

УДК 621.865.8(031)

МОБІЛЬНІ РОБОТИ ДЛЯ ПЛОДООВОЧЕВИХ ГОСПОДАРСТВ

Ю. М. Кузнєцов, М. М. Поліщук

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

Кореспонденція авторів: info@zmok.kiev.ua, borchiv@ukr.net.

Історія статті: отримано – травень 2018, акцептовано – вересень 2018.

Бібл. 7, рис. 5, табл. 0.

Анотація. В статті запропоновані нові конструкції мобільних роботів довільної орієнтації в просторі. Викладені описи патентованих пристроїв і математичних моделей крокуючих роботів. Відмінність конструкцій роботів полягає в можливості переміщення робота по поверхнях довільної орієнтації в різних системах координат. Запропоновані технічні розв'язки засновані на принципах нагромадження й перетворення енергії руху й інтеграції приводів переміщення робота в просторі. Дані принципи синтезу мобільних роботів дозволяють зменшити їхню сумарну потужність і забезпечити універсальність їх застосування до різних систем координат, де орієнтація власне об'єктів обслуговування, від дерев до плодово-ягідних культур, апіорі не визначена.

Ключові слова: мобільні роботи, крокуючі механізми, роботи вертикального переміщення, педипулятори.

Постановка проблеми

В умовах четвертої промислової революції «Індустрія 4.0» [1] з орієнтацією на штучний інтелект і повну автоматизацію із застосуванням робототехнічних систем, проблема роботизації сільського господарства здобуває особливу актуальність. Це притаманно не тільки умовам агропромислових комплексів, де має місце впровадження класичних засобів автоматизації, але й сільському господарству в цілому, коли гостроактуальна проблема заміни ручної праці, особливо в періоди сезонних робіт збору врожаю, наприклад, овочевих і плодово-ягідних культур, на сьогоднішній день практично нерозв'язна.

Аналіз останніх досліджень

Дослідження зі створення роботів довільної орієнтації в просторі почалися в останньому десятилітті ХХ століття в країнах Західної Європи, Японії, США, Кореї, Китаї й Росії. На жаль, на території країн СНД і України дотепер відсутні

промислові зразки мобільних роботів довільної орієнтації сільськогосподарського призначення.

Відомі експериментальні зразки мобільних роботів [2] оснащені пристроями втримання їх на поверхнях довільної орієнтації, однак обмежені видом систем координат. Моделі роботів [3, 4] дозволяють обслуговувати об'єкти в циліндричній системі координат, зокрема, такі об'єкти як дерева, у тому числі й плоди. Крім того мобільний робот повинен працювати й в ангулярній системі координат, що властива людині. Таким чином, проблема синтезу мобільних роботів, здатних виконувати технологічні операції в просторі довільної орієнтації, є актуальною.

Мета досліджень

Запропоновані дослідження мають за мету створення конструкцій мобільних роботів довільної орієнтації на основі математичного та 3D – моделювання з наступним переходом до створення інженерних методик розрахунків їх конструктивно-технологічних параметрів.

Результати досліджень

Розроблені нові конструкції мобільних роботів засновані на принципі нагромадження потенціальної енергії й перетворення її в кінетичну енергію руху та принципу інтеграції приводів переміщення й зміни орієнтації робота згідно із заданим маршрутом не залежно від типу системи координат виробничого простору.

З метою ілюстрації вказаних принципів синтезу розглянемо їхні моделі й проектні реалізації роботів довільної орієнтації.

На рис. 1 показаний мобільний робот [5], що реалізує перший з вище зазначених принципів, тобто робот, що має здатність нагромадження потенціальної енергії на кожному попередньому кроці й перетворення її в кінетичну енергію руху на кожному наступному кроці переміщення.

