

# Модернізація вакуумного захвату мобільного крокуючого робота

М.М. Поліщук

КПИ ім. Ігоря Сикорського, г. Київ, Україна

Received: 05 September 2017 / Accepted: 22 September 2017

***Анотація.** Запропоновано модернізацію захвату мобільного крокуючого робота довільної орієнтації, що дозволяє суттєво підвищити надійність утримання мобільного робота на поверхні переміщення за рахунок застосування пристрою зворотного зв'язку в системі керування під час моніторингу топології поверхні переміщення. Надано опис технічного рішення захвату з підсистемою зворотного зв'язку та рішення задачі знаходження квазіоптимальних співвідношень конструктивних параметрів захвату робота. Здобутком вирішення означених задач є автоматична компенсація падіння глибини вакууму під захватом внаслідок можливого підтоку повітря в присос захвату при зміні топології поверхні переміщення. В сукупності отримані результати забезпечують гарантоване втримання робота на поверхні переміщення будь якої орієнтації, в тому числі й мобільних роботів вертикального переміщення.*

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

## Вступ

Одним із нових різновидів мобільних роботів є, так звані, роботи вертикального переміщення, що оснащені різноманітними захватами для утримання робота на вертикальній або будь якої іншої орієнтації поверхні їх переміщення. Головною особливістю роботів даного типу є необхідність подолання гравітаційної складової в сукупності динамічних навантажень з метою гарантованого утримання робота на поверхні руху. Якщо відносно традиційних мобільних роботів гравітаційна сила сприяє стабілізації їх пересуванню, то у випадку роботів вертикального переміщення — навпаки, потребує її подолання. Саме тому задача підвищення надійності підсистеми утримання робота на поверхнях довільної орієнтації є актуальною. Взагалі необхідність створення таких роботів обумовлюється виникаючими екстремальними ситуаціями, збільшеними вимогами до виконання технологічних операцій в умовах, небезпечних, а інколи й неприпустимих для перебування людини.

## Аналіз досліджень і публікацій

Відомо, що крокуючи людина аналізує поверхню під ногами за рахунок чутливості стопи. Це дає змогу ефективніше з точки зору стабілізації руху розташовувати ногу на складному рельєфі. В галузі робототехніки, а саме щодо створення захоплюючих пристроїв мобільних роботів для руху по поверхнях будь якої орієнтації в просторі, вибір типу фіксації на поверхні впливає і на енергоефективність робота [1, 2, 3]. Так звані, термоплавкий адгезив [4], а також електрична адгезія є найбільш ефективними з точки зору енергозбереження, але й одночасно досить дорогими технологіями. За своєю доступністю більшу привабливість мають механічні захвати [5], але їх застосування обмежується наявністю пористої чи м'якої поверхні переміщення робота. Найбільш поширеними є підсистеми з вакуумною фіксацією [6, 7, 8]. Побудова цих рішень базується на традиційних конструкціях вакуумних захватів [9], притаманних стаціонарним промисловим роботам, і не враховує динаміку руху педипуляторів. Більш вдосконалені рішення [10, 11] передбачають адаптацію робота до різної топології поверхні переміщення. Адаптація до нерівностей поверхні переміщення сприяє зменшенню підтоку повітря у вакуумний захоплюючий орган. В означених технічних рішеннях передбачаються одночасне використання й нагнітання повітря й розрідження. Завдяки чому вакуумний захват адаптується до криволінійної поверхні.

Однак у випадку підтоку повітря з атмосфери в еластичні камери захватів вони втрачають здатність утримувати об'єкт маніпулювання або транспортний засіб на поверхні переміщення. Відсутність можливості збільшити силу зчеплення при аварійних ситуаціях є суттєвим недоліком означених технічних рішень, оскільки не забезпечує належної надійності утримання робота на поверхні руху. Тому задача підвищення надійності зчеплення захвата крокуючого робота з довільною як по топології, так і по орієнтації поверхнею його переміщення, залишається актуальною.

