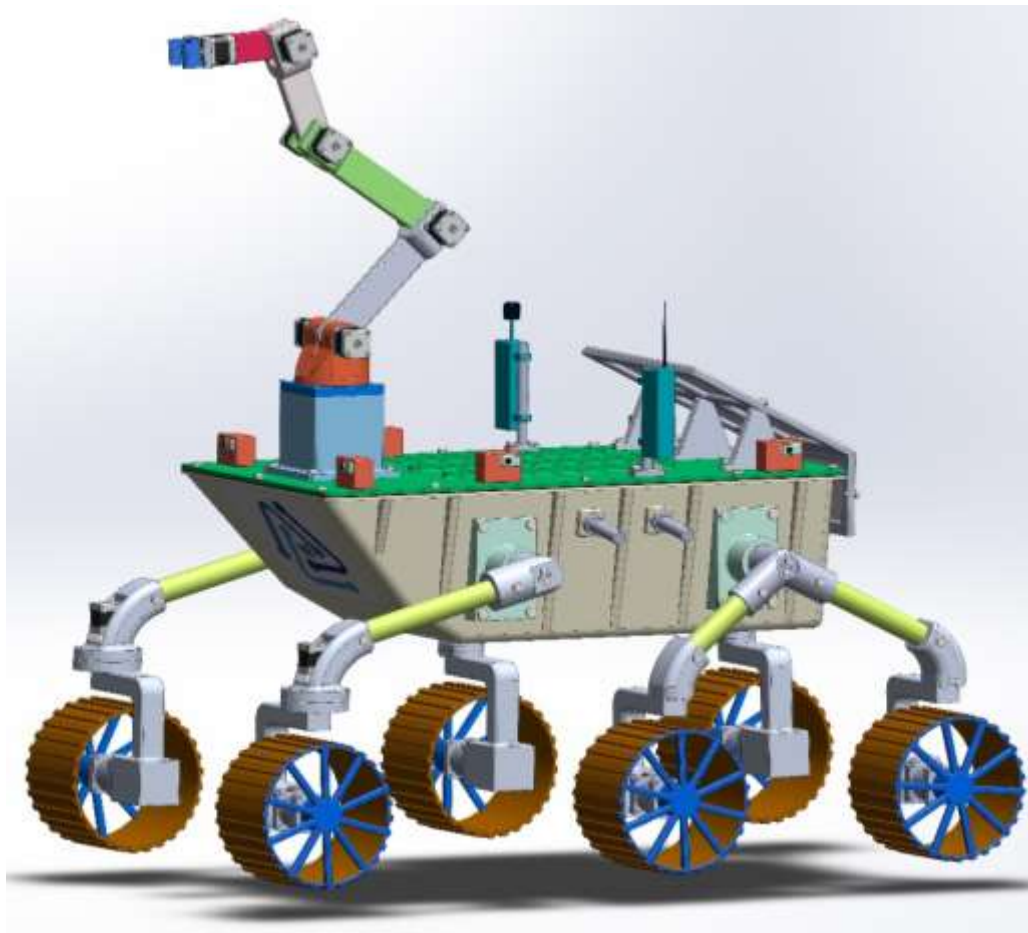


Рисунок 4 – Загальний вигляд марсохода NI

- магнію (Mg) – від 1,2 до 1,8%;
- марганцю (Mn) – від 0,3 до 0,9%;
- заліза (Fe) – трохи більше 0,5%;
- кремнію (Si) – трохи більше 0,5%;
- цинку (Zn) – до 0,25%;
- титану (Ti) – трохи більше 0,15%;
- хрому (Cr) – до 0,1%;
- домішок – до 0,15%.

У Д16Т аналогів імпортного виробництва та близьких за параметрами сплавів багато: Швейцарія – Al4Cu1.2Mg (стандарт SNV); США – AA2124 чи 2024; Німеччина – сплави AlCuMg2 або 3.1355 (стандарт DIN чи WNr); Італія – P-AlCu4.4MgMn (UNI); ЄС – ENAW-2024 або ENAW-AlCu4Mg1 (стандарт EN); Франція – 2024 або A-U4GI (AFNOR); Inter – 2024 або AlCuMg1 (ISO); Польща – AlCu4Mg2 (стандарт PN); Чехія – 424203 (стандарт CSN); Австрія – AlCuMg2 (стандарт ONORM).

