

УДК 007.52



В. Д. Залипка

ВИЗНАЧЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗНИКА ЕФЕКТИВНОСТІ НАЗЕМНИХ РОБОТИЗОВАНИХ КОМПЛЕКСІВ ІЗ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИМИ МАНІПУЛЯТОРАМИ В АСПЕКТІ ЇХ МОБІЛЬНОСТІ

У статті розроблено теоретичні положення щодо визначення інтегрального показника ефективності наземних роботизованих комплексів із багатофункціональними маніпуляторами (НРК з БМ) в аспекті їх мобільності. Встановлено, що використання множини Парето є зручним методом дослідження двокритеріальної оптимізації, що дає розуміння взаємодії показників критеріїв, структури компромісів і придатності тих чи інших підходів для пошуку рішень. Шляхом визначення інтегрального показника ефективності проведено багатокритеріальну оптимізацію НРК з БМ, для якого було сформовано модель, складові якої можуть варіюватися та мати різну вагомість залежно від призначення НРК з БМ.

К л ю ч о в і с л о в а: наземний роботизований комплекс, багатофункціональний маніпулятор, мобільність, оптимізація, ефективність.

Постановка проблеми. Більшість сучасних наземних роботизованих комплексів (НРК) займають проміжне положення між універсальними та спеціалізованими роботизованими системами. Ступінь універсальності або спеціалізованості НРК, а також вибір конкретних напрямів їх застосування є визначальними чинниками оцінювання ефективності, гнучкості та економічної доцільності НРК [1–4]. Зростання рівня універсальності супроводжується ускладненням конструкції, збільшенням вартості виготовлення та розширенням спектра завдань, які комплекс здатен виконувати. Водночас вузькоспеціалізовані системи часто демонструють вищу результативність у межах чітко визначених сценаріїв застосування.

Оснащення НРК багатофункціональними маніпуляторами [5], які крім функції маніпулювання об'єктами можуть виконувати і функцію крокуючого або колісного рушіїв, є одним із ключових шляхів підвищення його універсальності. Завдяки такому оснащенню комплекс стає мобільнішим і набуває здатності виконувати ширший спектр операцій – від точних технічних маніпуляцій до транспортно-логістичних або рятувальних завдань, без суттєвих конструкційних змін. Це розширює функціональні можливості платформи, підвищує її адаптивність до різних умов експлуатації, сприяє ефективнішому використанню в багатьох сферах.

Методологічна відмінність у підходах до оцінювання спеціалізованих і універсальних НРК з БМ є принциповою, оскільки ці два типи систем мають різну логіку призначення та проектування.

Методологія оцінювання спеціалізованих НРК передбачає вибір фіксованого набору показників, які напряму відображають здатність виконувати конкретну функцію, та оцінку за цими показниками, що зазвичай мають техніко-експлуатаційний характер. При цьому можна доцільно використовувати стандартизовані методики випробувань для окремих видів діяльності (долання смуги перешкод, ведення вогню або розвідки, виконання монтажних чи інженерних завдань тощо).

Методологія оцінювання універсальних НРК передбачає використання системного багатокритеріального оцінювання, що охоплює як технічну ефективність у різних режимах, так і гнучкість, адаптивність та інтеграційний потенціал. Оскільки система призначена для різномірних завдань, то набір показників повинен охоплювати як технічні, так і організаційно-експлуатаційні параметри. Для НРК з БМ один числовий показник не може повноцінно відобразити їх ефективність з таких причин:

– частина показників є технічними (точність, вантажність), інші – економічні (вартість життєвого циклу), експлуатаційні (адаптивність, час налаштування) та якісні (надійність); звести їх до одного числа без втрати змісту практично неможливо;

– оцінка залежить від сценарію застосування; один і той самий НРК може бути дуже ефективним у рятувальних операціях, але посереднім у логістичних, і навпаки; єдиний показник не відображає контекст;

– збільшення універсальності підвищує вартість і складність, але не завжди продуктивність в окремих сценаріях застосування; один показник не може адекватно збалансувати такі конфлікти без втрати інформації.

