

ОСОБЛИВОСТІ ТА ВИМОГИ ДО КОНСТРУКЦІЙ НАЗЕМНИХ РОБОТИЗОВАНИХ КОМПЛЕКСІВ ПРОМИСЛОВОГО ТА ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі виконано системний аналіз конструктивних та експлуатаційних вимог до наземних роботизованих комплексів промислового та військового призначення з урахуванням сучасних умов їх застосування. Розглянуто вплив характеру середовища експлуатації на формування технічних параметрів шасі, енергетичних модулів, архітектури керування та підсистем зв'язку. Обґрунтовано ключову роль масо-енергетичного балансу як визначального обмеження під час проєктування військових НРК. Показано відмінність між моделлю оптимізації за повною вартістю життєвого циклу для промислових платформ і моделлю вартості місії для військових систем. Деталізовано концепцію функціональної збереженості у деградованому стані та доведено доцільність формування гетерогенного парку військових НРК, що поєднує ресурсні та витратні платформи. Сформовано узагальнену порівняльну характеристику конструктивних рішень для різних типів застосування. Отримані результати можуть бути використані під час розроблення нових роботизованих платформ та вдосконалення існуючих систем.

Ключові слова: наземний роботизований комплекс, автономні системи, промислова робототехніка, військова техніка, масо-енергетичний баланс, функціональна збереженість, вартість місії, ресурсні та витратні платформи.

Abstract

This paper presents a systematic analysis of structural and operational requirements for unmanned ground vehicles (UGVs) intended for industrial and military applications under contemporary operating conditions. The influence of the operational environment on chassis configuration, power systems, control architecture, and communication subsystems is examined. The mass–energy balance is substantiated as a key design constraint, particularly for military UGVs operating in uncertain and high-risk environments. A distinction is made between life-cycle cost optimization for industrial platforms and mission cost optimization for military systems. The concept of functional survivability under degraded conditions is analyzed, and the feasibility of a heterogeneous military UGV fleet combining reusable (resource-oriented) and attritable platforms is justified. A comparative analysis of structural design approaches is presented. The obtained results may be applied in the development of new robotic platforms and in the modernization of existing systems.

Keywords: unmanned ground vehicle, autonomous systems, industrial robotics, military technology, mass–energy balance, functional survivability, mission cost, reusable and attritable platforms.

Наземні роботизовані комплекси (НРК) у сучасних умовах сформували окремий клас інтегрованих технічних систем, у яких несуча структура, рушійна база, енергетичний модуль, система керування, сенсорна підсистема та канали зв'язку функціонують як взаємозалежні елементи єдиної архітектури. Сучасні дослідження автономних наземних платформ демонструють перехід від ізольованих дистанційно керованих машин до багаторівневих автономних систем із розвиненими алгоритмами локалізації, планування

руху та інтеграції сенсорів [1], [3]. Водночас практичний досвід експлуатації показує, що визначальною умовою формування конструктивних вимог є характер середовища та економічна модель застосування.

У промисловому середовищі НРК працюють у структурованому просторі з передбачуваними геометричними параметрами, стабільним покриттям та гарантованою енергетичною інфраструктурою. Передбачуваність навантажень дозволяє застосовувати класичну інженерну парадигму оптимізації за повною вартістю життєвого циклу (Life Cycle Cost), що включає капітальні витрати, експлуатаційні витрати та вартість простоїв [2]. Саме простій є критичним фактором, оскільки навіть короточасне порушення логістичного процесу безпосередньо трансформується у фінансові втрати підприємства. Тому конструкція промислового НРК орієнтується на довговічність, прогнозованість технічного стану та планове обслуговування.

Механічна структура таких систем характеризується раціоналізованим запасом міцності, мінімізацією маси та використанням колісних рушійних схем. Відсутність потреби у подоланні пересіченої місцевості дозволяє зменшити кліренс, що покращує стійкість та знижує масу рами. Енергетична система інтегрується в інфраструктуру підприємства через стаціонарні або автоматизовані зарядні станції, тому автономність визначається виробничим циклом, а не максимальною дальністю ходу. Це дозволяє оптимізувати ємність акумуляторів та зменшити навантаження на шасі.