### Постановка задачі

Для гарантованого втримання робота на поверхні переміщення необхідно забезпечити компенсацію падіння глибини вакууму під захватом в наслідок можливого підтоку повітря в присос захвату при зміні топології поверхні переміщення. У формалізованому вигляді задача має розв'язок у побудові замкнутого контуру зворотного зв'язку [12]:

$$X_1(p) = X_v(p) - X_z(p),$$

де:  $X_1(p)$  – керуючий вплив на об'єкт регулювання, в даному випадку збільшення сили притискання вакуумного захвату до поверхні зчеплення з роботом;  $X_v(p)$ ,  $X_z(p)$  – відповідно вхідний та корегуючий впливи системи зі зворотним від'ємним зв'язком. Для останнього передаточна функція контуру управління  $K(p)$  буде мати вигляд:

$$K(p) = \frac{X_{vk}(p)}{X_v(p)} = \frac{K_1(p)}{1 + K_1(p)K_z(p)}$$

де:  $X_{vk}(p)$  – вихідний вплив системи, ;  $K_1(p)$ ,  $K_z(p)$  – відповідно передаточні функції об'єкту регулювання та контуру зворотного зв'язку. В даному випадку об'єктом регулювання є пристрій у вигляді сифону, що забезпечує необхідну силу для зчеплення вакуумного захвату з поверхнею переміщення робота, а вхідним впливом є значення глибини вакууму під присосом захвату.

Крім того, після побудування означеної системи регулювання, для ефективного функціонування захвата необхідно знайти, принаймні, квазіоптимальні співвідношення параметрів вакуумного захвату мобільного крокуючого робота, що мають забезпечити умову  $Q_{\min} \leq Q \leq Q_{\max}$  надійного втримання робота на поверхні його переміщення, а саме:

$$Q = S(p_1 - p_2) \rightarrow \max,$$

при умові

$$F < \mu Q_{\min}$$

$Q$ ,  $Q_{\min}$ ,  $Q_{\max}$  – відповідно сила зчеплення вакуумного захвату, та її мінімальне й максимальне значення;  $S$  – площа, що обмежена внутрішнім контуром присосу ( $m^2$ );  $p_1$ ,  $p_2$  – відповідно атмосферний та тиск під присосом, Па;  $F$  – сила зсуву робота з поверхні переміщення, Н;  $\mu$  – коефіцієнт тертя ковзання присоса з поверхнею переміщення.

### Вирішення задачі

Принципово новою відзнакою запропонованого захвату є наявність пристрою зворотного зв'язку в управлінні силою зчеплення з урахуванням глибини вакууму під еластичними захватами крокуючого робота довільної орієнтації, в тому числі й мобільних роботів вертикального переміщення. В класичному тлумаченні зворотного зв'язку в управлінні запропонованим захватом здійснено обернено пропорційний зв'язок між силою зчеплення захватів робота з поверхнею переміщення та глибиною вакууму під еластичними камерами захватів робота.

Вказаний зв'язок реалізовано в захваті 1 (рис. 1) поєднанням зони надлишкового тиску в гофрованих трубопроводах 2, що розташовані на зовнішній поверхні еластичного захвату, і зони розрядження в каналах 13 корпуса 6 посередництвом сифона 7, оснащеного зворотнім клапаном у вигляді штока 9, кульки 10

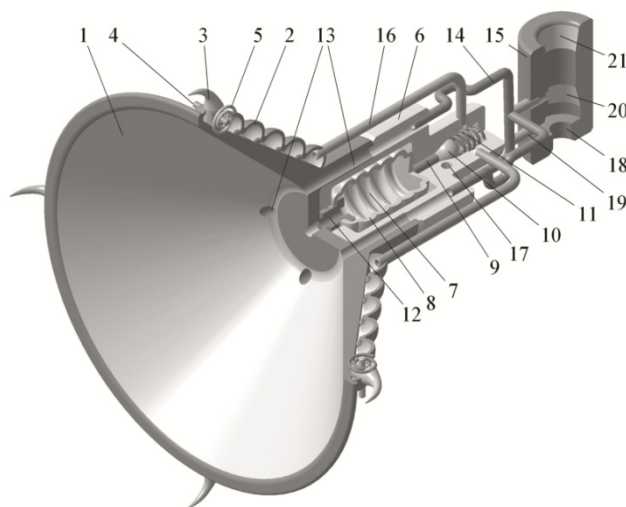


Рис. 1. Вакуумний захват крокуючого робота

та пружного елемента 11. Вказаний сильфон, що одночасно виконує і функцію сенсора і функцію виконавчого органа, через канал 12 з'єднано з зоною вакууму під присосом.

