

# МАШИНОЗНАВСТВО

УДК 621.865.8(031)

**Поліщук М.М.**

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

## ПРИНЦИПИ СИНТЕЗУ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ

*У роботі запропоновано три основних принципи синтезу мобільних роботів: нагромадження і перетворення енергії, інтеграції приводів руху й застосування генератора реактивної пневматичної тяги. Ці технічні розв'язки дають змогу роботам переміщатися по поверхнях довільної орієнтації в різних системах координат. Реалізація зазначених принципів сприяє зменшенню сумарної потужності приводів і підвищенню надійності втримання роботів на поверхні довільної орієнтації в технологічному просторі. Викладено результати математичного моделювання конструктивних і технологічних параметрів мобільних роботів.*

**Ключові слова:** мобільні роботи, крокуючі механізми, роботи вертикального переміщення, альпіністські роботи.

**Постановка проблеми.** У ХХ ст. науково-технічною думкою створені досить надійні засоби подолання гравітаційної сили у вигляді встаткування літального і реактивного характеру, що використовуються як транспорт, однак дотепер відсутні промислові зразки встаткування для виконання контактних технологічних операцій при одночасному подоланні сил гравітації.

Мобільні роботи довільної орієнтації в просторі, відомі також як роботи вертикального переміщення, а в міжнародних виданнях – під терміном Climber Robot (альпіністський робот), є новою модифікацією мобільних роботів, оснащених засобами втримання робота на поверхні довільної орієнтації стосовно обрїю технологічного простору. Створення цього виду робототехніки перебуває на початковій стадії і продиктоване необхідністю виконання технологічних операцій у таких областях, як моніторинг промислових об'єктів, монтаж і демонтаж будівельних конструкцій, ремонт і профілактичне обслуговування їх компонентів. Особливу актуальність експлуатація зазначених роботів здобуває в екстремальних умовах техногенних катастроф, небезпечних і навіть неприйнятних для перебування людини.

Наявність експериментальних зразків роботів зазначеного типу [1, с. 33–42; 2, с. 67–78] не усуває проблему відсутності методології синтезу підсистем роботів, що компенсують або долають гравітаційне навантаження для гарантованого втримання робота на довільно орієнтованій поверхні переміщення при виконанні технологічних операцій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідження зі створення роботів довільної орієнтації в просторі почалися порівняно недавно – в останньому десятилітті ХХ ст. у країнах Західної Європи, Японії, США, Кореї, Китаю й Росії. На жаль, приклади вітчизняних розробок, так само як і публікацій (крім авторських), до теперішнього часу в цій області відсутні.

Мобільні роботи [3, с. 5] оснащені підсистемами втримання робота на поверхнях переміщення у вигляді вакуумних пристроїв, які хоч і інваріантні до фізико-механічних властивостей поверхні переміщення, у разі підтоку повітря не гарантують надійного втримання робота. Тут можна рекомендувати комбіновану пневмомеханічну систему зчеплення [4, с. 60], що має властивість додаткової страховки утримання робота. Швидкодія й простота конструкції притаманні електромагнітним пристроям зчеплення [5, с. 2; 7, с. 10], але подолання сили гравітації шляхом прилипання магнітів обмежує застосування цього засобу тільки феромагнітними поверхнями переміщення. Роботи з механічним зчепленням [7, с. 9] вирізняються підвищеною надійністю, але їх приводи вимагають застосування редукції, що збільшує вагу робота, а значить, і його гравітаційне навантаження, для компенсації якого доцільне використання систем нагромадження і перетворення енергії руху [8, с. 117].

Розвитком систем зчеплення робота з поверхнею переміщення є технічні рішення [9, с. 6], в яких використовується технологія зчеплення за допомогою «сухої» адгезії, а також електричної адгезії [10, с. 7], що є найбільш ефективними з погляду енергозбереження, але й одночасно досить дорогими технологіями. Експериментальна реалізація зазначеного зчеплення з поверхнею переміщення

характеризується низькою швидкістю переміщення робота внаслідок повільності ефекту адгезії, що поки перешкоджає їхньому промисловому використанню.

Проблема синтезу мобільних роботів саме довільної орієнтації не вичерпується створенням систем зчеплення, але також включає задачу вибору трансмісії їх приводів, що безпосередньо впливають на енергетичну ефективність і гравітаційне навантаження роботів. Технічні розв'язки [11, с. 3] дають змогу здійснювати перехід робота по поверхнях, які орієнтовані під різним кутом до об'єкту, але тільки в 2D-просторі, тобто в площині. На відміну від зазначених технічних рішень, модель робота [12, с. 37–46] дає змогу обслуговувати об'єкти в циліндричній системі координат, зокрема, такі об'єкти, як дерева, але за наявності м'якої пористої поверхні переміщення робота. У той час, коли існують об'єкти технічного обслуговування, які також наближені до циліндричної системи координат, наприклад, стовпи електромереж, колони, труби теплоелектростанцій тощо. Крім того, мобільний робот має працювати й в ангулярній системі координат, властивій людині. Таким чином, проблема синтезу мобільних роботів, здатних виконувати технологічні операції в просторі довільної орієнтації, є актуальною.

