

УДК 621.865.8(031)

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/01>**Поліщук М.М.**

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ткач М.М.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Луцак Д.С.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОБІЛЬНИЙ КРОКУЮЧИЙ РОБОТ ІЗ СИСТЕМОЮ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ РУХУ

Стаття присвячена вирішенню проблеми обмеженого енергетичного ресурсу автономних джерел живлення мобільних роботів. Відомо, що крокуюча трансмісія мобільних роботів, на відміну від колісної, має значно більшу кількість приводів, тому завдання економії енергетичного ресурсу набуває особливу актуальність. Визначено, що перспективним напрямком вирішення означеного завдання є застосування принципу рекуперації енергії. В статті запропоновано принципово нову конструкцію крокуючої трансмісії, яка дозволяє накопичувати потенціальну енергію і надалі перетворювати її в кінетичну енергію руху мобільного робота. Кожен попередній крок робота є етапом накопичення потенціальної енергії, коли електродвигуни увімкнуті, а кожен наступний крок, коли двигуни вимкнуті, є етапом перетворення накопиченої енергії в кінетичну енергію руху. З'ясовано, що у якості енергоносія слід використовувати стисле повітря у пневматичних циліндрах, поршні котрих через не самогальмуючу гвинтову передачу та зубчаті шестерні кінематично зв'язані з електродвигунами. Вказані відмінні ознаки складають аспект технічної новизни, а наукова новизна ґрунтується на побудованій динамічній моделі руху крокуючого робота, на основі якої отримані аналітичні залежності для розрахунку параметрів робота з модулями рекуперації енергії. Також в статті визначені умови стабільного руху мобільного робота, тобто умови відсутності проковзування ніг по опорній поверхні з урахуванням сил та швидкостей переміщення, що вкрай важливо для забезпечення надійності функціонування крокуючих роботів. Запропоновані графоаналітичні залежності руху робота, трансмісія якого надає можливість накопичення та перетворення енергії. Доведено, що застосування принципу рекуперації енергії надає суттєву економію ресурсів автономних джерел живлення, притаманних мобільним роботам. Таким чином, підвищується енергетична ефективність мобільних роботів під час виконання транспортних і технологічних операцій різного призначення.

Ключові слова: мобільні роботи, крокуючі механізми, антропоморфні конструкції, педіпулятори, акумулятори енергії, рекуперації енергії.

Постановка проблеми. Не дивлячись на різноманітність сучасних моделей крокуючих роботів, в тому числі і антропоморфних, досі відсутні технічні рішення, спрямовані на економію енергетичних ресурсів автономних джерел живлення. Перспективним напрямком вирішення означеного завдання є використання модулів рекуперації енергії, інтегрованих в трансмісію крокуючих

механізмів, тобто педіпуляторів мобільного робота. Але створення нових конструктивних рішень подібних роботів не достатньо, а потрібна побудова динамічної моделі руху, яка б дозволила здійснювати імітацію переміщення робота з розрахунками основних енергетичних характеристик та умов стійкості крокуючого мобільного робота.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наявність експериментальних зразків мобільних роботів [1], в яких застосовані різноманітні засоби зчеплення з поверхнею переміщення, не усуває проблему енергоефективності підсистем роботів, що компенсують або долають гравітаційне навантаження для гарантованого утримання робота на довільно орієнтованій поверхні переміщення. Мобільний робот [2] з важільною трансмісією, на шарнірах котрої встановлено електроприводи, а у якості системи зчеплення застосовані вакуумні захвати, дозволяє здійснювати ефективний перехід з горизонтальної на вертикальну поверхню переміщення. Однак трансмісії цього робота притаманна велика кількість двигунів, що не сприяє енергозбереженню його приводів. Принципово інша система утримання робота на поверхні переміщення, а саме у якості генератора вакууму, запропонована в конструкції робота CCNY Robotics Lab City University New York, що відображена в дослідженнях [3]. Автономним генератором вакууму створюється зона пониженого тиску між корпусом робота і поверхнею переміщення, за рахунок чого робот і утримується на вказаній поверхні, а трансмісія у вигляді колісної бази дозволяє роботу досягати досить високої швидкості руху. Але наведені вище приклади роботів не передбачають вирішення задачі енергетичної ефективності їх приводів.

Суттєвою відзнакою мобільного робота Boston Dynamics є наявність пласко паралельних підпультів, оснащених голчастими механічними захватами [4]. Ці властивості надають можливість переміщення робота як у прямокутній Декартові системі координат, що необхідно для обслуговування висотних будинків, так і циліндричній системі координат, притаманній таким об'єктам, як дерева, чи стовпи ліній електропередач або трубопроводи. Відаючи належне оригінальності конструкцій наведених моделей, слід зауважити, що роботи з механічним зчепленням [5] відрізняються 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 й перетворення енергії руху [6].

Моделювання енергетичної ефективності мобільних роботів викладене в роботі [7], де представлений новий підхід до побудови енергетично ефективних планів руху. Розроблена модель передбачає обчислення енергетичних

витрат при різних маршрутах, швидкостях, прискореннях і гальмуваннях на поворотах. Під енергоспоживанням робота розуміється підлягаюча мінімізації сума потужностей усіх двигунів мобільного робота. Даний підхід відрізняється простотою й оригінальністю критерію, що дозволяє мінімізувати енергетичні витрати при покритті максимально можливої площі обслуговування роботом з колісною трансмісією. Однак у даній роботі не запропоновані рекомендації щодо забезпечення енергетичної ефективності власне конструкцій мобільних роботів.