На рис. 1 і рис. 2 (а) зображене вихідне положення захвата, коли присос 1 щільно облягає ділянку поверхні, по якій переміщається крокуючий робот. При цьому відсутній підтік повітря з атмосфери, тобто присос працює в режимі стандартного вакуумного захвата. А саме: стиснене повітря від компресора подається в ежектор 15 через сопло 18 і внаслідок змінного перетину колектора 20, в останньому створюється зона розрядження, яка будучи з'єднана трубопроводом 14 через канали 13 з присосом 1, створює під ним зону вакууму. Оскільки сильфон 7 через канал 12 з'єднаний з областю вакууму, то при значенні вакууму  $p < p_{\min}$  (де:  $p$  – достатня й  $p_{\min}$  – недостатня глибина вакууму для втримання присосу на поверхні переміщення, відповідно) сильфон 7, маючи гофровану оболонку 8, знаходиться у стиснутому стані під дією вакууму.

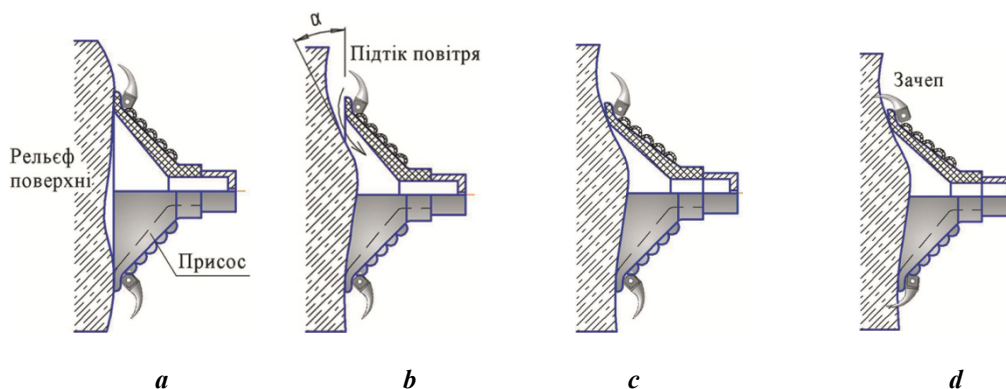


Рис. 2. Стани захватів робота на вертикальній поверхні переміщення

Однак, при зміні топології поверхні переміщення або зміні орієнтації мобільного робота, коли внаслідок зміни рельєфу поверхні переміщення, а саме появи більших нерівностей під кутом  $\alpha$  (фіг. 2, b), виникає підтік повітря під присос 1 і зменшення глибини вакууму. Таке негативне явище призводить до аварійного стану, наслідком якого може бути, що найменше, неможливість виконання роботом технологічних функцій або й зрив його з поверхні переміщення.

Для запобігання аварійної ситуації при співвідношенні  $p \geq p_{\min}$  (тобто зменшення глибини вакууму за рахунок збільшення тиску під присосом внаслідок підтоку повітря з атмосфери), сильфон 7 розтискається під дією його пружної оболонки 8, і штоком 9 натискає на кульку 10 і пружину 11, що утворюють зворотний клапан. У результаті стиснене повітря через канал 19 надходить у порожнину 17 надлишкового тиску, і далі по трубопроводах 16 — у внутрішню порожнину гофрованих трубопроводів 2. Останні, маючи зовнішню поверхню у вигляді гофри, а внутрішню плоску, що обрамляє присос 1, звиваються внаслідок різних довжин зазначених поверхонь. Вигин гофрованих трубопроводів 2 призводить до ущільнення контакту присосу 1 з поверхнею переміщення, як це показано на (фіг. 2, c). Зайвий об'єм повітря через розширення 21 ежектора виходить в атмосферу. У цьому випадку, якщо відновлюється співвідношення  $p < p_{\min}$ , необхідне для нормальної роботи присосу, то сильфон 7 повертається у вихідне положення (тобто підлягає стисненню) й кулька 10 під дією пружини 11 перекриває доступ стисненого повітря в гофровані трубопроводи 2. Якщо ж таке негативне явище, як підтік повітря під присос 1 триває через суттєву нерівність поверхні переміщення, то гофровані трубопроводи 2 під дією стисненого повітря (див. вище) продовжують звиватися доти, поки гострі зачепи 3, що встановлені на осях 4, долаючи зусилля спіральної пружини 5, не ввійдуть у поверхню переміщення, як це показано на (фіг. 2, d). Проникаючи в поверхню переміщення, зачепи 3 остаточно втримують крокуючий робот на вертикальній або будь-якій іншій орієнтації поверхні. Після виконання наступного кроку роботом, тобто спрацювання такого ж захвату іншої ноги крокуючого робота, у даному захваті припиняється подача стисненого повітря через сопло 18 і присос 1 звільняється від вакууму, а зачепи 3 під дією кожної своєї спіральної пружини 5 вертаються у вихідне положення. Далі цикл спрацювання захватів повторюється згідно із наступним кроком переміщенням робота.