**Постановка завдання.** Метою цих досліджень є розробка принципів синтезу мобільних роботів, що дають змогу суттєво зменшити сумарну потужність приводів при одночасному зниженні гравітаційного навантаження, що, зрештою, підвищить надійність утримання робота на поверхні переміщення незалежно фізико-механічних властивостей поверхні переміщення і систем координат технологічного простору.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

*Принципи побудови мобільних роботів.* Запропоновані нижче перспективні напрями вдосконалення мобільних роботів довільної орієнтації можуть бути реалізовані за допомогою трьох основоположних принципів синтезу їх конструкцій:

1) нагромадження потенційної енергії на кожній попередній ділянці (або кроці) переміщення й перетворення її на кінетичну енергію руху на наступній ділянці (кроці) руху;

2) інтеграції приводів поздовжнього та вертикального переміщення, а також приводів зміни орієнтації робота згідно із заданим маршрутом;

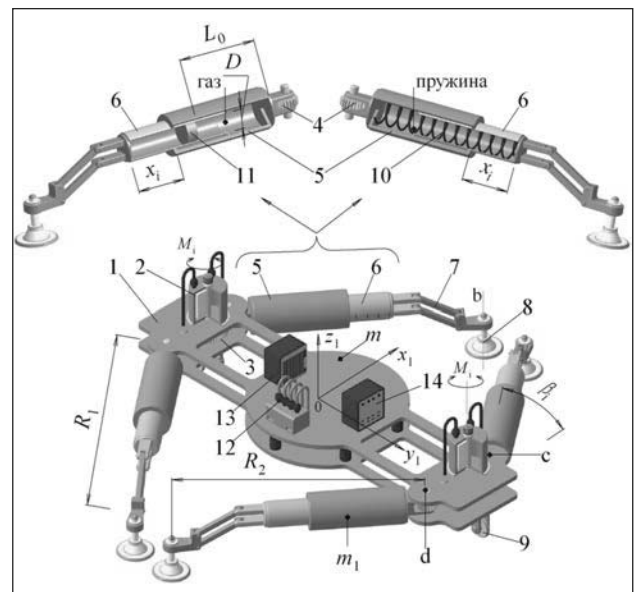
3) застосування *генераторів тяги* (аеродинамічної піднімальної сили) як засобу протидії гравітаційній силі з метою збільшення технологічного навантаження при одночасному зменшенні потужності приводів переміщення і зчеплення робота з поверхнею переміщення.

Зазначені напрями синтезу мобільних роботів у світовій теорії й практиці стосовно до роботів довільної орієнтації ще не розглядалися (крім авторських патентів) і тому не досліджені. З метою реалізації їх

сучасними засобами комп'ютерного моделювання для переходу до проектно-конструкторських розробок застосовані методи кінестатики на принципах Германа – Ейлера – Д'Аламбера, рівняння Лагранжа II роду для дослідження динаміки рухів робота й метод координатної оптимізації для знаходження екстремальних значень параметрів. Як інструментальне забезпечення побудови моделей застосовані програми математичного моделювання Matlab і Mathcad, а синтез конструкцій вузлів роботів здійснений у графічних середовищах проектування Компас 3D і AutoCAD.

Відповідно до вищевикладених принципів синтезу розглянемо їхні моделі й проектні реалізації роботів довільної орієнтації. На рис. 1 показаний мобільний робот [13, с. 3], що реалізує перший із вищезазначених принципів: має здатність нагромадження потенційної енергії на кожному попередньому кроці й перетворення її на кінетичну енергію руху на кожному наступному кроці переміщення.

На корпусі 1 робота встановлені поворотні пневматичні приводи 2, з'єднані через зубчасту трансмісію 3 і 4 з педипуляторами – крокуючими механізмами, виконаними у вигляді телескопічних циліндрів 5 і 6, і з'єднаними шарнірними паралелограмами 7 із захватами 8 для зчеплення з поверхнею переміщення робота.



**Рис. 1. Модель робота довільної орієнтації з модулями нагромадження і перетворення енергії**

Для подолання перешкод на поверхні переміщення робот додатково оснащений опорами кочення 9. На рис. 1 показано два варіанти виконання педипуляторів: із модулем нагромадження енергії у вигляді пружин 10 і, інший варіант, із газовим накопичувачем енергії, утвореним циліндром 5 і поршнем 11. Також робот оснащений

пневматичними розподільниками 12, модулем енергопостачання 13 і блоком керування 14. При зчепленні захватів 8 із поверхнею переміщення приводи 2 повертають педіпулятори робота навколо осей «b», стискаючи пружні елементи: або пружини 10, або газ у камері 5 залежно від варіанта виконання. Внаслідок такого стиснення на ділянці повороту педіпуляторів на кут  $0 \leq \beta \leq 45^\circ$  відбувається нагромадження потенційної енергії за період першої половини кроку, а на другій половині кроку  $45^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$  зазначені елементи, розтискаючись, перетворюють потенційну енергію стиску на кінетичну енергію руху робота. Обсяги кінетичної енергії руху робота на різних етапах переміщення можна визначити, використовуючи рівняння Лагранжа II-го роду. Оскільки цей метод є класичним, для стислості викладання обмежимося результатами моделювання. Вираження кінетичної енергії  $T_k$  корпуса робота буде мати вигляд

$$T_k = \frac{mV^2}{2} = \frac{mR_2^2}{4 \cos^4(45^\circ - \beta_1)} (\dot{\beta}_1)^2, \quad (1)$$

де  $m$  – маса корпуса робота;  $V$  і  $\dot{\beta}_1$  – відповідно, лінійна і кутова швидкості педіпуляторів робота. Кінетичну енергію  $T_l$  вільної від зчеплення з поверхнею ноги робота при відключенні захватів 8 визначимо як

$$T_l = \frac{1}{2} j (V_{x1}^2 + V_{y1}^2) dm, \quad (2)$$

Підставивши у формулу (2) вираження проєкцій швидкості та її значення  $v = \frac{ds}{dt} = \frac{R_2 \cos 45^\circ}{\cos^2(45^\circ - \beta_1)} \dot{\beta}_1$ , а також  $dm = m_1 dy / R_2$ , після інтегрування, одержуємо остаточну формулу для знаходження кінетичної енергії вільної від зчеплення з поверхнею переміщення ноги робота:

$$T_l = \frac{m_1 R_2^2}{2} \left( \frac{(\dot{\beta}_1)^2}{2 \cos^4(45^\circ - \beta_1)} + \frac{\dot{\beta}_1 \dot{\beta}_2 \sqrt{2} \cos(45^\circ - \beta_2)}{2 \cos^2(45^\circ - \beta_1)} + \frac{1}{3} (\dot{\beta}_2)^2 \right), \quad (3)$$

де  $m_1$  – маса педіпулятора (ноги) робота, а  $R_2$  – радіус його повороту.