Моделювання енергетичної ефективності мобільних роботів викладене в роботі [7], де представлений новий підхід до побудови енергетично ефективних планів руху. Розроблена модель передбачає обчислення енергетичних витрат при різних маршрутах, швидкостях, прискореннях і гальмуваннях на поворотах. Під енергоспоживанням робота розуміється підлягаюча мінімізації сума потужностей усіх двигунів мобільного робота. Даний підхід відрізняється простотою й оригінальністю критерію, що дозволяє мінімізувати енергетичні витрати при покритті максимально можливої площі обслуговування роботом з колісною трансмісією. Однак у даній роботі не запропоновані рекомендації із забезпечення енергетичної ефективності власне конструкцій мобільних роботів. Незважаючи на оригінальність антропоморфних конструкцій мобільних роботів [8, 9], у них відсутні засоби рекуперації енергії руху.

Підсистеми зчеплення з поверхнею руху поряд з підсистемами приводів, також визначають енергетичну ефективність мобільних роботів. Тому становить інтерес інший методологічний підхід до моделювання умов зчеплення мобільного робота з поверхнею довільної орієнтації, запропонований у роботі [10]. Метод заснований на теорії опору матеріалів, а саме: для забезпечення гарантованого зчеплення робота з поверхнею переміщення обчислюється значення нормальної напруги в зоні контакту й порівнюється із граничним значенням напруги при розтяганні й стиску поверхні контакту. Дана модель дозволяє контролювати міцність зчеплення ніг робота з поверхнею переміщення, однак у ній не відображені розв'язки, спрямовані саме на підвищення енергетичної ефективності приводів зчеплення робота з поверхнею переміщення.

Дослідження [11] становлять інтерес з погляду оптимального управління антропоморфними

конструкціями. У статті [12] запропоновані крокуючі механізми мініатюрного робота на основі біологічних систем із двома принципами пересування за допомогою ніг. Показано, що з допомогою сучасної програмної інженерії біоніка може бути ефективним інструментом. Однак у зазначених дослідженнях відсутні пристрої рекуперації енергії. У роботі [13] запропонований критерій енергетичної ефективності у вигляді показника питомої потужності мобільного робота. Даний критерій є домінуючим показником енергетичної підсистеми мобільного робота. На відміну від попередніх досліджень, у роботі [14] виконано аналіз стаціонарних промислових роботів із акумуляторами потенціальної енергії. Наведено різні технічні рішення промислових роботів із пристроями рекуперації енергії. Однак у зазначеній роботі відсутні пропозиції рекуперації енергії для мобільних роботів, динаміка цих роботів істотно відрізняється від автоматичних стаціонарних маніпуляторів. У жодній з розглянутих технічних реалізацій роботів не запропоновані способи чи конструкції для підвищення їх енергетичної ефективності, що для мобільних роботів має принципове значення. Таким чином, аналіз наведених вище досліджень показує, що проблема підвищення енергетичної ефективності крокуючих мобільних роботів залишається актуальною.

Постановка завдання. Необхідно створити мобільний робот, приводи та трансмісія якого мають здатність нагромадження потенціальної

енергії на кожному попередньому кроці й перетворення її в кінетичну енергію руху на кожному наступному кроці переміщення робота, але вже при вимкнених двигунах приводів. Також необхідно побудувати динамічну модель мобільного робота з модулем рекуперації енергії для дослідження параметрів його руху. Вирішення вказаних задач забезпечить економію енергетичного ресурсу автономного джерела живлення, а значить і підвищення енергетичної ефективності мобільних роботів.

Виклад основного матеріалу. *Конструкція крокуючого робота.* Основною мотивацією цього дослідження є створення модуля рекуперації енергії для приводів ніг крокуючого робота. Наслідком цієї якості є значна економія енергетичних ресурсів автономних джерел живлення робота.

Педипулятори робота (тобто його ноги) виконані у вигляді шарнірних паралелограмів [15], на кінцівках котрих встановлені захвати зчеплення з поверхнею переміщення (рис. 1). Для приводу педипуляторів використовуються пневматичні циліндри, розміри яких залежать від вантажопідйомності та ваги самого робота. В даному випадку по діагоналі корпусу робота встановлені пристрої повороту для зміни маршруту руху і модулі рекуперації енергії у вигляді пневматичних циліндрів. Головна технічна відзнака полягає у наявності пневматичних (газових) циліндрів, поршні котрих через не самогальмуючу