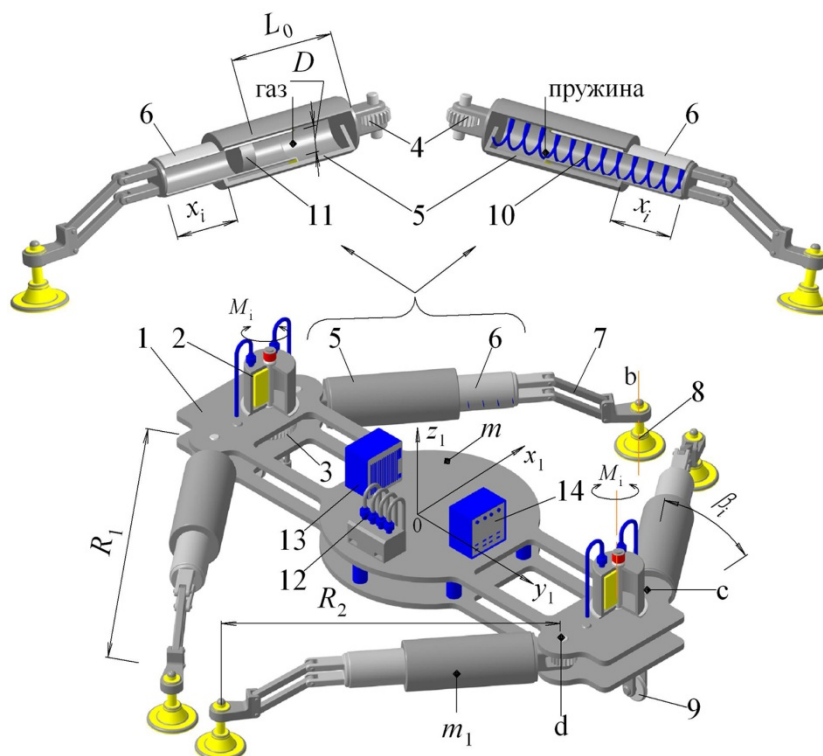


Рис. 1. Модель робота з модулями нагромадження і перетворення енергії.

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. Для подолання перешкод на поверхні переміщення робот додатково оснащений опорами кочення 9.

На рис. 1 показано два варіанти виконання педипуляторів: з модулем нагромадження енергії у вигляді пружин 10 та інший варіант, з 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 з поверхнею переміщення приводи 2 повертають педипулятори робота навколо осей «б», стискаючи пружні елементи: або пружини 10, або газ у камері 5 залежно від варіанта виконання. Внаслідок такого стиснення на ділянці повороту педипуляторів 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 в кінетичну енергію руху робота.

Якщо для нагромадження потенційної енергії використовується пружина з певним модулем Юнга (рис. 1, поз. 10), то сила пружного елемента педипулятора складе

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

де: $P_{\min}$ – попереднє стиснення і j – жорсткість пружного елемента для нагромадження потенційної енергії, що визначається модулем пружності матеріалу (сталі) для виготовлення вказаного елемента; R_2 – радіус (початкова довжина) ноги робота.

У випадку нагромадження потенційної енергії за допомогою стиснення газу в циліндрі 5 (рис. 1), сила J пружного елемента (газу) визначається за формулою:

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

$$x = R_2 \left(1 - \frac{\cos 45^\circ}{\cos(45^\circ - \beta)} \right); \quad L_0 = \frac{P_{\max} x_{\max}}{P_{\max} - p_a}$$

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.

Розглянутий мобільний робот призначений для переміщення вантажів невеликої ваги, приблизно масою 25...30 кг, і виконання технологічних операцій з невеликими зусиллями. Коли ж потрібна більша вантажопідйомність мобільного робота, то рекомендується конструкція, представлена на рис. 2. Крокуючі механізми даного робота (педипулятори) виконані у вигляді шарнірних паралелограмів із приводами від гідравлічних циліндрів. Як видно на рис. 2 по діагоналі корпуса робота розміщено дві ноги з газовими циліндрами й дві ноги із приводами повороту [6].

Коли одна пара ніг робота – його педипулятори з газовими циліндрами зчеплені з поверхнею пересування за допомогою захватів, а друга пара ніг із приводами повороту не зчеплена з поверхнею руху,

те електричні двигуни по показаній зубчастій рейці переміщують робот у напрямку осі Y. Одночасно із цим рухом електричні двигуни через не самогальмуючу гвинтову передачу забезпечують поступальний рух поршня газового циліндра, в наслідок чого відбувається стиск газу в зазначеному циліндрі й накопичення потенційної енергії стисненого газу.

Після відключення першої пари захватів і включення іншої пари захватів, стиснений газ у газових камерах розширюється, за рахунок чого відбувається зворотній рух поршня газової камери, що призводить до перетворення потенційної енергії в кінетичну енергію руху робота, але вже при виключених електричних двигунах. Такий спосіб руху робота дозволяє заощаджувати енергію автономного джерела живлення, яке завжди має обмежений ресурс. На рис. 2 показані всі можливі рухи робота в системі координат XYZ. Ці рухи включають три поступальні переміщення S_x , S_y , S_z і два поворотні рухи $\pm\alpha$ і $\pm\beta$. У підсумку робот має п'ять ступенів свободи, що досить для виконання будь-яких сільськогосподарських операцій на поверхнях довільної орієнтації.