Інформаційна архітектура промислових НРК інтегрується з ERP, MES та WMS-системами, що формує вимоги до стандартизованих протоколів, кібербезпеки та масштабованості. У такому середовищі на перший план виходить стабільність і передбачуваність, а не адаптивність до втрати зв'язку або фізичного ураження.

Військове застосування формує принципово іншу систему обмежень. Застосування НРК у бойових умовах, що підтверджується масштабом їх використання [5], відбувається в середовищі з високим рівнем невизначеності. Рельєф може бути пересіченим або зруйнованим, ґрунти – нестабільними, інфраструктура – відсутньою, а фізичний вплив – інтенсивним і непередбачуваним. До механічних навантажень додаються імпульсні впливи від артилерійських ударів, уламкове ураження та мінна небезпека.

Складність рельєфу формує необхідність забезпечення підвищеної прохідності. Гусеничні рушійні системи забезпечують кращий розподіл навантаження на ґрунт, однак супроводжуються збільшенням маси та енергоспоживання. Колісні системи є енергоефективнішими, проте менш універсальними. Таким чином, вибір рушійної схеми визначається компромісом між мобільністю, автономністю та допустимою масою, що узгоджується з сучасними дослідженнями автономної навігації в неструктурованому середовищі [3].

Поглиблюючи аналіз конструктивних вимог, слід зазначити, що механічна складова НРК визначає граничні масогабаритні параметри, допустиме корисне навантаження, стійкість руху та довговічність усієї системи. Саме механічна архітектура формує базові обмеження для енергетичної та інформаційної підсистем, оскільки вона задає масу, центр мас, геометрію контакту з опорною поверхнею та характер динамічних навантажень. У цьому контексті конструкцію НРК доцільно розглядати як просторову силову систему, де рама, рушійна база, підвіска та трансмісійні вузли функціонують як взаємопов'язаний комплекс.

Несуча структура повинна забезпечувати достатню крутильну та вигинальну жорсткість при мінімальній масі. Для промислових НРК характерним є застосування раціоналізованих запасів міцності, орієнтованих на статичні та циклічні навантаження, що виникають під час транспортування вантажу та регулярної експлуатації. Коефіцієнти запасу міцності в таких умовах визначаються з урахуванням нормативних стандартів машинобудування і зазвичай забезпечують довготривалу роботу без пластичних деформацій елементів. При цьому надмірне підвищення запасу міцності призводить до необґрунтованого зростання маси, що негативно впливає на енергоефективність та економіку життєвого циклу.

У військових НРК підхід до формування запасів міцності є складнішим. Окрім статичних і циклічних навантажень, необхідно враховувати імпульсні перевантаження від вибухових впливів, ударні навантаження при русі по пересіченій місцевості та можливі локальні пошкодження. У таких умовах конструкція повинна забезпечувати не лише запас міцності в традиційному розумінні, а й здатність до локальної пластичної деформації без втрати несучої здатності всієї системи. Тобто важливою стає не максимальна жорсткість, а раціональне поєднання жорсткості та енергопоглинальної здатності конструкції. Просторові каркасні структури із замкнених профілів забезпечують високу крутильну жорсткість і краший розподіл напружень, що підвищує стійкість платформи до динамічних впливів.

Особливе значення має компоновка вузлів у межах рами. Центр мас повинен розташовуватися максимально низько і в межах опорного контуру платформи навіть при змінному корисному навантаженні. Для військових НРК із модульною конфігурацією необхідно враховувати можливе зміщення центру мас при встановленні різних функціональних модулів, що вимагає додаткового запасу стійкості та аналізу граничних кутів перекидання.

Рушійна система визначає контактну взаємодію з опорною поверхнею. Ключовим інженерним параметром є питомий тиск на ґрунт, який залежить від повної маси платформи та площі контакту рушійних елементів. Зниження питомого тиску підвищує прохідність на м'яких ґрунтах, однак супроводжується збільшенням маси гусеничних або широкопрофільних колісних систем. Колісні платформи мають менші механічні втрати та вищу енергоефективність, але їхня прохідність обмежується умовами поверхні. Таким чином, вибір рушійної схеми повинен базуватися на системній оцінці співвідношення прохідності, маси та енергоспоживання.

