

М.Л. Рябчиков [0000-0002-9382-7562], В.С. Пуць [0000-0003-3164-6173], Р.В. Андрущак

Луцький національний технічний університет

УМОВИ РОБОТИ ПРИВОДУ З БАГАТЬМА СТУПЕНЯМИ СВОБОДИ В МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ РОБОТАХ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БОЙОВИХ ДІЙ

У статті розглянуто умови роботи приводу з багатьма ступенями свободи в мультимодальних роботах, призначених для забезпечення бойових дій. Проведено аналіз сучасних конструкцій мультимодальних роботизованих платформ та визначено основні вимоги до приводів зі змінною морфологією. Запропоновано конструкцію приводу на основі сферичного шарніра та хвильової передачі, що забезпечує просторову трансформацію колісних модулів і реалізацію різних режимів локомоції. Визначено кінематичні, геометричні та силові умови функціонування системи.

Ключові слова: мультимодальний робот, сферичний шарнір, хвильова передача, бойові дії, робототехніка.

M.L. Riabchykov, V.S. Puts, R.V. Andrushchak

OPERATING CONDITIONS FOR MULTI-DEGREE-OF-FREEDOM ACTUATORS IN MULTIMODAL COMBAT SUPPORT ROBOTS

The paper investigates the operating conditions of a multi-degree-of-freedom drive intended for multimodal robotic platforms used in military support operations. The growing demand for robotic systems capable of performing reconnaissance, logistics, engineering, and rescue missions in hazardous environments requires the development of adaptive locomotion mechanisms. A review of existing multimodal robots demonstrates the advantages of combining different locomotion modes, including wheeled, legged, aerial, and amphibious movement. A concept of a reconfigurable robotic platform with a variable-geometry chassis is proposed. The platform is based on wheel modules capable of changing their spatial orientation through a drive system incorporating spherical joints and harmonic gear transmissions. The developed architecture enables multiple operational modes, including high-speed wheeled motion, enhanced obstacle-crossing capability, vertical observation, and potential aerial mobility. The study identifies the kinematic, geometric, stability, and power requirements necessary for reliable operation of the drive system. Particular attention is paid to the integration of harmonic drives within spherical joints, providing compact dimensions, high positioning accuracy, and increased torque transmission. The obtained results confirm the feasibility of using multi-degree-of-freedom drives for the development of adaptive multimodal robots capable of effective operation under the challenging conditions of the modern battlefield.

Keywords: multimodal robot, multi-degree-of-freedom drive, robotic platform, spherical joint, harmonic drive, reconfigurable chassis, military operations, robotics.

Актуальність дослідження

Сучасні бойові дії характеризуються високою динамічністю, значною насиченістю поля бою безпілотними системами та необхідністю виконання завдань у складних і непередбачуваних умовах. Особливого значення набувають роботизовані платформи, здатні діяти в зонах підвищеного ризику без безпосередньої участі людини, здійснюючи розвідку, доставку вантажів, евакуацію поранених, інженерне забезпечення та вогневу підтримку. У таких умовах перспективним напрямом розвитку є мультимодальні роботи, які можуть змінювати спосіб пересування залежно від характеристик місцевості та поставлених завдань (Рис.1).



Рис.1 Мультимодальний робот в умовах бойових дій (рисунок згенерований штучним інтелектом)

© М.Л. Рябчиков, В.С. Пуць, Р.В. Андрущак

Однією з ключових проблем створення таких роботів є забезпечення ефективної роботи приводу з багатьма ступенями свободи, який дозволяє реалізовувати різні режими руху та трансформації конструкції. Застосування багатоступеневих приводів забезпечує адаптацію ходової частини до руйнувань міської інфраструктури, пересування по завалах, подолання вертикальних перешкод, вузьких проходів та інших складних елементів рельєфу. При цьому виникають суттєві вимоги до кінематичної узгодженості, енергетичної ефективності, стійкості руху та надійності роботи системи керування.

Особливої актуальності набуває дослідження умов функціонування приводів у роботах зі змінною морфологією, подібних до представленої конструкції, яка здатна трансформувати геометрію ходової системи та переходити між різними режимами пересування. Такі платформи мають забезпечувати збереження мобільності навіть при частковому пошкодженні елементів конструкції або зміні характеристик поверхні, що є критично важливим для виконання бойових завдань.

