УДК 629.3.014.5:007.52

В.М. Корендій, О.Ю. Качур, Р.Г. Літвін, Р.Б. Карпин, М.В. Пилип, А.В. Похмурська
Національний університет «Львівська політехніка», Україна

ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ НАЗЕМНОГО РОБОТИЗОВАНОГО КОМПЛЕКСУ НА ГУСЕНИЧНОМУ ШАСІ

У тезах обґрунтовано конструкцію та динаміку наземного роботизованого комплексу на гусеничному шасі з маніпулятором типу SCARA. Комплекс містить платформу з демпфованою установчою плитою, блок керування та 5-DOF маніпулятор. Наведено параметри робочої зони, отримані шляхом комп'ютерного моделювання. Висвітлено результати натурних випробувань на пересіченій місцевості зі швидкістю 8 км/год за допомогою датчика WitMotion BWT901CL. Пікові вертикальні прискорення досягають від –0,85g до +1g, що подвоює динамічне навантаження на схоплювач. Обґрунтовано необхідність сили утримання об'єкта масою 1 кг на рівні не менше 20 Н.
***Ключові слова**: наземний роботизований комплекс, гусеничне шасі, маніпулятор типу SCARA, робоча зона, вертикальні прискорення, захватний пристрій, експериментальна перевірка.*

The paper substantiates the design and dynamics of a ground robotic complex on a tracked chassis with a SCARA manipulator. The system comprises a platform with a damped mounting plate, a control unit, and a 5-DOF manipulator. Workspace parameters from computer simulations are presented. The results of field testing on rough terrain at 8 km/h using a WitMotion BWT901CL sensor are highlighted. Peak vertical accelerations reach from –0.85g to +1g, doubling the dynamic load on the gripper. The necessity of ensuring a gripping force of at least 20 N for a 1 kg object is justified.
***Key words**: ground robotic complex, tracked chassis, SCARA-type manipulator, workspace, vertical acceleration, gripping device, experimental verification.*

Постановка проблеми у загальному вигляді. Сучасний розвиток засобів автоматизації та робототехніки демонструє стійку тенденцію до розширення сфери застосування наземних роботизованих комплексів (НРК). Особливо гостро потреба у впровадженні таких систем виникає під час виконання транспортно-технологічних та пошуково-рятувальних операцій у середовищах, де безпосередня присутність людини пов'язана з підвищеним ризиком для її життя та здоров'я. До таких умов належать зони радіаційного, хімічного чи біологічного забруднення, місця ліквідації наслідків техногенних та природних катастроф, зони проведення військових місій, а також території, що потребують гуманітарного розмінування.

Для ефективної роботи у складних умовах довкілля мобільний робот повинен поєднувати в собі високі показники прохідності, стійкості під час подолання штучних і природних перешкод, а також здатність стабільно нести технологічне обладнання, зокрема маніпуляційні системи, забезпечуючи високу точність позиціювання їхніх робочих органів. З огляду на це, актуальним науково-прикладним завданням є створення та дослідження компактних вітчизняних наземних платформ на гусеничному шасі, які спроможні виконувати складні маніпуляційні та логістичні операції на пересіченій місцевості без втрати керованості, динамічної стійкості та загальної функціональності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематиці проєктування, моделювання та аналізу мобільних роботизованих платформ присвячено значну кількість сучасних наукових праць. Загальний огляд конструктивних схем, систем підвіски та рушіїв гусеничного типу, що застосовуються для наземних мобільних роботів, детально викладено у фундаментальних оглядових роботах [1]. Питання автономного планування траєкторій руху та алгоритмів навігації мобільних платформ у складних просторових умовах досліджено у праці [2]. Особливості динамічного моделювання та оптимізації конструкцій гусеничних комплексів спеціального призначення, зокрема для гуманітарного розмінування та переміщення нерівними опорними поверхнями, висвітлено у дослідженнях [3, 4].

Попередні етапи кінематичного аналізу мобільного гусеничного робота, оснащеного маніпулятором типу SCARA, були успішно реалізовані авторами у роботах [5, 6]. Водночас більшість існуючих публікацій обмежується теоретичним описом кінематики або чисельним моделюванням ідеалізованих умов руху. Наукова новизна пропонованого дослідження полягає у комплексному

поєднанні конструктивного аналізу компоновки НРК з експериментальною оцінкою реальних вертикальних прискорень під час руху пересіченою місцевістю. Такий підхід дає змогу сформувати обґрунтовану методику розрахунку та проєктування виконавчих елементів, зокрема силових параметрів захватного пристрою.

