

УДК 007.52



В. Д. Залипка

ОБҐРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ КОМБІНОВАНОГО РУШІЯ НА НАЗЕМНИХ РОБОТИЗОВАНИХ КОМПЛЕКСАХ

Отримано подальший розвиток дослідження стійкості та прохідності наземних роботизованих комплексів (НРК), зокрема із застосуванням нових підходів, як-от використання комбінованого рушія. Розроблено теоретичні положення щодо обґрунтування раціональності застосування комбінованих рушіїв (колісно-крокуючих) для НРК на основі аналізу їх стійкості та прохідності. З'ясовано, що вагомим фактором, який впливає на особливості руху крокуючого НРК та на вимоги до його масогабаритних параметрів, є хода (спосіб локомоції) НРК. Встановлено, що у випадку крокуючого НРК з чотирма кінцівками, вони утворюють чотирикутну опорну площу. Чим більша ця площа, тим більша потенційна стійкість. Вказано основні типи перешкод та їх вплив на рух НРК з необхідним рівнем його адаптації. З'ясовано, що висота подолання перешкоди для колісного НРК переважно залежить від розмірів колеса та твердості порогу. Також розміри колеса впливають на подолання ям (рову).

Проведено низку комп'ютерних моделювань щодо порівняння колісного та крокуючого рушіїв і встановлено, що колісний рушій забезпечує кращу швидкість НРК у сприятливих для руху умовах, проте, гірше функціонує у несприятливих. Крокуючий рушій забезпечує меншу швидкість пересування НРК, однак, краще функціонуватиме за несприятливих умов руху.

Досліджено застосування комбінованого рушія при подоланні різних типів перешкод. Запропоновано алгоритми подолання відповідних перешкод при виконанні конкретних умов. Розроблено порівняльну характеристику НРК з різними типами рушіїв, яка показує їх переваги та недоліки.

К л ю ч о в і с л о в а : наземний роботизований комплекс, стійкість, прохідність, колісний рушій, крокуючий рушій, комбінований рушій.

Постановка проблеми. Сьогодні більшість наземних роботизованих комплексів (НРК) базується на колісному рушії (дещо менше на гусеничному), що забезпечує відмінні показники мобільності за сприятливих для руху умов (дорога, автошлях тощо). Втім більша частина місцевості, де НРК доводиться виконувати завдання за призначенням, мало пристосована для руху типових колісних (гусеничних) НРК [1, 2], а у багатьох випадках і зразки озброєння та військової техніки підвищеної прохідності мають обмежену мобільність.

В умовах складного рельєфу місцевості та наявності численних перешкод відчутними стають переваги НРК із крокуючим рушієм [3]. Тому поєднання колісного та крокуючого рушія є перспективним напрямом реалізації засобів локомоції НРК. Вибір масогабаритних параметрів НРК напряму залежить від його майбутніх завдань. Зокрема для пересування по нерівних поверхнях НРК може бути оснащений руховими модулями з різною кількістю кінцівок (від двох і більше) або вдосконаленою системою амортизації. У випадку використання для транспортування вантажів конструкція НРК може передбачати підвищену вантажність та покращену стійкість і прохідність. Для застосування в умовах підвищеної складності, наприклад, у військових або рятувальних операціях, важливими характеристиками є здатність адаптуватися до умов складного рельєфу і забезпечення високої маневреності. Отже, проєктування НРК з відповідними масогабаритними параметрами здійснюється відповідно до його функціонального призначення та експлуатаційних вимог.

Отже, пошук нових підходів, що дозволять покращити експлуатаційні властивості НРК, зокрема стійкість та прохідність, а також дослідження, пов'язані з розробкою та практичною реалізацією перспективних зразків НРК, є актуальними та важливими у науково-технічному аспекті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У попередніх працях [4, 5] автором запропоновано підхід до забезпечення багатфункціональності маніпуляторів НРК завдяки застосуванню технології Abenics [6], які за несприятливих умов руху можуть переходити в режим крокуючого рушія, а у випадку виходу з ладу основного колісного (гусеничного) рушія переходити в колісний режим. Даний підхід дозволяє підвищити стійкість та прохідність НРК. Розроблено математичні моделі, які описують кінематику НРК у режимі крокуючого і колісного рушіїв [7, 8], та проведено об'ємне моделювання НРК із застосуванням вказаного підходу в програмному середовищі SolidWorks.

Однак у попередніх працях не проводилось дослідження обґрунтування раціональності застосування такого комбінованого рушія у НРК.

Мета статті – розробити теоретичні положення щодо обґрунтування раціональності застосування комбінованих рушіїв у НРК на основі аналізу стійкості та прохідності.

Виклад основного матеріалу

Стійкість НРК. Проведені дослідження щодо стійкості колісних систем можна проаналізувати у праці [9], вони доволі відомі і не потребують окремої уваги. А крокуючі системи тільки починають набувати ширшого застосування, тому доцільно їх розглянути детальніше. Для НРК, оснащених крокуючим рушієм, існують різні варіанти конструктивних рішень, що відрізняються кількістю кінцівок, їхньою геометрією, розмірами та кінематичними характеристиками [10 – 13].

Основні конфігурації такі: двоногі НРК (біонічні роботи-андроїди і подібні механізми Boston Dynamics та Limx Dynamics), чотириногі НРК (квадроподи Biswal, P. & Mohanty), шестиногі НРК (гексаподи Hexbug, Stiquito, Rhex, Whlegs, Lauron), восьминогі НРК (октоподи Lauria). Варіанти з більшою або непарною кількістю кінцівок трапляються рідко, переважно як експериментальні зразки. Переваги та недоліки крокуючих систем з різною кількістю кінцівок наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняння НРК з різною кількістю кінцівок

Кількість кінцівок	2	4	6	8
Довжина кінцівок, м	0,8 – 1,5	0,5 – 1,5	0,4 – 1,2	0,3 – 1
Переваги	Здатність до пересування по нерівних поверхнях, можливість використання у міських умовах, ефективна енергетика ходи.	Висока стійкість, можливість переміщення на складних ландшафтах, хороша вантажність.	Найкраща стійкість серед усіх варіантів, можливість зберігати функціональність навіть при пошкодженні однієї або двох кінцівок.	Екстремальна стійкість, здатність до пересування навіть у випадку виходу з ладу кількох кінцівок.
Недоліки	Складність у балансуванні та висока вимогливість до алгоритмів стабілізації.	Складність керування на високих швидкостях, підвищена витрата енергії, порівнюючи з колісними платформами.	Складність конструкції та велике енергоспоживання.	Найвища складність керування та велика маса конструкції.
Джерела [10–14].				

Фундаментальним фактором, що впливає на особливості руху та вимоги до масогабаритних параметрів НРК, є хода або спосіб локомоції НРК, що передбачає узгоджений рух різних складових кінцівок і платформи при переміщенні НРК із одного місця до іншого.

