

МАШИНОЗНАВСТВО

УДК 621.865.8(031)

Поліщук М.М.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кузнєцов Ю.М.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОРФОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ І ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ ДОВІЛЬНОЇ ОРІЄНТАЦІЇ

У статті вперше здійснено морфологічний аналіз структур, надано модифіковану методику параметричної оптимізації мобільних роботів довільної орієнтації в технологічному просторі. Відмінність запропонованих моделей полягає у відображенні взаємозв'язку цільових функцій оптимізації параметрів мобільних роботів на різних рівнях ієрархії їх структур. Запропоновано критерії оптимізації конструктивних та технологічних параметрів на прикладі мобільного робота для обслуговування деревних лісних і паркових масивів.

Ключові слова: мобільні роботи, роботи вертикального переміщення, альпіністські роботи, морфологічний аналіз, параметричний синтез.

Постановка проблеми. Ключове завдання проектування нового засобу виробництва, яким є мобільні роботи довільної орієнтації (РДО) в технологічному просторі, що відомі в міжнародних виданнях під терміном “Climber Robot” («альпіністський робот»), полягає у створенні відсутніх поки що інженерних методик конструювання їх пристроїв у взаємозв'язку з умовами експлуатації в різноманітних перспективних галузях застосування РДО.

Більшість сучасних досліджень у цій галузі спрямована на створення оригінальних дослідних зразків мобільних роботів, але без системного підходу до їх структурного та параметричного синтезу. Відсутність системного, науково обгрунтованого підходу до проектування мобільних роботів довільної орієнтації шкодить їх цільовому, тобто спрямованому на виконання технологічних функцій, синтезу виконавчих підсистем для застосування в різних галузях промисловості та господарств.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У відомій роботі [1, с. 33–42] надано огляд сучасних дослідних зразків так званих альпіністських роботів з відображенням різноманітних конструкцій зчеплення з поверхнею переміщення, але, на жаль, без будь-яких методичних рекомендацій щодо їх проектування. Ця недостатність частково

компенсована в роботі [2, с. 67–78], в якій запропоновано напрями вдосконалення мобільних РДО, та в монографії [3, с. 37–46], присвяченій проектуванню мобільного робота цільового призначення, а саме для діагностики дерев лісових та паркових масивів. На відміну від останньої, в монографії [4] запропоновано методики проектування мобільних роботів та стратегії управління ними. Однак слід констатувати, що в жодній роботі не застосовується такий системний метод дослідження, як морфологічний аналіз, та відповідний йому параметричний синтез функціональних підсистем мобільних роботів.

Постановка завдання. Для відтворення системного підходу до проектування мобільних РДО необхідно на основі методів морфологічного аналізу та структурно-параметричного синтезу [5, с. 3–8; 6; 7], що досить добре зарекомендували себе в інших галузях технічних наук, побудувати морфологічну модель та здійснити параметричний синтез виконавчих органів мобільних РДО у зв'язку з умовами їх експлуатації. Метою й нагальною потребою побудови зазначеної моделі є синтез придатних для експлуатації в промислових умовах проектно-конструкторських розв'язань мобільних технологічних роботів довільної орієнтації.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Морфологічний аналіз мобільних РДО на рівні інтеграції. На відміну від викладеного вище, запропонуємо тут і розв'ємо надалі новий напрям синтезу мобільних роботів довільної орієнтації спочатку на основі такої аксіоми¹: зменшення енергетичних витрат підсистем мобільних роботів приводить до зниження їх гравітаційного навантаження в сукупності динамічних навантажень, як транспортних, так і технологічних. Зрештою, реалізація цього підходу приводить до забезпечення надійності їх експлуатації. Зазначений напрям синтезу РДО у світовій теорії та практиці експериментальної побудови мобільних роботів досі не був досліджений.

Створення морфологічної моделі РДО є претечею реалізації декларованих нижче принципів синтезу мобільних роботів як класу робото-технічних систем. Задля вирішення поставленого завдання застосуємо модифікацію методу морфологічного аналізу згідно з рекомендаціями С.В. Акімова [8, с. 2–9], що полягають у такому: спочатку в результаті морфологічного аналізу визначають простір пошуку, називаний морфологічною множиною, яка обов'язково повинна містити шуканий розв'язок (структуру об'єкта), а потім звужують цей простір, здійснюючи пошук того рішення, яке є елементом морфологічної множини. Така процедура передбачає побудову морфологічного І/АБО-дерева об'єкта аналізу, який описує всю морфологічну множину, що підлягає розгляду. Однак оскільки в цьому разі необхідно представити конкретні об'єкти множини РДО у вигляді їх елементів, то, згідно з вищевказаними рекомендаціями, визначимо ребра (гілки), відповідні значенням класифікаційних ознак мобільних РДО. Тоді після вибору значень класифікаційних ознак з АБО-вершин буде виходити лише по одному ребру (однієї гілки) для кожного вибраного значення ознак системи, а сама вершина виявиться виродженою. Виконавши таку операцію для всіх необхідних АБО-вершин, одержимо морфологічне І-дерево з виродженими АБО-вершинами, яке однозначно ідентифікує наш об'єкт дослідження, а саме РДО, як технічну систему, що підлягає аналізу-ванню. Щодо І-вершин позначимо, що вони, як і в разі І/АБО-дерева, будуть персоніфікувати агрегацію об'єктів, тому інформацію про морфологічну множину компонентів РДО доцільно

представити не у вигляді дерева, а у вигляді морфологічного графа (рис. 1).

Далі на основі отриманого графа розробимо багаторівневі морфологічні таблиці, що відповідають класам галузей застосування мобільних РДО, їхнім виробничим функціям, а також таким компонентам, як приводи, трансмісія та системи зчеплення роботів довільної орієнтації з поверхнею їх переміщення. Морфологічна таблиця, що включає характеристики галузей застосування роботів та властивості виконуваних ними виробничих операцій, представлена у вигляді табл. 1.

Тут і надалі значення ознаки «0» ілюструють апіорі не прийнятні комбінації відзначених морфологічних ознак інакше їх відображення в морфологічній таблиці приведе тільки до викривлення інформаційного масиву можливих технічних розв'язань. У матричному вираженні фіксуємо параметри, що наведені в табл. 1, у вигляді такої матриці:

$$\begin{array}{cccc} A1 & A2 & A3 & A4 \\ 0 & B2 & B3 & B4 \\ C1 & C2 & C3 & C4 \\ D1 & D2 & D3 & D4 \\ 0 & E2 & E3 & E4 \\ F1 & F2 & F3 & F4 \end{array} \quad (1)$$

Отримана матрична структурна модель визначається за формулою:

$$S_1 = A4 \cdot B3 \cdot C4 \cdot D4 \cdot E3 \cdot F4. \quad (2)$$

Виходячи з формули (2), можемо сказати, що загальна кількість комбінацій можливих розв'язань складе таку величину:

$$N_1 = \prod_{i=1}^n K_i = 4 \times 3 \times 4 \times 4 \times 3 \times 4 = 3^2 \times 4^4 = 265 \text{ (варіантів)}. \quad (3)$$