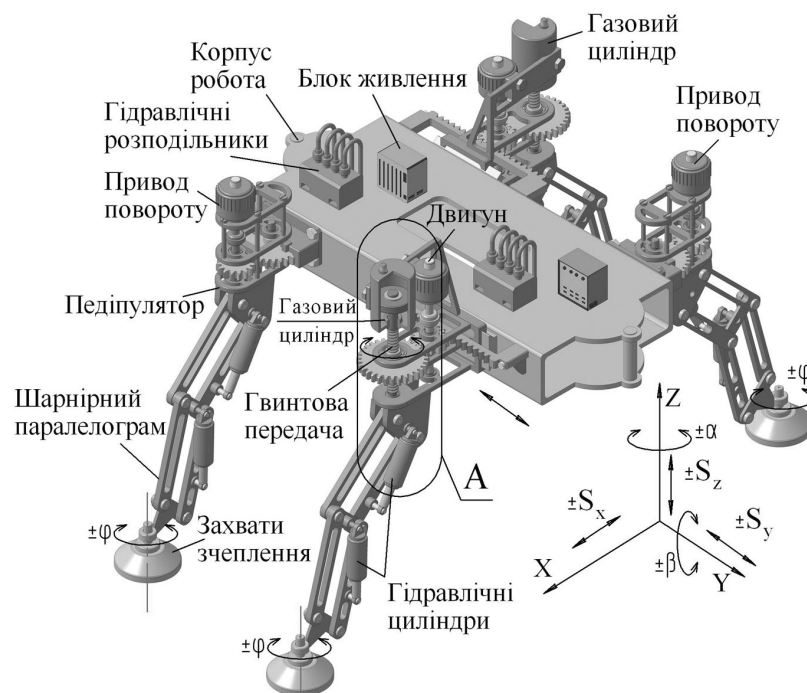


Рис. 1. Конструкція крокуючого робота з модулями рекуперації енергії

гвинтову передачу та зубчаті шестерні кінематично зв'язані з двигуном. Саме означені пневматичні циліндри виконують функцію накопичення потенціальної енергії на першому кроці та перетворення її в кінетичну енергію руху на кожному другому кроці робота.

Захвати зчеплення діагонально розташованих педіпуляторів вмикаються та вимикаються почергово, здійснюючи покроковий рух робота. В системі координат XYZ робот має п'ять ступенів свободи, а саме: повздовжнє переміщення $\pm S_Y$ та нахил $\pm \beta$ відносно осі Y; переміщення $\pm S_Z$ та поворот $\pm \alpha$ відносно осі Z; переміщення $\pm S_X$ по осі X. Така кількість ступенів рухомості дозволяє роботом виконувати не тільки транспортні, а й технологічні операції.

Конструкція пневматичного накопичувача енергії цього робота показана виносним елементом «А» (рис. 1) на рис. 2. На першому кроці переміщення по команді контролера включається електричний двигун, який через муфту і вал передає обертання приводній шестірні, що обертає зубчасте колесо і не самогальмуючу гайку. Остання повідомляє поступальне переміщення гвинту і встановленому на ньому з можливістю вільного обертання поршню. При цьому поршень стискає повітря, що перебуває в порожнині «с».

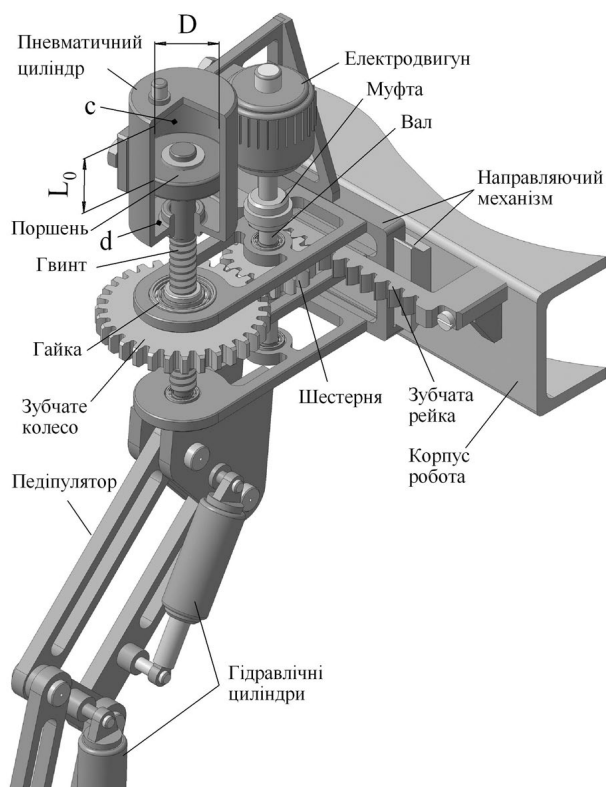


Рис. 2. Конструкція модуля рекуперації енергії (див. елемент «А» на рис. 1)

Одночасно шестірня повідомляє поступальне переміщення зубчастій рейці, жорстко закріпленої на корпусі робота. Оскільки захвати однієї пари педіпуляторів зчеплені з поверхнею переміщення, то робот рухається з напрямними поступально разом із педіпуляторами, захвати яких вільні від зчеплення з поверхнею переміщення. На цьому етапі – першому кроці, за рахунок того, що поршень стискає повітря в порожнині «с» нагромаджується певний запас потенціальної енергії для подальшого її перетворення в кінетичну енергію руху.

Процес руху корпуса робота і одночасного стиску газу в порожнині «с» буде тривати доти, поки тиск газу не досягне заданого проектом значення. Після чого спрацює датчик тиску, по сигналу якого контролер виключає двигун, муфту і відключає зчеплення захватів однієї пари педіпуляторів і одночасно включає зчеплення таких же захватів двох інших педіпуляторів. Далі сила стислого газу діє на поршень, і тим самим переміщує гвинт не самогальмуючої гвинтової передачі у зворотному напрямку, обертаючи через гайку тепер уже зубчасте колесо також у зворотному напрямку. Інакше кажучи, поступальний рух не самогальмуючого гвинта під дією сили стислого раніше газу в порожнині «с» перетворюється в обертний рух колеса і шестірні у зворотному напрямку. А оскільки одна пара педіпуляторів, на відміну від іншої діагонально розташованої, тепер вільна від зчеплення з поверхнею переміщення, то шестірня, обкатується по зубчастій планці, переміщує у напрямлюючому механізмі відповідні педіпулятори, які вільні від зчеплення з поверхнею руху робота.