Разом із тим можна задатись пріоритетним критеріальним показником, що дає змогу серед низки НРК різних типів та конструкцій встановити порядок від найменшого до найбільшого значення і провести порівняльне оцінювання. Для НРК логістичного типу таким показником безсумнівно є мобільність. Зауважимо, що навесні 2014 року дослідницька група НАТО 148 (ET-148) запропонувала модель мобільності наступного покоління NG-NRMM [6], оскільки поточна NRMM – це інструмент моделювання, розроблений США у 1970-х роках для прогнозування здатності транспортного засобу рухатися по заданій місцевості. У вітчизняній науковій військовій літературі це питання вивчене недостатньо. Тому в цій статті розглядаємо задачу побудови моделі для багатокритеріального оцінювання мобільності НРК з БМ як складової його загальної ефективності у вирішенні завдань.

Методологічно доцільно оцінювати ефективність НРК з БМ шляхом порівняння багатьох показників з урахуванням їх відносної важливості та ефективності, застосовуючи векторні параметри у рамках горизонтального матричного підходу. На виході маємо отримати багатofаспектне оцінювання НРК з БМ із застосуванням набору критеріїв з, імовірно, різними типами оцінювань за кожним із критеріїв. Такий набір є основою моделі прийняття рішень багатокритеріального оцінювання, яке враховує вагомість кожної функції.

Отже, пошук підходів що дозволять оцінити ефективність НРК з БМ в аспекті мобільності у порівнянні з існуючими зразками, а також дослідження, пов'язані з розробленням та практичною реалізацією перспективних зразків НРК, є актуальними та важливими у науково-технічному розумінні.

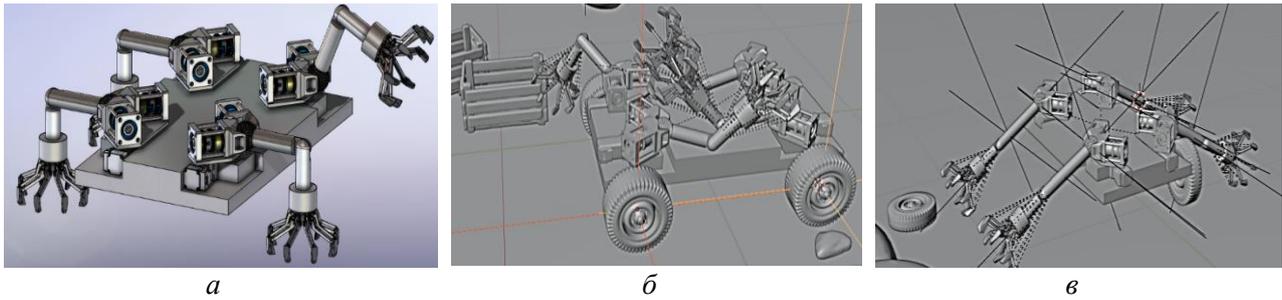
Аналіз останніх досліджень і публікацій. Принцип багатofункціональності маніпуляторів НРК, які крім своєї наперед заданої функції маніпулювання об'єктами можуть виконувати функцію крокуючого або колісного рушіїв, автором розроблено вперше [5]. У відкритих джерелах багатofункціональність маніпуляторів НРК у такому аспекті не розглядається. У попередніх працях автором також обґрунтовано раціональність застосування комбінованого рушія у НРК [7] та розроблено теоретичні положення, що описують кінематику і динаміку НРК з БМ у режимі крокуючого та колісного рушіїв [8, 9]. Крім того, на основі функціонально-вартісного аналізу удосконалено методику воєнно-економічного оцінювання НРК з БМ [10].

Однак у попередніх працях не проводилось дослідження щодо визначення інтегрального показника ефективності шляхом оптимізації показників мобільності НРК з БМ.

Мета статті – розробити теоретичні положення з визначення інтегрального показника ефективності НРК з БМ в аспекті їх мобільності.

Виклад основного матеріалу. Для вирішення зазначених задач із побудови методики оцінювання сучасна наука пропонує методи математичного моделювання, що включають: нормалізацію та вагове оцінювання, щоб можна було порівнювати різні критерії; багатокритеріальні методи, як-от: побудова ієрархії критеріїв (АНР – Analytic Hierarchy Process), побудова системи переваг і оцінок перспективності варіантів рішень (Electre, Promethee); TOPSIS – визначення відстані альтернатив до ідеального рішення; застосування нечіткої логіки та експертних систем для складних сценаріїв застосування з якісними оцінками [11, 12].

У даній статті автор спершу розглядає двокритеріальну, а згодом, шляхом узагальнення, – багатокритеріальну оптимізацію НРК з БМ (рис. 1) за показниками мобільності як комплексної властивості, що характеризує його здатність до руху.