Алюміній Д16Т є термозміцненим конструкційним матеріалом. Сплав проходить процедуру природного старіння ще на етапі виготовлення заготовок. Для криогенних умов експлуатації Д16Т володіє непоганою міцністю і опірністю деформаціям. Матеріал пластичний, має низьку електропровідність та теплопровід-

ність. Для зварювання не призначений, але піддається точковому способу зварювання для невідповідальних конструкцій. Основний недолік – невелика антикорозійна стійкість. Вона частково нівелюється плакуванням, анодуванням та іншими способами захисту. Алюмінієвий сплав Д16Т обробляється різанням, піддається куванню та іншим способам обробки.

Опис конструкції марсоходу. Загальна маса розробленої рухомої платформи для дослідження Марса складає 69 кілограмів 565 грамів. Колісна база – 1260x768 (мм). Висота ровера (без маніпулятора) сягає 580 мм (рис. 4). Маніпулятор з чотирма осями між ланками має вертикальну вісь повороту і поворотний схоплювач.

Система амортизації складається із чотирьох окремих механізмів, кожен із яких містить газовий амортизатор та важіль, прикріплений торцем до валу підвіски. Задля герметичності механізми амортизації розміщені усередині корпусу (рис. 5).

Колеса на стійках кріпляться до шарнірів, які, у свою чергу, кріпляться до валів, що входять у корпус (рис. 6).

