

УДК 621.865.8(031)

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.4-1/01>**Поліщук М.М.**

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**МОБІЛЬНИЙ РОБОТ ІЗ ПНЕВМАТИЧНИМ АКУМУЛЯТОРОМ ЕНЕРГІЇ**

*Процес еволюції технічних систем в області машинознавства в частині створення технологічного встаткування, як правило, приводив до виникнення нових засобів виробництва. Мобільні роботи характеризуються переважним використанням автономних джерел енергії від традиційних акумуляторів з їхнім обмеженим ресурсом ємності до сонячних батарей, які вимагають великої ефективної площі приймачів.*

*Головним напрямом підвищення енергетичної ефективності мобільних роботів є зменшення потужності їхніх приводів і підсистеми втримання на поверхні для подолання гравітаційної сили. Потужність приводів руху й зчеплення роботів із поверхнею переміщення є домінуючим чинником в енергетичному споживанні мобільних роботів. Тому створення конструкцій роботів, яким властиве мінімальне споживання енергії, є надзвичайно актуальним завданням. Розв'язок зазначеного завдання може бути здійснено за допомогою створення приводів і трансмісії роботів із можливістю нагромадження енергії на кожному попередньому кроці переміщення і перетворення її на енергію руху на кожному наступному кроці.*

*У статті надано опис принципово нової конструкції мобільного робота з пневматичним акумулятором енергії, здатним до накопичення потенційної енергії стислого повітря та перетворення її на кінематичну енергію руху крокуючого механізму. Новизна акумулятора енергії полягає в тому, що він виконаний у вигляді пневматичного циліндру, поршень і шток якого мають кінематичний зв'язок із трансмісією крокуючого механізму робота через несамогальмуючу гвинтову передачу. Наведені аналітичні залежності розрахунку параметрів акумулятора енергії та результати моделювання параметрів модуля нагромадження і перетворення енергії руху робота. У сукупності викладені розв'язки сприяють підвищенню енергоефективності мобільного робота шляхом заощадження ресурсу автономного джерела живлення.*

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

**Постановка проблеми.** Оскільки такому порівняно новому виду техніки, як мобільні роботи, притаманно використання автономних джерел живлення, то одним із ключових завдань є вирішення задачі енергетичної ефективності приводів трансмісії роботів. Особливу актуальність вказана задача здобуває під час застосування мобільних роботів в екстремальних умовах техногенних катастроф, небезпечних і навіть неприйнятних для перебування людини. Не менш важливе значення задача енергозабезпечення мобільних роботів має й при виконанні таких технологічних операцій, як моніторинг промислових об'єктів, монтаж і демонтаж будівельних конструкцій, ремонт і профілактичне обслуговування їхніх компонентів.

Відомо, що як автономні джерела живлення застосовують, як правило, акумуляторні та навіть сонячні батареї, першим з яких властива низька

питома потужність і досить невисокий енергетичний ресурс, а другим – неабияка ефективна площа поглинаючих сонячну енергію пластин. В обох випадках вкрай важлива економія ресурсу автономного джерела живлення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Наявність експериментальних зразків мобільних роботів [1, с. 4–11], в яких застосовані різноманітні засоби зчеплення з поверхнею переміщення, не усуває проблему енергоефективності підсистем роботів, що компенсують або долають гравітаційне навантаження для гарантованого втримання робота на довільно орієнтованій поверхні переміщення. Мобільний робот [2, с. 67–78] із важільною трансмісією, на шарнірах котрої встановлено електроприводи, а як система зчеплення застосовані вакуумні захвати (рис. 1), дає змогу здійснювати ефективний перехід із 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 як генератор вакууму запропонована в конструкції робота CCNY Robotics Lab City University New York (рис. 2), що відображена в дослідженнях [3, с. 35].