Визначена кількість варіантів є поки що гіпотетично припустимою та підлягає експертизі доцільності реалізації комбінацій ознак, відображених у табл. 1. Відомо, що істотний недолік морфологічних таблиць полягає в тому, що, крім можливих структурних розв'язань, у них можуть бути присутні дублюючі комбінації або принаймні некоректні. Згідно з теорією морфологічного аналізу, що належить до евристичних методів, який споконвічно заснований на так званому морфологічному ящику швейцарського астронома Фріца Цвіккі (F. Zwicky), виключення непродуктивних комбінацій досягається їхньою експертною оцінкою, яку застосуємо тільки для загальнотехнічних ознак на першому та другому рівнях аналізу, а для відбору варіантів конструкцій роботів на третьому та четвертому рівнях аналізу застосуємо більш жорсткий критерій, заснований на порівнянні

¹ Аксіома (від др.-гр. “ἀξίωμα”, тобто «твердження, положення»), або постулат, – вихідне положення якоїсь теорії, прийняте в рамках цієї теорії істинним без вимоги доказу й використовуване під час доказу інших її положень.

конструкцій з базами даних аналогів та прототипів технічних розв'язань міжнародних патентів, що набагато достовірніше, ніж експертні оцінки.

На першому рівні аналізу класу «Галузі застосування – Виробничі функції», на відміну від подальших рівнів (3-го та 4-го), що містять вже конструктивні ознаки, досить виключити дублюючі комбінації ознак. Так, аналіз комбінацій табл. 1 дає змогу стверджувати, що транспортні функції А1, відеоспостереження А2 та операції діагностики А3 щодо таких об'єктів обслуговування, як висотні будинки, зайві, оскільки будь-яке висо-

тне спорудження оснащене підйомно-транспортною технікою (ліфти, вантажні підйомники). Аналогічно можна виключити комбінації С1 і С2 (транспортні та відеоспостереження) щодо мостів та віадуків, що традиційно обслуговуються крановим устаткуванням, а також D1 (транспортні) для промислових трубопроводів, які самі по собі виконують транспортні функції. Крім того, діагностика Е3 деревних масивів дублює їх відеоспостереження Е2, за допомогою якого здійснюють аналізування стану лісових та паркових насаджень, використовуючи літальні апарати.

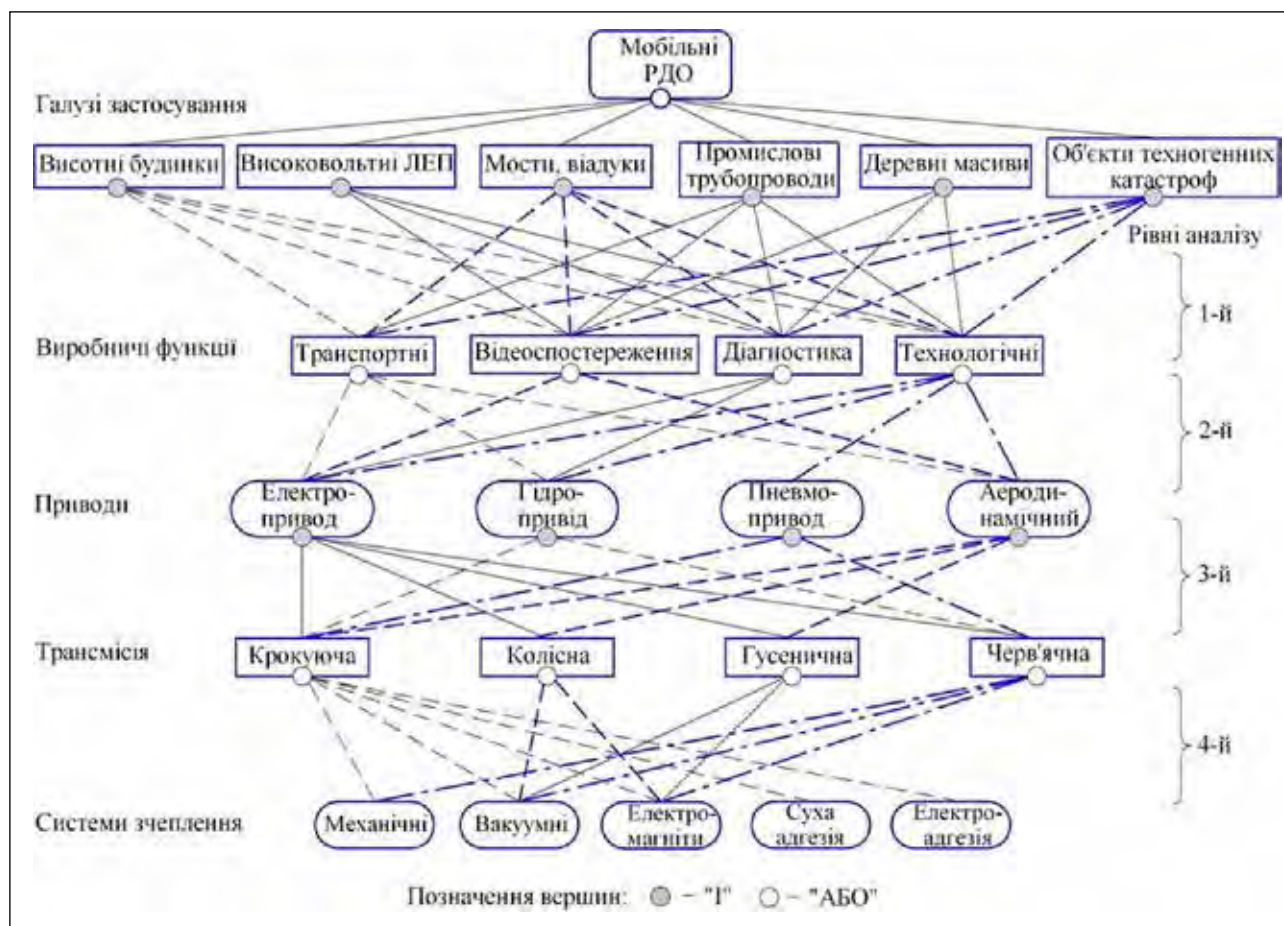


Рис. 1. Морфологічний граф мобільних РДО

Таблиця 1

Морфологічна таблиця 1-го рівня класу «Галузі застосування – Виробничі функції»

Галузі застосування		Виробничі функції			
		1	2	3	4
A	Висотні будинки	Транспортні	Відеоспостереження	Діагностика	Технологічні
B	Високовольтні ЛЕП	0	Відеоспостереження	Діагностика	Технологічні
C	Мости, віадук	Транспортні	Відеоспостереження	Діагностика	Технологічні
D	Промислові трубопроводи	Транспортні	Відеоспостереження	Діагностика	Технологічні
E	Деревні масиви	0	Відеоспостереження	Діагностика	Технологічні
F	Об'єкти техногенних катастроф	Транспортні	Відеоспостереження	Діагностика	Технологічні

Тоді матриця (1) з урахуванням виключених морфологічних ознак прийме змінений вигляд:

$$\begin{matrix} 0 & 0 & 0 & A4 \\ 0 & B2 & B3 & B4 \\ 0 & 0 & C3 & C4 \\ 0 & D2 & D3 & D4 \\ 0 & E2 & 0 & E4 \\ F1 & F2 & F3 & F4, \end{matrix} \quad (2)$$

а нова матрична модель визначиться формулою:

$$S = A1 \cdot B3 \cdot C2 \cdot D3 \cdot E2 \cdot F4. \quad (5)$$

Отже, з формули (5) загальна кількість практично доцільних комбінацій застосування мобільних РДО складе таку величину:

$$N_{01} = \prod_{i=1}^n K_i = 1 \times 3 \times 2 \times 3 \times 2 \times 4 = 3^2 \times 2^4 = 25 \text{ (варіантів)} \quad (6),$$

чого цілком достатньо для їх промислово ефективної експлуатації.