Додатковим фактором актуальності є стрімкий розвиток технологій автономного керування, штучного інтелекту та мережево-центричних систем ведення бойових дій. Для ефективної інтеграції мультимодальних роботів у єдиний інформаційний простір необхідно забезпечити прогнозовану та стабільну роботу приводів у широкому діапазоні навантажень і режимів експлуатації. Це потребує розроблення математичних моделей, критеріїв оцінювання та методів синтезу систем керування багатоступеневими приводами.

Таким чином, дослідження умов роботи приводу з багатьма ступенями свободи в мультимодальних роботах є актуальним науково-технічним завданням, спрямованим на підвищення прохідності, адаптивності, живучості та функціональної ефективності роботизованих систем, що використовуються для забезпечення бойових дій у складних та небезпечних умовах сучасного поля бою.

Дослідження стану питання

Для огляду літератури у статті доцільно провести класифікацію мультимодальних роботів за способом поєднання різних середовищ пересування та типом локомоції. Аналіз наведених публікацій свідчить, що сучасні мультимодальні роботи розвиваються у трьох основних напрямках: наземно-повітряні, наземно-водні та гібридні багатомодальні платформи зі змінною морфологією.

Перша група включає наземно-повітряні роботизовані системи. Одним із перших прикладів мультимодальних роботів є робот HyTAQ (Hybrid Terrestrial and Aerial Quadrotor), запропонований в [1]. Конструкція поєднує квадрокоптер із зовнішньою сферичною кліткою, яка одночасно виконує функцію колеса під час руху по землі. Робот здатний переходити між режимами польоту та кочення без додаткових приводів трансформації. Основною перевагою такої схеми є зниження енергоспоживання під час наземного переміщення, однак її прохідність обмежується геометрією захисної оболонки.

Автори [2] запропонували покращену конструкцію мініатюрного робота типу «земля–повітря», що використовує колісний привід для пересування по поверхні та роторну систему для польоту. У даній архітектурі здійснюється функціональне розділення механізмів локомоції, що забезпечує оптимізацію характеристик кожного режиму окремо.

Подальший розвиток даного напрямку представлений у роботі [3], де створено робота Flying Monkey, здатного виконувати біг, політ та захоплення об'єктів. Конструкція поєднує повітряну платформу з маніпуляційними механізмами, що розширює функціональні можливості системи під час виконання складних місій.

Автори дослідження [4] розробили робота Flying STAR, який може пересуватись повзанням по поверхні та переходити до польоту. Особливістю конструкції є радіально-симетричне компонування рухових модулів, що забезпечує високу стійкість у наземному режимі та ефективність польоту.

Значний інтерес становить робот, представлений в дослідженні [5], який здатний ходити на двох ногах, літати, пересуватись по канату та навіть використовувати скейтбординг. Така конструкція демонструє можливість інтеграції кількох принципово різних способів локомоції в межах єдиної платформи.

Наступною групою є колісно-крокуючі роботизовані системи. Важливим напрямом розвитку мультимодальних роботів є поєднання колісного та крокуючого способів пересування. Автори [6] запропонували платформу Leg-Track-Wheel Robot, в якій використовуються шарнірно з'єднані ноги,

колеса та гусеничні елементи. Робот може адаптувати конфігурацію ходової частини відповідно до характеристик місцевості, забезпечуючи високу прохідність у складних умовах. Подальший розвиток цього підходу відображений у роботі [7], присвяченій чотириногим роботам із колесами на кінцях ніг. Такі системи поєднують енергоефективність колісного руху з можливістю долати складні перешкоди за рахунок зміни положення кінцівок. Даний клас роботів сьогодні активно розвивається в роботах ETH Zurich та інших провідних дослідницьких центрів.

Окрему групу становлять роботи, здатні пересуватись як на суші, так і у воді, так звані амфібійні мультимодальні роботи. Прикладом є робот AmBot, запропонований в дослідженні [8]. Його конструкція натхненна біологічними особливостями земноводних організмів та забезпечує ефективне переміщення у водному середовищі й на суші. Такі системи орієнтовані переважно на екологічний моніторинг, рятувальні операції та дослідження прибережних зон.