Спочатку поняття ходи досліджували біологи і виявляли деякі особливі закономірності, що впливають на стійкість, швидкість та інші параметри переміщення НРК. У статті [10] при вивченні ходи введено такі поняття, як-от: «подія» (опускання чи піднімання кінцівки на опорну поверхню), «фаза підтримки» (проміжок часу, впродовж якого кінцівка перебуває у контакті з опорною

поверхнею і слугує опорою платформі), «фаза перенесення» або «цикл» (за періодичного руху проміжок часу між однаковими фазами), «крок кінцівки» (відстань, на яку вона переміщується відносно платформи під час фази підтримки), «крок платформи» (відстань, на яку переміщується центр ваги протягом одного повного циклу руху), «фаза кінцівки» (частка періоду циклу, на яку момент контакту деякої кінцівки з опорною поверхнею відстає від моменту контакту першої кінцівки).

Загалом для графічної ілюстрації ходи [14] використовують діаграми, наведені на рисунку 1. На діаграмах уздовж вертикальної осі відзначено номери кінцівок, уздовж горизонтальні осі відкладено час. Загальна довжина горизонтальної осі відповідає одному циклу. Лінії навпроти номерів кінцівок вказують, що кінцівка перебуває у фазі підтримки. Якщо НРК перебуває в стані спокою і спирається на всі чотири кінцівки, – отримуємо чотири паралельні суцільні лінії (рис. 1, а). У момент, коли НРК піднімає кінцівку для здійснення кроку, відмічаємо відсутність лінії. За такою діаграмою можна відстежити, скільки триватиме фаза перенесення та на скількох кінцівках буде опора у довільний момент часу. Наприклад, на рис. 1, б НРК переносить по одній кінцівці за раз, а на рис. 1, в – по дві кінцівки, і у цей момент, ймовірно, перебуває у нестійкому стані опори. Зручно також крок розділити на фази (субкроки): на рис. 1, б на 4, на рис. 1, в – на 2.

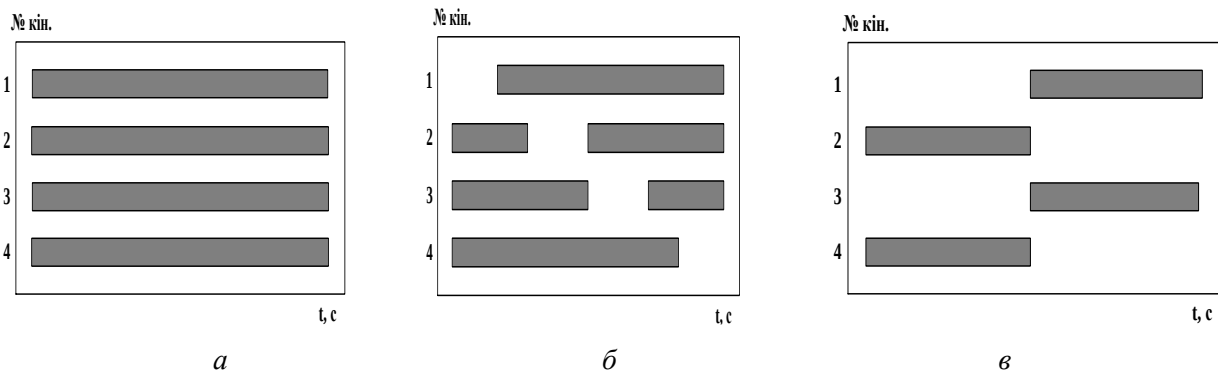


Рисунок 1 – Діаграми ходи крокуючого НРК

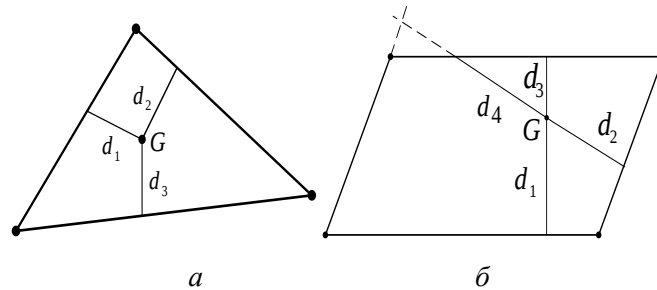
Стійкість і прохідність [9] – це динамічно пов’язані експлуатаційні властивості, які часто вступають у суперечність. Розробники НРК повинні знаходити баланс між ними залежно від цільового середовища. Часто для подолання перешкоди доводиться займати заздалегідь нестійке положення (для кращої прохідності потрібно більше кінцівок виводити з опори, переставляти їх, що зменшує площу опор), тому при вивченні прохідності слід звернути увагу і на стійкість. Для знаходження балансу між цими показниками сучасні НРК широко використовують розумне керування центром мас (активне зміщення корпусу перед переставлянням кінцівки, що допомагає зберегти центр мас у межах опорної площі навіть за складних умов), змінну геометрію кінцівок (якщо кінцівки мають більше ступенів вільності, вони можуть адаптуватися до рельєфу без значного впливу на центр мас – це підвищує прохідність без значної втрати стійкості) та інші прийоми.

Згідно з положеннями класичної механіки [15] стійкість твердого тіла безпосередньо пов’язана з просторовим розташуванням проєкції його центра мас відносно площини або області, обмеженої точками опори. Інакше кажучи, об’єкт перебуває у стійкій рівновазі тоді й лише тоді, коли вертикальна проєкція центра мас розміщується всередині площі опори (яка визначається геометричним контуром опорних точок). Аналізуючи стійкість, враховують вертикальну проєкцію об’єкта на площину опори. Якщо вона розташована в межах площі опори, то за незначних зовнішніх впливів тіло зазвичай повертається у вихідне положення, тобто лишається у стійкому стані. Якщо ж проєкція виходить за межі площі опори, тіло втрачає рівновагу і перекидається. У випадку, коли на тіло діють додаткові сили з відмінними від нуля горизонтальними складовими, висота положення центра мас теж має значення для стійкості. Наразі обмежимося лише дією сили тяжіння. Цей принцип має критичне значення в інженерії, де розрахунок стійкості конструкцій або тіл є необхідним для забезпечення їх безпечної експлуатації.

У аналізі стійкості крокуючого НРК з чотирма кінцівками принцип розташування проєкції центра мас відносно опорної площі є ключовим для забезпечення його стабільності під час руху та у стані

спокою. У випадку, коли всі чотири кінцівки знаходяться в контакті з поверхнею, вони утворюють чотирикутну опорну площу. Чим більша ця площа, тим більша потенційна стійкість.