Таким чином, завдяки тому, що порожнини вакууму й надлишкового тиску зв'язані сильфоном зі зворотним клапаном, а захвати крокуючого робота оснащені гострими зачепами, установленими на останній ланці кожного гофрованого трубопроводу, представляється можливим при підтоку повітря в присос із атмосфери, у випадку більших нерівностей на поверхні переміщення робота, здійснювати не тільки посилені притиск присосу до зазначеної поверхні, але й додаткове зчеплення захвата з поверхнею переміщення довільної орієнтації й топології. Що в сукупності забезпечує підвищення надійності роботи захватів у сенсі втримання крокуючого робота на поверхні переміщення довільної орієнтації.

Кількість гофрованих трубопроводів на зовнішній поверхні захватів може бути різною, але не менше чотирьох, розташованих по два трубопроводи в кожній із взаємно перпендикулярних площинах поперечного

перерізу присосу. У даному технічному рішенні означений вище сифон виконує дві функції: і датчика й виконавчого органа, що впливає на зворотній клапан, однак ці функції можуть бути і розділені, що не змінює ефективності наявності зворотного зв'язку в управлінні захватами робота. Також можливе застосування й різних типів генераторів (не обов'язково ежекторного типу), як вакууму, так і стисненого повітря.

Зрозуміло, що ефективність застосування захвата залежить і від стану та виду поверхні переміщення робота. Так при наявності твердої й плоскої поверхні переміщення, необхідність у зачехах може бути відсутня, достатньо посилення притиску присосу гофрованими трубопроводами. Однак при пористих, криволінійних і не твердих поверхнях переміщення (наприклад: ґрунт, дерево, пористі мінерали й т.п.) ефективність запропонованого захвату проявляється найбільшою мірою. Викладене технічне рішення може бути реалізовано в умовах промислового виробництва з використанням стандартного встаткування, сучасних матеріалів і технологій на будь-якому машинобудівному підприємстві.

Однак, як зазначено вище в постановці задачі, для ефективної роботи вакуумного захвату необхідно знайти, принаймні, квазіоптимальні (тобто, близькі до оптимальних з урахуванням граничних обмежень) співвідношення його конструктивних параметрів. Ця задача вирішується застосуванням у якості критерію цільової функції сили  $Q$  – притискання вакуумного присосу до поверхні переміщення, яку обчислимо за формулою:

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} K_s (p_a K_a - p_v) K \rightarrow \max \quad (1)$$

при чисельних обмеженнях:  $(50 \leq d \leq 150)10^{-3}$ ;  $0,9 \leq K_s \leq 1$ ;  $(20 \leq p_v \leq 80)$ ;  $0,65 \leq K \leq 0,85$ ; де:  $d$  – діаметр

зони вакуумування під присосом, (м);  $\frac{\pi d^2}{4}$  – площа, обмежена внутрішнім контуром присосу (м<sup>2</sup>);  $K_s$  – коефіцієнт зменшення площі присосу внаслідок деформації ущільнення;  $p_v = 101,3 \times 10^3$  (Па) – атмосферний тиск;  $p_v$  (Па) – глибина вакууму всередині камери присосу;  $K_a$  – коефіцієнт, яким ураховують зміни атмосферного тиску ( $K_a = 0,9$ );  $K$  – коефіцієнт, яким ураховують приплив повітря в місці контакту ущільнення камери (присосу) з поверхнею переміщення робота. Вказані вище діапазони чисельних значень надані з міркувань промислової доцільності.