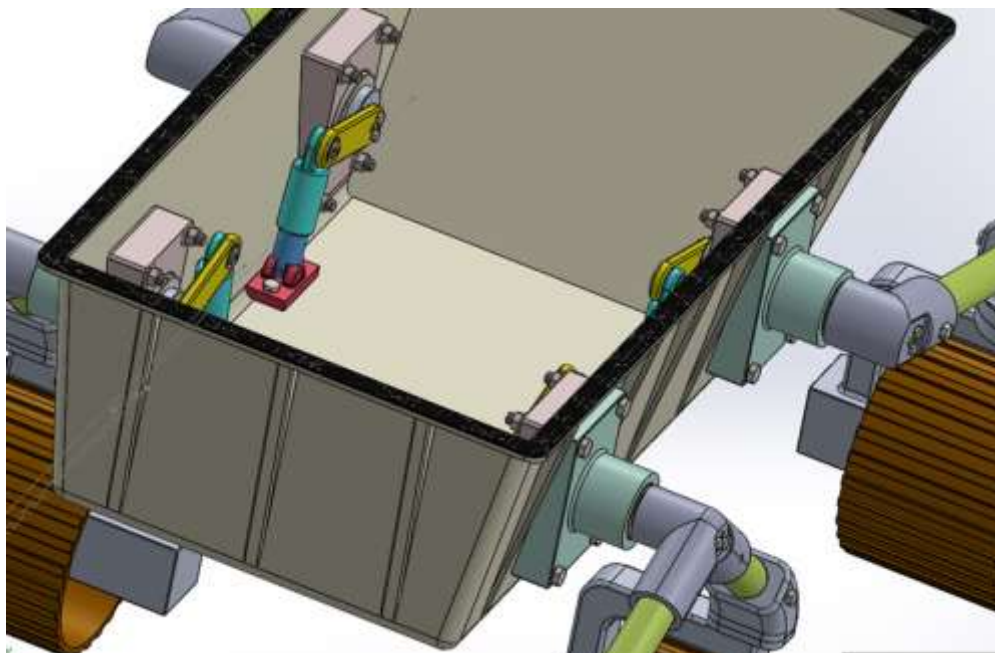


Рисунок 5 – Система амортизації рухомої платформи

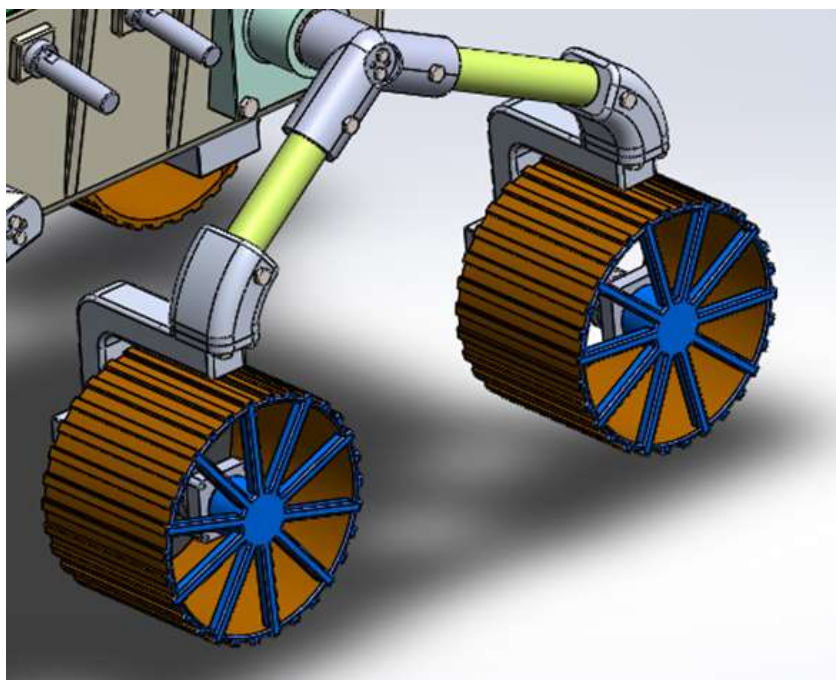


Рисунок 6 – Система шарнірного кріплення коліс рухомої платформи

Осьовий хід амортизатора (40 мм) і важільно-шарнірна система забезпечують вертикальний хід колеса 112 міліметрів (рис. 7).

Кріпильні болти М8х16 класу 5 забезпечують необхідні надійність з'єднання підвіски до несучого корпусу (рис. 8).

Перша і друга ланки маніпулятора однакові й мають довжину 275 міліметрів. Третя ланка коротша від попередньої та має довжину 205 мм. Крайня четверта ланка є найкоротшою і разом із монтажною платформою пристрою для захоплювання має довжину 104 мм (рис. 9).

Такий варіант конструкції з поступовим зменшенням довжини ланок запропоновано для того, щоб при навантаженні пристрою для захоплювання на нижню вісь не виникало надмірного плеча навантаження, і щоб кожен двигун давав максимальний крутний момент.

Морфологічний аналіз способів резервування надійності. Нижче проаналізовано такі рішення для резервування надійності марсохода як: розширення функціональності маніпулятора (А) і підвіски (Б), додаткові двигуни (В), амортизатори підвіски (Г), база запасних вузлів