У статті [10] використано поняття «межа стійкості $S(d_1; d_2; d_3; d_4)$ » – найкоротша відстань від вертикальної проєкції центра мас до меж опорної площі в горизонтальній площині (рис. 2).



а – три точки опори; б – чотири точки опори

Рисунок 2 – Опорна площа та межа стійкості НРК

Запас поздовжньої стійкості S_1 – це менша з відстаней від проєкції центра маси до передньої та задньої меж уздовж осі руху НРК (рис. 3). Фізичний смисл запасу поздовжньої стійкості – показати, на скільки НРК у напрямку руху може зміститись без втрати стійкості.

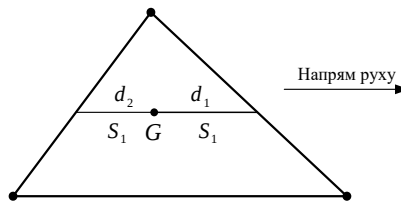


Рисунок 3 – Запас стійкості під час руху НРК

Під час руху одна або більше кінцівок можуть відриватися від опорної поверхні. У такому випадку опорна площа зменшується, і контроль за розміщенням центра мас стає критичним. Часто застосовується алгоритм «штативної» (трикутної) стійкості: три кінцівки залишаються на опорній поверхні, утворюючи стабільну трикутну площу, всередині якої повинен залишатися центр мас.

Очевидно, що за наявності лише двох точок опори таке положення НРК буде нестійким, у випадку, коли точки опори є власне математичними точками із нульовою площею, форма кінцівок починає грати суттєву роль. Також стійкість забезпечується динамічним підлаштуванням центра маси та реакцією на зміщення центра маси від лінії, що сполучає точки опори. Більш складним завданням є дослідження і опис динамічної рівноваги, тобто рівноваги у русі під дією сукупності сил, частина яких може мати випадковий характер. Очевидною є перевага гексаподів над тетраподами, і взагалі – чим більше кінцівок має крокуючий НРК, тим більша гнучкість у побудові опорної площі та легше підтримувати проєкцію центра мас у безпечній зоні. Це дозволяє спростити алгоритми керування рівновагою, особливо на нерівній поверхні або під час виконання складних маневрів. Існує безліч способів будувати ходу НРК. Виокремлюють основні групи ходи, як-от: хвильові, рівнофазові, рух за лідером [12, 13, 14].

Дослідимо, як хода впливає на стійкість. На рисунку 4 суцільною точкою відзначаємо проєкцію центра маси, пунктирною лінією – лінію руху, порожнистими точками – точки опори, суцільною лінією – межі опорної площі, символами a та x – точки, з яких та до яких переміщається кінцівка.

Як видно з рисунків 4, а; 4, б та 4, в, стартуючи з максимально стійкого симетричного положення, отримуємо положення, коли межа стійкості $S = 0$. Проте у випадках, наведених на рисунках 4, б і 4, в, уже на другому субкроці отримуємо положення центра маси в межах опорної площі з $S > 0$. Використовуючи математичні методи та прийоми елементарної геометрії, можна вирішити завдання

щодо вибору ходи, за якої буде забезпечуватися певна мінімальна межа стійкості S . Для цього слід побудувати довкола проєкції центра маси коло із заданим радіусом S , провести дотичну до цього кола та визначити точку U її перетину з прогнозованою лінією руху кінцівки V . Отримана точка U і буде відзначати майбутнє положення кінцівки V , що забезпечує задану межу стійкості S (рис. 4, з).

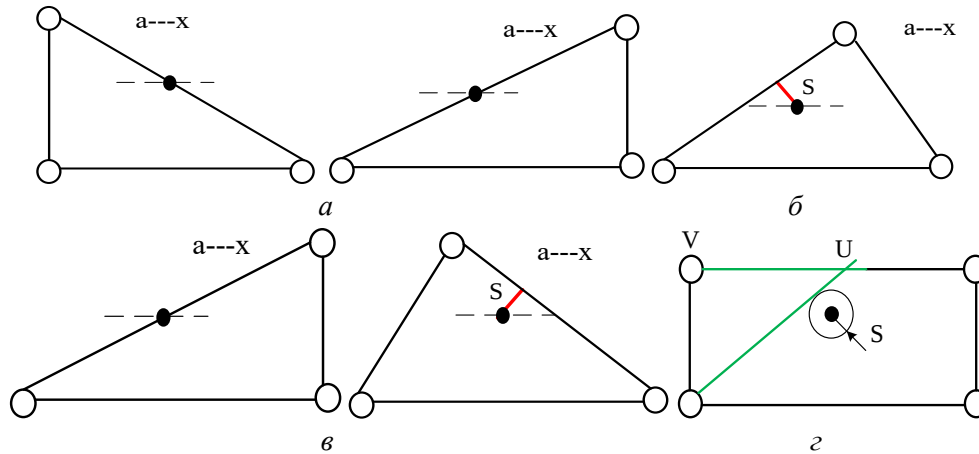


Рисунок. 4 – Вплив ходи НРК на його стійкість

Додаткові можливості маневру забезпечує можливість зміни положення центра маси щодо центра симетрії точок опори (або, що еквівалентно, зміна положення точок опори довкола центра симетрії).

Прохідність НРК. Одним із завдань більшості НРК є пересування на визначену відстань, зокрема по пересіченій місцевості. У зв'язку з цим особливу увагу звертають на прохідність НРК [9, 16].

Прохідність НРК – це його здатність пересуватися по різних типах поверхонь, долати перешкоди та ефективно працювати в складних умовах. Вона визначається конструкційними особливостями, типом приводу, дорожнім просвітом і системою керування рухом.

Основні типи рушіїв – колісні, гусеничні та крокуючі. Перші зазвичай мають перевагу у швидкості та економічності, решта мають підвищену прохідність, що по-різному проявляється для різних типів місцевості. Повний привід покращує зчеплення з поверхнею; регульована підвіска допомагає адаптуватися до нерівностей.

Наявність відповідних умов та перешкод [1, 2, 9] для руху НРК (рис. 5) вносить суттєві зміни у вибір ходи і навпаки, вибір ходи часто дає змогу порівняно легко долати певні види перешкод. Ефективність крокуючої системи тісно пов'язана з вибраним типом ходи. Хвильова хода, наприклад, забезпечує оптимальну стійкість і застосовується для пересування по ідеально рівній поверхні. Натомість хід «слідом за лідером» має найменші вимоги до вибору точок опори і є найпридатнішим для пересування по нерівному рельєфу.

Класифікація перешкод для НРК, які можуть виникати на його шляху, дозволяє виокремити такі типи перешкод: локальні нерівності мікрорельєфу, великі перешкоди рельєфу (макроперешкоди), м'які або нестабільні поверхні, зони з обмеженим або забороненим контактом, динамічні або небезпечні об'єкти на траєкторії та інші. Розуміння впливу таких перешкод на рух НРК та необхідності відповідної адаптації НРК в умовах, що склалися, дає таблиця 2.