Вираження кінетичної енергії опорної ноги, зчепленої з поверхнею переміщення, можна одержати з вираження (2) після його інтегрування, підставивши швидкість поступального руху робота  $V=0$  і куту швидкості педіпуляторів  $\dot{\beta}_2 = \dot{\beta}_1$ :

$$T_2 = \frac{m_1 R_2^2}{6} (\dot{\beta}_1)^2, \quad (4)$$

Тоді повна кінетична енергія  $T$  кожного педіпулятора на двох половинах циклу переміщення робота, тобто на стадії нагромадження потенційної енергії при стисненні пружних елементів 4 і перетворення її на кінетичну енергію руху, становитиме:

$$T = T_k + 2T_l + 2T_2 = \frac{R_2^2}{2} \left( \frac{(2m_1 + m)(\dot{\beta}_1)^2}{2 \cos^4(45^\circ - \beta_1)} + \frac{m_1 \dot{\beta}_1 \dot{\beta}_2 \sqrt{2} \cos(45^\circ - \beta_2)}{\cos^2(45^\circ - \beta_1)} + \frac{2m_1}{3} ((\dot{\beta}_2)^2 + (\dot{\beta}_1)^2) \right), \quad (5)$$

Таким чином, переміщення робота на кожній другій половині циклу відбувається завдяки енергії, накопиченій на кожній першій половині кроку переміщення. Це дає змогу суттєво знизити енергетичні витрати на рух робота і направити отриманий у такий спосіб резерв енергії на виконання технологічних операцій.

Якщо для нагромадження потенційної енергії використовується пружина 10 (рис. 1), то сила пружного елемента педіпулятора становитиме

$$J = P_{min} + jR_2 \left( 1 - \frac{\cos 45^\circ}{\cos(45^\circ - \beta_1)} \right); \quad 0 \leq \beta_1 \leq 90^\circ, \quad (6)$$

де  $P_{min}$  – попереднє стиснення і  $j$  – жорсткість пружного елемента для нагромадження потенційної енергії, що визначається модулем Юнга матеріалу (пружної сталі) для виготовлення вказаного елемента.

У разі нагромадження потенційної енергії за допомогою стиснення газу в циліндрі 5 (рис. 1), сила  $J$  пружного елемента (газу) становитиме:

$$J = p \frac{\pi D^2}{4} - p_a \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi D^2}{4} \left( p_0 \frac{L_0}{L_0 - x} - p_a \right); \quad 0 \leq \beta_1 \leq 90^\circ, \quad (7)$$

$$x = R_2 \left( 1 - \frac{\cos 45^\circ}{\cos(45^\circ - \beta_1)} \right); \quad L_0 = \frac{p_{max} x_{max}}{p_{max} - p_0}$$

де  $D$  – внутрішній діаметр газової камери;  $p_0$ ,  $p_a$ ,  $p_{max}$  – відповідно, поточний, атмосферний і максимальний тиск у камері;  $L_0$  – робоча довжина камери;  $x$ ,  $x_{max}$  – відповідно, поточне й максимальне стиснення пружного елемента, в даному випадку стислого повітря.

Пружні елементи (пружина або газ), як зазначено вище, виконують функцію нагромадження потенційної енергії за період першої половини циклу переміщення, тобто на першій половині кроку, а головною їхньою характеристикою є жорсткість  $j$  – параметр, який визначає величину накопиченої потенційної енергії на першій половині кроку педіпулятора. Як показують результати моделювання, вплив жорсткості  $j$  на зміну швидкості переміщення (рис. 2а) більшою мірою проявляється на другому етапі руху робота, у частині її зниження. Однак цей недолік не настільки суттєвий порівняно з економією енергії, що досягається при русі робота з виключеним двигуном, а це для мобільних роботів, що використовують автономні джерела живлення з обмеженими ресурсами, має принципове значення.

На рис. 2 (б) показана залежність зміни роботи  $A$  від жорсткості пружного елемента  $j$  (N/m) і сил ваги робота на другому етапі  $\beta_1 > 45^\circ$  переміщення, тобто під час перетворення потенційної енергії на кінетичну енергію руху робота. Оскільки на другому етапі переміщення  $45^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$  привод педіпулятора відключений із метою