а – платформа з БМ; б – маніпулювання об'єктом; в – перехід БМ у колісний (крокуючий) режим

Рисунок 1 – НРК з БМ

При цьому крім НРК з БМ розглядаються НРК з колісним ((НРК (К)) та НРК з гусеничним ((НРК Г)) рушіями, оскільки перші доцільно порівнювати із другими (для них вже напрацьовано певну експериментальну базу використання), тоді як перші перебувають на етапі розроблення (прототипів).

Основи двокритеріальної оптимізації. Нехай система характеризується набором числових параметрів $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, що задають її стан. Деяка функція корисності

$$y_1 = y_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

відображає ступінь досягнення однієї з цілей (наприклад, ефективності, продуктивності чи точності системи). Інша функція

$$y_2 = y_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2)$$

характеризує другий критерій, наприклад, надійність, вартість або енергоспоживання.

Отже, задача полягає у пошуку такого вектора параметрів $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, який одночасно оптимізує обидві функції y_1 та y_2 . Зауважимо, що поняття оптимізації функції, що набуває числові значення, у техніці зазвичай передбачає пошук її мінімального $y_1 = y_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \min$ чи максимального $y_2 = y_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \max$ значень. Такі складові, як-от: надійність, продуктивність, максимізують, а вартість чи енергоспоживання – мінімізують. Окремими є задачі, наприклад, у екології, де оптимальним значенням буде те, що знаходиться у певному діапазоні і не набуває екстремальних значень. У зв'язку з тим, що задача мінімізації функції y_1 у математичному сенсі тотожно відповідає задачі максимізації функції $-y_2$, то будь-яку задачу максимізації можна без втрати сенсу перетворити на задачу мінімізації.

Оскільки у більшості практичних випадків такі пари показників критеріїв, як-от: «надійність – вартість» чи «продуктивність – економічність» є суперечливими, тобто покращення одного з них призводить до погіршення іншого, задача не має єдиного екстремуму. Замість цього розглядають множину оптимальних у сенсі Парето розв'язків, для яких неможливо покращити один критерій без погіршення іншого [13].

Формально точка x' називається парето-оптимальною, якщо не існує такої точки x , для якої

$$y_1(x) \geq y_1(x') \text{ та } y_2(x) \geq y_2(x'), \quad (3)$$

якщо функції мінімізуємо, і хоча б для одного критерію виконується суворі нерівність.

У випадку двокритеріальної задачі буває зручно зобразити множину точок, оптимальних за Парето, графічно на площині $\{y_1; y_2\}$. Форма кривої, яку складають ці точки (наприклад її опуклість), має важливе значення для аналізу характеру компромісів між критеріями. Якщо крива Парето є опуклою, це свідчить про відносно плавний обмін між критеріями – невелике зменшення одного показника супроводжується невеликим збільшенням іншого. У такому випадку вагові методи (лінійна комбінація критеріїв) дають змогу отримати всю множину парето-оптимальних рішень.

Натомість увігнута або ламано-увігнута форма кривої вказує на наявність зон різко зростаючих витрат: покращення одного показника критерію у певній області потребує значного погіршення іншого. У такій ситуації просте лінійне агрегування функцій корисності може не забезпечити знаходження всіх парето-оптимальних точок. Тоді доцільно застосовувати методи обмежень, еволюційні або інші спеціальні багатокритеріальні алгоритми.

Крім того, щільність точок уздовж кривої може вказувати на чутливість системи до зміни параметрів: ділянки з високою щільністю відповідають зонам, де можна знайти багато близьких за ефективністю компромісних рішень. Тоді як розріджені ділянки сигналізують про «критичні» області з обмеженим вибором параметрів.

Отже, графічний аналіз множини Парето є не лише зручним способом візуалізації результатів двокритеріальної оптимізації, а й дає якісне розуміння взаємодії критеріїв, структури компромісів і придатності тих чи інших методів для пошуку рішень. Цей підхід може бути рекомендований для вибору оптимального конструкційного рішення НРК за критеріями.

На жаль, для випадків багатокритеріальної оптимізації, коли критеріїв більше ніж два (наприклад, для НРК можна перелічити до десяти і більше критеріїв: маса, прохідність, енергоспоживання, маневреність, міцність, стійкість до навантажень, захист, маскування, ремонтпридатність, дальність), можливості використання методів графічного аналізу обмежені.