На другому рівні морфологічного аналізу класу «Виробничі функції – Приводи» зіставимо можливі комбінації приводів мобільних РДО щодо виконуваних ними виробничих функцій (табл. 2).

Отже, матриця значень показників, наведених у табл. 2, має вигляд:

$$\begin{matrix} G1 & G2 & 0 & G4 \\ H1 & 0 & 0 & H4 \\ J1 & J2 & 0 & 0 \\ K1 & K2 & K3 & K4 \end{matrix} \quad (7)$$

Матрична структурна цієї моделі визначається формулою:

$$S_2 = G3 \cdot H2 \cdot J2 \cdot K4. \quad (8)$$

Виходячи з формули (8), бачимо, що загальна кількість комбінацій гіпотетично припустимих розв'язань складе таку величину:

$$N_2 = \prod_{i=1}^n K_i = 3 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 4 = 3 \cdot 2^4 = 48 \text{ (варіантів)}. \quad (9)$$

Як і на попередньому рівні аналізу, отримана кількість варіантів є тільки гіпотетично можливою, тобто поки що без доказу інженерної доцільності. Однак слід взяти до уваги те, що для виконання транспортних функцій гідравлічний привід G2 хоча й має більшу питому потужність, проте суттєво поступається електроприводу за швидкістю, а також немає необхідності в настільки ефек-

тивній якості, як висока питома потужність, під час виконання ненавантажених операцій діагностики J2 (наприклад, ультразвуковими або оптичними методами), тому виключення зазначених ознак з інженерної точки зору слід визнати правомірним. Тоді з урахуванням цих оцінок доцільності застосування того чи іншого типу приводів матриця значень параметрів матиме такий вигляд:

$$\begin{matrix} G1 & 0 & 0 & G4 \\ H1 & 0 & 0 & H4 \\ J1 & 0 & 0 & 0 \\ K1 & K2 & K3 & K4 \end{matrix} \quad (10)$$

Змінена матрична структурна модель (10) визначається формулою:

$$S_2 = G2 \cdot H2 \cdot J1 \cdot K4, \quad (11)$$

виходячи з якої, можемо визначити, що загальна кількість комбінацій доцільних варіантів розв'язань складе практичну величину:

$$N_{02} = \prod_{i=1}^n K_i = 2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 4 = 2^2 \cdot 4 = 16 \text{ (варіантів)}. \quad (12)$$

Істотне обмеження морфологічних ознак на першому та другому рівнях аналізу дає змогу запобігти ускладненим конструкторським рішенням (нехай навіть гіпотетично припустимих) на подальших рівнях морфологічного аналізу технічної системи у вигляді мобільних РДО. Подальші рівні аналізу є найбільш відповідальними, оскільки вони визначають проектно-конструкторські розв'язання, від яких безпосередньо залежать виробничо-економічні показники експлуатації мобільних РДО.

Отже, на 3-му рівні аналізу класу «Приводи – Трансмисії» зіставимо можливі комбінації типів приводів РДО щодо видів трансмісії мобільних роботів (табл. 3) відповідно до графу на рис. 1.

Аналогічна матриця значень показників, наведених у табл. 3:

$$\begin{matrix} L1 & L2 & L3 & L4 \\ M1 & 0 & 0 & M4 \\ N1 & 0 & 0 & N4 \\ P1 & P2 & P3 & 0 \end{matrix} \quad (13)$$

Ця матрична структурна модель визначиться такою формулою:

$$S_3 = L4 \cdot M2 \cdot N2 \cdot P3. \quad (14)$$

Таблиця 2

Морфологічна таблиця другого рівня аналізу класу «Виробничі функції – Приводи»

Виробничі функції		Тип приводу			
		1	2	3	4
G	Транспортні	Електропривод	Гідропривід	0	Аеродинамічний
H	Відеоспостереження	Електропривод	0	0	Аеродинамічний
J	Діагностика	Електропривод	Гідропривід	0	0
K	Технологічні	Електропривод	Гідропривід	Пневмопривод	Аеродинамічний

Отже, виходячи з формули (14), можемо визначити, що загальна кількість комбінацій варіантів гіпотетично можливих розв'язань складе таку величину:

$$N_3 = \prod_{i=1}^n K_i = 4 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 3 = 2^4 \cdot 3 = 48 \text{ (варіантів)}. \quad (15)$$

Однак на цьому рівні аналізу з огляду на надзвичайно високу відповідальність виключення морфологічних ознак, обумовлену впливом конструкторських розв'язань на економічні показники експлуатації мобільних РДО, недостатньо обмежитися тільки експертними оцінками, заснованими на попередньому досвіді проектування та інженерної логіки, адже необхідно застосувати більш жорсткі критерії відсівання гіпотетично можливих варіантів. Як такі критерії застосуємо, по-перше, принципи синтезу [9] мобільних роботів довільної орієнтації, а по-друге, наявні бази даних технічних рішень зі світовою новизною, а саме бази патентів США, Німеччини, Росії та України загального доступу. Аналоги й прототипи технічних розв'язань, що відображені в патентах зазначених країн, будемо використовувати як доказ інженерної правомірності варіантів морфологічних ознак. Однак спочатку як критерії відбору варіантів використаємо зазначені вище принципи синтезу мобільних РДО за такого тлумачення їх змісту.

Принцип 1. Нагромадження потенційної енергії на кожному попередньому кроці та перетворення її на кінетичну енергію руху на подальшому кроці руху. Вочевидь, найбільш ефективною в цьому разі буде крокуюча трансмісія, оскільки колісна та гусенична трансмісії є безперервними й вимагають більших шляхових дистанцій для нагромадження енергії, що знижує ефективність цього принципу. Оскільки типи приводів та трансмісії взаємозалежні з видом виробничих операцій, як це видно з морфологічного графа рис. 1, варіанти комбінацій ознак, що не задовольняють цьому принципу, повинні бути виключені.