У ході досліджень руху НРК перешкоди моделюються таким чином (рис. 6). Вирви та ями моделюються подоланням рову, якщо поперечний вимір перешкоди не дає змоги його обійти (рис. 6, а), а як ні – виникає задача на подолання поверхні із забороненими зонами. Каміння та валуни моделюються подоланням стіни (рис. 6, б). Також як перешкода розглядається окрема сходинка різної геометрії (рис. 6, в та 6, з).



Рисунок 5 – Потенційні умови та перешкоди для руху НРК

Таблиця 2 – Вплив перешкод на рух НРК та необхідний рівень його адаптації

Тип перешкоди	Приклади	Вплив на рух	Необхідна адаптація
Мікрорельєф	Каміння, ями	Помірний	Амортизація, стабілізація
Макроперешкоди	Вирви, великі валуни	Високий	Ходи для подолання перешкод
Нестабільні поверхні	Болото, лід	Критичний	Аналіз несної здатності, альтернативні опори
Заборонені зони	Міни, пастки	Критичний	Планування безпечних точок опори
Штучні конструкції	Сходи, руїни	Високий	Точне моделювання геометрії
Динамічні перешкоди	Люди, техніка	Змінний	Сенсорна адаптація, реактивне керування
Джерела [9–15].			

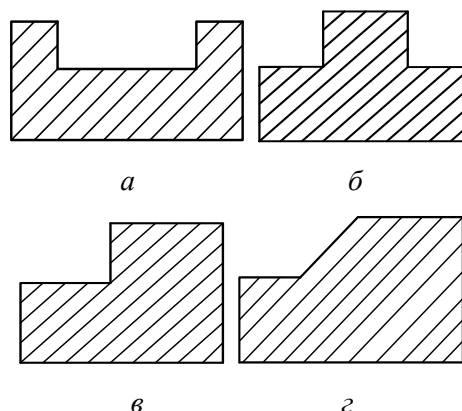


Рисунок 6 – Геометричне подання перешкод

Якщо говорити про подолання перешкод саме колісними НРК, то з теорії руху автомобіля відомо,

що висота подолання перешкоди h_n (рис. 7) в основному залежить від розмірів колеса та твердості порогу. Максимальна висота подоланого порогу неповноприводним НРК становить 0,3-0,5 радіуса колеса, а повноприводним – 0,5-0,8 [9]. Також розміри колеса впливають на подолання ям (рову).

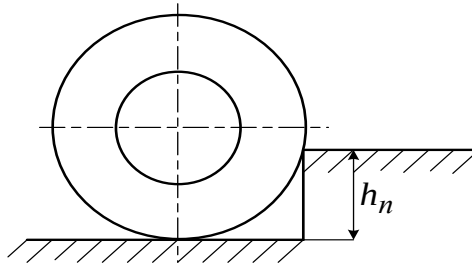


Рисунок 7 – Подолання колесом порогової перешкоди

Враховуючи вище зазначене, очевидним є те, що при подоланні певної відстані на шляху НРК будуть як сприятливі, так і несприятливі умови для його руху. Якщо умови руху сприятливі (тверде покриття, ґрунтова дорога та інша рівнинна місцевість), то безумовно краще для руху НРК, щоб забезпечити належну швидкість, використовувати колісний рушій, якщо ж несприятливі (пороги, ями) – крокуючий.

Для кращого розуміння наявності переваг та особливостей застосування у НРК колісного чи крокуючого рушіїв проведено низку комп'ютерних моделювань. Використані довільні однакові характеристики НРК, різниця тільки в типі рушія. На всіх нижче поданих графіках прийнято позначення: 1 – колісний НРК; 2 – крокуючий НРК.

Отже, на рисунку 8 наведено графічне подання моделювання досягнення успіху (ймовірності подолання маршруту) НРК на різних сприятливих та несприятливих ділянках місцевості.

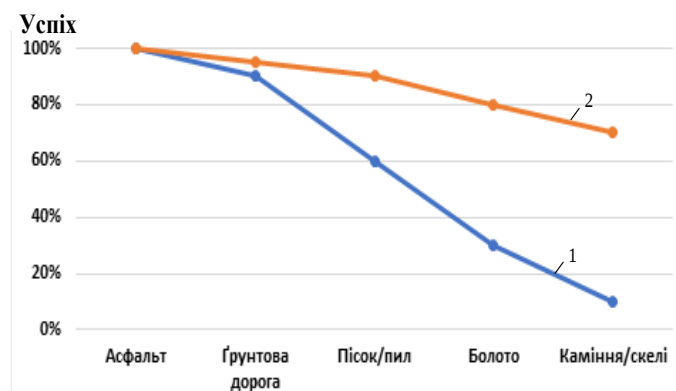


Рисунок 8 – Графічне подання досягнення НРК успіху при подоланні різних типів місцевості

На графіку видно, що під час руху НРК за сприятливих умов (асфальт, ґрунтова дорога) обидва рушії функціонують належним чином, а на складному рельєфі (пісок, болото, каміння) крокуючий НРК значно перевершує колісного.

На рисунку 9 наведено графічне подання моделювання досягнення успіху НРК під час подолання порогових перешкод висотою від 10 см до 50 см.

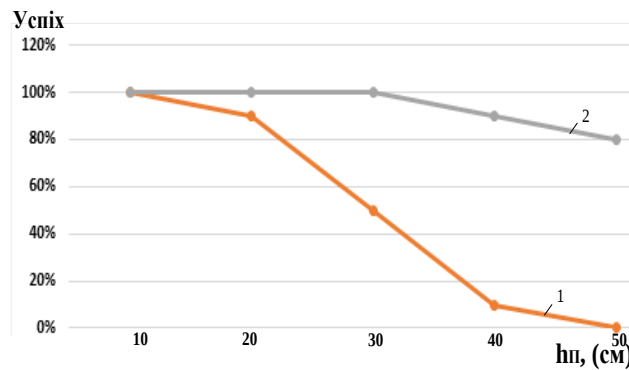


Рисунок 9 – Графічне подання досягнення НРК успіху при подоланні порогових перешкод різної висоти

З графіка видно, що з вищими перешкодами краще справляється НРК з крокуючим рушієм.

На рисунку 10 наведене графічне подання моделювання витрати енергії НРК при подоланні одного метра різних типів ділянок місцевості.

Графічне подання моделювання показує, що у колісного НРК перевага тільки на твердому покритті, а при подоланні інших типів ділянок місцевості на подолання одного метра витрачається більше енергії, ніж у випадку НРК з крокуючим рушієм.