Виклад основного матеріалу дослідження. Досліджуваний наземний роботизований комплекс (рис. 1) інтегрує в собі три взаємопов'язані функціональні підсистеми: мобільну гусеничну платформу, електронний блок керування та маніпулятор типу SCARA. Вибір такої компоновки є конструктивно та технологічно доцільним для операцій із циліндричними об'єктами невеликої маси. Механізм SCARA забезпечує високу швидкість та точність переміщення робочого органа в горизонтальній площині, тоді як гусеничне шасі гарантує високу прохідність та можливість підведення маніпулятора безпосередньо до об'єкта маніпулювання.

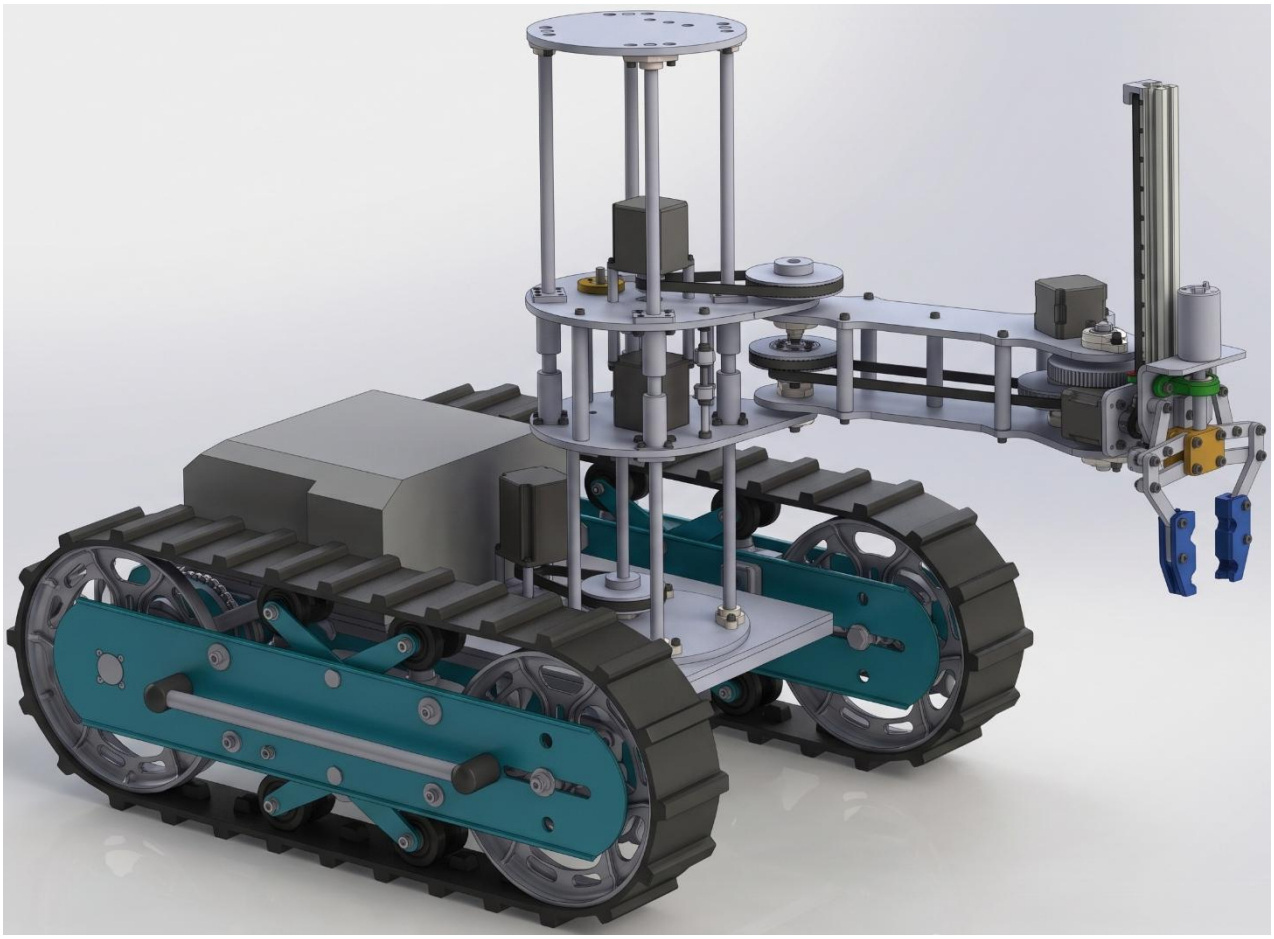

Рис. 1. Загальний вигляд досліджуваного роботизованого комплексу

Базою комплексу є двогусенична платформа з двома бортовими рушіями. Основним конструктивним рішенням для захисту прецизійного обладнання є те, що установча плита, на якій закріплено маніпулятор та блок електроніки, підвішена до гусеничних модулів через спеціалізовані гумові або поліуретанові демпфери. Це дозволяє суттєво мінімізувати ударні й коливальні впливи на несучу систему під час подолання мікропрофілю нерівностей. Передні колеса шасі є веденими й виконують функцію регулювання натягу гусеничних стрічок. Задні колеса є ведучими й приводяться в рух від мотор-редукторів через ланцюгові передачі. Для стабілізації просторового положення гусениць та підтримання оптимального натягу під час подолання перешкод у конструкції шасі реалізовано додаткові V-подібні важільні механізми.

Кожен бортовий привод НРК укомплектовано електродвигуном потужністю 100 Вт із номінальною напругою живлення 24 В. Передаточне число інтегрованого редуктора становить 20, що забезпечує номінальну вихідну частоту обертання 150 об/хв. З урахуванням передаточного числа ланцюгової передачі, яке дорівнює 1,5, розроблене шасі здатне розвивати лінійну швидкість руху в межах 8–10 км/год, упевнено долати поодинокі перешкоди заввишки до 0,3 м та працювати в автономному режимі не менше 2 годин.