Принцип 2. Інтеграція приводів поздовжнього та вертикального переміщення, а також приводів зміни орієнтації робота. Цей принцип має на меті

зменшення кількості приводів для зниження ваги робота, точніше, гравітаційного навантаження, що має принципове значення для мобільних роботів саме довільної орієнтації. Однак при цьому не допускається зменшення необхідного числа ступенів свободи роботів, що обслуговують об'єкти у відповідній їм системі координат, а саме прямокутній Декартовій, циліндричній або сферичній, а ще краще ангулярній, тобто кутовій системі без поступальних кінематичних пар механізмів, що притаманна антропоморфним конструкціям. Використання цього принципу як критерія відбору варіантів дає змогу виключити ті з них, які вимагають додаткових перетворюючих механізмів, через що не можуть забезпечити мінімізацію ваги робота.

Принцип 3. Застосування генераторів тяги (аеродинамічної піднімальної сили). Цей принцип декларує протидію гравітаційному навантаженню задля збільшення технологічного силового впливу за одночасного зменшення потужності приводів руху та зчеплення робота з поверхнею переміщення. Отже, із застосуванням цього принципу як критерія відбору варіантів та з урахуванням структурних зв'язків морфологічного графа рис. 1 на третьому рівні аналізу доцільно виключити ті варіанти комбінацій ознак, які не дають змогу досягати зменшення гравітаційного навантаження за допомогою застосування генераторів аеродинамічної піднімальної сили. Точніше, якщо реалізація прототипу варіанта вимагає підвищення сумарної потужності приводів, то цей варіант повинен бути виключений.

Послідовно виконуючи проекцію викладених принципів на морфологічні ознаки табл. 3 як критерії їх відсівання, доходимо таких висновків. Електропривод, хоча й поступається гідроприводу за потужністю, а пневматичному приводу – за швидкістю, маючи компактні автономні (для забезпечення мобільності робота) джерела живлення, є універсальним для всіх видів трансмісії. Ці якості дають змогу електроприводу задовольняти вимоги 2-го із зазначених вище принципів, а саме прин-

Таблиця 3

Морфологічна таблиця третього рівня аналізу класу «Приводи – Трансмісії»

Приводи		Вид трансмісії			
		1	2	3	4
L	Електропривод	Крокуюча	Колісна	Гусенична	Черв'ячна
M	Гідропривід	Крокуюча	0	0	Черв'ячна
N	Пневмопривод	Крокуюча	0	0	Черв'ячна
P	Аеродинамічний	Крокуюча	Колісна	Гусенична	0

ципу інтеграції приводів з можливістю працювати в будь-яких системах координат, тому комбінації електроприводу L1 (з крокуючою трансмісією) – L3 (колісною) повинні бути залишені.

Більш того, зроблений висновок підтверджується аналогами технічних розв'язань патентних баз даних, а саме патентами на мобільні роботи з електроприводом та такими трансмісіями: США [10] мають крокуючу L1; Росія [11] – колісну L2; США [12] – гусеничну L2. Навпаки, сукупність електроприводу з черв'ячною трансмісією L4 не підтверджується ніякими патентами, тому виключається. Далі застосування гідроприводу M1 та пневматичного приводу N1 з крокуючою трансмісією відображене в патентах Німеччини [13], України [14; 15], а також Росії [16]. Доцільність використання аеродинамічного приводу з крокуючою P1, колісною P2 та гусеничною P3 трансмісіями підтверджується відповідними патентами США [17; 18], а також Росії [19; 20], тому ці морфологічні комбінації ознак залишаються в табл. 3. Тим більше, що ефективність зазначених комбінацій повністю відповідає викладеному вище принципу 3, що передбачає застосування аеродинамічної тяги як засобу протидії гравітаційному навантаженню. Комбінація пневматичного приводу з черв'ячною трансмісією N4 підтверджується патентом Росії [21], а не властиво це комбінації ознак M4 (гідропривід – черв'ячна трансмісія), що підлягає виключенню.

У результаті виконаного аналізу матриця (13) гіпотетичних комбінацій ознак, наведених у табл. 3, перетворюється на вид практично доцільних технічних розв'язань, що підтверджені міжнародними базами патентів:

$$\begin{array}{cccc} L1 & L2 & L3 & 0 \\ M1 & 0 & 0 & 0 \\ N1 & 0 & 0 & N4 \\ P1 & P2 & P3 & 0 \end{array} \quad (16)$$

Тоді нова матрична структурна модель визначиться такою формулою:

$$S_3 = L3 \cdot M1 \cdot N2 \cdot P3. \quad (17)$$

Отже, виходячи з цієї формули, можемо сказати, що загальна кількість комбінацій варіантів розв'язань на третьому рівні морфологічного аналізу складе таку величину:

$$N_{03} = \prod_{i=1}^n K_i = 3 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 3 = 3^2 \cdot 2 = 18 \text{ (варіантів)}. \quad (18)$$

Таким чином, варіантами морфологічних ознак (18) є саме ті технічні розв'язання, які не тільки відповідають викладеним вище трьом принципам синтезу мобільних РДО, але й підтверджені аналогами з наведених міжнародних баз даних патентів, що в сукупності є доказом їх інженерної доцільності.

Нарешті, закінчимо морфологічний аналіз на четвертому рівні можливих комбінацій ознак «Трансмісії – Системи зчеплення», представлених у табл. 4. Як і в попередньому випадку (на відміну від перших двох рівнів), таблиця відображає суцільно конструктивні ознаки, що домінують у впливі на техніко-економічні показники експлуатації мобільних РДО. Однак цей рівень аналізу особливо важливий ще й тому, що включає ознаки систем зчеплення робота з поверхнею переміщення, що принципово відрізняє мобільні РДО від звичайних мобільних роботів наземного базування, оскільки саме від виду зчеплення залежить надійність утримання робота на поверхні довільної орієнтації.

Матриця значень показників, наведених у табл. 4, буде мати такий вигляд:

$$\begin{array}{ccccc} Q1 & Q2 & Q3 & Q4 & Q5 \\ 0 & R2 & R3 & 0 & 0 \\ 0 & S2 & S3 & 0 & 0 \\ T1 & T2 & T3 & 0 & 0 \end{array} \quad (19)$$

Ця матрична структурна модель визначиться такою формулою:

$$S_4 = Q5 \cdot R2 \cdot S2 \cdot T3. \quad (20)$$

Отже, виходячи з формули (20), можемо визначити, що загальна кількість комбінацій варіантів гіпотетично можливих розв'язань складе таку величину:

$$N_4 = \prod_{i=1}^n K_i = 5 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 3 = 5 \cdot 2^2 \cdot 3 = 60 \text{ (варіантів)}. \quad (21)$$

Однак, як і в попередніх випадках, тут немає впевненості в тому, що всі отримані варіанти ком-

Таблиця 4

Морфологічна таблиця четвертого рівня аналізу класу «Трансмісії – Системи зчеплення»

Вид трансмісії		Системи зчеплення				
		1	2	3	4	5
Q	Крокуюча	Механічні	Вакуумні	Електромагніти	Суха адгезія	Електроадгезія
R	Колісна	0	Вакуумні	Електромагніти	0	0
S	Гусенична	0	Вакуумні	Електромагніти	0	0
T	Черв'ячна	Механічні	Вакуумні	Електромагніти	0	0

бінацій морфологічних ознак можуть бути реалізовані на практиці навіть із залученням сучасних матеріалів та технологій. Щоби відібрати варіанти технічних розв'язань, сумісних із сучасним рівнем техніки, проаналізуємо їх способом, що аналогічний попередньому рівню, а саме перевіримо відповідність гіпотетичних розв'язань трьом принципам синтезу мобільних РДО, викладеним вище, а також зіставимо ці варіанти з аналогами й прототипами міжнародних патентних баз.