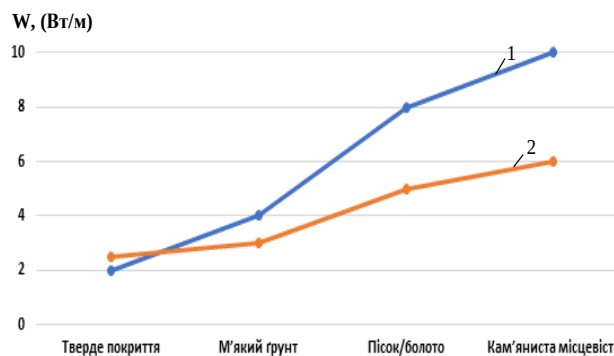


Рисунок 10 – Графічне подання моделювання витрати енергії НРК при подоланні одного метра різних типів місцевості

Наступний етап – моделювання швидкості НРК на різних типах місцевості (рис. 11).

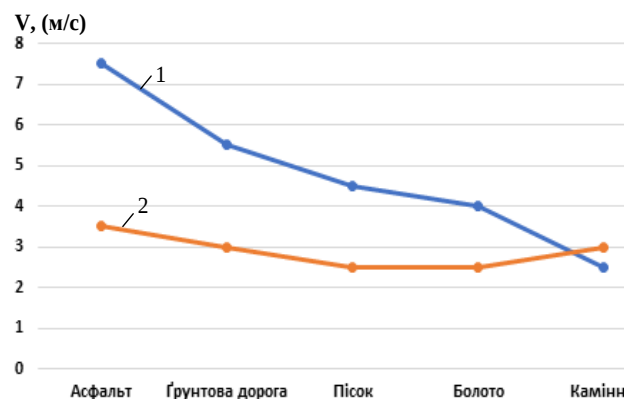


Рисунок 11 – Графічне подання моделювання швидкості руху НРК при подоланні різних типів місцевості

Безумовно, що колісний НРК матиме перевагу у швидкості над крокуючим, однак слід пам'ятати, що в реальних умовах, починаючи з піщаної місцевості (рис. 11), можлива втрата прохідності.

Отже, можемо констатувати, що колісний рушій забезпечує кращу швидкість НРК у сприятливих

для руху умовах (тверде покриття, ґрунтові дороги), проте, гірше функціонує у несприятливих (складний рельєф, пісок, болото, каміння). Крокуючий рушій забезпечує меншу швидкість пересування НРК, однак, все одно буде краще функціонувати за несприятливих умов руху, що збільшує ймовірність виконання завдання НРК.

Враховуючи ці очевидні практичні аспекти та раціональну обумовленість, автор пропонує застосувати на НРК комбінований рушій, тобто при русі НРК за сприятливих умов використовуватиметься колісний (можливо гусеничний) рушій, а при русі НРК за несприятливих умов – крокуючий. Технічний вигляд такого перспективного НРК обґрунтовано та наведено у праці [4].

Особливості застосування комбінованого рушія. Дослідимо, як перспективний чотириколісний НРК з поєднаним крокуючим рушієм із чотирма симетрично розташованими дволанковими кінцівками долатиме ямкову перешкоду заданої глибини і довжини (рис. 12).

Якщо глибина ями менше на 30-40 % діаметра колеса, цю перешкоду НРК може подолати виключно із застосуванням колісного рушія як звичайний автомобіль, незалежно від довжини ями.

Якщо довжина ями більше діаметра колеса, але менше довжини НРК, для подолання перешкоди доречно використати додаткову опору із кінцівок, які однаково розміщені поруч із колесом, що долає перешкоду (рис. 12, а). Для цього має виконуватись умова

$$(K + L)^2 > H^2 + D^2, \quad (1)$$

тобто кінцівка повинна бути достатньої довжини.

Якщо довжина ями значна (більше довжини НРК із деяким запасом), то подолання такої перешкоди зводиться до подолання двох перешкод типу, зображеного на рисунку 6, в, у прямому та зворотному напрямках, тобто кінцівками необхідно буде опускатись на дно ями.

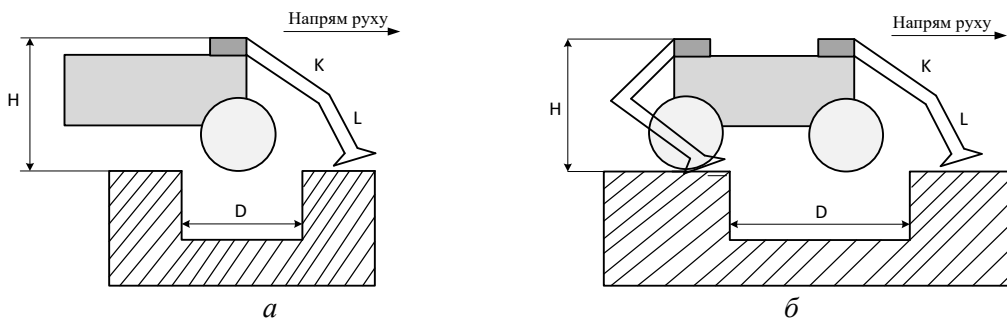


Рисунок. 12 – Схематичне зображення подолання перспективним НРК ямкової перешкоди

Якщо ж довжина ями дорівнює довжині НРК або дещо більша, що дозволяє не опускатись кінцівками на дно ями, то таку перешкоду НРК долає із використанням крокуючого рушія (рис. 12, б) за алгоритмом, наведеним у таблиці 3.

У випадку втрати прохідності НРК на горбистій місцевості, як зображено на рисунку 13, достатньо збільшити дорожній просвіт завдяки підйому кінцівками платформи для виходу з контакту з опорною поверхнею, щоб продовжити рух.

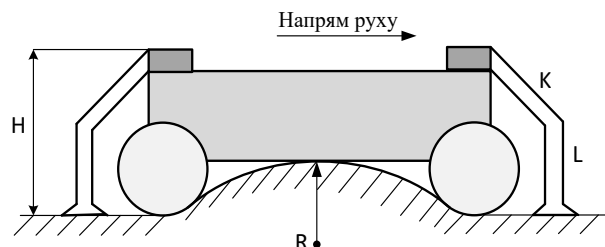


Рисунок 13 – Схематичне зображення подолання перспективним НРК горбистих ділянок місцевості

Таблиця 3 – Алгоритм подолання ямкової перешкоди перспективним НРК

Послідовність дій	Дія НРК
1	Передні кінцівки створюють точку опори перед ямою, опускаються за межі ями й закріплюються на твердій поверхні.
2	Підтягування передньої частини платформи (за допомогою коліс та роботи кінцівок) передня частина корпусу просувається над ямою, не допускаючи втрати стійкості – проєкція центра мас не повинна переміститись у область ями.
3	Задні кінцівки стабілізують задню частину і переміщуються максимально близько до ями. Можливе зниження центра ваги НРК.
4	Передні кінцівки можуть або переміщатись на другу сторону ями, або переставлятися до ями, якщо потрібно збільшити стабільність, а глибина та тип дна ями допускають такий маневр.
5	Центр ваги переміщаємо на другу сторону ями узгодженою роботою усіх кінцівок.
6	Задні кінцівки переносяться і стабілізують на другу сторону ями. Можливе підвищення центра мас НРК.