Переміщення педіпуляторів буде відбуватися до падіння тиску в порожнині «с», рівного початковому значенню. При цьому їх швидкість не буде постійною, на відміну від першого кроку переміщення педіпуляторів, у зв'язку із зазначеним падінням тиску в газовому циліндрі. Однак цей недолік не настільки суттєвий у порівнянні з економією енергії, яка досягається при переміщенні педіпуляторів на наступний крок, але вже при вимкнених двигунах. При необхідності руху робота у зворотному напрямку, тобто заднім ходом, контролером перемикається пневматичний розподільник (рис. 3) і порожнина «с» з'єднується з атмосферою, а порожнина «d», навпаки, заглушається для стиску газу й нагромадження потенціальної енергії. Схема пневматичного розподільника на рис. 3 показана для двох циклів, а саме для руху вперед и руху назад.

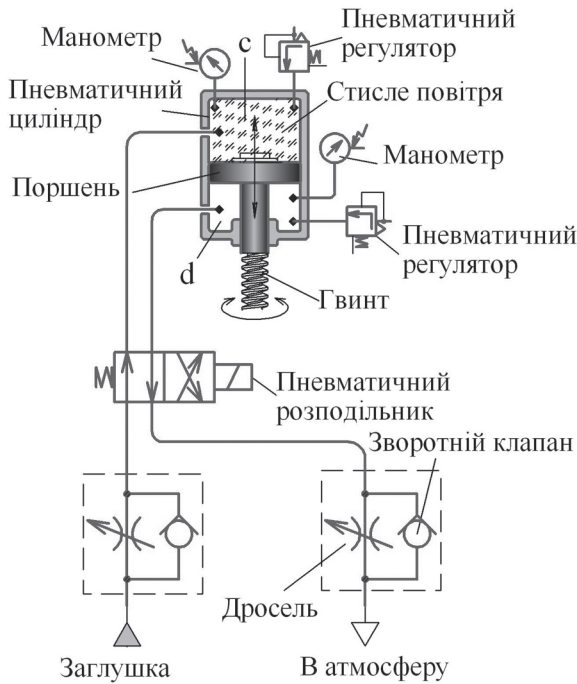


Рис. 3. Пневматична схема керування модулем рекуперації енергії

Принципова схема управління включає цифрові манометри для контролю тиску стисненого повітря та регулятори його тиску. Пневматичні дроселі призначені для регулювання швидкості потоку стиснутого повітря. Двигун на першому кроці заднього ходу робота буде працювати в реверсивному напрямку, а на другому кроці буде вимкнутий аналогічно вище описаному руху вперед. Таким чином відбувається накопичення потенціальної енергії на кожному першому кроці робота і перетворення її в кінетичну енергію руху на кожному другому кроці переміщення робота, але вже при вимкнених двигунах, що надає суттєву економію ресурсу автономних джерел живлення мобільних роботів.

Динамічна модель робота. Для можливості дослідження крокуючих мобільних роботів з модулями рекуперації енергії нижче наведено динамічні моделі руху робота та модуля рекуперації енергії, а також пропонуються графіки зміни кінематичних характеристик та наводяться вперше створені аналітичні формули для розрахунку кінематичних параметрів. При вмиканні електричних двигунів приводу (див. рис. 1 та рис. 2) корпус робота, а разом з ним і вільні від зчеплення з поверхнею переміщення педипулятори, почнуть рухатись поступально у напрямку вісі Ox . Для опису їх руху використаємо рівняння Лагранжа 2-го роду

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \left(\frac{\partial T}{\partial q_i} \right) = Q_{q_i}, \quad i = 1 \dots k, \quad (1)$$

де k – кількість степенів вільності механічної системи; q_i – узагальнені координати; $\dot{q}_i$ – узагальнені швидкості; $T(\dot{q}_i, q_i)$ – кінетична енергія механічної системи, яка є функцією в узагальнених координатах і узагальнених швидкостях; Q_{q_i} – узагальнена сила, що відповідає узагальненій координаті q_i . У нашому випадку система має одну степінь вільності. За узагальнену координату виберемо поступальне переміщення корпусу робота $q_1 = x_1$. Відповідно, $\dot{x}_1$ – узагальнена швидкість. Тоді, вираз для кінетичної енергії корпусу і двох вільних від зчеплення педипуляторів матиме вигляд

$$T_1 = \frac{(m + 2m_1)(\dot{x}_1)^2}{2}, \quad (2)$$

де m – маса корпусу робота; $m_1 = 0,25m$ – маса одного педипулятора, а кінетичну енергію T_4 шестерні (рис. 2), яка здійснює обертальний рух, знаходимо за формулою

$$T_4 = \frac{J_4 \omega_4^2}{2}, \quad (3)$$

де $J_4 = \frac{m_4 r_4^2}{2}$ – момент інерції шестерні відносно осі обертання; m_4 – маса шестерні; r_4 – радіус шестерні; $\omega_4 = \dot{x}_1 / r_4$ – її кутова швидкість. Кінетичними енергіями гвинта і поршня нехтуємо, оскільки вони незначні. Повна кінетична енергія T механізму дорівнює

$$T = T_1 + T_4 = \frac{(m + 2m_1)(\dot{x}_1)^2}{2} + \frac{m_4(\dot{x}_1)^2}{4}. \quad (4)$$

Знайдемо частинні похідні від кінетичної енергії, що входять у рівняння (1)

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1} = (m + 2m_1)(\dot{x}_1) + \frac{m_4(\dot{x}_1)}{2}, \quad \frac{\partial T}{\partial x_1} = 0. \quad (5)$$

Обчислимо ще повну похідну за часом

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1} \right) = (m + 2m_1)(\ddot{x}_1) + \frac{m_4(\ddot{x}_1)}{2}. \quad (6)$$

Узагальнену силу Q_{q_i} знаходимо за загальною формулою

$$Q_{q_i} = \frac{\delta A_{q_i}}{\delta q_i}, \quad (7)$$

де δq_i – можливий приріст узагальненої координати; δA_{q_i} – можлива робота сил, що діють на механічну систему, на відповідному можливому переміщенні.