Особливе місце займає робот-саламандра, створений авторами [9]. Конструкція використовує біологічно натхнену систему керування, яка дозволяє плавно переходити від плавання до ходьби шляхом зміни параметрів центрального генератора рухів. Робот став одним із перших прикладів успішної реалізації мультимодальної локомоції на основі біоміметичних принципів.

Новітнім напрямом є створення роботів зі змінною геометрією та адаптивною структурою. У роботі [10] розглядаються методи планування траєкторій для роботів, які можуть комбінувати крокуючу та повітряну локомоцію. Автори показують, що ефективне використання кількох режимів руху потребує інтегрованого підходу до керування та планування.

До цього класу також можна віднести запропоновану на рисунках конструкцію мультимодального робота зі змінним положенням колісних модулів. На відміну від більшості відомих платформ, вона забезпечує не лише перехід між різними способами пересування, а й активну зміну конфігурації ходової системи за рахунок приводів із багатьма ступенями свободи. Такий підхід дозволяє реалізовувати режими колісного руху, підвищеної прохідності, подолання перешкод, вертикального позиціонування та потенційно переходу до аеромобільного режиму.

Аналіз існуючих конструкцій показує, що сучасні мультимодальні роботи переважно реалізують поєднання двох способів локомоції: «рух–політ», «ходьба–кочення» або «плавання–ходьба». Водночас перспективним напрямом є створення роботів зі змінною морфологією та приводами з багатьма ступенями свободи, які забезпечують адаптивну реконфігурацію ходової системи залежно від умов середовища. Саме такі системи мають найбільший потенціал для застосування в умовах бойових дій, де необхідні висока прохідність, універсальність та живучість роботизованої платформи.

В процесі досліджень використовувались загальні синергетичні підходи до створення об'єктів машинобудування [11]. Відбувалось моделювання основних систем рухомих роботів на основі опублікованих методів [12-13]. В процесі створення приводів мультимодального робота використовувались методи створення хвильових передач [14] і інших спеціальних приводів [15].

Результати дослідження

Виходячи з представлених зображень, робот має трансформовану ходову систему з багатьма ступенями свободи, де колеса можуть змінювати просторову орієнтацію та положення відносно корпусу. Це дозволяє реалізувати кілька модифікацій і режимів роботи залежно від умов бойового застосування.

Можливі модифікації робота наведені на рис.2. Базова конфігурація колісного розвідувального робота (рис. 2,а) передбачає класичне чотириколісне пересування. Особливостями такого робота є висока швидкість руху, низьке енергоспоживання, можливість встановлення відеокамер, тепловізорів та засобів радіорозвідки, використання для патрулювання та розвідки.

Конфігурація робота підвищеної прохідності (рис. 2,б) демонструє збільшення колісної бази та ширини опорного контуру. Переваги подібної модифікації це підвищена стійкість на завалах, зменшення ризику перекидання, можливість руху по сипучих ґрунтах та уламках будівель. Призначення такої модифікації – це інженерна розвідка, доставка вантажів, евакуація поранених у складній місцевості.

Робот для подолання вертикальних перешкод (рис. 2,в) передбачає асиметричне розташування коліс. Його можливості передбачають підйом на сходи, подолання бордюрів та барикад, рух по пересіченій місцевості. Такий режим може використовуватися в міських бойових діях. Гібридний колісно-роторний робот (рис. 2,г) показує трансформацію коліс у горизонтальне положення. У цьому випадку колеса можуть виконувати функцію роторів для створення підйомної сили,

© М.Л. Рябчиков, В.С. Пуць, Р.В. Андрущак

вентиляторів для короткочасного зависання, засобів стабілізації під час стрибка через перешкоди. Перевагами такої модифікації є подолання ровів, короткочасний політ, збільшення мобільності в складних умовах.