Оскільки накладаються обмеження окремо на кожну незалежну змінну і відсутні умови, які б пов'язували параметри між собою, то для знаходження оптимального значення цільової функції використаємо класичний підхід. Знайдемо частинні похідні по кожній незалежній змінній функції (1):

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial K} &= \frac{\pi d^2}{4} K_s (p_a K_a - p_v); & \frac{\partial Q}{\partial d} &= \frac{\pi d}{2} K_s (p_a K_a - p_v) \\ \frac{\partial Q}{\partial K_s} &= \frac{\pi d^2}{4} K (p_a K_a - p_v); & \frac{\partial Q}{\partial K_a} &= \frac{\pi d^2}{4} K_s (p_a - p_v); \\ \frac{\partial Q}{\partial p_v} &= -\frac{\pi d^2}{4} K_s (p_a K_a - p_v). \end{aligned} \quad (2)$$

Жодна з похідних (2) не дорівнює нулю ні в середині області значень змінних параметрів, ні на границі області, а тому цільова функція  $Q$  досягає екстремальних значень на границі області зміни параметрів. Перші чотири похідних додатні, а тому цільова функція  $Q$  зростає при зростанні відповідних змінних. Остання похідна від'ємна і функція  $Q$  зростає при зменшенні глибини вакууму всередині камери присосу. Отже максимальне і мінімальне значення цільової функції дорівнюють:

$$\begin{aligned} Q_{\max} &= \frac{\pi d_{\max}^2}{4} K_s^{\max} (p_a K_a^{\max} - p_v^{\min}) K_{\max}; \\ Q_{\min} &= \frac{\pi d_{\min}^2}{4} K_s^{\min} (p_a K_a^{\min} - p_v^{\max}) K_{\min}; \\ Q_{\min} &\leq Q \leq Q_{\max}. \end{aligned} \quad (3)$$

Отже, максимально можлива зсувна сила  $F$  зчеплення мобільного робота з поверхнею переміщення буде дорівнювати:

$$F = \mu Q_{\max}, \quad (4)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт зчеплення (коефіцієнт тертя ковзання) присоса з поверхнею переміщення. Від цієї сили залежить максимальна загальна маса крокуючого робота.

Враховуючи нерівномірність тиску в присосі захвата по периметру його діаметра, а також силу інерції руху робота доцільно додати ще одну умову ефективної роботи вакуумних захватів [13, 14]:

$$\Delta p > \frac{mg}{k \frac{\pi d^2}{4}} \left( 1 + \frac{\varepsilon}{g} \right) \left( \frac{4h}{d} + 1 \right), \quad (5)$$

де:  $\Delta p = (p_a - p_v)$  – різниця тисків атмосферного та глибини вакууму;  $m$  – маса робота зі змінним технологічним вантажем, кг:  $25 \leq m \leq 50$ ;  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  – прискорення вільного падіння;  $k$  – кількість присосів (зазвичай:  $k=4$  або  $k=6$ );  $\varepsilon$  – прискорення руху робота,  $\text{м/с}^2$ , залежно від ділянки поверхні пересування:  $0,5 \leq \varepsilon \leq 2,0$ ;  $h$  – відстань від центра ваги робота до вісі захвата робота, (м).

### Результати моделювання

На рис. 3 надані залежності сили притискання вакуумного присосу до поверхні переміщення від діаметру присосу при різних значеннях глибини вакууму під присосом.

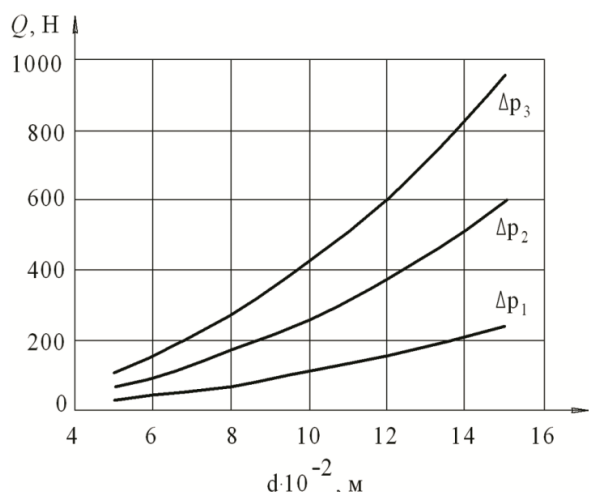


Рис. 3. Залежності сили притискання  $Q$  від діаметра присоса  $d$  та різниці тисків  $\Delta p$  (Па), при  $\Delta p_1 = 20000$ ;  $\Delta p_2 = 40000$ ;  $\Delta p_3 = 80000$ ;  $K_s = 0,9$ ;  $K = 0,75$

тобто  $\Delta p = (p_a - p_v) = \max$  має місце при  $p_v = p_v^{\max}$ . Також потрібно враховувати, що максимальне прискорення  $\varepsilon$  руху робота спостерігається на етапі пускового режиму руху робота.