Так, наприклад, трансмісія, що крокує внаслідок невисокої швидкості переміщення порівняно з колісною дасть змогу реалізувати комбінації Q1, Q2 і Q3 (табл. 4), тобто механічні, вакуумні й електромагнітні системи зчеплення відповідно. Ця ж властивість сприяє реалізації повільних систем сухої Q4 й електричної адгезії Q5. Крім того, крокуюча трансмісія в комбінації із зазначеними способами зчеплення повністю задовольняє першим двом із зазначених вище принципів синтезу мобільних РДО, оскільки дає змогу накопичувати потенційну енергію на кожному попередньому кроці та перетворювати її на кінетичну енергію на кожному подальшому кроці переміщення мобільного РДО. Крім того, ця трансмісія дає змогу інтегрувати приводи руху робота, що підтверджується технічними розв'язаннями, відображеними в наведених вище патентах України [14; 15], тому ці комбінації морфологічних ознак повинні бути залишені.

Доцільність комбінацій морфологічних ознак R2 (вакуумні) та R3 (електромагнітні) для колісної трансмісії підтверджується патентами США [22], України [23] та Росії [24]. Комбінація S2 (гусенична трансмісія з вакуумним зчепленням) має реалізацію в мобільній роботизованій системі Gekko швейцарської фірми Serbot AG [25] для очищення похилих поверхонь сонячних панелей, а ознака S3 (гусенична з магнітним зчепленням) підтверджується патентом США [16]. Комбінація T1 черв'ячної трансмісії та механічного зчеплення ілюструє технічний розв'язок [26], так званий зміїний робот Omni Tread для промислової інспекції й нагляду.

Ознаки T2 (черв'ячна з вакуумною трансмісією) і T3 (з електромагнітною) поки що не мають підтвердження, тому повинні бути виключені. Таким чином, матриця (19) матиме такий вигляд:

Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
0	R2	R3	0	0
0	S2	S3	0	0
T1	0	0	0	0

Очевидно, що ця матрична модель визначиться такою формулою:

$$S_4 = Q5 \cdot R2 \cdot S2 \cdot T1. \quad (23)$$

Згідно з цією формулою кількість практично придатних варіантів класу «Трансмисії – Системи зчеплення» складе таку величину:

$$N_{04} = \prod_{i=1}^n K_i = 5 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 1 = 5 \cdot 2^2 = 20 \text{ (варіантів)}. \quad (24)$$

У підсумку виконаного морфологічного аналізу отримані варіанти виконань мобільних РДО, які підтверджені міжнародними базами патентів та задовольняють трьом викладеним вище принципам синтезу, отже, є практично доцільними. Так на 1-му рівні аналізу, згідно з формулою (6), число варіантів склало $N_1 = 25$; на 2-му рівні, згідно з виразом (12), – $N_2 = 16$; на 3-му рівні, за формулою (18), – $N_3 = 18$, а на 4-му рівні, згідно з формулою (24), – $N_4 = 20$ варіантів виконань структур мобільних роботів. Тоді первісний морфологічний граф на рис. 1 з урахуванням матричних образів (4), (10), (16) і (22) перетворюється на модифікований вид, наданий на рис. 2. Досягнена модифікація морфологічного графа мобільних РДО дає можливість здійснювати новітні проектні розробки мобільних роботів довільної орієнтації в технологічному просторі, не марнуючи кошти на апробацію не доцільних з інженерної точки зору (хоча й гіпотетично можливих з огляду на далеко не завжди вдосконалену людську логіку) варіантів виконань РДО. Слід наголосити на тому, що підтвердження тієї чи іншої морфологічної структури мобільних РДО аналогами або прототипами міжнародних баз даних патентів зовсім не означає повтор технічних розв'язань, а дає можливість продукування інноваційних конструкцій, здатних бути винаходами в цій галузі.

Застосований критерій у вигляді порівняння з патентованими технічними розв'язаннями підтверджує тільки відповідність вибраних структур сучасному рівню матеріалів та технологій для їхнього виготовлення, що є неодмінною вимогою патентного відомства будь-якої країни. Більш того, інший критерій відбору варіантів, а саме проектування на морфологічні структури трьох принципів подальшого синтезу мобільних РДО, зазначає напрям удосконалювання конструкцій мобільних роботів довільної орієнтації.

Структурний синтез мобільних РДО.

Тепер, коли отримані доцільні з обліком викладених вище критеріїв відбору варіанти виконань мобільних РДО, можна почати морфологічний синтез конкретних моделей роботів та їх конструкцій із застосуванням водночас методів параметричного синтезу. У роботі С.В. Акімова [8] запропонована вдосконалена класифікація методів морфологічного

синтезу, висвітленого в дослідженнях В.М. Одріна [6]. Згідно з модифікованою класифікацією методи морфологічного синтезу поділяються на методи генерації структур та методи їх трансформації. Генерація структури здійснюється за відсутності прототипу, а для трансформації структури, навпаки, необхідна структура, яка підлягає послідовному вдосконалюванню. Методи генерації структур поділяються на методи зондування морфологічної множини й методи морфологічного конструювання. У першому разі вибирається вся технічна система або окремий пристрій хоча б на рівні її підсистем. У другому разі морфологічного конструювання об'єкт створюється поступово. Методи трансформації структури поділяються на методи випадкового блукання й методи цілеспрямованого вдосконалювання прототипу. Слід зазначити, що методи генерації структури орієнтовані на пошук глобального екстремуму, а трансформації структури – локального. На нашу думку, локальні екстремуми більш притаманні рішенням завдань оптимізації параметрів конкретних технологій та пристроїв, оскільки, як правило, мають технічні обмеження незалежних змінних цільових функцій.

Оскільки в нашому разі стосовно мобільних роботів генерація структур уже виконана раніше на основі морфологічного конструювання (модифікований граф структурних зв'язків на рис. 2), перейдемо до трансформації структури на основі методу цілеспрямованого вдосконалювання прототипів, тим більше останній метод припускає пошук не глобального, а локального екстремуму.

Параметричний синтез мобільних РДО.