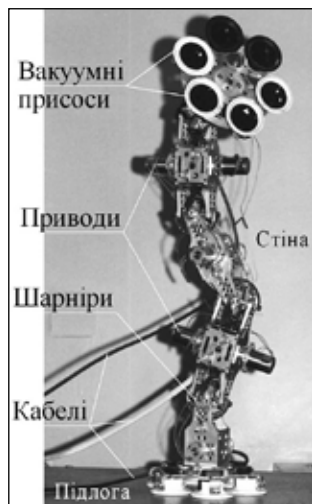


Рис. 1. Мобільний робот ПМ ім. О.Ю. Ішлінського (РАН)



Рис. 2. Робот CCNY Robotics Lab City University New York



Рис. 3. Робот «Boston Dynamics» Cambridge, USA

Автономним генератором вакууму створюється зона пониженого тиску між корпусом робота і поверхнею переміщення, завдяки чому робот і утримується на вказаній поверхні, а трансмісія у вигляді колісної бази дає змогу роботу досягати вищої швидкості руху.

Суттєвою відзнакою мобільного робота «Boston Dynamics» (рис. 3) є наявність плоско паралельних педипуляторів, оснащених голчастими механічними захватами [4, с. 2]. Ці властивості надають роботу переміщатися як у прямокутній Декартовій системі координат, що необхідно для обслуговування висотних будинків, так і в циліндричній системі координат, притаманній таким об'єктам, як дерева, стовпи ліній електропередач або трубопроводи. Віддаючи належне оригінальності конструкції наведених моделей, варто зауважити, що роботи з механічним зчепленням [5, с. 25–27] відрізняються підвищеною надійністю, але їхні приводи вимагають застосування редукції, що збільшує вагу робота, а значить, його гравітаційне навантаження, для компенсації якого доцільне використання систем нагромадження і перетворення енергії руху [6, с. 117].

Моделювання енергетичної ефективності (Energy-Efficient Motion Planning) мобільних роботів викладене в роботі [7, с. 6], 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. Як критерій ефективності обране відношення площі покриття до загальних витрат енергії руху робота. Під енергоспоживанням робота розуміється сума потужностей усіх двигунів мобільного робота, що підлягає мінімізації. Цей підхід відрізняється простотою й оригінальністю критерію, що дає змогу мінімізувати енергетичні витрати у процесі покриття максимально можливої площі обслуговування роботом із колісною трансмісією. Однак у цій роботі не запропоновані рекомендації із забезпечення енергетичної ефективності власне конструкції мобільних роботів.

Підсистеми зчеплення з поверхнею руху поряд із 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 [8, с. 14–18]. 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. Ця модель дає змогу 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. У роботі [9] запропонований критерій енергетичної ефективності у вигляді показника питомої потужності мобільного робота. Цей критерій є домінуючим показником енергетичної підсистеми мобільного робота.

Однак у жодній із розглянутих технічних реалізацій роботів не запропоновані способи чи конструкції для підвищення їхньої енергетичної ефективності, що для такого виду технологічного встаткування, як мобільні роботи, має принципове значення. Таким чином, задача підвищення енергетичної ефективності мобільних роботів є актуальною.

**Постановка завдання.** Необхідно створити мобільного робота, приводи та трансмісія якого мають здатність нагромадження потенційної енергії на кожному попередньому кроці й перетворення її на кінетичну енергію руху на кожному наступному кроці переміщення робота, але вже при вимкнених приводних двигунах. Застосування таких приводів забезпечить економію енергетичного ресурсу автономного джерела живлення, а значить і підвищення енергетичної ефективності мобільних роботів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

**Конструкція мобільного робота.** Принципова новизна конструкції мобільного робота з пневматичним накопичувачем енергії, що представлена на рис. 4, підтверджена кваліфікаційною експертизою Державного підприємства «Укрпатент» [10, с. 9]. Педипулятори робота виконані у вигляді шарнірних паралелограмів, на кінцівках котрих встановлені захвати зчеплення з поверхнею переміщення. Але головна відзнака полягає в наявності пневматичних (газових) циліндрів, поршні котрих через несамогальмуючу гвинтову передачу та зубчасті шестерні кінематично зв'язані з двигуном. Саме означені пневматичні циліндри виконують функцію накопичення потенціальної енергії на першому кроці та перетворення її на кінетичну енергію руху на кожному другому кроці робота.