Підвіска виконує функцію зниження динамічних навантажень, що передаються на раму та електронні модулі. У промислових НРК достатніми є конструкції з обмеженим ходом, розраховані на помірні нерівності. У військових платформах доцільним є застосування більш енергоємних підвісок із підвищеним ходом та демпфувальними елементами, що дозволяє зменшити пікові прискорення корпусу. Зниження рівня переданих вібрацій безпосередньо впливає на ресурс електроніки та акумуляторних блоків, оскільки перевищення допустимих прискорень може спричинити відмови паяних з'єднань, деградацію контактів або порушення роботи сенсорів.

Механізми передавання крутного моменту повинні забезпечувати необхідне тягове зусилля при збереженні компактності та захищеності від зовнішніх впливів. Планетарні редуктори та закриті трансмісійні вузли є доцільними з точки зору мінімізації відкритих рухомих елементів і зниження чутливості до забруднення та уламкових пошкоджень. Герметизація підшипникових і редукторних вузлів є обов'язковою умовою довготривалої експлуатації в умовах пилу та волог.

Вібраційні та імпульсні навантаження формують критичний зв'язок між механічною та електронною складовими НРК. Конструкція повинна передбачати демпфувальні елементи, еластичні кріплення та ізоляцію чутливих модулів від силового каркаса. Узгодження власних частот рами та підвіски дозволяє уникнути резонансних явищ, що підвищують амплітуду коливань. Таким чином, механічна архітектура стає інструментом забезпечення функціональної збереженості інформаційної підсистеми.

Модульність механічної конструкції забезпечує можливість швидкої заміни вузлів і адаптації платформи до різних задач. Для промислових НРК це спрощує сервіс і модернізацію. Для військових – дозволяє оперативно відновлювати пошкоджені елементи та змінювати конфігурацію залежно від місії. Стандартизовані точки кріплення, уніфіковані силові інтерфейси та раціональне розміщення навісних модулів підвищують гнучкість експлуатації.

Узгодження механічних параметрів із енергетичними можливостями платформи формує прямий перехід до аналізу масо-енергетичного балансу. Збільшення запасу міцності,

посилення захисних елементів або розширення рушійної бази неминуче призводить до зростання маси, що підвищує енергоспоживання та впливає на прохідність. Таким чином, механічна складова не може розглядатися ізольовано: вона безпосередньо визначає параметри енергетичної підсистеми та ефективність виконання місії.

Масо-енергетичні взаємозалежності є центральним обмеженням проектування військових НРК. Підвищення рівня захисту або вантажопідйомності збільшує масу. Зростання маси підвищує споживання енергії та знижує прохідність. Збільшення ємності акумуляторів для компенсації енергоспоживання знову підвищує масу. Таким чином формується замкнений цикл взаємозалежностей, що потребує багатокритеріальної оптимізації. Рациональні рішення включають використання легких матеріалів, високоефективних приводів та адаптивного розподілу тяги.

Функціональна збереженість у військових НРК реалізується через конструктивні та компоновочні рішення, що знижують чутливість системи до локальних пошкоджень. Рознесення критичних вузлів у просторі зменшує ймовірність одночасної втрати систем керування та енергопостачання. Демпфування електронних модулів знижує ризик відмови плат керування внаслідок імпульсних перевантажень від вибухових хвиль. Локальний захист акумуляторних блоків і контролерів запобігає катастрофічним відмовам у разі уламкового ураження. Таким чином, забезпечується перехід системи у деградований режим роботи з обмеженим функціоналом, але збереженням здатності завершити місію.

Не менш значущим є інформаційний аспект. Нестійкість радіоканалів і вплив радіоелектронної боротьби вимагають резервування каналів зв'язку, застосування ретрансляційних або mesh-архітектур [7] та впровадження автономних режимів руху. Забезпечення інтероперабельності різних платформ потребує стандартизованих протоколів обміну даними [9].

У цьому контексті військовий парк НРК доцільно розглядати як гетерогенну систему, що включає ресурсні та витратні платформи. Ресурсні НРК розраховані на багаторазове використання, мають підвищену надійність, модульність і ремонтпридатність. Витратні НРК орієнтовані на виконання високоризикових задач із допустимою втратою, що обумовлює спрощення конструкції та зниження вартості одиниці.