Із графіків рис. 4 видно наскільки суттєво на необхідну для утримання робота глибину вакууму впливає кількість захватів, яка за правилом відповідає кількості ніг педипулятора (крокуючого механізму) мобільного робота. Як зазначено вище, зменшення тиску під присосами захватів веде до росту потужності генератора вакууму. Тому з міркувань енергозбереження приводів робота тут слід віддавати перевагу збільшенню кількості захватів перед збільшенням глибини вакууму. Відносно мобільних роботів вертикального переміщення останнє ствердження набуває особливого значення, коли замість ежекторних генераторів вакууму для підвищення вантажопідйомності використовують вакуумні насоси з електроприводом, що суттєво впливає на динамічні характеристики роботів.

### Висновки

На першому кроці досліджень, тобто математичного моделювання, можна спостерігати, що застосування пристрою зворотного зв'язку в управлінні силою зчеплення та глибиною вакууму під еластичними

Із залежностей рис. 3 очевидно, що при необхідності збільшення сили притискання, слід віддавати перевагу збільшенню діаметру присосу перед збільшенням різниці тисків під ним, оскільки, по-перше, при двократному збільшенню діаметра наслідком є чотириохватне збільшення сили притискання, а по-друге, збільшення різниці тисків, тобто глибини вакууму, веде до росту потужності генератора вакууму, а значить і ваги робота, що надзвичайно важливо для роботів вертикального переміщення з точки зору їх динамічних характеристик. Якщо умову (5) перетворити на рівняння (6), то стає можливим обчислювати мінімальне значення тиску  $p_v$  під присосами захватів залежно

$$p_v = p_a - \frac{mg}{k \frac{\pi d^2}{4}} \left( 1 + \frac{\varepsilon}{g} \right) \left( \frac{4h}{d} + 1 \right) \quad (6)$$

від їх кількості (рис. 4). Слід пам'ятати, що поняття «максимальна глибина вакууму» відповідає мінімальному значенню тиску під присосом захвата,

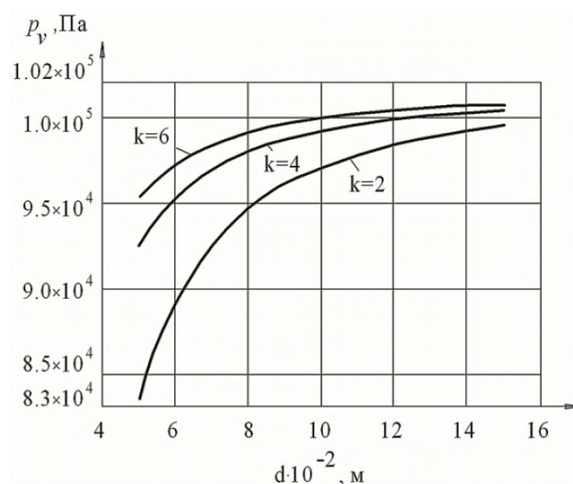


Рис. 4. Залежності мінімального тиску  $p_v$  під присосом від діаметра  $d$  присосів та їх кількості (при  $\varepsilon = 2 \text{ м/с}^2$ ;  $m = 50 \text{ кг}$ )

захватами крокуючого робота довільної орієнтації сприяє підвищенню надійності утримання робота на поверхні його руху.

З метою підвищення енергоефективності мобільного робота слід віддавати перевагу збільшенню діаметру присосів захватів та їх кількості перед збільшення глибини вакууму під ними.

Викладені рекомендації є підґрунтям для побудови дослідного стенда з метою експериментальної апробації отриманих результатів математичного моделювання, що складає наступний крок досліджень.