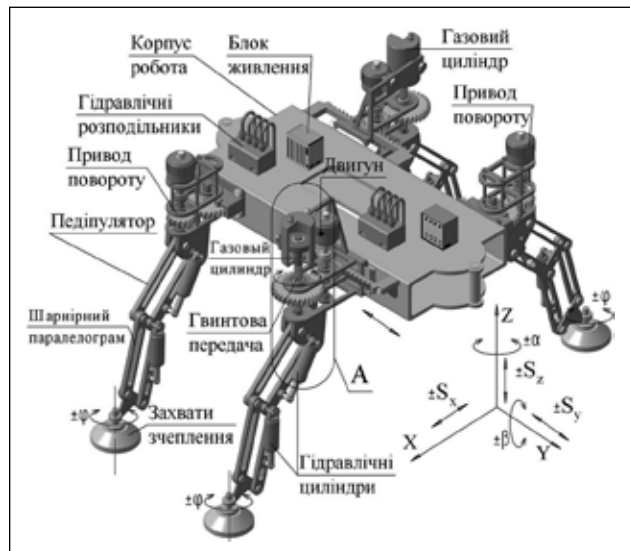


Рис. 4. Мобільний робот із пневматичним накопичувачем енергії

Захвати зчеплення діагонально розташованих педипуляторів вмикаються та вимикаються по чергово, здійснюючи покроковий рух робота. У системі координат XYZ робот має п'ять ступенів свободи, а саме: повздовжнє переміщення  $\pm S_y$  та нахил  $\pm \beta$  щодо осі Y; переміщення  $\pm S_z$  та поворот  $\pm \alpha$  щодо осі Z; переміщення  $\pm S_x$  по осі X. Така кількість ступенів рухомості дає змогу роботу виконувати не тільки транспортні, а й технологічні операції.

Пневматичний накопичувач енергії цього робота показано виносним елементом «А» на рис. 5. За командою контролера вмикається двигун 1, який через муфту 2 і вал 3 передає обертання приводній шестірні 4, що обертає зубчасте колесо 5 і несамогальмуючу гайку 6. Остання повідомляє поступальне переміщення гвинта 7 і встановленого на ньому з можливістю вільного обертання поршня 8. При цьому поршень 8 стискає повітря, що перебуває в порожнині «с».

Одночасно шестірня 4 повідомляє поступальне переміщення зубчастій рейці 9, жорстко закріпленої на корпусі робота. Оскільки захвати однієї пари педипуляторів зчеплені з поверхнею переміщення, робот рухається з напрямними 10 у полозку 11 поступально разом із педипуляторами, захвати яких вільні від зчеплення з поверхнею переміщення. На цьому етапі – першому кроці через те, що поршень стискає повітря в порожнині «с», нагромаджується певний запас потенціальної енергії для подальшого її перетворення на кінетичну енергію руху.

Процес руху корпусу робота й одночасного стиску газу в порожнині «с» буде тривати доти,

поки тиск газу не сягне заданого проектом значення. Після чого спрацьовує датчик тиску, за сигналом якого контролер виключає двигун, муфту 2 і відключає зчеплення захватів однієї пари педіпуляторів і одночасно включає зчеплення таких самих захватів двох інших педіпуляторів. Далі сила стислого газу діє на поршень, і тим самим переміщає гвинт 7 несамогальмуючої гвинтової передачі у зворотному напрямі, обертаючи через гайку 6 тепер уже колесо 5 також у зворотному напрямі. Інакше кажучи, поступальний рух несамогальмуючого гвинта під дією сили стислого газу в порожнині «с» перетворюється на обертний рух колеса і шестірні у зворотному напрямі. А оскільки одна пара педіпуляторів, на відміну від іншої діагонально розташованої, тепер вільна від зчеплення з поверхнею переміщення, шестірня 4, обкатуючись по зубчастій рейці 9, переміщає полозок 11, а разом із ними й відповідні педіпулятори на величину, раніше пройдену поршнем з урахуванням передаточного числа трансмісії педіпулятора.