Відмінність між ресурсними та витратними НРК доцільно формалізувати за такими критеріями: рівень резервування підсистем, ремонтпридатність у польових умовах, допустима ймовірність втрати під час місії та розрахунковий цикл експлуатації. Для ресурсних платформ характерне резервування каналів зв'язку та живлення, можливість заміни модулів у польових умовах і орієнтація на багаторазове використання. Для витратних систем пріоритетом є технологічність виробництва, спрощена архітектура та мінімально достатній рівень функціональності, що забезпечує виконання конкретного завдання за прийнятною вартості.

Порівняльна характеристика моделей наведена у таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняння вимог до конструкцій промислових та військових НРК

Параметр	Промислові НРК	Ресурсні військові	Витратні військові
Основний критерій оптимізації	Вартість життєвого циклу	Вартість місії при багаторазовому використанні	Вартість однієї місії
Ресурс	Довготривалий	Багаторазовий	Обмежений
Захист	Мінімальний	Локальний + резервування	Мінімально достатній
Ймовірність втрати	Низька	Середня	Висока

Параметр	Промислові НРК	Ресурсні військові	Витратні військові
Ремонт	Плановий / регламентний	Польовий	Недоцільний

Вартість місії у військовому контексті формується не лише прямими витратами, але й непрямими чинниками, які суттєво впливають на економічну доцільність застосування платформи. По-перше, слід враховувати витрати на підготовку місії, які включають перевірку технічного стану, калібрування сенсорів, тестування каналів зв'язку, підготовку оператора та забезпечення транспортної доставки платформи до району застосування. Для ресурсних НРК ця складова розподіляється на значну кількість циклів використання, тоді як для витратних вона може становити відносно більшу частку загальної вартості. По-друге, важливо враховувати деградацію ресурсу вузлів, зокрема акумуляторних модулів, елементів рушійної системи (гусениць, шин, редукторів) та електронних компонентів. Навіть за відсутності повної втрати платформи кожна місія зменшує залишковий ресурс, що повинно враховуватися у структурі амортизаційної складової. По-третє, значущим є фактор незавершеної місії. У випадку втрати платформи до виконання основного завдання виникає потреба у повторному виконанні операції іншими засобами, що збільшує сумарні витрати. Для витратних НРК це закладається у модель через допустиму ймовірність втрати, тоді як для ресурсних систем прагнуть мінімізувати такі ризики. По-четверте, доцільно враховувати ефект заміщення. Якщо застосування НРК дозволяє уникнути втрат особового складу або техніки значно більшої вартості, економічна ефективність його використання може бути виправданою навіть за високої ціни самої платформи. Таким чином, оцінювання вартості місії повинно здійснюватися з урахуванням альтернативних сценаріїв виконання завдання.

Узагальнюючи викладене, можна стверджувати, що проектування НРК переходить від парадигми максимальної надійності до парадигми системної оптимізації в умовах невизначеності. Промислові НРК оптимізуються за довготривалою економічною ефективністю та інтеграцією в цифрову інфраструктуру. Військові НРК оптимізуються за критерієм виконання місії в умовах фізичного та інформаційного впливу, де ключовими є масо-енергетичний баланс, функціональна збереженість і раціональне співвідношення вартості та тактичної ефективності.

Висновки

1. Визначальним чинником формування конструктивних вимог до наземних роботизованих комплексів є характер середовища експлуатації, який безпосередньо впливає на вибір рівня запасу міцності, тип рушійної системи, архітектуру підвіски та ступінь захисту критичних вузлів.

2. Механічна складова є системоутворювальною і задає межі масогабаритних, енергетичних та експлуатаційних параметрів комплексу; ізольоване підвищення жорсткості або захисту без урахування масо-енергетичних обмежень є неефективним.

3. Для промислових НРК оптимізація повинна здійснюватися за критерієм повної вартості життєвого циклу із забезпеченням прогнозованої надійності, мінімізації простоїв та технологічності конструкції.

4. Для військових НРК ключовою є здатність до функціонування в умовах динамічних та імпульсних навантажень, а також збереження працездатності при часткових пошкодженнях.

5. Ефективна структура військового парку передбачає поєднання ресурсних та витратних платформ із диференційованими вимогами до захисту, резервування та вартості.

6. Ефективність військових НРК повинна оцінюватися за моделлю вартості місії, яка включає амортизаційні витрати, деградацію ресурсу, витрати підготовки, ризик незавершення місії та ефект заміщення.

Практичні рекомендації

З урахуванням сформульованих висновків доцільно рекомендувати такі напрями проєктування та вдосконалення НРК.