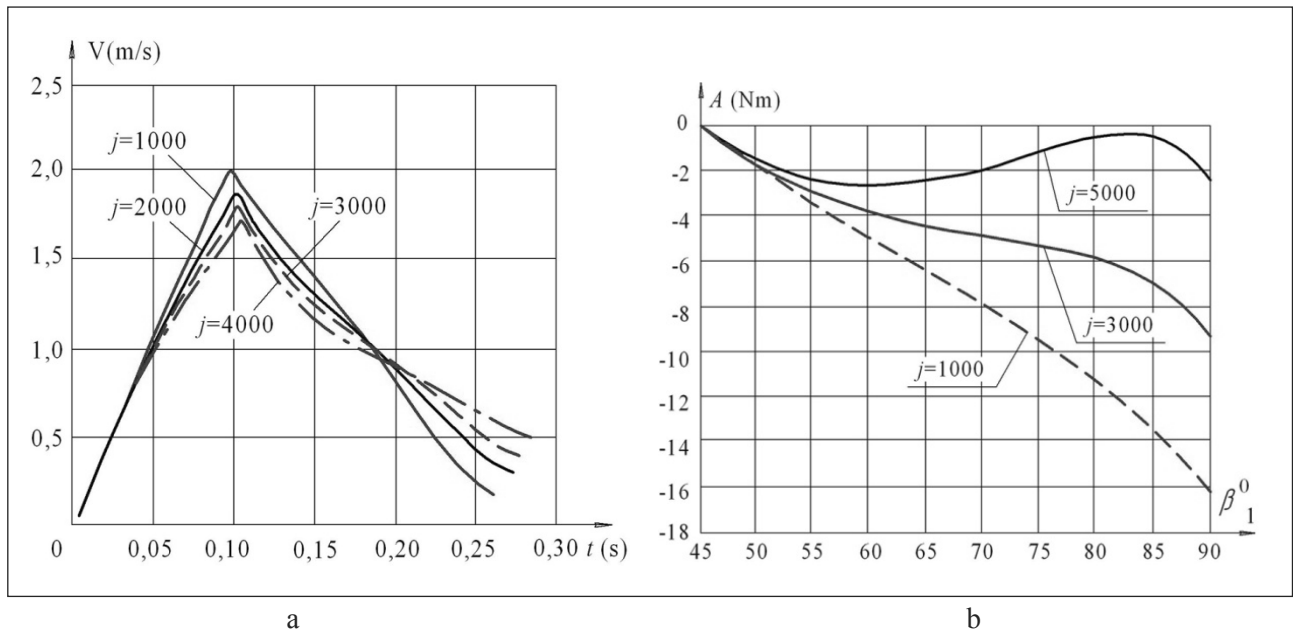


Рис. 2. Вплив жорсткості  $j$  (N/m) пружного елемента на зміну швидкості (a) і виконуваним роботу (b) на другому етапі  $\beta_1 > 45^\circ$  переміщення робота

енергозбереження ресурсів робота і він рухається тільки завдяки кінетичній енергії, очевидно, що значення жорсткості пружного елемента привода має домінуючий вплив на динаміку переміщення.

Аналіз цих графіків показує, що для збільшення кінетичної енергії руху робота доцільне підвищення жорсткості пружини або початкового тиску в газовій камері, незважаючи на те, що при цьому зростає протидія привода на першій половині кроку, тобто зменшується коефіцієнт корисної дії привода. Однак цей негативний прояв можна компенсувати збільшенням передатного відношення трансмісії (див. поз. 3 і 4, рис. 1) педіпуляторів робота. У разі використання стислого газу як пружного елемента припускаємо, що процес відбувається при постійній температурі, а тому за законом Бойля – Маріотта має місце рівність  $p_0 V_0 = p V$ , де  $p_0$  – тиск у камері при максимальному її об’ємі  $V_0$ ;  $p$  – тиск у камері при довільному об’ємі  $V$  з урахування збільшення щільності стислого газу.

Обидва розглянутих варіанти синтезу педіпуляторів мобільного робота мають об’єктивні переваги й недоліки. Так, використання пружинного накопичувача енергії сприяє підвищенню вантажопідйомності робота, але внаслідок природнього нагромадження залишкових напруг пружин знижується ресурс роботи педіпуляторів. І, навпаки, застосування газового накопичувача не менш ніж на порядок збільшує ресурс роботи, але це рішення прийнятне для роботів незначної вантажопідйомності.

Інтеграцію приводів переміщення для їхнього зменшення, а значить, і маси робота з метою зни-

ження гравітаційного навантаження, передбачає зазначений вище **другий принцип** синтезу. Відомо, що в Декартовій системі координат ми маємо шість ступенів свободи – три поступальних й три обертальних, кожному з яких згідно із класичними розв’язками відповідає автономний привод. Пропонована на рис. 3 технічна реалізація цього принципу виключає необхідність у приводах по кожній із координатних осей [14, с. 6; 15, с. 5]. Для цього робот оснащений *гнучкими* крокуючими механізмами 2, установленими на корпусі 1. Кожна пара педіпуляторів через зубчаті трансмісії 3 постачена електроприводами 4. Захвати 5 утримують робота на поверхні переміщення, а приводи повороту 6 погоджують положення захватів щодо поверхні переміщення. На платформі робота розміщений модуль 7 енергетичного забезпечення, генератор 8 тиску газу або рідини, а також контролер керування 9.

Педіпулятори робота виконані у вигляді набору напівсферичних кілець 10 (рис. 4), зібраних у пакет пружним елементом 11, а усередині пакета кілець розміщені *гофровані* трубопроводи 12 під різним тиском  $p_1$  і  $p_2$ , створюваним через канали 13 і 14. Завдяки такій схемі педіпуляторів робот має здатність працювати в різних системах координат: прямокутної Декартової, сферичної й циліндричної без додаткових приводів по кожній координатній осі. У кожній нозі робота у вертикальній і горизонтальній площинах розміщено по два гофрованих трубопроводи з відповідними тисками  $p_1, p_2$  і  $p_3, p_4$ . Внаслідок дії цих тисків на торці кожного трубопроводу виникають сили  $F_i$ :