У нашому випадку надамо можливий приріст δx_1 переміщенню корпусу робота x_1 . В результаті,

одержить можливий приріст кута повороту приводної шестерні (рис. 2) $\delta_\varphi = \delta_{x_1} / r_4$, на якому моменти M_1 приводів виконують роботу. Виконують можливу роботу також сили тиску газу і сили тертя у гвинтових передачах

$$\delta A_{x_1} = \left(\frac{2M_1}{r_4} \delta_{x_1} - 2 \frac{(p_1 - p_a) \pi D^2}{4} (\delta_h + f \delta_s) \right), \quad (8)$$

де D – діаметр поршня; p_a – атмосферний тиск; $p_1 = p_o \left(\frac{L_o}{L_o - a x_1} \right)$; L_o – довжина камери при мінімальному тиску p_o ; $a = \frac{ns}{2\pi r_4 k}$; s – крок нарізки гвинта; f – коефіцієнт тертя ковзання у гвинтовій парі; n – кількість заходів гвинта; k – передатне відношення; $\delta_h = a \delta_{x_1}$; $\delta_s = \frac{d}{2r_4 k} \delta_{x_1}$; d – діаметр гвинта.

Отже, враховуючи формули (7), (8) і введені позначення, узагальнена сила буде дорівнювати

$$Q_{x_1} = 2 \left(\frac{M_1}{r_4} - \frac{(p_1 - p_a) \pi D^2}{4r_4 k} \left(\frac{ns}{2\pi} + f \frac{d}{2} \right) \right). \quad (9)$$

Підставляємо знайдені вирази похідних та узагальненої сили у вираз (1) і одержуємо диференціальне рівняння руху корпусу робота на першій частині циклу

$$(m + 2m_1 + \frac{m_4}{2}) \frac{d^2 x_1}{dt^2} = 2 \left(\frac{M_1}{r_4} - \frac{(p_1 - p_a) \pi D^2}{4r_4 k} \left(\frac{ns}{2\pi} + f \frac{d}{2} \right) \right). \quad (10)$$

Динамічна модель модуля рекуперації енергії. Нагромаджену потенціальну енергію стисненого газу використаємо тепер для приведення у рух вільного педіпулятора, щоб перемістити його у початкове положення відносно корпусу робота. Для дослідження цього руху також як і раніш використаємо рівняння Лагранжа 2-го роду (1). Аналогічно викладеному вище отримаємо вираз для кінетичної енергії педіпулятора і шестерні (рис. 2) матиме вигляд

$$T_2 = \frac{(m_1 + m_4 / 2)}{2} (\dot{x}_1)^2. \quad (11)$$

Знайдемо частинні похідні від кінетичної енергії T_2 , що входять у рівняння (1)

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_2} = (m_1 + m_4 / 2) (\dot{x}_2), \quad \frac{\partial T_2}{\partial x_2} = 0. \quad (12)$$

Обчислимо ще повну похідну за часом

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_2}{\partial \dot{x}_2} \right) = (m_1 + m_4 / 2) (\ddot{x}_2). \quad (13)$$

Для визначення узагальненої сили Q_{x_2} за формулою (7) надамо можливий приріст δ_{x_2} переміщенню x_2 . В результаті, одержить можливий приріст кут повороту шестерні (рис. 2) $\delta_\varphi = \delta_{x_1} / r_4$. Можливу роботу виконують сили тиску газу і сили тертя у гвинтових парах, а тому для узагальненої сили має місце формула

$$Q_{x_2} = \left(\frac{(p_2 - p_a) \pi D^2}{4r_4 k} \left(\frac{ns}{2\pi} - f \frac{d}{2} \right) \right), \quad (14)$$

де $p_2 = p_o \left(\frac{L_o}{L_o - a(L_3 - x_2)} \right)$; L_3 – переміщення корпусу робота на попередньому циклі. Тоді диференціальне рівняння руху вільного педіпулятора при рекуперації енергії матиме вигляд

$$(m_1 + m_4 / 2) \frac{d^2 x_2}{dt^2} = \left(\frac{(p_2 - p_a) \pi D^2}{4r_4 k} \left(\frac{ns}{2\pi} - f \frac{d}{2} \right) \right). \quad (15)$$

Якщо врахувати, що

$$\frac{d^2 x_1}{dt^2} = \frac{d\dot{x}_1}{dt} = \frac{d\dot{x}_1}{dx_1} \frac{dx_1}{dt} = \frac{d(\dot{x}_1)^2}{2dx_1},$$

то рівняння (10) легко інтегрувати

$$(m + 2m_1 + \frac{m_4}{2}) \frac{1}{2} \int_0^{x_1} d(\dot{x}_1)^2 = 2 \int_0^{x_1} \left(\frac{M_1}{r_4} - \frac{(p - p_a) \pi D^2}{4r_4 k} \left(\frac{ns}{2\pi} + f \frac{d}{2} \right) \right) dx_1. \quad (16)$$

Звідси знаходимо залежність швидкості корпусу робота від його положення (координати x_1)

$$V_1 = \sqrt{\frac{4}{(m + 2m_1 + \frac{m_4}{2})} \left(\frac{M_1}{r_4} x_1 - \left(\frac{p_o L_o}{a} \ln \frac{L_o}{L_o - a x_1} - p_a x_1 \right) \frac{\pi D^2}{4r_4 k} \left(\frac{ns}{2\pi} + f \frac{d}{2} \right) \right)}, \quad (17)$$