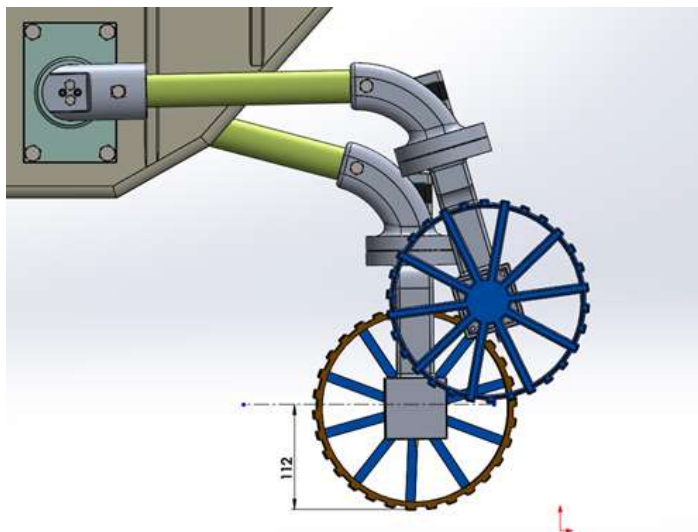


Рисунок 7 – Максимальний вертикальний хід колеса

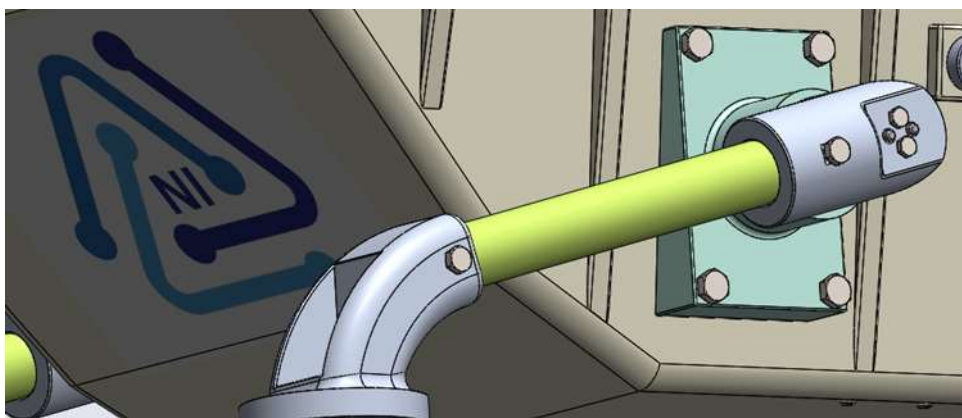


Рисунок 8 – Кріплення передньої колісної шарнірної підвіски

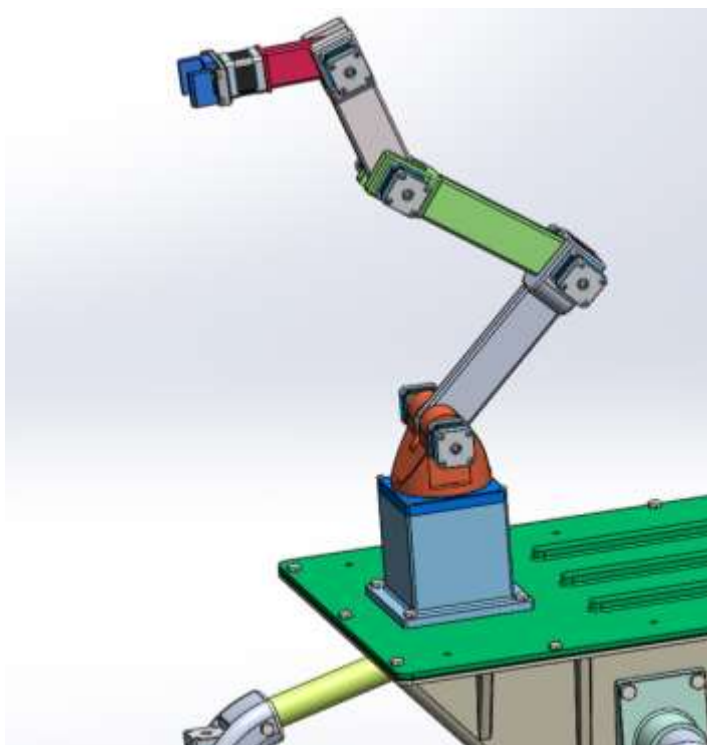


Рисунок 9 – Загальний вигляд маніпулятора

та додаткових інструментів (Д), яка може бути стаціонарною, або рухатись з марсоходом. З метою виявлення перспективних варіантів побудовано матрицю (таблиця 1) з їхніми комбінаціями для морфологічного аналізу.

Таблиця 1 – Матриця для морфологічного аналізу

	А	Б	В	Г	Д
А	1	2	3	4	5
Б		6	7	8	9
В			10	11	12
Г				13	14
Д					15

Розширення функціональності маніпулятора (А). З точки зору резервування надійності, цікавим є використання маніпулятора для зміни конфігурації підвіски (2), автономного ремонту або заміни її компонентів (5). Це потребує запасу ресурсу маніпулятора, збільшення ступенів вільності (3) або збільшення кількості маніпуляторів (1).