За результатами моделювання отримані графоаналітичні залежності рис. 3, що відображають зміни довжини L газової камери (а) і зміни її діаметра D (б) залежно від величини максимального тиску p_{max} ($k=p_{max}/p_a$). Надані графіки можуть бути безпосередньо використаними у якості номограм при проектуванні мобільного робота з газовим накопичувачем потенційної енергії та перетворення її в кінетичну енергію руху.

Таким чином, розглянуті принципово нові конструкції роботів дозволяють шляхом накопичення та перетворення енергії руху підвищити енергетичну ефективність мобільних роботів довільної орієнтації у просторі, бо саме цьому типу роботів притаманне використання автономних джерел живлення, ресурс котрих завжди обмежений.

З метою зниження гравітаційного навантаження шляхом зменшення маси робота та одночасного забезпечення інваріантності до систем координат виробничого простору запропоновано принцип інтеграції приводів переміщення. Відомо, що в Декартові системі координат ми маємо шість ступенів свободи — три поступальних й три обертових, кожному з яких згідно із класичними розв'язками відповідає автономний привод. Пропонована на рис. 4 технічна реалізація даного принципу виключає необхідність використання приводів по кожній з координатних осей [7].

Для цього робот оснащений *гнучкими* крокуючими механізмами 2, установленими на корпусі 1. Кожна пара педипуляторів через зубчасті трансмісії 3 постачена електроприводами 4. Захвати 5 утримують робот на поверхні переміщення, а приводи повороту 6 погоджують положення захватів відносно поверхні переміщення. На платформі робота також розміщений модуль 7 енергетичного забезпечення, генератор 8 тиску газу або рідини, а також контролер керування 9.

Педипулятори робота виконані у вигляді набору напівсферичних кілець, зібраних у пакет пружним елементом, а всередині пакета кілець розміщені *гофровані* трубопроводи під різним тиском p_1 і p_2 . Завдяки такій схемі педипуляторів робот має здатність працювати в різних системах координат (прямокутної Декартові, сферичній й циліндричній) без додаткових приводів по кожній координатній осі. У кожній нозі робота у вертикальній і горизонтальній площинах розміщені по два гофровані 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 :

$$F_1 = p_1 \frac{\pi d^2}{4}; F_2 = p_2 \frac{\pi d^2}{4}; F_3 = p_3 \frac{\pi d^2}{4}; F_4 = p_4 \frac{\pi d^2}{4}, \quad (3)$$

де d — внутрішній діаметр торця гофрованих трубопроводів.

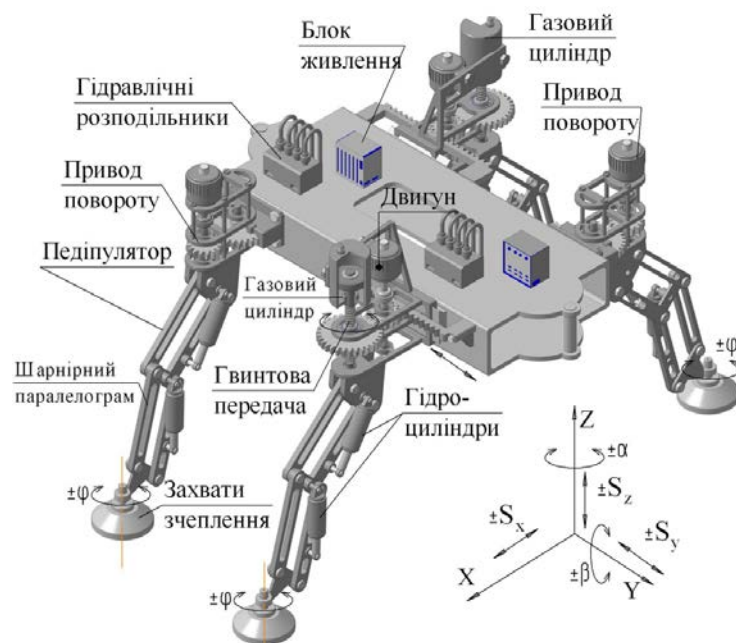


Рис. 2. Крокуючий мобільний робот сільськогосподарського призначення.