Оскільки $V_1 = \frac{dx_1}{dt}$, то вираз (17) можна ще раз інтегрувати і знайти залежність між часом руху і положенням корпусу

$$t_1 = \int_0^{x_1} \frac{dz}{\sqrt{\frac{4}{(m + 2m_1 + \frac{m_4}{2})} \left(\frac{M_1}{r_4} z - \left(\frac{p_o L_o}{a} \ln \frac{L_o}{L_o - a z} - p_a z \right) \frac{\pi D^2}{4r_4 k} \left(\frac{ns}{2\pi} + f \frac{d}{2} \right) \right)}}. \quad (18)$$

Означений інтеграл у правій частині формули (18) можна обчислювати яким-небудь

числовим методом, наприклад, методом трапецій. Аналогічно, можна розв'язати диференціальне рівняння (15). У результаті одержимо вираз для швидкості вільного від зчеплення педіпулятора під час рекуперації енергії

$$V_2 = \sqrt{\frac{4}{(m_1 + \frac{m_4}{2})} \left(\left(\frac{p_0 L_0}{a} \ln \frac{L_0 - a(L_3 - x_2)}{L_0 - aL_3} - p_a x_2 \right) \frac{\pi D^2}{4r_4 k} \left(\frac{ns}{2\pi} - f \frac{d}{2} \right) \right)}. \quad (19)$$

Умови стійкості крокуючого робота. Для стабільного руху мобільного робота необхідно визначити умови його стійкості. Ураховуючи вагу робота нормальна реакція N , яка діє на ногу з боку опорної поверхні, по якій переміщується робот, може змінюватись у межах:

$$Q_{\min} + \frac{1}{2}(m + 4m_1)g \leq N \leq Q_{\max} + \frac{1}{2}(m + 4m_1)g. \quad (20)$$

З рівняння (10) видно, що максимальна сила $F_{\max}$, яка діє на опорний педіпулятор (тобто на ногу, яка зчеплена з поверхнею переміщення робота) у горизонтальному напрямку, дорівнює

$$F_{\max} = \frac{m}{(m + 2m_1 + \frac{m_4}{2})} \left(\frac{M_1}{r_4} - \frac{(p_0 - p_a)\pi D^2}{4r_4 k} \left(\frac{ns}{2\pi} + f \frac{d}{2} \right) \right). \quad (21)$$

Умова відсутності проковзування ноги по опорній поверхні виглядає так: $f_1 N_{\min} > F_{\max}$. Підставив вирази цих параметрів, отримуємо умову стійкості мобільного робота:

$$f_1 \left(Q_{\min} + \frac{1}{2}(m + 4m_1)g \right) > \frac{m}{(m + 2m_1 + \frac{m_4}{2})} \left(\frac{M_1}{r_4} - \frac{(p_0 - p_a)\pi D^2}{4r_4 k} \left(\frac{ns}{2\pi} + f \frac{d}{2} \right) \right), \quad (22)$$

де f_1 – коефіцієнт тертя ковзання.

Аналіз результатів моделювання. Моделювання процесу руху мобільного робота з модулем рекуперації енергії здійснювалося за наступних початкових параметрів механічної системи робота: маса робота $m = 12$ кг; маса одного педіпулятора $m_1 = 3$ кг; маса приводної шестерні $m_4 = 0,1$ кг; переміщення корпуса робота на попередньому циклі руху $L_3 = 0,1$ м; крок гвинтової лінії гвинта $s = 0,004$ м; число заходів гвинтової лінії $n = 3$; передаточне відношення $k = 0,6$; коефіцієнт тертя гвинтової передачі $f = 0,15$; довжина газової камери пневматичного циліндра $L_0 = 0,05$ м при мінімальному тиску в камері; діаметр пневматичного циліндра $D = 0,06$ м; діаметр гвинта $d = 0,02$ м; атмосферний тиск $p_a = 1,013$ бар.

На рис. 4 представлені залежності переміщень корпуса робота x_1 та вільного педіпулятора x_2 від часу t для різних значень моменту двигуна M_1 та початкового тиску p_0 в пневматичному циліндрі. З порівняння графіків рис. 4(а), коли момент двигуна дорівнює $M_1 = 2$ Нм, и графіків рис. 4(б), коли момент двигуна дорівнює $M_1 = 1$ Нм, стає очевидним, що швидкість руху робота зменшується більш ніж на 57%, але при цьому залишається досить високою.

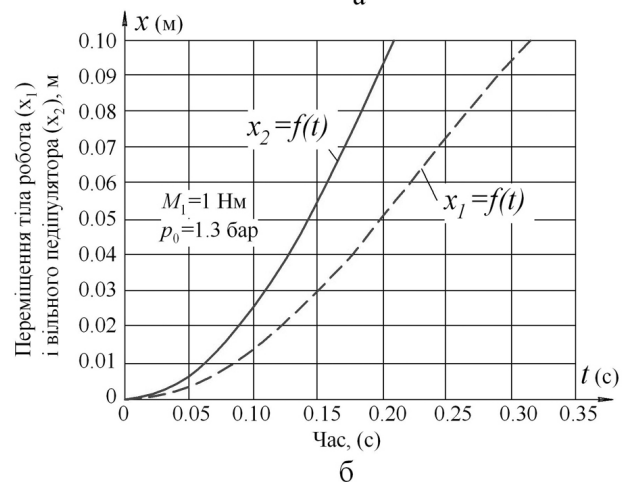
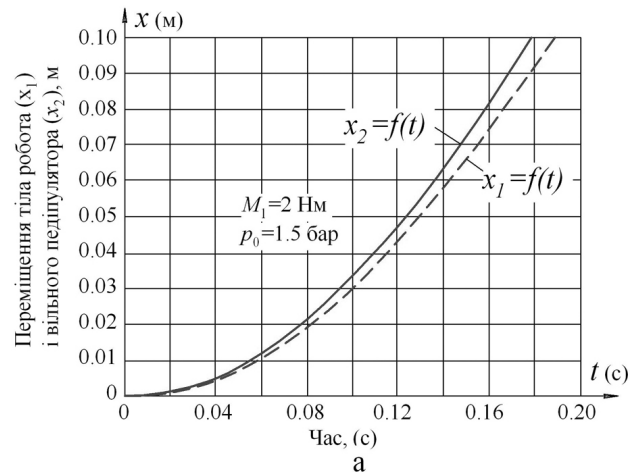