Проаналізуємо, як перспективний НРК з комбінованим рушієм долатиме перешкоду у вигляді ізолюваної стіни (рис. 6, б). Тут можна виокремити два випадки. Перший – ширина стіни є достатньою, а її поверхня допускає розміщення НРК на стіні. Тоді подолання такої перешкоди, як відомо з праці [10], зводиться до подолання двох перешкод типу, зображеному на рис. 6, в, у прямому та зворотному напрямках (рис. 14).

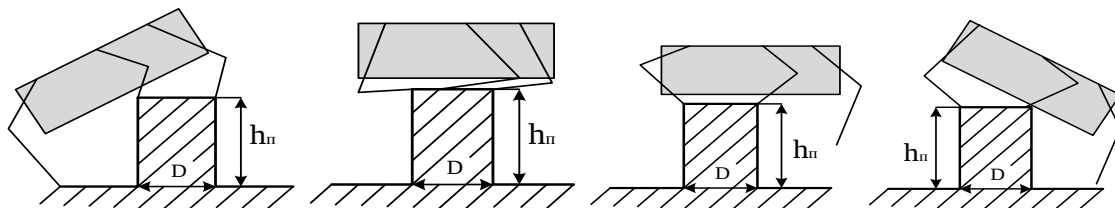


Рисунок 14 – Схематичне зображення подолання перспективним НРК перешкоди у вигляді широкої ізолюваної стіни

Другий випадок – ширина стіни є малою. Один із варіантів подолання такої перешкоди зображено на рисунку 15, проте, деталі залежать від розміру коліс та можливості спиратися на дно НРК і передбачають несиметричну опору на ліві та праві кінцівки.

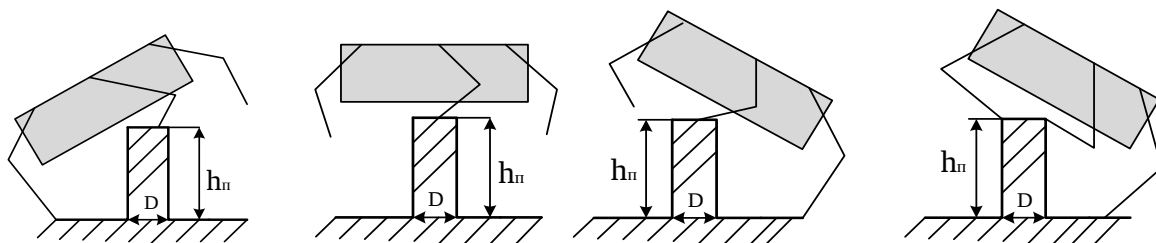


Рисунок 15 – Схематичне зображення подолання перспективним НРК перешкоди у вигляді вузької ізолюваної стіни

З результатів наведених досліджень видно переваги крокуючого рушія, а саме: можливість переступання перешкоди; кінцівки здатні підійнятися вище рівня платформи, чого не може зробити колесо; адаптивність до структури сходів (кінцівки можна ставити на окремі сходинки з

індивідуальним контролем висоти й кута); статична або квазістатична стабільність зберігається завдяки багатоточковій опорі; здатність зачеплення за край (навіть вузький край сходинки можна використовувати як тимчасову опору для кінцівки).

Для кращого розуміння подолання порогових перешкод перспективним НРК із застосуванням комбінованого рушія на рисунку 16 наведене схематичне зображення цього процесу, а в таблиці 4 – безпосередньо сам алгоритм.

Таблиця 4 Алгоритм подолання порогової перешкоди перспективним НРК

Позиція	Дія НРК
<i>a</i>	Фіксація передньої кінцівки на перешкоді, формування там точки опори.
<i>б</i>	Перенесення другої передньої кінцівки на перешкоду, крок задньою.
<i>в</i>	Рівномірний розподіл маси на дві передні і одну задню кінцівки, переміщення впритул до перешкоди.
<i>г</i>	Розподіл маси на дві передні і одну задню кінцівки, перенесення задньої кінцівки на перешкоду. Якщо колесо зачіпає перешкоду, то крутний момент на колесі допомагає подоланню.
<i>д</i>	Перенесення маси на три точки опори на перешкоді.
<i>е</i>	Повне переміщення на перешкоду.

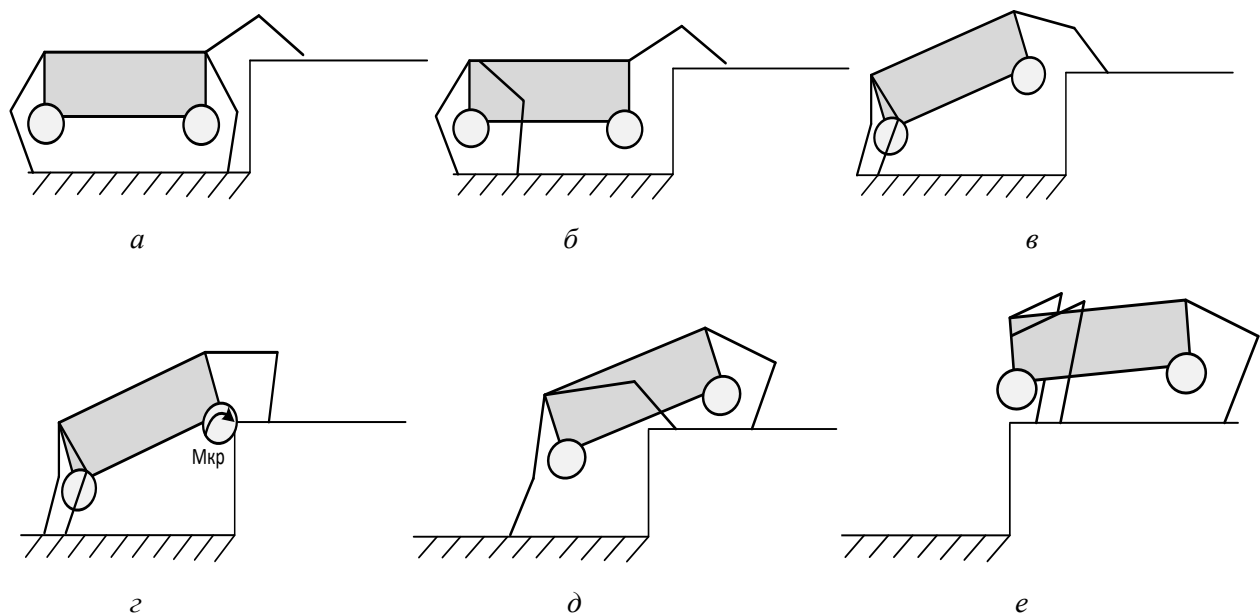


Рисунок 16 – Алгоритм подолання порогової перешкоди перспективним НРК

Для можливості реалізації позицій алгоритму, наведеного в таблиці 4, необхідним є виконання такого співвідношення:

$$2K + L > h_n, \quad (2)$$

де $K; L$ – довжини ланок кінцівок НРК (рис. 12);

h_n – висота перешкоди (рис. 14 та 15).