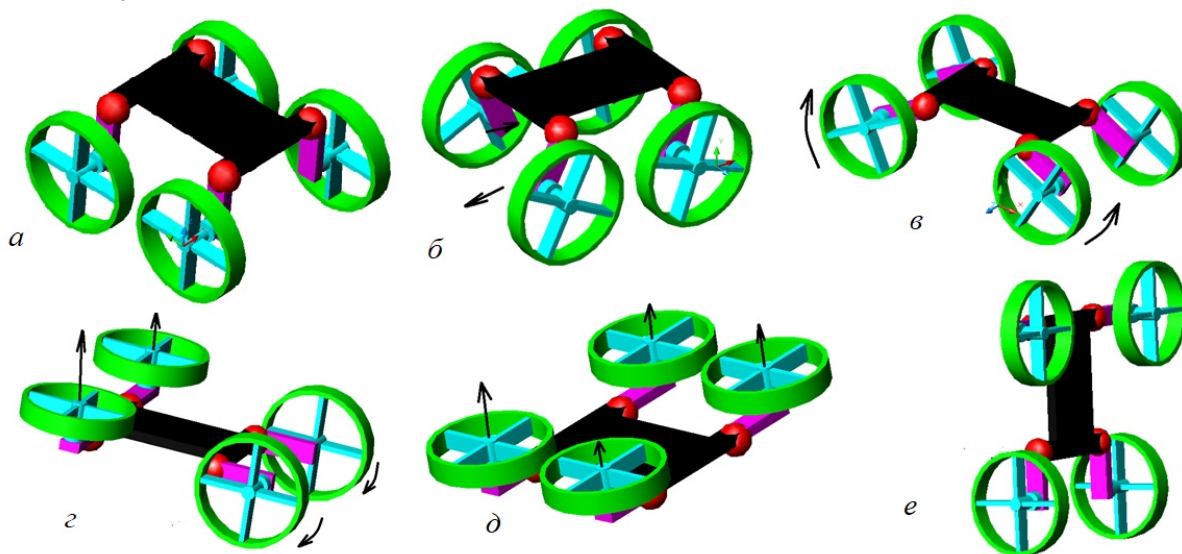


Рис.2 Можливі модифікації мультимедійного робота

Конфігурація мультироторної безпілотної платформи (рис. 2,д) фактично перетворює робот на квадрокоптер. Його призначенням може бути повітряна розвідка, доставка малих вантажів, коригування вогню, створення ретранслятора зв'язку. У такому режимі робот може працювати як наземний і повітряний безпілотною одночасно.

Робот для огляду вертикальних конструкцій (рис. 2,е) передбачає вертикальне положення корпусу. Його перевагами можуть бути огляд високих об'єктів, спостереження через вікна та амбразури, збільшення висоти встановлення сенсорів. Він може використовуватись для огляду будівель, контролю периметра, спостереження з укриття.

На базі запропонованої платформи можуть бути створені спеціалізовані бойові модифікації, зокрема розвідувальна модифікація з відеокамерами, тепловізором та РЕБ-датчиками, ударна модифікація з легким озброєнням або баражуючим боєприпасом, інженерна модифікація для пошуку мін та вибухонебезпечних предметів, логістична модифікація для доставки боєприпасів і медикаментів, евакуаційна модифікація для транспортування поранених, ретрансляційна модифікація для підтримки зв'язку між підрозділами, рятувальна модифікація для роботи в завалах після руйнувань.

Особливістю представленого робота є поєднання в одній платформі багатоступеневого приводу, змінної геометрії ходової системи, можливості переходу між наземним і повітряним режимами, адаптації до різних типів перешкод без зміни конструкції.

Така архітектура дозволяє розглядати платформу як мультимодальний робот з реконфігурованою ходовою системою та багатьма ступенями свободи, здатний виконувати широкий спектр завдань забезпечення бойових дій в умовах сучасного поля бою.

На рисунку 3 показано окремий модуль мультимодального робота, що складається з колеса (блакитний елемент), сферичного шарніра (жовтий елемент) та поворотної вилки (синій елемент). Конструкція дозволяє змінювати просторову орієнтацію колеса відносно корпусу робота та формувати різні режими локомоції. Для забезпечення положень, зображених на рисунку (а–г), необхідно виконати ряд кінематичних та конструктивних умов.

Необхідні умови створення різних положень виконавчих органів включають наступні вимоги. Необхідна наявність щонайменше трьох ступенів свободи. Для переходу між положеннями (Рис.3,а–г) кожен модуль повинен мати обертання колеса навколо власної осі, поворот вилки навколо вертикальної осі, нахил колісного вузла відносно корпусу. Таким чином, мінімально необхідна кількість ступенів свободи одного модуля становить три.