Маніпулятор типу SCARA змонтовано на окремій плиті платформи. Його вертикальне переміщення (грубе позиціювання по висоті) здійснюється за допомогою гвинтової пари з пасовою передачею від електродвигуна. На рухомій платформі встановлено приводи повороту першої та другої ланок, які передають крутний момент через зубчасті пасові передачі. Поворот самого захватного вузла реалізовано через зубчастий сектор, а локальне високоточне коригування вертикального положення захвату вздовж напрямної забезпечується окремим малогабаритним приводом. Маніпулятор має 5 ступенів вільності (два поступальні переміщення і три обертальні пари). Геометричні параметри ланок становлять: базова стійка – 120 мм, послідовні ланки механізму – 300 мм, 300 мм та 87 мм відповідно.

Аналітичний опис положення захвату за допомогою узагальнених координат було верифіковано шляхом твердотільного моделювання у середовищі SolidWorks та чисельних розрахунків у MathCad. Результати моделювання визначили межі робочої зони: максимальне переміщення вздовж осі *Ox* становить близько 1300 мм; максимальне переміщення вздовж осі *Oy* становить близько 840 мм; вертикальні межі переміщення захвату становлять від –200 мм до +300 мм відносно плити кріплення.

Для експериментального підтвердження працездатності комплексу було створено повномасштабний лабораторний прототип (рис. 2) та проведено серію натурних випробувань під час руху пересіченою місцевістю зі швидкістю близько 8 км/год. Реєстрацію вертикальних прискорень корпусу в зоні кріплення маніпулятора (де формуються основні інерційні навантаження) здійснювали за допомогою високоточного датчика WitMotion BWT901CL. Дані передавалися на ПК через Bluetooth-інтерфейс та оброблялися в MathCad.