Для побудови парето-оптимальної множини доцільно використовувати такі підходи.

Метод зведення до однокритеріальної задачі, коли вводять агреговану функцію корисності, наприклад:

$$u(x) = \alpha y_1(x) - \beta y_2(x) \text{ або } v(x) = y_1^\alpha(x) y_2^{-\beta}(x), \quad (4)$$

де вагові коефіцієнти α, β відображають пріоритети, а мінімізації агрегованих функцій корисності сприятиме як мінімізація y_1 , так і максимізація y_2 .

Метод обмежень, коли один критерій оптимізується, а інший розглядається як обмеження. Наприклад, вибирають мінімально необхідну вантажність для виконання необхідних задач, її фіксують, а потім змінюють інші параметри, аби досягнути максимальної швидкості чи надійності.

Методи еволюційної та багатокритеріальної оптимізації, які дозволяють знайти наближену множину парето-оптимальних рішень без аналітичного розв'язування задачі.

Отже, отримана множина Парето слугує основою для подальшого вибору компромісного рішення, що задовольняє технічні, економічні чи експлуатаційні вимоги системи.

Багатокритеріальна оптимізація НРК з БМ. Ключовими напрямками багатокритеріальної оптимізації конструкції НРК є вибір силової установки, конфігурації шасі (трансмсія, система керування, ходова частина), матеріалів та несної структури, модульності і компонування, інших параметрів, що часто не є цілком незалежними а пов'язані із рушієм, використаними матеріалами чи модульним складом НРК.

Конкретний вибір у кожному з напрямів впливає на певні параметри, наприклад, заміна сталевих елементів конструкції на пластикові ймовірно матиме наслідком одночасно зниження маси та ремонтпридатності, підвищення економічності та швидкості; перехід з колісного рушія на гусеничний суттєво збільшує масу і прохідність, знижуючи швидкість та економічність виробництва і руху [11–13].

Для кількісного оцінювання і порівняння різних НРК слід у кожній із складових мобільності (прохідність, стійкість, маневреність, керованість) та інших властивостей (швидкісні властивості, енергоефективність руху, адаптивність до середовища) виокремити числові (діапазон значень розмірної величини) та логічні (наявність чи відсутність опції) набори параметрів.

Для оцінювання за показниками складових базових властивостей мобільності, що є ключовим для будь-якого НРК, та інших можливих властивостей, які можуть додаватися, у таблиці 1 наведено приклад моделі для визначення інтегрального показника ефективності. Орієнтовні коефіцієнти для багатокритеріального аналізу можуть бути уточнені експертно.

Ідеалізована постановка задачі про максимізацію мобільності за наведеними сімома цільовими складовими має вигляд:

$$M_k(x) \rightarrow \max, \quad k = 1, 2, \dots, 7, \quad (5)$$

де x – вектор технічних змінних параметрів, що визначає конструкційні особливості НРК.

Таблиця 1 – Модель для визначення інтегрального показника ефективності НРК з БМ

№	Складові мобільності та суміжні властивості	Показники	Позначення	Вагомість, ω_k	Примітки
1	Прохідність	Висота перешкоди (м), кут підйому ($^\circ$), питомий тиск (кПа)	M_1	0,20	Залежить від типу рушія
2	Стійкість	Кут перекидання ($^\circ$), коливання платформи (мм)	M_2	0,15	Важлива для перевезення вантажів
3	Маневреність	Мінімальний радіус повороту (м), час розвороту (с)	M_3	0,15	Особливо важлива у міських умовах
4	Керованість	Затримка реакції системи (с), похибка курсу ($^\circ$)	M_4	0,10	Визначається якістю системи керування
5	Швидкісні властивості	Середня швидкість (м/с), максимальна швидкість (м/с), прискорення (м/с ²)	M_5	0,10	Впливає на оперативність
6	Енерго-ефективність руху	Енерговитрати на 1 км (Вт·год/км), час автономності (год)	M_6	0,15	Залежить від силової установки
7	Адаптивність до середовища	Зміна дорожнього просвіту (мм), час перебудови, коефіцієнт адаптації	M_7	0,15	Ключова при русі по змішаній місцевості

Як вже було зазначено, зазвичай не можна максимізувати всі цільові показники одночасно. Так, збільшення параметра x_5 (дорожній просвіт) буде мати наслідком підвищення прохідності M_1 , проте, при цьому можливе зниження стійкості M_2 . Тому можливим варіантом постановки задачі буде перенесення частини цільових функцій у обмеження. Якщо перенести у обмеження всі показники, крім першого, отримуємо таку постановку задачі:

$$M_1(x) \rightarrow \max, M_k(x) \geq M_k^b, k = 2, \dots, 7, \quad (6)$$

де M_k^b – граничне значення показника M_k , що допускається технічними вимогами.