## Модернизация вакуумного захвата мобильного шагающего робота

М.Н. Полищук

*Аннотация.* Предложен принципиально новый захват мобильного шагающего робота произвольной ориентации, который позволяет существенно повысить надежность удержания мобильного робота на поверхности перемещения за счет применения устройства обратной связи в системе управления во время мониторинга топологии поверхности перемещения. Предоставлено описание технического решения захвата с подсистемой обратной связи и решения задачи нахождения квазиоптимальных соотношений конструктивных параметров захвата робота. Достижением решения рассмотренных задач есть автоматическая компенсация падения глубины вакуума под захватом вследствие возможного подтока воздуха в присос захвата при изменении топологии поверхности перемещения. В совокупности полученные результаты обеспечивают гарантированное удержание робота на поверхности перемещения произвольной ориентации, в том числе и мобильных роботов вертикального перемещения.

*Ключевые слова:* мобильные роботы вертикального перемещения, шагающие механизмы, захваты роботов

## Modernization of the vacuum gripper of the mobile walking robot

M.N. Polyshchuk

*Abstract.* The article describes the description of the construction and mathematical model of the capture of a mobile robot. Capture allows you to increase the reliability of holding the mobile robot on the moving surface. This quality is achieved through the use of feedback in the monitoring system for monitoring the topology of the displacement surface. Rational relations of constructive parameters of robot capture are provided. An automatic compensation of the drop in the depth of the vacuum under the gripper due to a possible influx of air into the suction cup is carried out, when the topology of the displacement surface is changed. The results of the research give a guaranteed retention of the robot on the surface of displacement of arbitrary orientation. These technical solutions are recommended for constructing systems of retention of mobile robots on the displacement surface.

*Keywords:* mobile robots, vertical movement robots, stepping mechanisms, robot grips

### References

1. Polishchuk, M.M. and Persikov, V.K. (2014), Analiz problem stvorennia tekhnolohichnykh robotiv vertykalnoho peremishchennia. *Adaptyvni systemy avtomatichnoho upravlinnia*, no. 24, pp.87-95
2. Polishchuk, M. N. (2016), Pedipuljator robota vertikal'nogo peremeschenija s vozmozhnost'ju rekuperacii energii dvizhenija. *Adaptyvni systemy avtomatichnogo upravlinnya*, no.28, pp. 107–115.
3. Yampolskyi, L.S., Polishchuk, M.M. and Persykov, V.K. (2016), Spisib peremishchennia pedipuljatoriv krokuiuchoho robota ta prystrii dlia yoho zdiisnennia. UA, Pat. 111021. 10.3.2016.
4. Robot, prevedvigajuschijsja po vertikal'noj stene. (2017), Available at: <http://rce.su/izobreli-robota-kotoryj-peredvigaetsja-po-vertikalnoj-poverhnosti/>.
5. Lam, T. L. and Yangsheng, X. (2012), Tree Climbing Robot: Design, Kinematics and Motion Planning . Springer Heidelberg New York , p. 28–29.
6. Dethe, D. and Jaju, S. (2014), Developments in wall climbing robots: International journal of engineering research and general science volume, p. 37.
7. Apostolescu, T., Udrea, C., Duminica, D., Ionascu, G., Bogatu, L., Laurențiu, A. and Maiorescu, T. (2011), Development of a Climbing Robot with Vacuum Attachment Cups. Mechanical Engineering And New High-Tech Products Development, pp. 258–267.
8. Rachkov, M. Ju. (1991), Vakuumnij zahvatnyj organ. SU, A.S. 1684225. 10.15.1991.
9. Tawigrip pneumatic vacuum gripper (2017), Rezhim dostupu do resursu, Available at: <http://www.pneumaticvacuumlifter.co.uk>
10. Polishchuk, M. N. and Tishkevich, Ju. V. (2014), Proektirovanie tehnologicheskogo osnaschenija i naladka promyshlennykh robotov. Dorado-Druk, Kiiv, UA, pp. 143 – 144.
11. Polishchuk, M. M., Tkach, M. M. and Pas'ko, V.P. Zahvat krokujuchogo robota . UA, Pat. 117979. 07.10.2017.
12. Zajcev, G. F. (1988), Teorija avtomaticheskogo upravlenija i regulirovanija. Vischa shkola, Kiev, UA, pp. 40 – 41.
13. Raschet prisosok vakuumnykh pitatelej. (2017), [Elektronnij resurs]. Himija i himicheskaja tehnologija. Spravochnik himika. Rezhim dostupu do resursu <http://chem21.info>.
14. Festo Pneumatic catalogue. (2015), CD1. [FESTO KG&GMBH](http://www.festo.com).