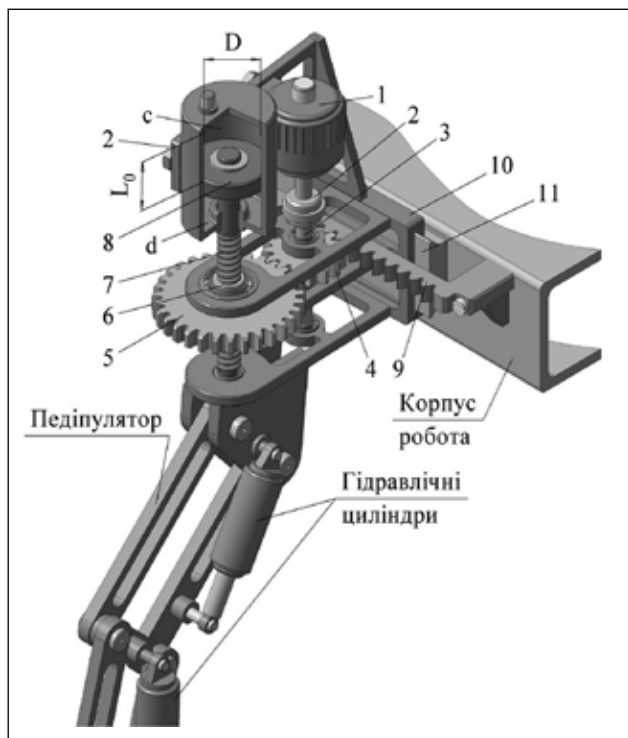


Рис. 5. Пневматичний накопичувач енергії мобільного робота

Переміщення педіпуляторів буде відбуватися до падіння тиску в порожнині «с», що дорівнює початковому значенню. При цьому їхня 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 порівняно з економією енергії, яка досягається під час переміщення педіпуляторів на наступний крок, але вже при вимкнених двигунах. У разі потреби руху робота у зворотному напрямі, тобто заднім ходом, контролером перемикається пневматичний розподільник, і порожнина «с» з'єднується з атмосферою, а порожнина «d», навпаки, заглушається заради стиску газу і нагромадження потенційної енергії. Двигун на першому кроці заднього ходу робота буде працювати в реверсивному напрямку, а на другому кроці буде вимкнений аналогічно до вище описаного руху вперед.

Таким чином, відбувається накопичення потенційної енергії на кожному першому кроці робота і перетворення її на кінетичну енергію руху на кожному другому кроці переміщення робота, але вже при вимкнених двигунах, що надає суттєву економію ресурсу автономних джерел живлення мобільних роботів.

**Розрахунок параметрів пневматичного акумулятора.** Для проектування накопичувача енергії у вигляді циліндричної пневматичної камери необхідно розрахувати її діаметр  $D$  і довжину  $L_0$  (див. рис. 5), що визначають максимальний об'єм камери при мінімальному тиску  $p_{\min}$  повітря чи газу. На першому етапі поршень стискає повітря і, таким чином, нагромаджується певний запас потенційної енергії, а на другому етапі повітря розширюється і видає набуту енергію. Коректно припустити, що процес відбувається при постійній температурі, а тому, за законом Бойля – Маріотта, має місце рівність  $p_0 V_0 = p V$ , де  $p_0 = p_{\min}$  – тиск у камері при максимальному її об'ємі  $V_0 = \frac{\pi D^2}{4} L_0$ ;  $p$  – тиск у камері при довільному положенні поршня;  $V = \frac{\pi D^2}{4} (L_0 - x)$ ;  $x$  – поточне переміщення поршня.

Враховуючи вище наведене рівняння Бойля – Маріотта і введені позначення, одержуємо формулу для знаходження тиску  $p$  при довільному положенні поршня пневматичного накопичувача енергії

$$p = p_0 \frac{L_0}{L_0 - x}, \quad (1)$$

Якщо мінімальним тиском  $p_0$  і максимальним тиском  $p_{\max}$  (при  $x = x_{\max}$ ) задатися наперед, то з виразу (1) знаходимо необхідну довжину камери

$$L_0 = \frac{p_{\max} x_{\max}}{p_{\max} - p_0}, \quad (2)$$

Отже, пружну силу  $J$  стислого повітря (газу), яка діє на поршень, обчислюємо за формулою з урахуванням виразу (1):

$$J = p \frac{\pi D^2}{4} - p_a \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi D^2}{4} \left( p_0 \frac{L_0}{L_0 - x} - p_a \right), \quad (3)$$

де  $p_a$  – атмосферний тиск при нормальних умовах.