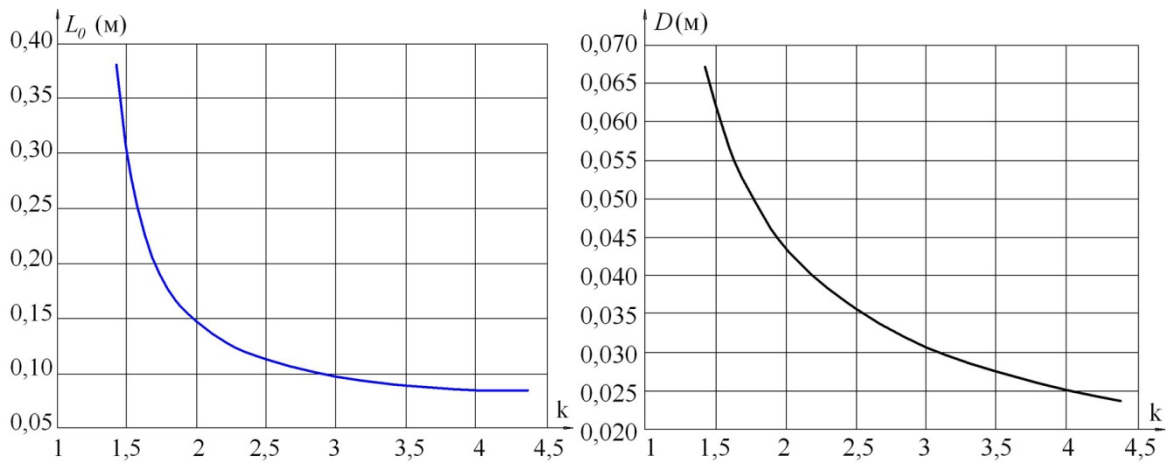


Рис. 3. Графіки зміни довжини L_0 (а) і діаметра D (б) газової камери залежно від величини максимального тиску p_{max} ($k = p_{max}/p_a$).

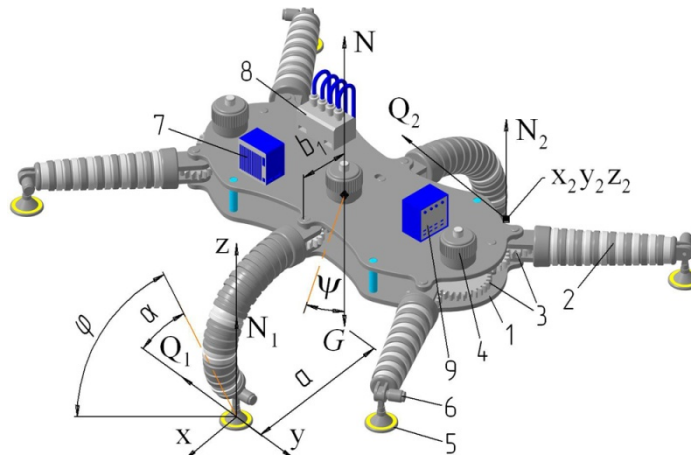


Рис. 4. Мобільний робот з гнучкими підпіюляторами.

Оскільки осі трубопроводів зміщені відносно осі підпіюлятора на ексцентриситет e , то виникають моменти M_1 і M_2 , які, згинаючи ногу робота по певному радіусу, здійснюють орієнтацію робота в просторі:

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

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

Для надійного утримання робота на поверхні переміщення довільної орієнтації необхідно встановити взаємозв'язок між припустимим технологічним навантаженням і сил зчеплення його ніг з поверхнею переміщення. Із цією метою розглянемо критичний випадок, коли робот опирається тільки на дві ноги, як це показано на рис. 4. 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. 4):

$$N_2 = Q_2 + a_3 G - b_3 N; \quad Q_{2y} = d_3 G + h_3 N, \quad (5)$$

де для компактності запису позначено:

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

$$d_1 = y_c \cos \alpha - z_c \sin \alpha; \quad b_2 = x_2 \cos(\varphi - \alpha); \quad d_3 = \frac{d_2 a_1 - d_1 a_2}{\Delta}; \quad h_3 = \frac{h_2 a_1 + a_2 h_1}{\Delta}$$

$$a_1 = y_2 \cos(\varphi - \alpha) + z_2 \sin(\varphi - \alpha); \quad a_2 = -x_2 \sin(\varphi - \alpha); \quad d_2 = x_c \sin \alpha; \\ h_1 = y_c \cos \psi + z_c \sin \psi; \quad b_1 = y_2 \sin(\varphi - \alpha) - z_2 \cos(\varphi - \alpha); \quad h_2 = x_c \sin \psi;$$

$\Delta = a_1 b_2 - b_1 a_2$; 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; α, φ – кути нахилу до обр'їзу поверхонь, на які опираються ноги робота; ψ – кут нахилу центральної осі робота, що проходить через його центр ваги G .