Необхідно використання сферичного або карданного шарніра. Сферичний елемент на рисунку виконує функцію просторового шарніра. Його застосування забезпечує поворот колеса в

горизонтальній площині, поворот у вертикальній площині, комбіновані просторові переміщення. За відсутності такого вузла реалізація всіх режимів трансформації буде неможливою

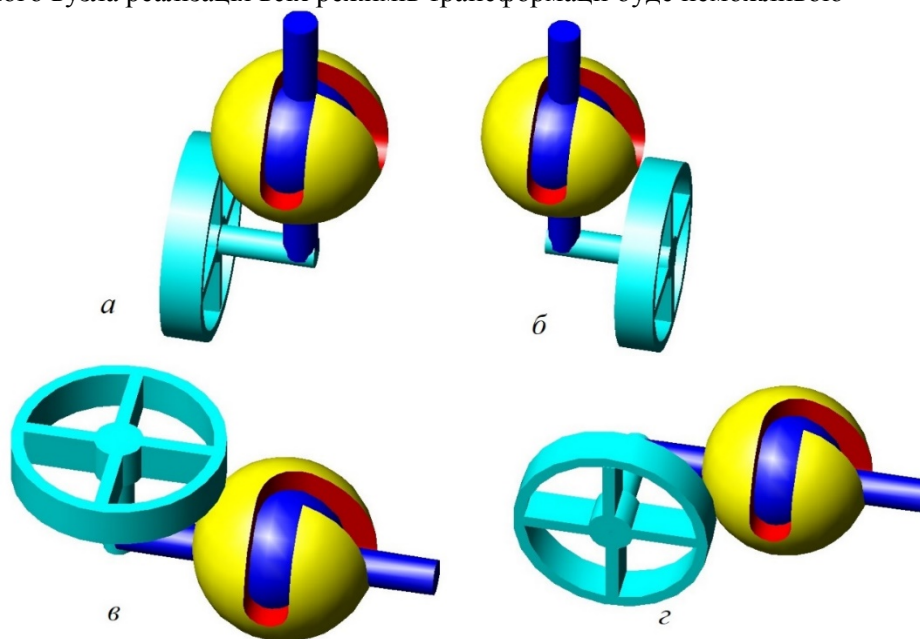


Рис.3 Модуль руху мультимодального робота

Для формування різних конфігурацій необхідно забезпечити індивідуальне керування приводами кожного колеса. Це дозволяє змінювати ширину колії, піднімати окремі колеса, формувати асиметричні схеми руху, реалізовувати режими самовирівнювання.

Для переходу між положеннями необхідно забезпечити геометричні умови трансформації, які включають достатні кути повороту шарнірів, відсутність взаємного контакту коліс, збереження кінематичної сумісності механізмів. Максимальні кути нахилу повинні становити не менше $\pm 90^\circ$ для переведення колеса з вертикального у горизонтальне положення і $\pm 180^\circ$ для реалізації повного розвороту модуля.

Умови статичної стійкості передбачають, що під час трансформації центр мас робота повинен залишатися всередині опорного контуру. Для цього необхідно координувати рух усіх модулів, обмежувати швидкість трансформації, використовувати датчики положення та нахилу. Особливо це важливо при переходах між конфігураціями «3,б» і «3,в», де відбувається значна зміна положення опорних точок.

Силкові умови роботи приводів вимагають умову, щоб приводи повинні створювати моменти, достатні для повороту колеса разом із навантаженням, утримання обраної конфігурації, компенсації динамічних навантажень під час руху. Необхідний момент приводу визначається вагою модуля, відстанню до центра мас та зовнішніми навантаженнями від контакту з поверхнею.

Для реалізації окремих конфігурацій необхідно виконання певних умов.

Для положення а, б (колісний режим) необхідно орієнтувати площину колеса вертикально, забезпечити збіг осі кочення з напрямком руху, зафіксувати нахил шарніра. Такий випадок використовується для швидкісного пересування.

Для положення в, г (трансформований режим) необхідно повернути колесо на кут близько 90° , змінити положення вилки, синхронізувати роботу приводів усіх модулів. Таке положення може використовуватись для збільшення прохідності, подолання перешкод, формування повітряного або гібридного режиму, зміни габаритів робота.