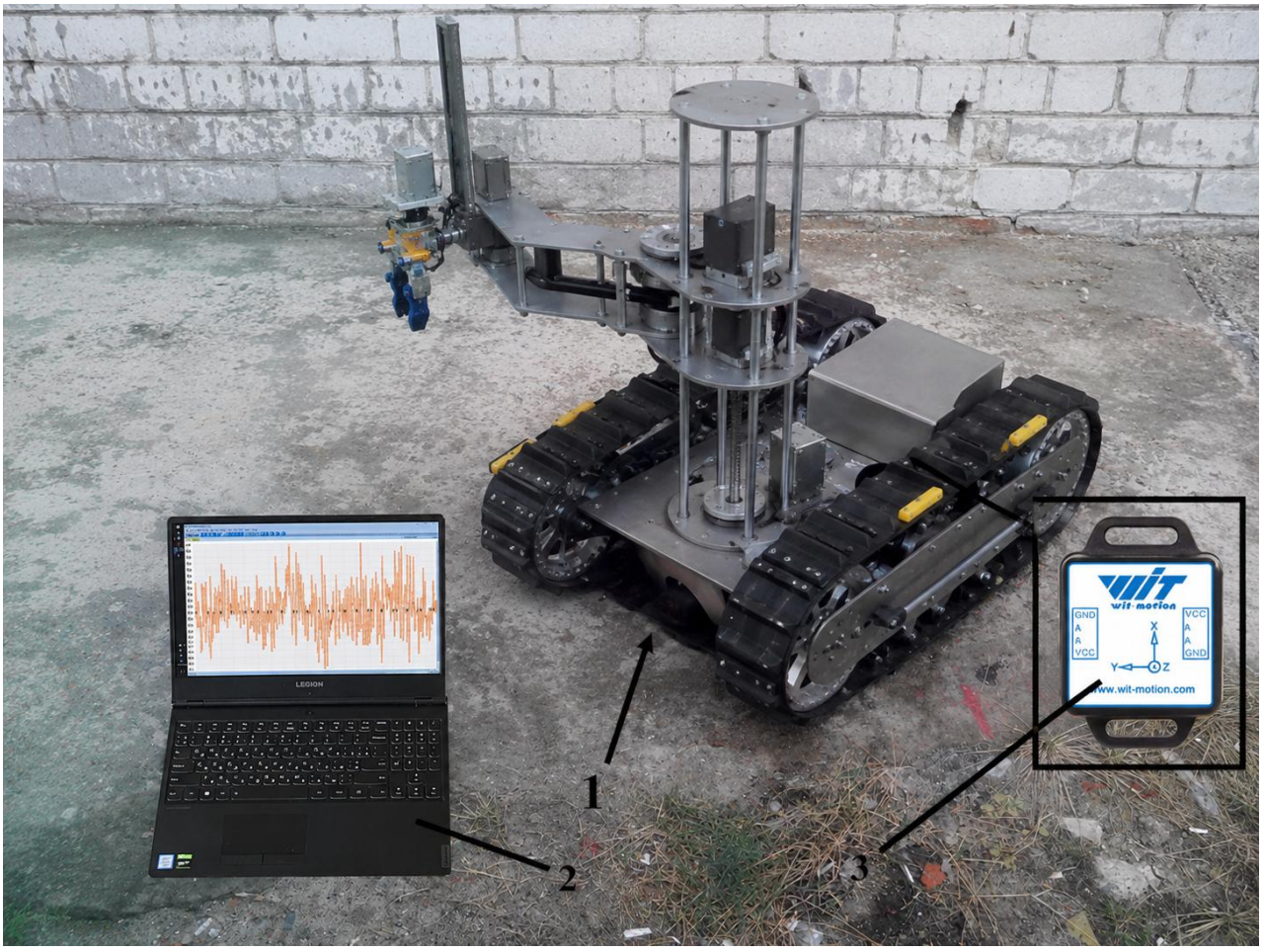

Рис. 2. Експериментальний зразок гусеничної платформи

Аналіз отриманих часових залежностей показав, що під час руху нерівним рельєфом корпус зазнає значних коливальних збурень: максимальне вертикальне прискорення в додатному напрямку досягало 1*g* (або 9,81 м/с²); максимальне прискорення у від'ємному напрямку становило 0,85*g* (або 8,34 м/с²). Це свідчить про те, що під час транспортування об'єкта масою до 1 кг у захваті виникають

динамічні перевантаження, які практично подвоюють розрахункове вертикальне навантаження на робочий орган. Отже, під час проєктування та силового розрахунку виконавчого органа (захвату) силу утримання об'єкта необхідно закладати на рівні не менше 20 Н.

Висновки. За результатами проведеного дослідження можна зробити такі узагальнюючі висновки:

1. Запропонована конструктивна схема, що поєднує мобільну гусеничну платформу із демпфованою установчою плитою та маніпулятор типу SCARA, є ефективним компромісом між високою прохідністю комплексу та точністю виконання площинних технологічних операцій.