Набір цих граничних значень може бути встановлений на основі експертних опитувань, зокрема із застосуванням елементів нечіткої логіки, або вибраний на основі статистичного аналізу відповідних показників існуючих зразків аналогічного призначення. Альтернативним підходом є формування інтегрального показника ефективності НРК, що має сенс функції корисності, приклади якої наведено вище.

Інтегральний показник ефективності M_{int} має відображати сукупну ефективність НРК з БМ за набором показників M_k . Класичний підхід передбачає алгоритмізацію процедури вибору показника за такими кроками: вибір релевантних показників M_1, \dots, M_7 ; приведення їх до однієї шкали (нормалізація); присвоєння ваги ω_k ; агрегування у єдиний параметр. Додатково проводять аналіз чутливості та коректності моделі.

Значимо, що прохідність, стійкість, маневреність та швидкісні властивості максимізуємо. Керованість також максимізуємо, якщо пов'язані з нею параметри, як-от: час реакції системи та курсова похибка, будуть мінімальні. Аналогічним чином і енергоефективність руху буде найбільшою при найменших енергозатратах. Оптимізація адаптивності до середовища досягається зменшенням часу перебудови та підвищенням коефіцієнта адаптації. За потреби, залежно від пріоритетності, деякі із зазначених параметрів можна виключити або, навпаки, перелік доповнити показниками вантажності, вартості експлуатації, виробництва, відновлення, середнього очікуваного часу виконання задачі тощо.

Нормалізація може базуватись на лінійних моделях

$$M_k^* = \frac{M_k}{M_k^{\max}} \quad \text{або} \quad M_k^* = \frac{(M_k - M_k^{\min})}{(M_k^{\max} - M_k^{\min})}, \quad (7)$$

де M_k^* – нормований показник;

M_k^{\max} – найбільше значення для k -го параметра у наборі зразків, що порівнюються.

При статистичному оцінюванні, наприклад,

$$M_k^* = \frac{(M_k - \mu)}{\sigma^2}, \quad (8)$$

$$\text{де } \mu = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N M_k;$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (M_k - \mu)^2;$$

N – кількість структурних елементів моделі.

Отже, загальний інтегральний показник ефективності за показниками мобільності обчислюється як зважена сума на основі формули

$$M_{\text{int}} = \sum_{k=1}^7 \omega_k M_k^*. \quad (9)$$

Таке співвідношення дозволяє виконати розрахунок показника мобільності / ефективності кожного зразка НРК із набору однотипних зразків (однотипних у тому сенсі, що для кожного із них можна виміряти типові складові на основі показників, як у табл. 1). За кожним із показників один (або декілька) із зразків будуть мати екстремальне значення, і зміна складу набору зразків, які оцінюємо, може змінювати оцінку всіх зразків. Якщо для всіх k всі показники M_k^* деякого першого зразка поступаються відповідним показникам другого зразка, то можна стверджувати, що другий має перевагу над першим. Проте якщо M_n^* першого зразка менший від M_n^* другого зразка, а інший показник M_m^* першого зразка більший від M_m^* другого зразка, то перший зразок поступається другому за показником n , проте, випереджає його за показником m , і інтегральний показник ефективності може бути вищим у будь-якого з них.

У деяких випадках є сенс порівнювати пропоновані зразки з деяким стандартним зразком, що прийнятий за еталон. Складові еталонного зразка позначимо індексом e . Тоді відповідні складові зразка, котрий оцінюємо, розраховуємо як

$$M_k^* = \frac{M_k}{M_k^e}, \quad (10)$$

і за окремими з цих показників новий зразок може як переважати еталонний ($M_k^* > 1$), так і поступатись йому ($M_k^* < 1$). У такому випадку доцільно розраховувати інтегральний показник ефективності таким чином:

$$M_{\text{int}} = \prod_{k=1}^7 (M_k^*)^{\omega_k}. \quad (11)$$

Для перевірки зазначеного проведемо комп'ютерне моделювання структурних елементів моделі (показників складових мобільності та суміжних властивостей) і визначимо інтегральний показник ефективності колісного НРК, гусеничного НРК та НРК з БМ. Для цього спочатку підберемо набір показників із відповідними значеннями, враховуючи можливості НРК з БМ, і внаслідок дотримання умови отримаємо значення оптимальності (табл. 2). Зауважимо, що умова для показників буде різною: для одних буде кращим наближення до 1, а для інших кращим буде наближення до 0.