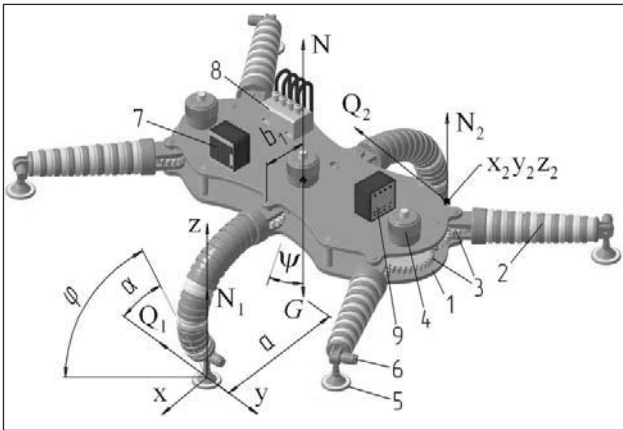


Рис. 3. Модель робота із гнучкими підпюляторами

$$F_1 = p_1 \frac{\pi d^2}{4}; \quad F_2 = p_2 \frac{\pi d^2}{4}; \quad F_3 = p_3 \frac{\pi d^2}{4}; \quad F_4 = p_4 \frac{\pi d^2}{4}, \quad (11)$$

де  $d$  – внутрішній діаметр торця гофрованих трубопроводів. Оскільки осі трубопроводів зміщені щодо осі підпюлятора на ексцентриситет  $e$ , виникають моменти, які, згинаючи ногу робота по радіусу  $R$  (див. рис. 4), переводять її з положення «А» у положення «В», здійснюючи орієнтацію робота в просторі:

$$M_1 = \frac{\pi d^2}{4} (p_1 - p_2) e; \quad M_2 = \frac{\pi d^2}{4} (p_3 - p_4) e, \quad (12)$$

де  $e$  – ексцентриситет зміщення осей гофрованих трубопроводів в одній із площин систем координат.

Для проектування робота необхідно встановити взаємозв'язок між припустимим технологічним навантаженням і сил зчеплення його ніг із поверхнею переміщення. Із цією метою розглянемо критичний випадок, коли робот опирається тільки на дві ноги, як це показано на рис. 3. Склавши систему рівнянь рівноваги на основі принципу Германа – Ейлера – Д'Аламбера, запис яких для стислості викладення тут опускаємо, знаходимо відповідні сили реакцій  $N_i$  і сили тертя  $Q_i$  зчеплення ніг робота з поверхнею переміщення, а саме (див. рис 3):

$$N_2 = Q_2 + a_3 G - b_3 N; \quad Q_{2y} = d_3 G + h_3 N, \quad (13)$$

де для компактності запису позначено:

$$a_3 = \frac{d_1 b_2 - b_1 d_2}{\Delta}; \quad b_3 = \frac{b_2 h_1 + b_1 h_2}{\Delta};$$

$$d_1 = y_c \cos \alpha - z_c \sin \alpha; \quad b_2 = x_2 \cos(\varphi - \alpha);$$

$$d_3 = \frac{d_2 a_1 - d_1 a_2}{\Delta}; \quad h_3 = \frac{h_2 a_1 + a_2 h_1}{\Delta}$$

$$a_1 = y_2 \cos(\varphi - \alpha) + z_2 \sin(\varphi - \alpha);$$

$$a_2 = -x_2 \sin(\varphi - \alpha); \quad d_2 = x_c \sin \alpha;$$

$$h_1 = y_c \cos \psi + z_c \sin \psi;$$

$$b_1 = y_2 \sin(\varphi - \alpha) - z_2 \cos(\varphi - \alpha); \quad h_2 = x_c \sin \psi;$$

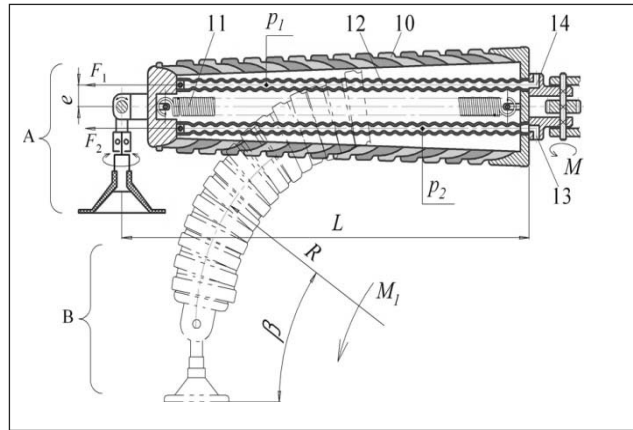


Рис. 4. Конструкція підпюлятора робота

$\Delta = a_1 b_2 - b_1 a_2$ ;  $x_2, y_2, z_2$  – координати точки контакту другої ноги робота з поверхнею переміщення;  $x_c, y_c, z_c$  – координати центру ваги робота;  $\alpha, \varphi$  – кути нахилу до обрису поверхонь, на які опираються ноги робота;  $\psi$  – кут нахилу центральної осі робота, що проходить через його центр ваги  $G$ . Потім із тієї ж системи рівнянь рівноваги (яких достатньо, оскільки робот не рухається) знаходимо інші невідомі реакції й сили тертя:

$$N_1 = Q_1 + G a_4 - N h_4; \quad Q_{1y} = G h_5 + N h_6, \quad (14)$$

де також позначено:

$$a_4 = \cos \alpha - a_3 \cos(\varphi - \alpha) - d_3 \sin(\varphi - \alpha);$$

$$h_4 = \cos \psi - b_3 \cos(\varphi - \alpha) + h_3 \sin(\varphi - \alpha);$$

$$h_5 = \sin \alpha - d_3 \cos(\varphi - \alpha) + a_3 \sin(\varphi - \alpha);$$

$$h_6 = \sin \psi - h_3 \cos(\varphi - \alpha) - b_3 \sin(\varphi - \alpha)$$

Для стійкості робота при технологічному навантаженні сили тертя кожної його ноги не мають перевищувати граничних значень:

$$Q_{1y} < \mu N_1; \quad Q_{2y} < \mu N_2; \quad N_1 > 0; \quad N_2 > 0, \quad (15)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт тертя зчеплення ноги робота з поверхнею переміщення. Підставивши в умови (15) вираження вище знайдених реакцій сил, знаходимо обмеження технологічного навантаження робота з обліком сил, що діють на нього:

$$N_1 > 0 \Rightarrow N < \frac{Q_1 + G a_4}{h_4}; \quad N_2 > 0 \Rightarrow N < \frac{Q_2 + G a_3}{b_3};$$

$$N < \frac{\mu Q_2 + G(\mu a_3 - d_3)}{h_3 + \mu b_3}; \quad N < \frac{\mu Q_1 + G(\mu a_4 - h_5)}{h_6 + \mu h_4}, \quad (16)$$

Найбільше значення реакції  $N$  сили технологічної операції, що задовольняє всім нерівностям (16), визначає граничне технологічне навантаження робота, наприклад, зусилля свердління, різання, клепки, установки монтажних дюбелів і т.п. технологічних операцій.

У результаті моделювання отримані граничні значення технологічного навантаження при опорі робота на дві ноги (рис. 5, а): криві 1 і 2 визначають

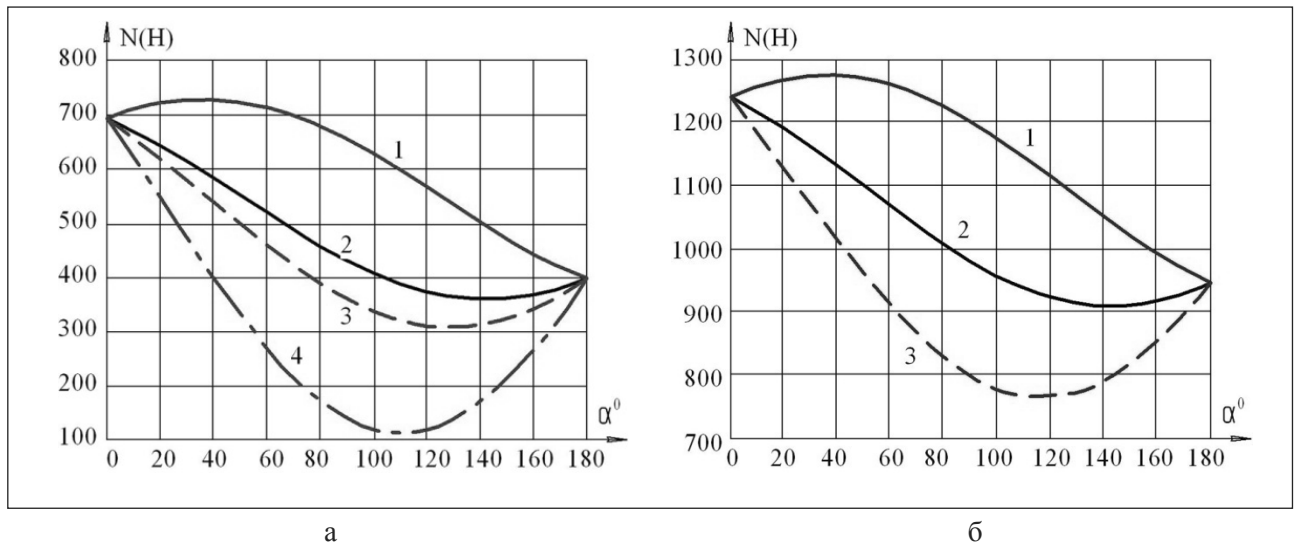


Рис. 5. Графіки граничних значень технологічного зусилля  $N$  робота залежно від кута  $\alpha$  нахилу до обрію: а – опора на дві ноги; б – опора на чотири ноги

стан відриву від поверхні переміщення відповідно першої і другої ніг робота, а криві 3 і 4 – відповідно, початок проковзування зазначених ніг робота. При опорі робота на чотири ноги (рис. 5б), де крива 1 відповідає умові  $N_1 > 0$ , крива 2 – умові  $N_2 > 0$ , тобто ноги робота не відриваються від поверхні переміщення, а крива 3 відповідає умові відсутності проковзування ніг робота, очевидний непропорційний ріст корисного технологічного навантаження. Отримані залежності дають змогу проектувати пристрої зчеплення робота з поверхнею переміщення залежно від граничних значень технологічних навантажень.

Таким чином, реалізація другого принципу синтезу дає змогу досягти довільної орієнтації крокуючого мобільного робота в різних робочих просторах: прямокутної Декартової, сферичної й циліндричної систем координат. Цей ефект забезпечує розширення технологічних можливостей робота.

**Третій принцип** – застосування генераторів тяги як засобу протидії гравітаційній силі, реалізує робот [16, с. 8], показаний на рис. 6. Як і в попередньому випадку, він також містить на корпусі 1 гнучкі педипулятори 2, оснащені захватами 3, трансмісією 4 і електроприводом 5. Однак принциповою відмінністю цього робота є установка в центрі його мас карданового підвісу 6 із трьома ступенями свободи й зміщеного від центру мас пневматичного генератора тяги 7. Такий принципово новий розв’язок – розміщення генератора тяги на кардановому підвісі дає змогу генератору тяги зберігати збіг ліній дії протилежних сил: піднімальної пневматичної й гравітаційної, незалежно від положення робота в просторі.