Зауважимо, що слід розрізняти безумовне та умовне подолання перешкоди. Приклад першого наведений на рисунку 16. Умовне подолання цієї ж перешкоди ілюструє граничний випадок – коли точки P, R, F, T, Q знаходяться на одній прямій (рис. 17). Такий алгоритм дозволяє долати більші перешкоди. Одна з умов подолання:

$$(2K + L + N) \sin \beta > h_n, \text{ при чому } K < L, \quad (3)$$

де N – відстань між R та F ;

β – кут між лінією P, R, F, T, Q і горизонтом.

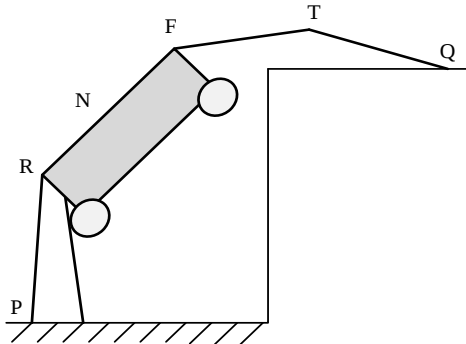


Рисунок 17 – Схематичне зображення умовного подолання перспективним НРК порогової перешкоди

Проте для реалізації такого варіанта мають бути належні опорні умови некінематичного характеру у точках P та Q (відсутність проковзування та надійне зчеплення).

Отже, перспективні НРК з комбінованим рушієм мають очевидні переваги у подоланні порогових перешкод завдяки наявності кінематично незалежних точок опори (кінцівок), які можуть адаптивно змінювати положення в просторі, забезпечуючи стійкість та прохідність НРК. Для кращого розуміння переваг чи недоліків НРК різних типів у таблиці 5 наведено їх порівняльну характеристику.

Таблиця 5 – Порівняльна характеристика НРК з різними типами рушіїв

Критерій	Колісний НРК	Крокуючий НРК	НРК з комбінованим рушієм
Подолання високих перешкод	Обмежено радіусом колеса	Переступання або піднімання кінцівкою	Колісний режим і коли необхідно подолання кінцівками
Збереження рівноваги на сходах	Можливе перекидання	Стійкий через зміну опорної площі	Активна компенсація кінцівками щодо перекидання
Маневреність на сходах	Обмежена	Висока	Висока
Точне позиціонування опори	Відсутнє	Вибіркове розміщення кінцівок	Можливість зміни точки контакту
Плавність подолання	Різкий удар до краю перешкоди	Контрольована траєкторія кінцівки	Плавне подолання завдяки кінцівкам
Навантаження на платформу	Стрибкоподібне зростання	Розподіл навантаження через кінцівки	Комбіноване гасіння ударів
Швидкість руху	Підвищена тільки за сприятливих умов	Менша за сприятливих умов та зберігається за несприятливих	Підвищена за сприятливих умов та менша за несприятливих
Ймовірність виконання завдання	За несприятливих умов суттєво знижується	Підвищена за несприятливих умов, однак, з більшим часом	Підвищена за будь-яких умов

З наведеної порівняльної характеристики випливає, що на відміну від суто колісних НРК, чия прохідність обмежується геометрією колеса, або суто від крокуючих, які не забезпечують належної швидкості, комбінований рушій дозволяє ефективно поєднувати мобільність на рівній поверхні з прохідністю на складному рельєфі, що в цілому збільшує ймовірність виконання завдання за призначенням.

Ураховуючи отримані результати, перспектива подальших досліджень полягатиме в оцінюванні бойової ефективності перспективного НРК з комбінованим рушієм, порівнюючи з існуючими колісними (гусеничними, крокуючими) рушіями.

Висновки

У статті розроблено теоретичні положення щодо обґрунтування раціональності застосування комбінованих рушіїв у НРК на основі аналізу стійкості та прохідності. З'ясовано, що вагомим фактором, який впливає на особливості руху крокуючого НРК та на вимоги до його масогабаритних параметрів, є хода або спосіб локомоції НРК, що передбачає узгоджений рух різних складових кінцівок і платформи при переміщенні НРК із одного місця до іншого. Встановлено, що у випадку крокуючого НРК з чотирма кінцівками, коли всі чотири кінцівки знаходяться в контакті з поверхнею, вони утворюють чотирикутну опорну площу. Чим більша ця площа, тим більша потенційна стійкість.

Вказано основні типи перешкод та їх вплив на рух НРК з необхідним рівнем його адаптації. З'ясовано, що висота подолання перешкоди для колісного НРК здебільшого залежить від розмірів колеса та твердості порогу. Максимальна висота подоланого порогу неповноприводним НРК становить 0,3-0,5 радіуса колеса, а повноприводним – 0,5-0,8. Також розміри колеса впливають на подолання ям (рову). Проведено низку комп'ютерних моделювань щодо порівняння колісного та крокуючого рушія і встановлено:

- під час руху НРК за сприятливих умов (асфальт, ґрунтова дорога) обидва рушії функціонують належним чином, а на складному рельєфі (пісок, болото, каміння) крокуючий НРК значно перевершує колісного;
- під час подолання порогових перешкод висотою від 10 см до 50 см досягнути успіху з вищими перешкодами вдається крокуючому НРК;
- у колісного НРК перевага у затраті енергії тільки на твердому покритті, при подоланні інших типів ділянок місцевості на подолання одного метра витрачається більше енергії, ніж у НРК з крокуючим рушієм;
- колісний НРК матиме перевагу у швидкості над крокуючим, однак, у реальних умовах, починаючи з піщаної місцевості, можлива втрата прохідності.

Колісний рушій забезпечує кращу швидкість НРК у сприятливих для руху умовах, проте, гірше функціонує у несприятливих. Крокуючий рушій забезпечує меншу швидкість пересування НРК, однак, все одно буде краще функціонувати за несприятливих умов руху. Отже, встановлено раціональність підходу щодо застосування комбінованого рушія.