Виходячи з багаторічного досвіду проектування таких машин, як верстатне й конвеєрне встаткування, промислові роботи й маніпулятори, а також створюваних на їхній основі роботизованих технологічних комплексів, можемо стверджувати, що будь-яка машина (одиниця промислового встаткування) розробляється на основі Технічного завдання (ДСТУ 3974-2000), що диктує конкретні чисельні значення параметрів як конструкції, так і режимів функціонування, а останнє означає, що їх оптимізація завжди буде закінчуватися пошуком локальних екстремумів цільових функцій, оскільки апіорі задаються інтервали варіювання незалежних змінних, що входять у цільові функції. Інакше кажучи, під час зміни границь поля

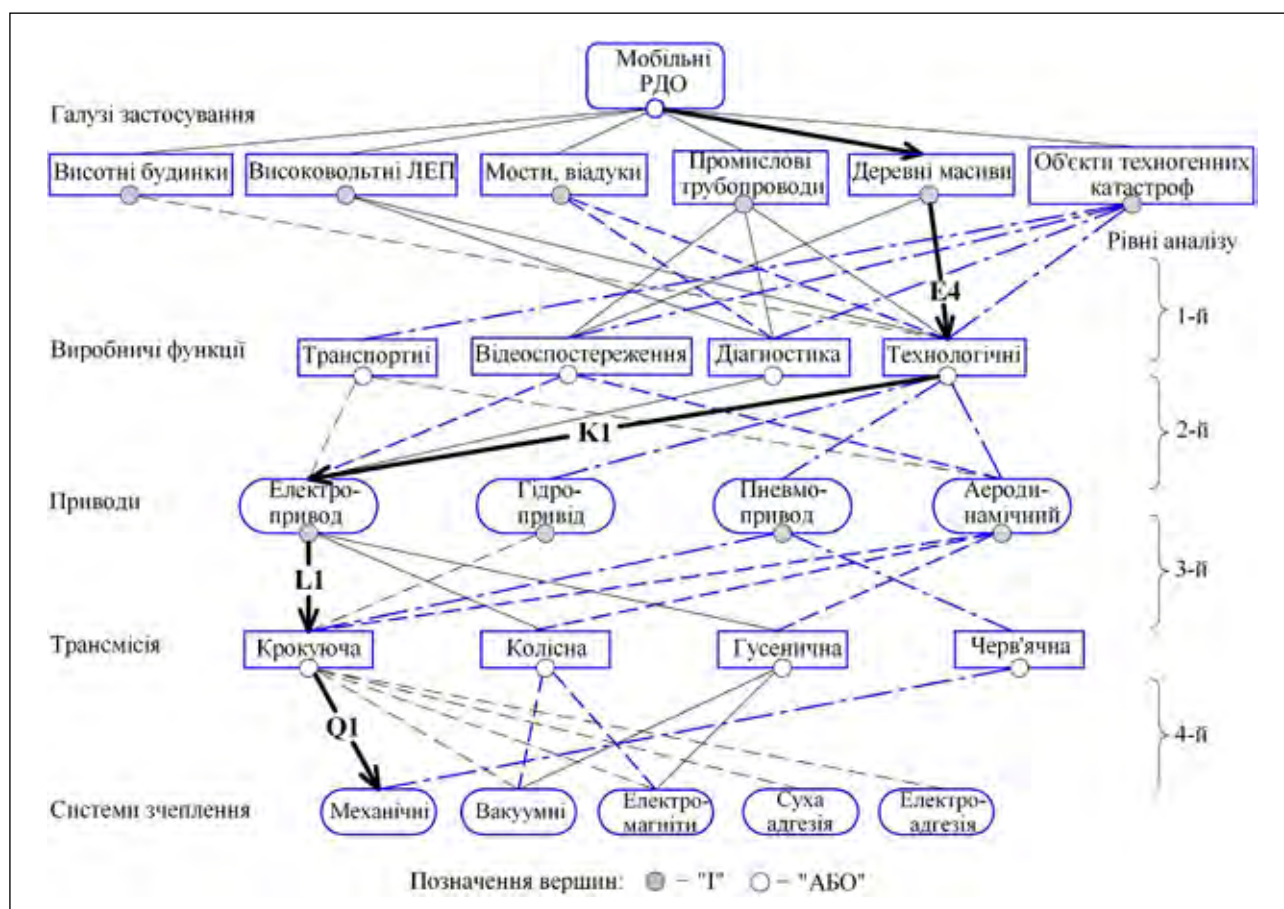


Рис. 2. Модифікація морфологічного графа мобільних РДО

пошуку оптимального розв'язання будуть змінюватися також координати локальних екстремумів, точніше матиме місце пошук квазіоптимальних (тобто найкращих або майже оптимальних) розв'язань задач. Більше того, через відсутність реальної можливості в процесі моделювання будь-якої технічної системи врахувати (навіть із залученням сучасних засобів обчислювальної техніки) всі фактори впливу на об'єкт у вигляді незалежних змінних про глобальні екстремуми не доводиться й говорити.

Як приклад параметричний синтез мобільного РДО виконаємо на основі окремо вибраної морфологічної структури. Припустимо, що технічне завдання передбачає розроблення конструкції мобільного робота для обслуговування паркових деревних масивів, зокрема для обрізки наростів, сучків та віток на деревах. На основі методу морфологічного конструювання виконаємо синтез необхідної структури, а саме створимо необхідну структуру робота, послідовно рухаючись по ребрах (гілках) графа рис. 2. Шукана структура виділена на морфологічному графі рис. 2 товщеними лініями зі стрілками та позначеннями морфологічних ознак E4, K1, L1 і Q1 комбінацій, що відображають такі ознаки: деревні масиви → технологічні операції → електропривод → із крокуючою трансмісією → й механічними захватами

для зчеплення зі стовбуром дерева. Витягнута з графу рис. 2 шукана структура показана на рис. 3 з відображенням цільових функцій для оптимізації її параметрів.

Нехай, наприклад, згідно з технічним завданням, мобільний робот 1 (рис. 3, а), оснащений крокуючою трансмісією 2 з електроприводами 3 (L1) та механічними Q1 захватами 4, повинен переміщатися стовбуром дерева 5 у системі координат XYZ на величину ΔZ , а також виконувати технологічну операцію E4. Нехай остання полягає в тому, щоби дисковою фрезою 6 зрізати деревні нарости 7. Тоді, відповідно до вибраної з морфологічного графа рис. 2 структури на рис. 3, б, оптимізації підлягають такі параметри: режими технологічної операції (різання наростів) → характеристики електроприводу → крокуючої трансмісії → конструктивні параметри механічного захвату.