1. На етапі концептуального проєктування здійснювати класифікацію майбутньої платформи за моделлю експлуатації (промислова, ресурсна військова, витратна військова) до визначення основних масогабаритних параметрів.

2. Формувати коефіцієнти запасу міцності з урахуванням характеру навантажень: для промислових систем – на основі прогнозованих циклічних режимів; для військових – із врахуванням імпульсних перевантажень та можливих локальних пошкоджень.

3. Оптимізувати масо-енергетичний баланс шляхом мінімізації надлишкової маси, локалізації захисту лише для критичних вузлів та використання легких матеріалів у другорядних елементах конструкції.

4. Забезпечувати низьке розташування центру мас і достатній запас стійкості при змінному корисному навантаженні, з урахуванням можливих модульних конфігурацій.

5. Реалізовувати демпфування та віброізоляцію електронних модулів як обов'язковий елемент конструкції військових НРК.

6. Впроваджувати модульну архітектуру з уніфікованими механічними та силовими інтерфейсами, що забезпечує швидку заміну пошкоджених вузлів та адаптацію платформи до різних задач.

7. Для військових систем оцінювати доцільність конструктивних рішень через призму вартості місії, а не лише технічних характеристик або вартості одиниці виробу.

8. Реалізація зазначених рекомендацій дозволяє забезпечити конструктивну раціональність, зниження надлишкової маси, підвищення стійкості до динамічних впливів та економічну доцільність застосування наземних роботизованих комплексів у різних умовах експлуатації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. La Regina R., Genel Ö. E., Pappalardo C. M., Guida D. A comprehensive review of theoretical advances, practical developments, and modern challenges of autonomous unmanned ground vehicles. *Machines*. 2025. Vol. 13, No. 12. Article 1071. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines13121071>
2. Krug S., Huber F., Verl A. Review of autonomous mobile robots in intralogistics: state of the art, limitations and research gaps. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2024. Vol. 81. P. 102554. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2023.102554>
3. Li Y., Wang Z., Chen X. Autonomous navigation for unmanned ground vehicles in unstructured terrain: a review. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 1. Article 128. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25010128>
4. Pande S. S., Rajendran R., Prabhu S. Coordination and tracking strategies for multi-unmanned vehicle systems: a systematic review. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2024. Vol. 21, No. 2. DOI: <https://doi.org/10.1177/17298814241235678>
5. Понад 7 тисяч місій за січень: Україна масштабує застосування наземних роботизованих комплексів // Міністерство оборони України : офіц. вебсайт. 2026. URL: <https://mod.gov.ua/news/2026/02/17/ponad-7-tisyach-misij-za-sichen/> (дата звернення: 20.02.2026).
6. Без екіпажу, але з місією: розробники НРК розповіли про сімейство роботів // АрміяInform : офіц. вебсайт. 2026. URL: <https://armyinform.com.ua/2026/01/28/bez-ekipazhu-ale-z-misiyeyu/> (дата звернення: 20.02.2026).
7. Parker R., et al. Unmanned ground vehicle communications relays: lessons learned. *Journal of Field Robotics*. 2019. Vol. 36, No. 5. P. 896–918. DOI: <https://doi.org/10.1002/rob.21865>
8. Ramasamy S., Sabatini R., Gardi A. Demonstrating interoperability between unmanned ground systems and command and control systems. *Defence Technology*. 2020. Vol. 16, No. 5. P. 1055–1067. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.05.004>
9. MIL-STD-810H. Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests. Washington: Department of Defense, 2019. 804 p.

Савуляк Віктор Валерійович – к.т.н., доцент кафедри технології та автоматизації машинобудування. Вінницький національний технічний університет, e-mail: vvs_81@vntu.edu.ua

Лебідь Віталій Вікторович – ст.гр.2ПМ-22б, факультет машинобудування і транспорту

Гливицький Владислав Миколайович – ст.гр.1ПМ-23б, факультет машинобудування і транспорту

Savuliak Viktor V. – Associated Professor, Ph.D., Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: vvs_81@vntu.edu.ua

Lebid Vitaliy Viktorovich – student, 2PM-22b, Faculty of Mechanical Engineering and Transport

Hlyvyi Vladislav Mykolayovich – student, 1PM-23b, Faculty of Mechanical Engineering and Transport