У запропонованій системі потенційно можуть бути реалізовані колісний рух, режим підвищеної прохідності, крокуючий рух за рахунок послідовної зміни положень коліс, режим самовирівнювання, аеромобільний режим (при використанні коліс як роторів), вертикальний режим спостереження. Створення різних положень виконавчих органів мультимодального робота можливе за умови застосування багатоступеневих приводів, сферичних шарнірів, незалежного керування кожним модулем та забезпечення кінематичної сумісності механізмів. Сукупність цих умов

дозволяє формувати адаптивну ходову систему зі змінною геометрією, яка може перебудовуватися відповідно до умов середовища та виконуваних бойових завдань.

Привід модуля мультимодального робота, представлений на рис. 4, призначений для забезпечення багатьох ступенів свободи колісного вузла та реалізації просторової трансформації ходової системи. Конструкція приводу побудована за модульним принципом і включає декілька незалежних виконавчих механізмів, які забезпечують обертання колеса навколо власної осі, поворот вилки відносно корпусу та зміну просторової орієнтації колісного модуля. Така кінематична схема дозволяє здійснювати плавний перехід між різними режимами локомоції без зміни конструкції робота.

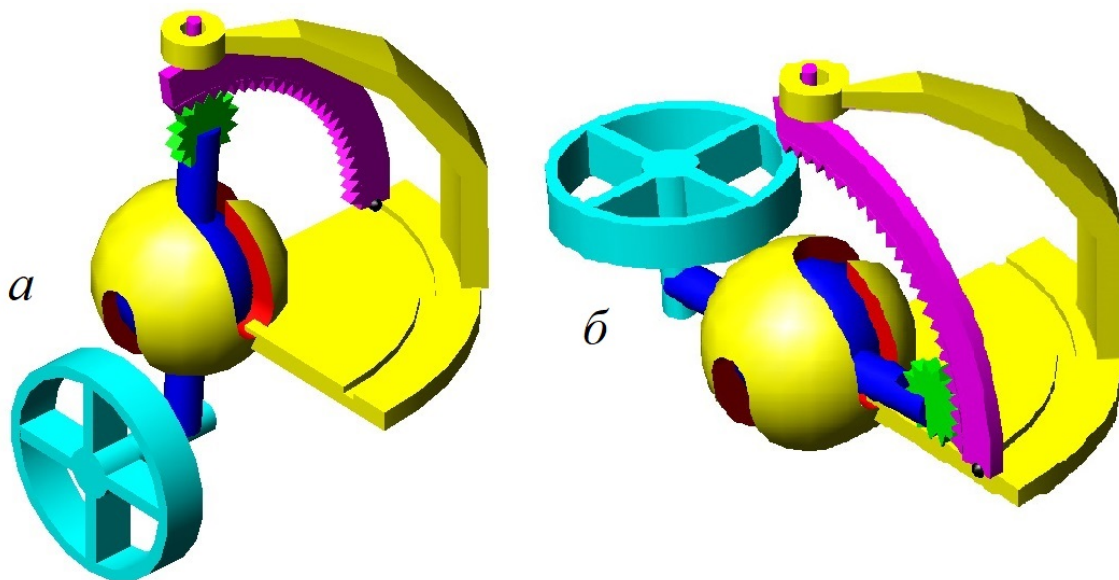


Рис.4. Привід, який забезпечує ступені свободи

Передача крутного моменту від електродвигунів до виконавчих ланок здійснюється через систему редукторів, які забезпечують необхідне збільшення моменту та точність позиціонування. При роботі в колісному режимі один із приводів забезпечує безпосереднє обертання колеса, тоді як інші приводи відповідають за орієнтацію модуля в просторі. Координоване керування приводами дозволяє змінювати ширину колії, висоту розташування корпусу, положення окремих коліс та формувати асиметричні конфігурації для подолання складних перешкод.

Особливістю конструкції є використання хвильової передачі, розташованої всередині сферичного шарніра (рис. 5). Таке технічне рішення дозволяє поєднати компактність конструкції з високим передавальним відношенням і точністю керування. Хвильова передача складається з жорсткого колеса, гнучкого колеса та генератора хвилі. Під час обертання генератора хвилі відбувається пружна деформація гнучкого колеса, внаслідок чого зубці періодично входять у зачеплення з зубцями жорсткого колеса. Через різницю кількості зубців між колесами формується значне передавальне відношення, що забезпечує отримання великих крутних моментів при малих габаритах механізму.