Оскільки функціонали цільових функцій, що зв'язують критерій оптимізації з незалежними факторами, можуть бути різноманітними та визначаються рівнем кваліфікації конструктора чи математика, то тут для стислості обмежимося відображенням цільових функцій у загальному вигляді, чого поки що достатньо для викладання застосованої методології параметричного синтезу. Таке обмеження виправдане також тим, що процедура обчислення

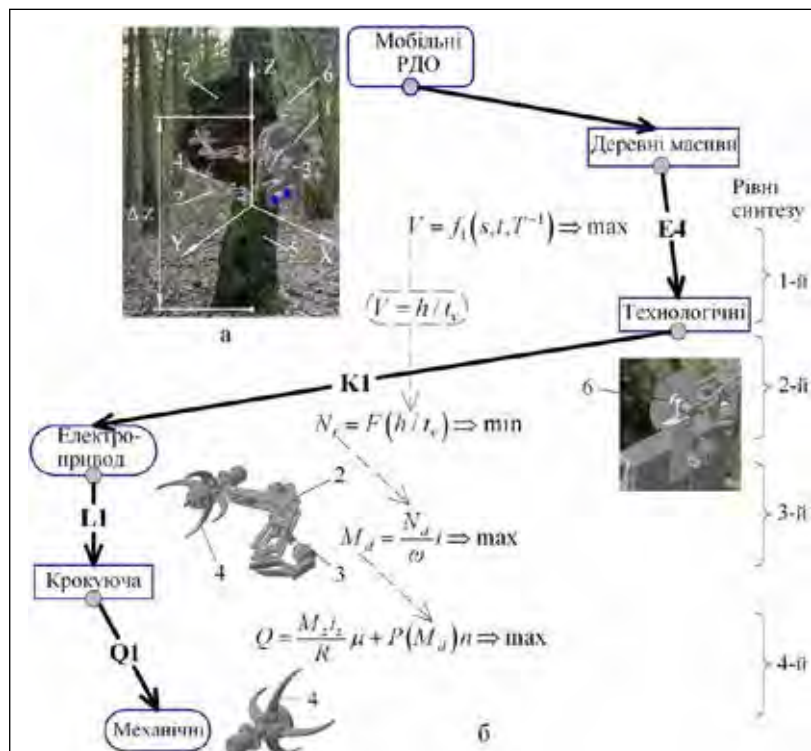


Рис. 3. Структурно-параметрична модель мобільного робота для обрізки дерев

оптимальних або, скоріше, квазіоптимальних значень параметрів може здійснюватися як аналітичними, так і чисельними методами, що в сукупності виходить за рамки цих досліджень.

Тут відобразимо найважливіше, а саме запропоновану модифікацію методики параметричного синтезу [27] для такої багаторівневої ієрархічної структури, як мобільний РДО. Пропонована модифікація полягає в тому, що слід відобразити не тільки наявність зв'язку критеріїв оптимізації з незалежними змінними в межах цільових функцій, що вже відомо та істотно (тобто тривіально), але й зв'язок самих цільових функцій на різних рівнях технічної системи (позначення штриховими стрілками на рис. 3, б), в цьому разі – структури мобільного РДО.

Отже, на першому рівні параметричного синтезу для морфологічної комбінації Е4 цільова функція, що включає режими технологічної операції, може бути представлена в загальному вигляді як функція швидкості різання деревини дисковою фрезой:

$$V = f_1(s, t, T^{-1}) \Rightarrow \max, \quad (25)$$

за таких обмежень: $s = f_{11}(\sigma)$; $t_1 \leq t_i \leq t_n$, де s – величина подачі на зуб дискової фрези; σ – межа міцності деревини певної породи; t – глибина різання в межах діапазону значень $t_1 \dots t_n$; T – період стійкості інструмента.

На другому рівні синтезу для морфологічної комбінації ознак К1 (технологічна функція – привод) цільову функцію можна записати як функцію потужності N_i (кВт) виконання технологічної операції (у цьому разі – різання):

$$N_i = F(h / t_v) \Rightarrow \min, \quad (26)$$

де F – зусилля різання деревини; h – товщина або діаметр об'єкта різання (вітки, сука, наросту); t_v – час різання; оскільки $(h / t_v) = V$, то можна записати як $N_i = FV \Rightarrow \min$, що відобразить взаємозв'язок першого та другого рівнів синтезу.

Для третього рівня синтезу морфологічної комбінації ознак L1 (привод – трансмісія) цільову функцію можна представити у вигляді крутного моменту M_d електропривода:

$$M_d = \frac{N_d}{\omega} i \Rightarrow \max; \text{ при } N_d = M_d \omega \geq N_i, \quad (27)$$

де N_d і ω – потужність і кутова швидкість двигуна; i – передатне відношення підсилювально-передатної ланки (редуктора).

На четвертому рівні параметричного синтезу для комбінації Q1 (привод – система зчеплення з поверхнею переміщення робота) цільову функцію також бажано зв'язати з попереднім функціоналом. Це можемо виконати, записавши у вигляді

цільової функції вираження для сили зчеплення Q механічного захвату з поверхнею переміщення мобільного РДО:

$$Q = \frac{M_z i_z}{R} \mu + P(M_d) n \Rightarrow \max; \quad Q \geq (F + mg) K, \quad (28)$$

де M_z і i_z – крутний момент і передатне відношення приводу захвату; R – виліт (довжина) пазурів захвату; μ – коефіцієнт тертя ковзання між матеріалом пазурів захвату й поверхнею дерева; P – зусилля однієї ноги з числа n ланок крокуючої трансмісії як функція моменту двигуна M_d у вираженні (27); m – маса робота; g – прискорення вільного падіння; K – коефіцієнт запасу (1,2...1,5) для врахування інерційних перехідних процесів.

Зазначені цільові функції параметричного синтезу спрощені та аж ніяк не є вичерпними, тому вони можуть бути доповнені й змінені, а особливо тоді, коли буде поставлено аналогічне завдання оптимізації для інших гілок морфологічного графа рис. 2. На цьому етапі, згідно з методом параметричного синтезу, надзвичайно важливим є параметричний взаємозв'язок цільових функцій оптимізації компонентів структури як ієрархічної багаторівневої технічної системи, показаної на прикладі мобільного робота, зокрема робота для обрізки дерев. Більш того, вкрай бажаний не тільки взаємозв'язок функціоналів на різних рівнях системи, але й функціональний зв'язок між їхніми незалежними змінними з накладеними на них обмеженнями, які можуть бути як лінійними, так і нелінійними.

Створення подібних формалізованих моделей, тобто у взаємозв'язку цільових функцій на різних рівнях ієрархії системи, дасть змогу максимально підвищити їхню адекватність реальним умовам експлуатації мобільних РДО. Методи розв'язування задачі пошуку локальних екстремумів критеріїв оптимізації на кожному з рівнів досить відомі й можуть включати як аналітичні, так і чисельні методи. В будь-якому разі пошук квазіоптимальних розв'язань, безумовно, сприяє ефективності проектування, отже, експлуатації мобільних роботів довільної орієнтації в технологічному просторі як нового виду засобів виробництва.

Висновки. На основі проведеного дослідження можна зробити такі висновки:

1) викладений морфологічний аналіз мобільних роботів, заснований на таких критеріях відбору, як принципи раціонального проектування й відповідність міжнародним базам патентів, дає змогу знаходити найбільш раціональні комбінації морфологічних ознак у вигляді варіантів виконання мобільних роботів, відповідних сучасному рівню технологій та матеріалів для їхнього виробництва;

2) структурний синтез конструктивних виконань роботів, заснований на послідовному проходженні так званих ребер (гілок) морфологічного графа І/АБО, дає змогу формувати структури мобільних РДО цільового технологічного призначення;

3) модифікація параметричного синтезу, що полягає у взаємозв'язку цільових функцій на різних рівнях синтезу, дає можливість шляхом пошуку квазіоптимальних розв'язань, суттєво підвищити ефективність проектування мобільних роботів, отже, їхньої майбутньої експлуатації.