2. Проведені натурні експериментальні дослідження динаміки руху платформи пересіченою місцевістю зі швидкістю 8 км/год зафіксували пікові вертикальні прискорення на рівні від –0,85g до +1g. Це зумовлює виникнення значних інерційних навантажень, які майже вдвічі перевищують статичну вагу об'єкта маніпулювання.

3. На основі отриманих експериментальних даних встановлено, що для надійного утримання циліндричних деталей масою 1 кг в умовах руху нерівним рельєфом мінімальна зумовлена сила утримання захвату повинна становити 20 Н, із забезпеченням відповідного запасу міцності та жорсткості для шарнірних вузлів і приводів.

4. Результати дослідження формують вихідні передумови для подальшого вдосконалення підвіски шасі, оптимізації параметрів трансмісії та синтезу законів керування, спрямованих на компенсацію коливальних збурень маніпулятора під час руху.

Бібліографія

[1] Bruzzone L., Nodehi S. E., Fanghella P. Tracked locomotion systems for ground mobile robots: A review // Machines. – 2022. – Vol. 10, No. 8. – Art. 648.

[2] Qin H. Review of autonomous path planning algorithms for mobile robots / H. Qin, S. Shao, T. Wang, X. Yu, Y. Jiang, Z. Cao // Drones. – 2023. – Vol. 7, No. 3. – Art. 211.

[3] Petrişor S. M. Humanitarian demining serial-tracked robot: Design and dynamic modeling / S. M. Petrişor, M. Simion, G. Bârsan, O. Hancu // Machines. – 2023. – Vol. 11, No. 5. – Art. 548.

[4] Ugenti A. Analysis of an all-terrain tracked robot with innovative suspension system / A. Ugenti, R. Galati, G. Mantriota, G. Reina // Mechanism and Machine Theory. – 2023. – Vol. 182. – Art. 105237.

[5] Korendiy V. Analysis of kinematic characteristics of a mobile caterpillar robot with a SCARA-type manipulator / V. Korendiy, O. Kachur, M. Boikiv, Yu. Novitskyi, O. Yaniv // Transport Technologies. – 2023. – Vol. 4, No. 2. – P. 56–67.

[6] Корендій В. М., Качур О. Ю., Карпин Р. Б., Пилип М. В., Предко Р. Я. Загальна конструкція та експериментальна перевірка наземного роботизованого комплексу на гусеничному шасі з маніпулятором типу Scara // Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту : матеріали XIV Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції (Вінниця, 14-16 квітня 2026 р.). – 2026. – С. 261–265.

[7] Корендій В. М., Качур О. Ю., Пилип М. В., Карпин Р. Б. Проблеми оцінювання пікових моментів і моделювання «стрес-траєкторій» маніпулятора TELEMAX EVO PLUS // Молода наука – роботизація і нанотехнології сучасного машинобудування : збірник наукових праць Міжнародної молодіжної науково-технічної конференції (Краматорськ, 15–17 квітня 2026 р.). – 2026. – С. 221–227.

КОРЕНДІЙ Віталій Михайлович – к.т.н., доцент, завідувач кафедри технічної механіки та інженерної графіки, НУ «Львівська політехніка», e-mail: vitalii.m.korendii@lpnu.ua

КАЧУР Олександр Юрійович – д-р філософії, доцент кафедри технічної механіки та інженерної графіки, НУ «Львівська політехніка», e-mail: oleksandr.y.kachur@lpnu.ua

ЛІТВІН Роман Григорович – д-р філософії, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту, НУ «Львівська політехніка», e-mail: roman.h.litvin@lpnu.ua

КАРПИН Роман Богданович – аспірант кафедри прикладної математики, НУ «Львівська політехніка», e-mail: roman.b.karpyn@lpnu.ua

ПИЛИП Михайло Васильович – аспірант кафедри технічної механіки та інженерної графіки, НУ «Львівська політехніка», e-mail: mykhailo.v.pylyp@lpnu.ua

ПОХМУРСЬКА Анна Володимирівна – к.т.н., асистент кафедри технічної механіки та інженерної графіки, НУ «Львівська політехніка», e-mail: anna.v.pokhmurska@lpnu.ua