Розміщення хвильової передачі безпосередньо всередині сферичного шарніра дозволяє реалізувати привід повороту нижнього стрижня без застосування додаткових зовнішніх редукторів. У результаті зменшуються маса та габарити вузла, підвищується жорсткість конструкції та знижується кількість кінематичних ланок. Одночасно забезпечується можливість передачі значних навантажень через шарнір при збереженні високої точності позиціонування колісного модуля.

Застосування хвильової передачі у сферичному шарнірі особливо ефективно для мультимодальних роботів зі змінною геометрією, оскільки дозволяє виконувати великі кути повороту виконавчих органів, утримувати задане положення під дією зовнішніх навантажень та забезпечувати плавність руху під час трансформації. Завдяки практично безлюфтовому зачепленню досягається висока точність керування положенням колісних модулів, що є важливим для реалізації режимів підвищеної прохідності, самовирівнювання, подолання перешкод і переходу між різними способами локомоції.

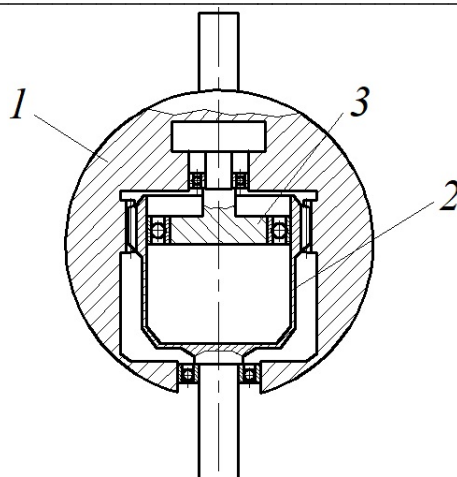


Рис.5. Хвильова передача для забезпечення повороту нижнього стрижня

Таким чином, поєднання багатоступеневого приводу зі сферичним шарніром та інтегрованою хвильовою передачею забезпечує створення компактного, енергоефективного та високоточного механізму просторового позиціонування колісних модулів, що є необхідною умовою функціонування мультимодального робота в складних умовах сучасного поля бою.

Висновки

У результаті проведеного дослідження проаналізовано особливості функціонування приводів з багатьма ступенями свободи у складі мультимодальних роботів, призначених для виконання завдань забезпечення бойових дій. Аналіз сучасних наукових публікацій показав, що перспективним напрямом розвитку роботизованих платформ є створення систем зі змінною морфологією, здатних адаптувати свою конфігурацію до умов зовнішнього середовища та характеру виконуваних завдань.

Запропоновано концепцію мультимодального робота з реконфігурованою ходовою системою, яка забезпечує реалізацію різних режимів локомоції та спеціалізованих конфігурацій. Встановлено, що для забезпечення необхідних функціональних можливостей кожен модуль повинен мати щонайменше три ступені свободи, сферичний або карданний шарнір та незалежну систему керування приводами. Визначено основні кінематичні, геометричні, силові та експлуатаційні умови, виконання яких є необхідним для надійної роботи системи трансформації.

Показано, що застосування багатоступневих приводів дозволяє реалізувати колісний режим руху, режими підвищеної прохідності, подолання вертикальних перешкод, самовирівнювання, вертикального спостереження та потенційно аеромобільний режим. Особливу увагу приділено використанню хвильової передачі, інтегрованої у сферичний шарнір, що забезпечує високу точність позиціонування, значне передавальне відношення, компактність конструкції та можливість передачі великих навантажень.

Отримані результати підтверджують доцільність використання приводів з багатьма ступенями свободи для створення адаптивних мультимодальних роботів нового покоління. Запропоновані конструктивні рішення можуть бути використані під час розроблення перспективних роботизованих платформ військового призначення, здатних ефективно функціонувати в умовах складного рельєфу, руйнувань інфраструктури та високої невизначеності сучасного поля бою. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення математичних моделей динаміки системи, оптимізацію алгоритмів керування та експериментальну перевірку працездатності запропонованих технічних рішень.