Таблиця 2 – Показники різних типів НРК та їх оптимальні значення

Структурні елементи моделі	Показники	НРК (К)	НРК (Г)	НРК з БМ	Умова	НРК (К)	НРК (Г)	НРК з БМ
						Значення оптимальності		
М1	тиск, Па	60	25	65	0	0,42	1,00	0,38
	ухил (поздов.), град	25	30	45	1	0,56	0,67	1,00
	перешкода, см	25	45	70	1	0,36	0,64	1,00
М2	ухил (попер), град	20	25	55	1	0,36	0,45	1,00
	вібрація, мм/с	25	20	35	0	0,80	1,00	0,57
М3	радіус повороту, м	5	0	0	0	0,00	1,00	1,00
	час на поворот, с	4	5	2	0	0,50	0,40	1,00
М4	реакція на систему керування, с	0,1	0,4	0,2	0	1,00	0,25	0,50
	похибка виконання завдання, %	6	4	3	0	0,50	0,75	1,00
М5	швидкість (бездоріжжя), км/год	7	10	15	1	0,47	0,67	1,00
	швидкість (по дорогах), км/год	60	40	50	1	1,00	0,67	0,83
	прискорення (бездоріжжя), м/с	3	5	10	1	0,30	0,70	1,00
М6	самостійна робота, год	6	6	6	1	1,00	1,00	1,00
	енерговитрата, кВт·год	350	550	700	0	1,00	0,64	0,50
М7	дорожній просвіт, що змінюється, см	0	0	40	1	0,00	0,00	1,00
	коефіцієнт адаптації опори до ґрунту	0,2	0,9	0,7	1	0,22	1,00	0,78

Для візуального подання структурних елементів моделі необхідно отримати середні значення оптимальності, що є нормованими показниками M_k^* , та, помноживши їх на вагомість ω_k (може бути еталонною для логістично-евакуаційних НРК), отримати значення підсумкових показників для кожного із типів НРК (табл. 3). Крім того, на стадії проектування НРК відповідно до їх призначення можна сформувавши вагомість, наприклад, НРК «камікадзе» або НРК інженерної підтримки.

Таблиця 3 – Моделювання середніх значень оптимальності та значень показників для різних типів НРК

Структурні елементи моделі	НРК (К)	НРК (Г)	НРК з БМ	Вагомість ω_k	НРК (К)	НРК (Г)	НРК з БМ
	Нормовані показники M_k^*				Підсумкові показники		
М1	0,44	0,81	0,79	0,20	0,0886	0,1540	0,1590
М2	0,58	0,73	0,79	0,15	0,0873	0,1091	0,1179
М3	0,25	0,70	1,00	0,15	0,0375	0,1050	0,1500
М4	0,75	0,63	0,63	0,10	0,0750	0,0500	0,0750
М5	0,75	0,63	0,58	0,10	0,0589	0,0678	0,0944
М6	0,49	1,00	0,26	0,15	0,1500	0,1227	0,1125
М7	0,11	0,50	0,89	0,15	0,0167	0,0750	0,1333

Для визначення інтегрального показника ефективності в аспекті мобільності M_{int} використаємо формулу (9) та отримаємо такі значення: НРК (К) – 0,5140; НРК (Г) – 0,6836; НРК з БМ – 0,8421.

На рисунку 2 наведено графічне подання результатів моделювання, причому чим більше значення структурних елементів моделі, тим краще.