Рис. 4. Залежності переміщень корпуса робота (x_1) та вільного педіпулятора (x_2) від часу (t): а) при $M_1=2$ Нм, $p_0=1.5$ бар; б) при $M_1=1$ Нм, $p_0=1.3$ бар

Зменшення моменту двигуна сприяє зменшенню його ваги, а отже, і зменшенню гравітаційного навантаження на робот. Зменшення початкового тиску в пневматичному циліндрі (тобто тиску на початок процесу рекуперації) сприяє підвищенню коефіцієнта корисної дії приводу мобільного робота. Тому перевагу слід віддавати меншим значенням моменту двигуна та початкового тиску в газовій камері модуля рекуперації енергії. На рис. 5 показані графіки зміни швидкості руху самого робота та вільного

від зчеплення з поверхнею переміщення педипулятора. Зміна швидкості ілюструє прискорення руху робота. Відомо, що прискорення приводу робота не повинно перевищувати значень $2 \text{ м/с}^2 \dots 2.5 \text{ м/с}^2$, оскільки це призводить до збільшення інерційних навантажень, отже й зменшення стійкості мобільного робота. Тому перевагу слід віддавати меншим значенням моменту двигуна та початкового тиску в газовій камері модуля рекуперації енергії, що сприятиме підвищенню стійкості мобільного робота.

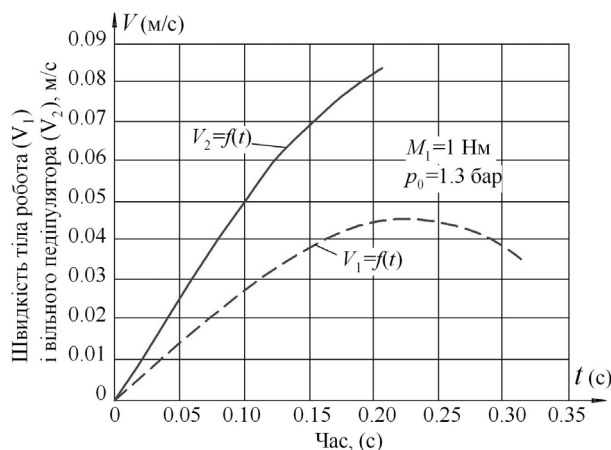


Рис. 5. Зміна швидкості руху корпусу робота V_1 та вільного педипулятора V_2

Графіки рис. 6 ілюструють зміну тиску в газовій камері (тобто пневматичному циліндрі) модуля рекуперації енергії. Очевидно, що тиск p_2 в газовій камері під час руху педипулятора зменшується до початкового значення тиску, що відповідає процесу перетворення накопиченої потенційної енергії на кінетичну енергію руху педипулятора. І, навпаки, при русі мобільного робота тиск p_1 в газовій камері збільшується, що відповідає стиску газу, тобто накопичення потенційної енергії.

Ці процеси свідчать про адекватність розробленої динамічної моделі реальному фізичному процесу рекуперації енергії.

Висновки. У цій статті авторами запропонована принципово нова конструкція крокуючого мобільного робота, основною відмінністю якої

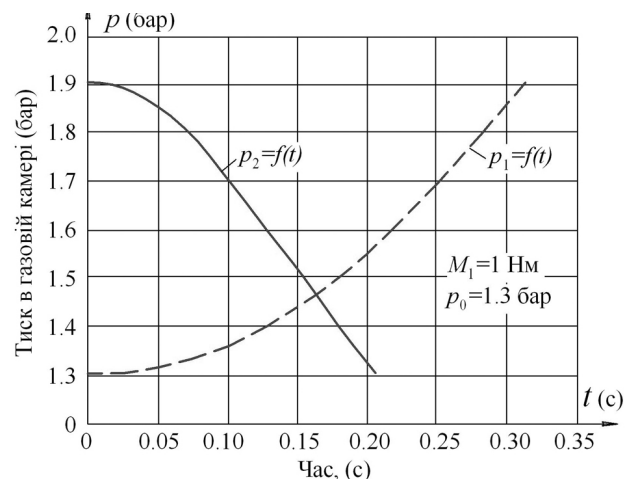


Рис. 6. Зміна тиску в газовій камері в часі при русі корпусу робота p_1 та педипулятора p_2

є наявність модуля рекуперації енергії у вигляді пневматичного циліндра і не самогальмуючої гвинтової передачі з приводом. Запропоноване технічне рішення дозволяє здійснювати накопичення потенційної енергії стисненого повітря на кожному кроці мобільного робота і перетворювати накопичену енергію на кінетичну енергію руху на кожному наступному кроці руху робота.