Список використаних джерел

1. Kalantari A., Spenko M. (2014) Modeling and performance assessment of the hytaq, a hybrid terrestrial/aerial quadrotor. *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 30, no. 5, pp. 1278–1285, <https://doi.org/10.1109/TRO.2014.2337555>.
2. Kossett A., D'Sa R., Purvey J., Papanikolopoulos N. (2010) Design of an improved land/air miniature robot. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2010, pp. 632–637, <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2010.5509453>.

3. Mulgaonkar Y., Araki B., Koh J.-S., Guerrero-Bonilla L., Aukes D. M., Makineni A., Tolley M. T., Rus D., Wood R. J., Kumar V. (2016) The flying monkey: A mesoscale robot that can run, fly, and grasp. *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 4672–4679, <https://doi.org/10.1109/ICRA.2016.7487667>.
4. Meiri N., Zarrouk D. (2019) Flying star, a hybrid crawling and flying sprawl tuned robot. *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 5302–5308, <https://doi.org/10.1109/ICRA.2019.8794260>.
5. Kim K., Spieler P., Lupu E.-S., Ramezani A., Chung S.-J. (2021) A bipedal walking robot that can fly, slackline, and skateboard. *Science Robotics*, vol. 6, no. 59, p. eabf8136, <https://doi.org/10.1126/scirobotics.abf8136>.
6. Michaud F., Le'tourneau D., Arsenault M., Bergeron Y., Cadrin R., Gagnon F., Legault M.-A., Millette M., Pare J.-F., Tremblay M.-C., Lepage P., Morin Y., Bisson J., Caron S. (2005) Multi-modal locomotion robotic platform using leg-track-wheel articulations. *Au-ton. Robots*, vol. 18, pp. 137–156, <https://doi.org/10.1007/s10514-005-0722-1>.
7. de Viragh Y., Bjelonic M., Bellicoso C. D., Jenelten F., Hutter M. (2019) Trajectory optimization for wheeled-legged quadrupedal robots using linearized zmp constraints. *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 4, no. 2, pp. 1633–1640, <https://doi.org/10.1109/LRA.2019.2896721>.
8. L. Cui, P. Cheong, R. Adams, and T. Johnson, “AmBot: A Bio-Inspired Amphibious Robot for Monitoring the Swan-Canning Estuary System,” *Journal of Mechanical Design*, vol. 136, no. 11, 10 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1115/1.4028094>
9. Ijspeert A. J., Crespi A., Ryczko D., Cabelguen J.-M. (2007) From swimming to walking with a salamander robot driven by a spinal cord model. *Science*, vol. 315, no. 5817, pp. 1416–1420, <https://doi.org/10.1126/science.1138353>.
10. Sihite E., Mottis B., Ghanem P., Ramezani A., Gharib M. (2022) Efficient path planning and tracking for multi-modal legged-aerial locomotion using integrated probabilistic road maps (prm) and reference governors (rg). *IEEE 61st Conference on Decision and Control (CDC)*, pp. 764–770, <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:248798470>.
11. Рябчиков М.Л., Шимчук С.П., Зайчук Т.П., Пилипчук С.В. (2026) Синергетика технологічних процесів: філософсько-технологічне моделювання універсальних принципів виробництва. *Наукові нотатки*, № 85, 158-166, <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2026.85.21>.
12. Харчук В., Ткаченко С. (2025) Метод побудови траєкторії руху мобільного робота у середовищі з рухомими перешкодами. *Information technology: computer science, software engineering and cyber security*, Вип. 2, 156-165, <https://doi.org/10.32782/IT/2025-2-16>.
13. Кадицьникова Т. М., Далік М. О. (2025) Ситуаційне моделювання руху наземних роботів. *Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки*, Т. 37, 46-58, <https://doi.org/10.15421/472514>.
14. Riabchykov M. (2025). Creating Wave Transmissions with a Flexible Magnetic Element and a Non-contact Magnetic Generator. *Smart Innovations in Energy and Mechanical Systems. SIEMS 2025. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 1480, Springer, Cham, https://doi.org/10.1007/978-3-031-95191-6_3.
15. Riabchykov M., Martyniuk V., Puts V. (2025) Design of expert systems for creation of special shafts with liquid control for innovative machines. *Наукові Нотатки*, Луцьк, №81, с.36-43, <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2025.81.5>.

Дата надходження статті до видання: 25.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.05.2026

Дата оприлюднення 28.05.2026