Наведено переваги застосування комбінованого рушія (колісно-крокуючого) при подоланні різних типів перешкод. Запропоновано алгоритми подолання відповідних перешкод при виконанні конкретних умов. Розроблено порівняльну характеристику НРК з різними типами рушіїв, яка показує їх переваги та недоліки.

Окреслено перспективу подальших досліджень, що полягає в оцінюванні бойової ефективності перспективного НРК з комбінованим рушієм, порівнюючи з існуючими колісними (гусеничними, крокуючими) рушіями.

Перелік джерел посилання

1. Класифікація бойових наземних робототехнічних комплексів – дієвий шлях до з'ясування сутності цієї категорії озброєння / Чепков І. Б., Григор'єв О. П., Беліков В. Т., Ковалішин С. С. *Наука і оборона*. 2017. № 3/4. С. 66–72.
2. Засади розвитку роботизованих систем в Збройних Силах України : монографія / В. Ф. Залужний та ін.; за заг. ред. проф. О. М. Семененка. Київ : 7БЦ, 2023. 348 с.

3. Biswal P. & Mohanty P. K. (2021). Development of quadruped walking robots: A review. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(2), 2017-2031.
4. Залипка В. Д. Моделювання засобів взаємодії багатоцільових роботизованих платформ із зовнішніми об'єктами та середовищем в процесі їх трансформації. *Науковий вісник НЛТУ України*. Львів, 2023. Вип. 33 (4). С. 65 – 70. DOI:10.36930/40330409.
5. Залипка В. Д. Конструкційні особливості маніпулятора-рушія для багатоцільових роботизованих платформ. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*. Черкаси, 2024. № 3 (21). С. 35–42. DOI:10.37701/dndivsovt.21.2024.04.
6. Kazuki Abe, Kenjiro Tadakuma, Riichiro Tadakuma. ABENICS: Active Ball Joint Mechanism With Three-DoF Based on Spherical Gear Meshings. April 2021. *IEEE Transactions on Robotics* PP (99). DOI:10.1109/TRO.2021.3070124.
7. Залипка В. Д. Кінематика руху багатоцільових роботизованих платформ з багатофункціональними маніпуляторами в режимі крокуючого рушія. *Системи озброєння і військова техніка*. 2024. № 2 (78). С. 55–64. DOI:10.30748/soivt.2024.78.06.
8. Залипка В. Д. Кінематика руху багатоцільових роботизованих платформ з багатофункціональними маніпуляторами в режимі колісного рушія. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. Харків, 2024. № 2 (80). С. 124–133. DOI:10.30748/zhups.2024.80.16.
9. Волков В. П., Вільський Г. Б. Теорія руху автомобіля : підручник. Суми : Університетська книга, 2015. 320 с.
10. Shin-Min Song, K. J. Waldron. Geometric Design of a WalkingMachine for Optimal Mobility. *Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*. March. 1987. Vol. 109. Pp. 21–28.
11. Robust rough-terrain locomotion with a quadrupedal robot / P. Fankhauser et al. *In Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Brisbane, Australia, 21–25 May 2018. Pp. 5761–5768.
12. Footholds optimization for legged robots walking on complex terrain / Y. Yin et al. *Front. Mech. Eng.* 18, 26 (2023). DOI:10.1007/s11465-022-0742-y.
13. A walking and climbing quadruped robot capable of ground-wall transition: design, mobility analysis and gait planning / S Fang et al. *Intel Serv Robotics*. 2023. 16. Pp 431–451 DOI:10.1007/s11370-023-00475-5.
14. Xi-Ding Qiu, Shin-Min Song. A Strategy of Wave Gait for aWalking Machine Traversing a Rough Planar Terrain. *Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*. December. 1989. Vol. 111. Pp. 471–478.
15. Теоретична механіка : навч. посіб. / Черниш О. М., Березовий М. Г., Яременко В. В., Головач І. В. Київ : Центр навч. літ., 2018. 760 с.
16. Choi B. S., Song S. M. Fully automated obstacle-crossing gaits for walking machines. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. 1988. 18 (6). Pp. 952–964.

Стаття надійшла до редакції 05.07.2025 р.

UDC 007.52

V. Zalyпка

JUSTIFICATION OF THE RATIONALIZATION OF THE APPLICATION OF A COMBINED PROPULSION ON GROUND ROBOTIC COMPLEXES

The article develops theoretical provisions on the justification of the rationality of the use of combined engines on ground robotic complexes (GRCs) based on the analysis of stability and cross-country ability. It was found that a significant factor affecting the features of the movement of a walking GRC and the requirements for its mass and dimensions is the gait or method of locomotion of the GRC, which involves the coordinated movement of various components of the limbs and the platform when moving the GRC from one

place to another. It was established that in the case of a walking GRC with four limbs, when all four limbs are in contact with the surface, they form a quadrangular support area. The larger this area, the greater the potential stability. The main types of obstacles and their impact on the movement of the GRC with the necessary level of its adaptation are indicated. It was found that the obstacle overcoming height for a wheeled GRC mainly depends on the wheel dimensions and the hardness of the threshold. The maximum height of the threshold overcome by a full-wheel drive GRC is 0,3-0,5 of the wheel radius, and by a full-wheel drive 0,5-0,8. The size of the wheel also affects the overcoming of pits (ditches). A number of computer simulations have been conducted to compare the wheeled and walking engines and it has been established: during the movement of the GRC under favorable conditions (asphalt, dirt road) both engines function properly, but on difficult terrain (sand, swamp, stones) - the walking GRC is significantly superior to the wheeled one; when overcoming threshold obstacles with a height of 10 to 50 cm, the walking GRC manages to achieve success with higher obstacles; in terms of energy consumption - the wheeled GRC has an advantage only on hard surfaces, and when overcoming other types of terrain, more energy is spent on overcoming 1 m than in the case of the GRC with a walking engine; wheeled GRC will have an advantage in speed over walking, but in real conditions, starting from sandy terrain, a loss of patency is possible. So, a wheeled engine provides a better speed of GRC in favorable conditions for movement, but it functions worse in unfavorable conditions. A walking engine provides a lower speed of movement of GRC, but it will still function better under unfavorable conditions. Thus, the rationality of the approach to the use of a combined engine is established. The advantages of using a combined engine (wheeled-walking) when overcoming various types of obstacles are presented. Algorithms for overcoming the corresponding obstacles when specific conditions are met are proposed. A comparative characteristic of GRC with different types of engines is developed, which shows their advantages and disadvantages.

К е у о р д с : ground robotic complex, stability, cross-country ability, wheeled propulsion, stepping propulsion, combined propulsion.

Залипка Василь Дарійович – кандидат технічних наук, доцент, докторант Національної академії Сухопутних військ імені гетьмана П. Сагайдачного.
<https://orcid.org/0000-0002-5189-8370>