Розроблена динамічна модель робота з модулем рекуперації енергії та отримані диференціальні рівняння руху мобільного робота дозволили здійснити моделювання процесу рекуперації енергії. Запропоновані графоаналітичні залежності надають дослідникам та інженерам у цій галузі здійснювати проектування модулів рекуперації енергії для різних конструкцій мобільних роботів та умов їх експлуатації.

Застосування такого способу накопичення потенційної енергії, як пневматичний акумулятор, та подальше перетворення накопиченої енергії в кінетичну енергію руху робота, надає можливість суттєво економити енергетичний ресурс автономних джерел живлення приводів крокуючих механізмів. Зрештою запропоновані результати досліджень дозволяють підвищити енергетичну ефективність мобільних роботів.

Дослідження виконувались у межах проекту Національного фонду досліджень України № 2023.04/0077 «Дрон для забору проб води».

Список літератури:

1. 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. 25 p.
2. Chernousko F.L., Bolotnik N.N., Gradetsky V.G. Mobile robots: problems of motion control and optimization. XII All-Russian Conference on Management Problems: Proceedings of the VSPU 2014 (Moscow, June 16–17, 2014). Moscow. 2014, P. 67–78.

3. Raju D.D, Jaju S.B. Developments in wall climbing robots: a review. *International journal of engineering research and general science*. 2014. № 2. P. 35.
4. 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.
5. Tin Lun Lam, Yangsheng Xu. *Tree Climbing Robot: Design, Kinematics and Motion Planning*. Springer Heidelberg, New York, 2012. 178 p.
6. Polishchuk Mikhail, Oliynyk Volodymyr. Mobile climbing robot with elastic energy accumulators. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2018. № 1 (82), P. 116–122.
7. Mei Y., Lu Y., Hu Y, Lee C. Energy-Efficient Motion Planning for Mobile Robots. School of Electrical and Computer Engineering, Purdue University. 2005. P. 6.
8. Polishchuk Mikhail, Tkach Mikhail, Parkhomey Igor, Boiko Juliy, Eromenko Oleksander. Experimental Studies on the Reactive Thrust of the Mobile Robot of Arbitrary Orientation. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics*. ISSN 2089–3272. Vol. 8, No 2. 2020, P. 340–352. DOI: 10.11591/ijeei.v8i2.1681.
9. Polishchuk M., Tkach M., Stenin A. Anthropomorphic Walking Robot: Design and Simulation. *FME Transactions*. VOL. 50, No 4, 2022, P. 724–731, doi: 10.5937/fme2204724P.
10. Ruffieux Simon, Ijspeert Auke, Menon Carlo. *Modelisation and Simulation of Climbing Robots*. Simon Frazer University. 2008. 21 p.
11. Lazarević Mihailo. Optimal Control of Redundant Robots in Human-Like Fashion. *FME Transactions*, 2005, Vol. 33 (2), P. 53–64.
12. Stevanović Ilija, Rašuo Boško. Development Of a Miniature Robot Based on Experience Inspired by Nature. *FME Transactions*. Volume 45, 1, 2017. P. 189–191.
13. Jonathan E. Clark, Daniel I. Goldman, Tao S. Chen, Robert J. Full and Daniel E. Koditschek. Toward a Dynamic Vertical Climbing Robot. September 2006. URL: http://repository.upenn.edu/ese_papers/504
14. Industrial robots with energy recovery. Internet resource. URL: https://bstudy.net/812331/tehnika/promyshlennyye_roboty_rekuperatsiye_energii (Accessed 06/06/2023)
15. Кузнецов Ю.М., Поліщук М.М. Крокуючий мобільний робот. Патент України 121432; МПК B62 D57/032; заяв. 18.07.2018; опубл. 25.01.2019. Київ: Укрпатент, Бюл. № 2, 2019. 16 p.

Polishchuk M.M., Tkach M.M., Lutsak D.S. MOBILE WALKING ROBOT WITH MOTION ENERGY RECOVERY SYSTEM

The article is devoted to solving the problem of limited energy resources of autonomous power sources of mobile robots. It is known that the stepping transmission of mobile robots, unlike the wheeled one, has a much larger number of drives, therefore the task of saving energy resources acquires particular relevance. It is determined that a promising direction for solving the specified task is the application of the principle of energy recovery. The article proposes a fundamentally new design of the stepping transmission, which allows you to accumulate potential energy and subsequently convert it into kinetic energy of movement of the mobile robot. Each previous step of the robot is a stage of accumulation of potential energy when the electric motors are turned on, and each subsequent step, when the motors are turned off, is a stage of conversion of the accumulated energy into kinetic energy of movement. It is found that compressed air in pneumatic cylinders should be used as an energy carrier; the pistons of which are kinematically connected to the electric motors through a non-self-braking helical gear and gear wheels. The specified distinctive features constitute an aspect of technical novelty, and the scientific novelty is based on the constructed dynamic model of the movement of a walking robot, on the basis of which analytical dependencies for calculating the parameters of the robot with energy recovery modules are obtained. The article also defines the conditions for stable movement of a mobile robot, that is, the conditions of the absence of slipping of the legs on the supporting surface, taking into account the forces and speeds of movement. The graph-analytical dependencies of the movement of the robot are proposed, the transmission of which provides the possibility of accumulating and converting energy. It is proved that the application of the principle of energy recovery provides a significant saving of resources of autonomous power sources inherent in mobile robots. Thus, the energy efficiency of mobile robots increases during the performance of transport and technological operations of various purposes.

Key words: mobile robots, walking mechanisms, anthropomorphic structures, pedipulators, energy accumulators, energy recovery.