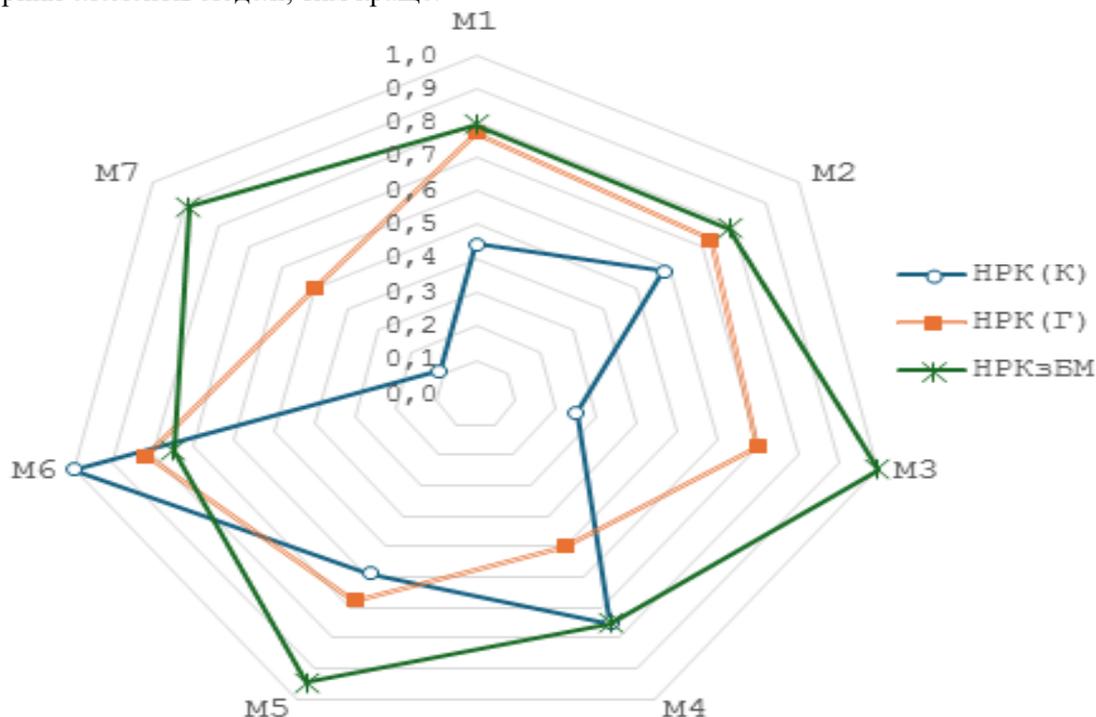


Рисунок 2 – Графічне подання структурних елементів моделі для визначення інтегрального показника ефективності різних типів НРК

З рисунку видно, що в аспекті мобільності НРК з БМ має перевагу над колісним та гусеничним НРК, однак поступається їм в енерговитраті. Зрозуміло, що показники є умовними (наближеними до реальних), проте вони відображають особливості складного рельєфу. Якщо моделювати сприятливі умови для руху, то очевидно, що колісний НРК буде ефективнішим в аспекті швидкості та енерговитрати, з погіршенням умов руху інколи матиме переваги гусеничний НРК. Зауважимо, що для колісних і гусеничних НРК можуть виникнути такі критичні умови, за яких рух буде неможливим, а НРК з БМ за цих самих умов зможе продовжувати рух, про що свідчить значення інтегрального показника ефективності.

Висновки

У статті розроблено теоретичні положення щодо визначення інтегрального показника ефективності НРК з БМ в аспекті їх мобільності. Зокрема наведено особливості двокритеріальної оптимізації та встановлено, що графічний аналіз множини Парето є не лише зручним способом візуалізації результатів двокритеріальної оптимізації, а й дає якісне розуміння взаємодії показників критеріїв, структури компромісів і придатності тих чи інших методів для пошуку рішень.

Багатокритеріальну оптимізацію НРК з БМ проведено шляхом визначення інтегрального показника ефективності, для якого було сформовано модель, складові якої можуть варіюватися та мати різну вагу залежно від призначення НРК з БМ. Причому орієнтовні коефіцієнти для багатокритеріального аналізу можуть бути уточнені експертно.

Перспектива подальших досліджень полягає у визначенні ефективності НРК з БМ щодо подолання маршруту з випадковим профілем рельєфу, побудованим за рівномірним та нормальним розподілами.