Розширення функціональності підвіски (Б). Підвіски можуть мати додаткові ступені вільності з додатковими приводами (7). Наприклад, можна забезпечити обертання коліс навколо осі підвіски (7). Це дозволяє працювати їм як додаткові маніпулятори (2, 6), виконувати перестановку зношених коліс або заміну коліс на запасні (9, 12), покращити пересування нерівною поверхнею. Для розвертання на місці задні колеса теж повинні самостійно повертатись (7). Існує цікава можливість одночасної роботи кількох маніпуляторів (2+6+7), тобто головного і утворених шляхом зміни функціональності підвісок. Це дозволить виконувати складні операції, пов'язані з автономним ремонтом вузлів - складання, різання, зварювання або паяння.

В описаній вище конструкції в основі підвіски знаходиться амортизатор (Г). Наявність крокового двигуна в основі підвіски (В) дозволяє долати значно вищі перешкоди, а також змінювати функціональність підвіски (7, 12). Двигун може повертати ланки з метою: зміни міжосьової відстані між колесами, висоти корпусу, нахилу корпусу, перемикання у режим переміщення на чотирьох колесах.

Загальним недоліком цих рішень може бути збільшення маси конструкції. Але об'єднання функціональності двигуна і електромагнітного амортизатора (11) дає додаткові переваги і майже не збільшує масу. Кроковий двигун може виконувати функції електромагнітного демпфера [22]. Коли робот пересувається,

то він працює в режимі демпфера. Коли робот нерухомий, то він може використовувати режим двигуна. Така функціональність потребує сенсора кута і швидкості повороту, спеціального контролера двигуна і програми, які адаптивно змінюють гальмівний момент, шляхом подачі відповідного струму в обмотки. Це вимагає додаткової витрати електроенергії. Додатковою проблемою є те, що такий вузол є «вузьким місцем». У разі його відмови рух марсохода стане неможливим. Це потребує забезпечення його надійності, або переходу підвіски на інший спосіб амортизації у разі його відмови.

Висновки

1. Пересувна платформа виконана із дюралюмінію і разом із маніпулятором має масу 80 кг, що майже у 8 разів менше, ніж у місяцеходу Апарат 8ЕЛ. Недостатню міцність дюралюмінію можна компенсувати застосуванням амортизаторів та більш гнучким керуванням підвіскою з використанням додаткових двигунів.

2. Підвіска рухомої платформи виконана незалежною для двох пар задніх коліс і для кожного із передніх. Вільний вертикальний хід передніх коліс становить 112 мм, що уможливає подолання перешкод під кутом до 45°. Разом з гібридними електромагнітними амортизаторами-двигунами та додатковими ступенями вільності підвіски це дозволить полегшити подолання складних перешкод, зменшити ударно-втомні навантаження і забезпечити додаткову функціональність підвіски.

3. Маніпулятор з 5 ступенями вільності і поворотом навколо вертикальної осі є довшим за сам марсохід, що дозволяє схоплювати об'єкти в щілинах і заглибленнях, а також мати розширену функціональність, у тому числі пов'язану з автономним ремонтом і резервуванням надійності.

4. Ємність спроєктованого корпусу марсохода є достатньою для розміщення елементів живлення, дослідного приладдя, запасних вузлів та вузлів, що розширюють функціональність маніпулятора і підвіски.

5. Проведений морфологічний аналіз показує, що існують конструкційні рішення, які можуть максимізувати адаптивність марсоходу та ефективно забезпечити резервування надійності.

Література / References

1. Every spacecraft on Mars – comparison [Video] URL: <https://youtu.be/ER6EO4B7V68?si=XqSnZUgTiKxntKQh> (accessed 31.01.25).