Список літератури:

1. Raju D.D, Jaju S.B. Developments in wall climbing robots: a review. *International journal of engineering research and general science*. 2014. № 2. P. 33–42.
2. Черноусько Ф.Л., Болотник Н.Н., Градецкий В.Г. Мобильные роботы: проблемы управления и оптимизации движений. *XII Всероссийское совещание по проблемам управления* : труды ВСПУ 2014 (Москва, 16–17 июня 2014 года). Москва, 2014. С. 67–78.
3. Tin Lun Lam, Yangsheng Xu. Tree Climbing Robot: Design, Kinematics and Motion Planning. Springer Heidelberg, New York, 2012. P. 37–46.
4. Градецкий В.Г., Вешников В.Б., Калиниченко С.В., Кравчук Л.Н. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям. Москва : Наука, 2001. 360 с.
5. Козляков В.В., Раков Д.Л. Поиск новых технических решений в машиностроении на ранних этапах проектирования. *Анализ и синтез машин*. 2008. С. 2–11.
6. Одрин В.М. Метод морфологического анализа технических систем. Москва : ВНИИПИ, 1989. 312 с.
7. Кузнецов Ю.Н., Герра Ж.А., Хамуйела Т.О. Морфологический синтез станков и их механизмов : монография. Киев : ООО «ГНОЗИС», 2012. 416 с.
8. Акимов С.В. Введение в морфологические методы исследования и моделирование знаний предметной области. URL: <http://www.structuralist.narod.ru/about/about.htm> (дата звернення: 06.02.2019).
9. Polishchuk M.N. Principles of designing mobile robots. *Norwegian Journal of development of the International Science*. 2018. № 22. P. 31–37.
10. Walking machine: patent US 4527650: Int. Cl. B62D 57/02. Appl. No. 476629; Filed: Mar. 18, 1983; Date of Patent: Jul. 09, 1985.
11. Транспортное средство и способ его передвижения : патент RU 2369514 Россия : МПК B62D57/032. № 2008101305/11; заяв. 09.01.2008; опубл. 10.10.2009.
12. Climbing vehicle with suspension mechanism : Patent US 9428231 Int. Cl. B62D 55/00. Appl. No. 179464; Filed: Feb. 12, 2014; Date of Patent: Aug. 30, 2016.
13. Walking mechanism and method for moving devices : Patent DE 4107314: Int. Cl. B62D 57/032. Filed: 07.03.91; Date of Patent: 10.09.92.
14. Спосіб переміщення педипуляторів крокуючого робота та пристрій для його здійснення : Патент UA 111021 Україна: МПК B62D57/032. № a201411741; заявл. 30.10.2014; опубл. 10.03.2016, Бюл. № 5.
15. Крокуючий мобільний робот : Патент UA 117065 Україна : МПК B62D 57/032. № a201701440; заявл. 16.02.2017; опубл. 11.06.2018. Бюл. № 11.
16. Транспортное средство для перемещения по поверхностям произвольной пространственной ориентации : патент RU 2053911 Россия : МПК B62D57/032. № 5049217/11; заявл. 23.06.1992; опубл. 10.02.1996.
17. Climbing robot vehicle : Patent US 9738337: Int. Cl. B62D 57/024. Appl. No. 14/906,451; Filed: Jan. 28, 2015; Date of Patent: Aug. 22, 2017.
18. Air lifted and propelled vehicle : Patent US 4643268: Int. Cl. B60V 1/14. Appl. No. 640319; Filed: Aug. 13, 1984; Date of Patent: Feb. 17, 1987.
19. Мобильный шагающий робот : патент RU 2057046 Россия : МПК B 62D 57/032. № 5034754/11; заяв. 09.03.1992; опубл. 27.03.1996.
20. Шагающая опора : патент RU 2086450 Россия : МПК B62D57/032. № 94024222/11; заявл. 29.06.1994; опубл. 10.08.1997.
21. Транспортное средство для передвижения в разного рода грунтах «червяк» : Патент RU 2260542 Россия: МПК B62D57/032. № 2003134920/11; заявл. 03.12.2003; опубл. 20.09.2005.
22. Climber robot : Patent US 5551525 Int. Cl. B62D 57/032. Appl. No. 293498; Filed: Aug. 19, 1994; Date of Patent: Sep. 03, 1996.
23. Захват крокуючого робота : Патент UA 117979 Украина : МПК B65H 5/08. № u201702363; заявл. 14.03.2017 опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13.
24. Транспортное устройство для движения по вертикальным металлическим поверхностям : Патент РФ 101683 Россия : МКИ B62D 57/04. № 2010140051/11; заяв. 29.09.2010; опубл. 27.01.2011. Бюл. № 3.
25. Роботизированная система Gekko швейцарской фирмы Serbot AG. URL: <https://www.designworldonline.com/cleaning-solar-panels-with-a-robotic-gecko> (дата звернення: 09.02.2019).

26. Granosik G., Hansen M.G., Borenstein J. The Omni Tread Serpentine Robot for Industrial Inspection and Surveillance. *International Journal on Industrial Robots, Special Issue on Mobile Robots*. 2005. Vol. IR32-2. March 18th. P. 139–148.

27. Поліщук М.М., Науменко Ю.О. Вибір методу оптимізації критеріїв багаторівневої складної агрегатованої системи. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2010. № 16 (36). С. 84–88.

МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ

В статье впервые осуществлен морфологический анализ структур, предоставлена модифицированная методика параметрической оптимизации мобильных роботов произвольной ориентации в технологическом пространстве. Отличие предложенных моделей заключается в отображении взаимосвязи целевых функций оптимизации параметров мобильных роботов на разных уровнях иерархии их структур. Предложены критерии оптимизации конструктивных и технологических параметров на примере мобильного робота для обслуживания древесных лесных и парковых массивов.

Ключевые слова: мобильные роботы, роботы вертикального перемещения, альпинистские роботы, морфологический анализ, параметрический синтез.

MORPHOLOGICAL ANALYSIS AND PARAMETRIC SYNTHESIS OF MOBILE ROBOTS OF ARBITRARY ORIENTATION

In the article a morphological analysis of structures was first carried out and a method of parametric optimization of mobile robots of arbitrary orientation in the technological space was presented. The difference between the proposed models illustrates the relationship of the objective functions for optimizing the parameters of mobile robots at different levels of the hierarchy of their structures. Criteria for optimization of design and technological parameters are proposed on the example of a mobile robot for servicing forest and park arrays.

Key words: mobile robots, walking mechanisms, robots of vertical movement, climbing robots, morphological analysis, parametric synthesis.