Перелік джерел посилання

1. Vaidya O. S., Kumar S. (2006). Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of operational research*. No 169 (1). Pp. 1–29.
2. Figueira J. R., Mousseau V., Roy B. (2005). ELECTRE methods. In *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys* (pp. 155–185). New York, NY: Springer New York.
3. Papadakis P. (2013). Terrain traversability analysis methods for unmanned ground vehicles: A survey. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. No 26(4). Pp. 1373–1385.
4. Wong J. Y., Jayakumar P., Toma E., Preston-Thomas J. (2020). A review of mobility metrics for next generation vehicle mobility models. *Journal of Terramechanics*. No 87. Pp. 11–20.
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. Next-Generation NATO Reference Mobility Model (NRMM) Development. (Développement de la nouvelle génération du modèle de mobilité de référence de l'OTAN (NRMM)). Science and Technology Organization. AVT-ET-148.
7. Залипка В. Д. Обґрунтування раціональності застосування комбінованого рушія на наземних роботизованих комплексах. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків, 2025. Вип. 1 (45). С. 60–74.
8. 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/sovt.2024.78.06.
9. Залипка В. Д. Теоретичні аспекти динаміки наземних роботизованих комплексів з багатофункціональними маніпуляторами в режимі колісного рушія. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*. Черкаси, 2025. № 3 (25). С. 34–41. DOI: 10.37701/dndivsovt.25.2025.05.
10. Шабатура Ю. В., Залипка В. Д. Методика воєнно-економічної оцінки наземних роботизованих комплексів з багатофункціональними маніпуляторами на основі функціонально-вартісного аналізу. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*. Черкаси, 2025. № 2 (24). С. 110–118. DOI: 10.37701/dndivsovt.24.2025.13.
11. Brans J. P., De Smet Y. (2005). PROMETHEE methods. In *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys* (pp. 187–219). New York, NY: Springer New York.
12. Behzadian M., Otaghsara S. K., Yazdani M., Ignatius, J. (2012). A state-of-the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with applications*. No 39 (17). Pp. 13051–13069.
13. Волошин О. Ф., Машенко С. О. *Моделі та методи прийняття рішень : навч. посіб.* Київ : ВПЦ «Київський університет», 2010. 336 с.

Стаття надійшла до редакції 22.11.2025 р.

UDC 007.52

V. Zalyпка

DETERMINATION OF THE INTEGRAL EFFICIENCY INDEX OF GROUND ROBOTIC COMPLEXES WITH MULTIFUNCTIONAL MANIPULATORS IN TERMS OF THEIR MOBILITY

The article provides further development of research on the creation and application of ground robotic complexes with multifunctional manipulators (GRC with MM), which, in addition to the function of manipulating objects, can also perform the function of a walking or wheeled motor. In particular, the following are analyzed: the methodology for evaluating specialized GRCs, which involves the selection of a fixed set of indicators that directly reflect the ability to perform a specific function, and the assessment according to these indicators, and the methodology for evaluating universal GRCs, which involves the use of a systematic, multi-

criteria assessment that covers both technical efficiency in different modes and flexibility, adaptability and integration potential. Theoretical provisions have been developed for determining the integral indicator of the effectiveness of GRCs with MM in terms of their mobility. First, two-criteria, and then, by generalization, multi-criteria optimization of GRCs with MM according to mobility indicators as a complex property characterizing its ability to move are considered. The features of two-criteria optimization are presented and it is established that the graphical analysis of the Pareto set is not only a convenient way to visualize the results of two-criteria optimization, but also provides a qualitative understanding of the interaction of criteria, the structure of trade-offs and the suitability of certain methods for finding solutions. It was found that for constructing the Pareto-optimal set it is advisable to use the following methods: the method of reduction to a single-criteria problem, when an aggregate utility function is introduced; the method of constraints, when one criterion is optimized, and the other is considered as a constraint; evolutionary and multi-criteria optimization methods, which allow finding an approximate set of Pareto-optimal solutions without analytical reduction of the problem. Multi-criteria optimization of the GRCs with MM was carried out by determining the integral efficiency indicator, for which a model was formed, the components of which can vary and have different weights depending on the purpose of the GRCs with MM. Moreover, the approximate coefficients for multi-criteria analysis can be specified by experts. It has been established that the integral indicator should reflect the overall effectiveness of the GRCs with MM according to a set of indicators, the classical approach involves algorithmizing the indicator selection procedure according to the following steps: selection of relevant indicators; bringing them to a single scale (normalization); assigning weight; aggregation into a single parameter.

К e y w o r d s: ground robotic complex, multifunctional manipulator, mobility, optimization, efficiency.

Залипка Василь Дарійович – кандидат технічних наук, доцент, докторант штатний науково-організаційного відділу Національної академії Сухопутних військ ім. гетьмана П. Сагайдачного.

<https://orcid.org/0000-0002-5189-8370>