2. Ulivi P., Harland D. M. Robotic Exploration of the Solar System Part I: The Golden Age 1957–1982. Chichester : Springer, 2007. 536 p.
3. Siddiqi, Asif A. Beyond Earth: A Chronicle of Deep Space Exploration, 1958–2016 (PDF). The NASA history series (second ed.). Washington, DC: NASA History Program Office, 2018. URL: <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2018/09/beyond-earth-tagged.pdf?emrc=967232> (accessed 31.01.25).
4. Lunokhod 1. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Lunokhod_1 (accessed 31.01.25).
5. Mars Pathfinder. URL: <https://science.nasa.gov/mission/mars-pathfinder/> (accessed 31.01.25).
6. Pathfinder Mars Mission – Sojourner mini-rover. URL: http://jleslie48.com/jj_sojourner/SojournerRover_PaperModel.pdf
7. Mars Pathfinder. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Mars_Pathfinder (accessed 31.01.25).
8. Makovsky A., Ilott P., Taylor J. Mars Science Laboratory Telecommunications System Design. DESCANSO Design and Performance Summary Series. Vol. 14. NASA/Jet Propulsion Laboratory. November, 2009. URL: https://descanso.jpl.nasa.gov/DPSummary/Descanso14_MSL_Telecom.pdf
9. Mars Science Laboratory: Curiosity Rover. URL: <https://science.nasa.gov/mission/msl-curiosity/> (accessed 31.01.25).
10. Articulated suspension system. US4840394 (A); IPC1-7: B62D21/00. 20.06.1989. 6 p.
11. Senatore C., Stein N., Zhou F., Bennett K., Arvidson R., Trease B., Lindemann R., Bellutta P., Heverly M., Iagnemma K. Modeling and validation of mobility characteristics of the mars science laboratory curiosity rover. *Proceedings of the 12th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS)*. 2014.
12. Thanadulsatit T., Bualert P., Deschanin S., Ruxthawonwong T., Rueankham S., Wongsawat S., Tantana P., Chancharoen W. A review of structural and system design of mars rover Curiosity and Perseverance. *Suranaree Journal of Science and Technology*. 2024. Vol. 31, No. 2. Art. No. 010294(1-19). <https://doi.org/10.55766/sujst-2024-02-e01241>
13. Lakdawalla E. Curiosity wheel damage: The problem and solutions. Aug 19, 2014. URL: <https://www.planetary.org/articles/08190630-curiosity-wheel-damage> (accessed 31.01.25).
14. Mars 2020: Perseverance Rover. URL: <https://science.nasa.gov/mission/mars-2020-perseverance/rover-components/> (accessed 31.01.25).
15. Neilson T. A., Donaldson J. A. Curiosity's Fault Tolerant Wakeup and Shutdown Design. *Procedia Computer Science*. 2014. Vol. 28. P. 441-448. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.03.054>.
16. Gao H., Lu R., Deng Z., Liu Z., Yuan R. One necessary condition for passive all-wheel attachment of a wheeled planetary rover. *Mechanism and Machine Theory*. 2023. Vol. 182. Art. No 105226. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2022.105226>.
17. Caruso M., Bregant L., Gallina P., Seriani S. Design and multi-body dynamic analysis of the Archimede space exploration rover. *Acta Astronautica*. 2022. Vol. 194. P. 229-241. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.02.003>.
18. Lu R., Gao H., Liu Z., Yuan R., Deng Z. Design and analysis of a high-speed planetary rover with an adaptive suspension and spring damper. *Acta Astronautica*. 2023. Vol. 211. P. 827-843. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.07.019>.
19. Schilling K., Krupp T. CAE-Methods Assisting the Design of the European Mars-Rover MIDD // IFAC Proceedings Volumes. 2000. Vol. 33, Iss. 26. P. 297-302. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)39160-7](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)39160-7).
20. Kopei V. B., Proniuk I. V. Mobile robot with quasi-wheels and a mechanism for reserving reliability. *Conference Proceedings of XII International Scientific and Technical Conference "Advanced technologies in mechanical engineering"*, 5-9 February 2024. Ivano-Frankivsk-Yaremche, 2024. Ivano-Frankivsk : IFNTUOG, 2024. P. 24-25.
21. ALUMINIUM AW-2024. URL: <https://emetal.eu/en/AW-2024/> (accessed 31.01.25).
22. Zhang Y., Wernicke L., Wulff W., Bleicher A., Schauer T. Design and validation of a dual-functional damper based on a stepper motor for energy harvesting and vibration control. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2023. Vol. 200. Art. No 110568. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110568>.