Цей принцип, будучи заснованим на узгодженні технологічного навантаження й зусиль зчеплення

робота з поверхнею переміщення, з одного боку, і сили реактивної пневматичної тяги, з іншого боку, дає змогу здійснити диференційований підхід до регулювання аеродинамічної піднімальної сили робота залежно від його орієнтації в просторі. Точніше, регулювати силу втримання робота на поверхні переміщення [див. 16, с. 8–9] залежно від кутів Ейлера осей робота щодо обрію. Зазначене регулювання необхідне, щоб при критичних кутах нахилу робота пневматична реактивна тяга  $G_1$  за своєю величиною не перевищувала силу зчеплення захватів робота з поверхнею переміщення. Інакше кажучи, щоб робот не перетворився на літальний апарат, а генератор тяги долав негативний вплив сили гравітації, одночасно не перевищуючи силу зчеплення захватів робота. Ця задача вирішується розрахунками критичного кута нахилу робота до обрію, коли настає момент часу включення генератора пневматичної тяги.

Аналогічно попередньому випадку із системи рівнянь рівноваги робота визначаємо сили нормальних реакцій  $N_i$ , опор ногам робота й відповідні сили тертя  $Q_i$  (рис. 6):

$$N_2 = b_{12}(G - G_1), \quad (22)$$

де  $G$  – сила ваги робота;  $G_1$  – пневматична сила тяги;  $\alpha$  – кут нахилу площини переміщення робота до обрію;  $b_{12} = \cos \alpha y_c - \sin \alpha z_c / 2y_2$ ;  $y_c, z_c$  – координати центру ваги робота;  $y_2$  – координата контакту з поверхнею другої ноги робота. Сила тертя  $Q_{1y}$  і нормальна реакція  $N_1$  становитимуть:

$$\begin{aligned} Q_{1y} &= (G - G_1) \left( -\mu b_{12} + \frac{1}{2} \sin \alpha \right) \\ N_1 &= (G - G_1) \left( -b_{12} + \frac{1}{2} \cos \alpha \right) \end{aligned}, \quad (23)$$

Кут  $\alpha$  нахилу робота до обрію може змінитись у межах  $0 \leq \alpha \leq 180^\circ$ . Як видно із графіків рис. 7,

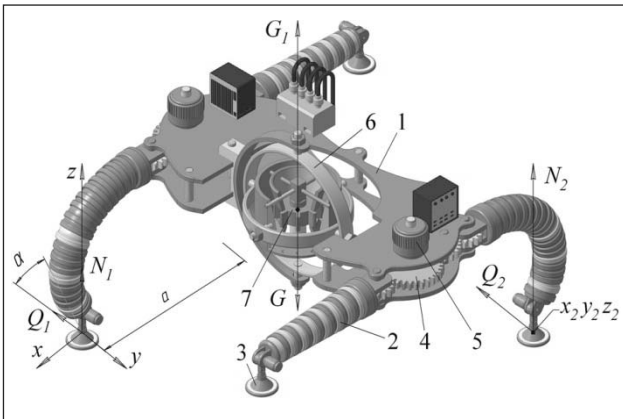


Рис.6. Мобільний робот із генератором реактивної тяги

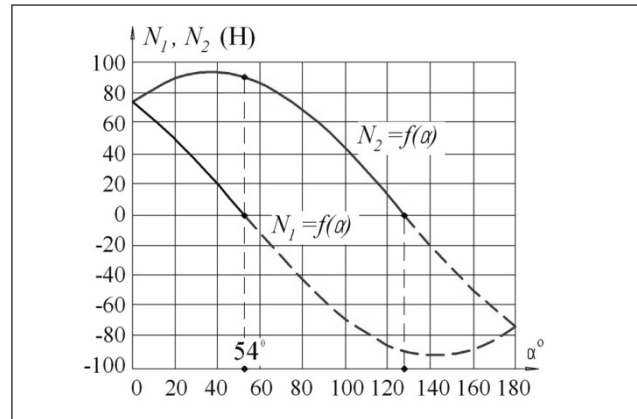


Рис. 7. Графіки залежності нормальних реакцій  $N_1$ ,  $N_2$  опор робота від кута  $\alpha$  його нахилу до обрїю

за певних характеристик робота (ваги, жорсткості педіпуляторів, потужності приводів і т.п.) обидві реакції  $N_1$  і  $N_2$  позитивні до значення кута нахилу поверхні переміщення  $\alpha \leq 54^\circ$  (на графіках позначено точками). Інакше кажучи, при цих кутах нахилу робота до обрїю сила ваги сприяє збільшенню технологічного навантаження. Це означає, що включення генератора реактивної тяги необхідне при куті нахилу робота до обрїю  $\alpha \geq 54^\circ$ , незважаючи на те, що друга сила реакції  $N_2$ , на відміну від першої  $N_1$ , стає негативною тільки коли  $\alpha > 128^\circ$ . Тому для забезпечення надійності втримання робота, щоб не допустити відрив хоча б однієї з його ніг, необхідне включення генератора тяги вже при нахилі робота до обрїю  $\alpha \geq 54^\circ$ . Безумовно, критичний кут нахилу буде змінюватися при інших масово-центрувальних характеристиках робота.

Усі три розглянутих принципи синтезу роботів довільної орієнтації можуть бути застосовані автономно й у сукупності залежно від технологічного призначення мобільного робота і його рентабельності, що, своєю чергою, визначається галузю промислової експлуатації.