Оскільки ефективність пневматичного накопичувача визначається потенційною енергією  $U$ , що нагромаджується у процесі стискання повітря в камері, обчислимо значення цієї енергії:

$$U = \int_0^x J dz = \frac{\pi D^2}{4} \int_0^x \left( p_0 \frac{L_0}{L_0 - z} - p_a \right) dz = \frac{\pi D^2}{4} \left( -p_0 L_0 \ln |L_0 - z| - p_a z \right) \Big|_0^x = \frac{\pi D^2}{4} \left( p_0 L_0 \ln \frac{L_0}{L_0 - x} - p_a x \right)$$

Отже, максимальне значення потенційної енергії в одній пневматичній камері одного педипулятора робота становитиме:

$$U_{max} = \frac{\pi D^2}{4} \left( p_0 L_0 \ln \frac{L_0}{L_0 - x_{max}} - p_a x_{max} \right), \quad (5)$$

**Результати моделювання.** Представлені нижче графоаналітичні залежності дають змогу вибрати параметри пневматичного акумулятора залежно від вантажопідйомності чи технологічного призначення мобільного робота. На рис. 6 показано, наскільки суттєво залежить пружна сила стислого повітря (газу)  $J$  від переміщення  $x$  поршня акумулятора енергії. Очевидно, що зростання чи падіння величини пружної сили, як це показано на рис. 7, буде також суттєво залежати й від співвідношення  $k=L/D$  розмірів газової камери, а саме від її довжини  $L$  та діаметра  $D$  при певному значенні початкового тиску  $p_0$  у камері пневматичного акумулятора.

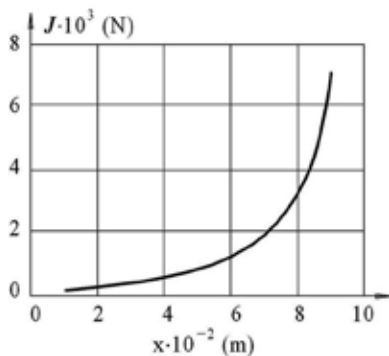


Рис. 6. Зміна пружної сили  $J$  стислого повітря від переміщення  $x$  поршня при  $p_0 = 101 \cdot 10^3$  (Pa);  $D=0,1$ (m)

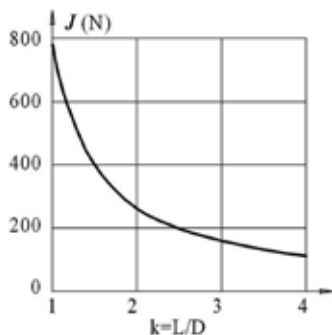


Рис. 7. Зміна пружної сили  $J$  стислого повітря від співвідношення  $k=L/D$  при  $p_0 = 101 \cdot 10^3$  (Pa);  $x=5 \cdot 10^{-2}$  (m)

Графік рис. 8 ілюструє залежність пружної сили  $J$  від одночасної зміни розмірів камери за умови, що  $D=L$ . Така рівність дає змогу забезпечити компактність конструкції пневматичного акумулятора потенціальної енергії.