**Висновки.**

1. На етапі теоретичних досліджень, що передують експериментальній апробації, очевидно,

що застосування засобів нагромадження потенційної енергії приводів із подальшим її перетворенням на кінетичну енергію руху робота, а також інтеграція приводів поздовжнього й вертикального переміщення дають змогу суттєво зменшити їх сумарну потужність, що має принципове значення для мобільних роботів довільної орієнтації в просторі як шлях до зниження гравітаційного навантаження.

2. Реалізація способу протидії гравітаційному навантаженню за допомогою пневматичного генератора тяги дає змогу при регулюванні сили тяги залежно від кута нахилу робота до обрїю підвищити надійність утримання робота на поверхні довільної орієнтації, що, своєю чергою, дає змогу зменшити потужність приводів зчеплення робота з поверхнею переміщення при одночасному збільшенні корисного технологічного навантаження.

3. Пропонований підхід синтезу конструкцій роботів дає змогу шляхом зниження сумарної потужності приводів пропорційно зменшити вагу робота, а звільнений енергетичний ресурс – направити на підвищення ефективності виконання як транспортних, так і технологічних операцій, що виконуються мобільними роботами у різних областях промисловості.

**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 (16–17 июня 2014). Москва. 2014. С. 67–78.
3. Manuel F. Silva and J.A. Tenreiro Machado. A Survey of Technologies and Applications for Climbing Robots Locomotion and Adhesion. Climbing and Walking Robots / Behnam Miripour. London, 2010. 508 p.
4. Поліщук М.М. Модернізація вакуумного захвату мобільного крокуючого робота. Mechanics and Advanced Technologies. 2017. № 2. С. 59–64.

5. Транспортное устройство для движения по вертикальным металлическим поверхностям: пат. 101683 Россия: МКИ В62D 57/04. № 2010140051; заяв. 29.09.2010; опубл. 27.01.2011, Бюл. № 3. 4 с.
6. Climbing vehicle with suspension mechanism: pat. 9428231 US: Int.Cl. B62D 55/00. Appl. № 179464; filed. 12.02.2014; publ. 30.08.2016. 26 p.
7. Saunders A., Goldman D.I., Full R.J. and Buehler M. The RiSE Climbing Robot: Body and Leg Design. Boston Dynamics, Unmanned Systems Technology VIII. Proc. of SPIE Vol. 6230. 2005. 13 p.
8. Mikhail Polishchuk, Volodymyr Oliinyk. Mobile climbing robot with elastic energy accumulators. Mechanics and Advanced Technologies. 2018. № 1 (82). Pp. 116–122.
9. Carlo Menon, Michael Murphy, and Metin Sitti. Gecko Inspired Surface Climbing Robots. International Conference on Robotics and Biomimetics. (Shenyang, August 22–26, 2004). China, 2004. P. 6.
10. Yehya M, Hussain S, Wasim A, Jahanzaib M and Abdalla H. Cost Effective and Light Weight Unipolar Electro-adhesion Pad Technology for Adhesion Mechanism of Wall Climbing Robot. International Journal of Robotics and Mechatronics. 2014. Vol. 2, Issue 1. P. 1–10.
11. Транспортное средство для перемещения по наклонным и вертикальным поверхностям: пат. 2267434 Россия: МПК В62D57/032. № 2003131247; заявл. 23.10.2003; опубл. 10.01.2006, Бюл. № 1. 6 с.
12. Tin Lun Lam, Yangsheng Xu. Tree Climbing Robot: Design, Kinematics and Motion Planning. Springer Heidelberg, New York, 2012. 178 p.
13. Спосіб переміщення педипуляторів крокуючого робота і пристрій для його здійснення: пат. 111021 Україна: МПК В62D57/032. № а201411741; заявл. 30.10.2014; опубл. 10.03.2016, Бюл. № 5. 10 с.
14. Крокуючий мобільний робот: пат. 117065 Україна: МПК В62D 57/032. № а201701440; заявл. 16.02.2017; опубл. 11.06.2018, Бюл. 11. 8 с.
15. Polishchuk M., Opashnianskyi M., Suyazov N. Walking Mobile Robot of Arbitrary Orientation. International Journal of Engineering and Manufacturing (IJEM). 2018. Vol.8, No.3. P. 1–11.
16. Антигравітаційний мобільний робот Поліщука: заявка № а201805661 на видачу патенту України: МПК В62D 57/024; заявл. 22.05.2018. К.: Укрпатент, 2018. 16 с.

## ПРИНЦИПЫ СИНТЕЗА МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

*В работе предложены три основополагающих принципа синтеза мобильных роботов: накопление и преобразования энергии, интеграции приводов движения и применение генератора реактивной пневматической тяги. Данные технические решения позволяют роботам перемещаться по поверхностям произвольной ориентации в различных системах координат. Реализация указанных принципов способствует уменьшению суммарной мощности приводов и повышению надежности удержания роботов на поверхности произвольной ориентации в технологическом пространстве. Изложены результаты математического моделирования конструктивных и технологических параметров мобильных роботов.*

**Ключевые слова:** мобильные роботы, шагающие механизмы, роботы вертикального перемещения, альпинистские роботы

## PRINCIPLES OF SYNTHESIS OF MOBILE ROBOTS

*The paper proposes three basic principles for the synthesis of mobile robots: the accumulation and conversion of energy, the integration of motion drives and the use of a generator of reactive pneumatic traction. These technical solutions allow robots to navigate on surfaces of arbitrary orientation in different coordinate systems. The implementation of these principles contributes to reducing the total power of the drives and increasing the reliability of holding robots on the surface of arbitrary orientation in the technological space. The results of mathematical modelling of constructive and technological parameters of mobile robots are described.*

**Key words:** mobile robots, walking mechanisms, robots of vertical movement, climbing robots.