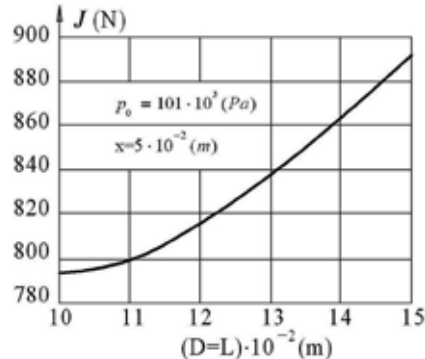


Рис. 8. Залежність пружної сили  $J$  від зміни розмірів камери  $D=L$

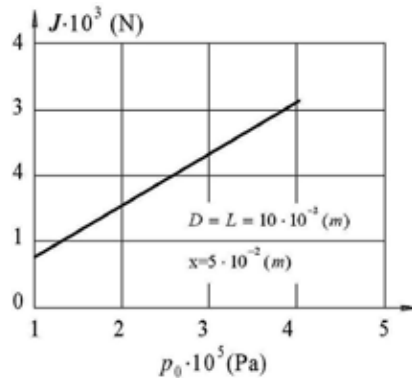


Рис. 9. Залежність пружної сили  $J$  при зміні початкового тиску в камері

Але домінуючим чинником впливу на величину пружної сили  $J$ , яка й визначає ефективність функціонування пневматичного акумулятора, є значення початкового тиску  $p_0$  в камері, як це показано на графіку (рис. 9). Вказаний початковий тиск може бути встановлений шляхом попереднього накачування стислого повітря (газу) через запірні зворотні пневматичні клапани, що монтуються в корпусі газового циліндра акумулятора. Наведені графічні залежності рекомендуються для використання як діаграми для визначення параметрів пневматичного акумулятора енергії на стадії технічного проекту.

**Висновки.** Застосування такого засобу нагромадження потенціальної енергії, як пневматичний акумулятор, із подальшим її перетворенням на кінетичну енергію руху робота дає змогу суттєво заощадити енергетичний ресурс автономних джерел живлення приводів мобільних роботів.

Запропонована принципово нова конструкція мобільного робота з пневматичним

акумулятором енергії та отримані графоаналітичні залежності дають змогу створювати мобільних роботів із підвищеною енергетичною ефективністю для виконання як транспортних, так і технологічних операцій у різних областях промисловості.

#### 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. 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 г., Москва 16–17 июня 2014 г. Москва, 2014. С. 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 M., Oliinyk V. 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. Ruffieux S., Ijspeert A., Menon C. Modelisation and Simulation of Climbing Robots. Simon Frazer University. 2008. 21 p.
9. 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](http://repository.upenn.edu/ese_papers/504) (дата звернення: 10.09.2018).
10. Крокуючий мобільний робот. Заявка № а201807976 на видачу патенту України: МПК В62D57/032; заявл. 18.07.2018; опубл. 25.01.2019. Київ : Укрпатент, Бюл. № 2, 2019. 16 с.

#### **Polishchuk M.N. MOBILE ROBOT WITH PNEUMATIC ENERGY BATTERY**

*The process of evolution of technical systems in the field of engineering in the development of technological equipment, as a rule, led to the emergence of new means of production. Mobile robots are characterized by the predominant use of autonomous sources of energy from traditional batteries with their limited capacity resource to solar batteries, which require a large effective area of receivers.*

*The main direction of increasing the energy efficiency of mobile robots is to reduce the power of their drives and the subsystem retention on the surface to overcome the gravitational force. The power of the traction drives of robots is the dominant factor in the power consumption of mobile robots. Therefore, the creation of designs of robots, which tend to the minimum energy consumption, is an extremely important task. The solution of this problem can be carried out by creating drives and transmissions of robots with the possibility of accumulating energy at each previous step of movement and transforming it into energy of movement at each subsequent step.*

*The article presents a description of a fundamentally new design of a mobile robot with a pneumatic accumulator of energy capable of accumulating the potential energy of compressed air and converting it into the kinematic energy of motion of the walking mechanism. The novelty of the energy accumulator lies in the fact that it is made in the form of a pneumatic cylinder, the piston and rod of which has a kinematic connection with the transmission of the robot's walking mechanism through a non-self-braking helical transmission. The analytical dependencies for calculating the parameters of the energy accumulator and the results of modelling the parameters of the accumulation module and the energy conversion of the robot's movement are given. Taken together, these solutions contribute to increasing the energy efficiency of a mobile robot by saving the resource of an autonomous power source.*

**Key words:** mobile works, walking mechanisms, vertical movement works, energy accumulators.