Потім з вище означеної системи рівнянь рівноваги (яких достатньо, оскільки робот не рухається, коли виконує технологічну операцію) знаходимо інші невідомі реакції й сили тертя (див. рис. 4):

$$N_1 = Q_1 + G a_4 - N h_4; \quad Q_{1y} = G h_5 + N h_6, \quad (6)$$

де також позначено:

$$a_4 = \cos \alpha - a_3 \cos(\varphi - \alpha) - d_3 \sin(\varphi - \alpha); \quad h_4 = \cos \psi - b_3 \cos(\varphi - \alpha) + h_3 \sin(\varphi - \alpha); \\ h_5 = \sin \alpha - d_3 \cos(\varphi - \alpha) + a_3 \sin(\varphi - \alpha); \quad h_6 = \sin \psi - h_3 \cos(\varphi - \alpha) - b_3 \sin(\varphi - \alpha)$$

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

$$Q_{1y} < \mu N_1; \quad Q_{2y} < \mu N_2; \quad N_1 > 0; \quad N_2 > 0, \quad (7)$$

де μ – коефіцієнт тертя зчеплення ноги робота з поверхнею переміщення.

Підставивши в умови (7) вираження вище знайдених реакцій сил знаходимо обмеження технологічного навантаження робота з обліком діючих на нього сил:

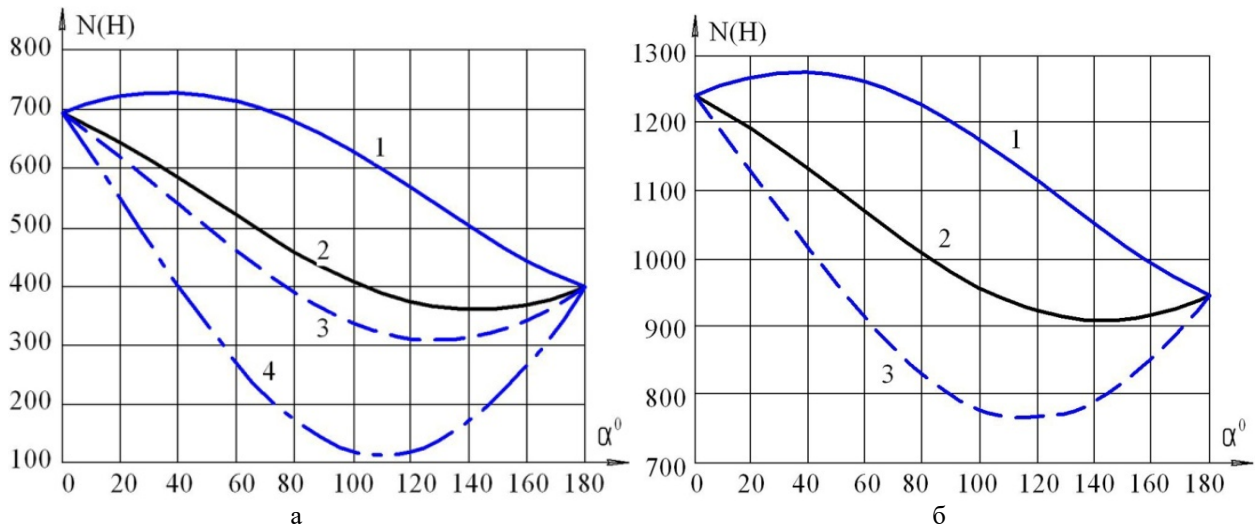


Рис. 5. Графіки граничних значень технологічного зусилля N робота залежно від кута α нахилу до обрію: а – опора на дві ноги; б – опора на чотири ноги.

$$N_1 > 0 \Rightarrow N < \frac{Q_1 + Ga_4}{h_4}; \quad N_2 > 0 \Rightarrow N < \frac{Q_2 + Ga_3}{b_3}; \quad (8)$$

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

Граничне технологічне навантаження робота визначає найбільше значення реакції N сили технологічної операції, що відповідає умовам (8).

Ці умови є критеріями визначення екстремального технологічного навантаження мобільного робота.

У результаті моделювання отримані граничні значення навантаження при опорі робота на дві ноги (рис. 5, а): криві 1 і 2 визначають стан відриву від поверхні переміщення відповідно першої й другої ніг робота, а криві 3 і 4 – відповідно початок проковзування зазначених ніг робота.

При опорі робота на чотири ноги (рис. 5, б), 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.

Отримані залежності дозволяють проектувати пристрої зчеплення робота з поверхнею переміщення залежно від граничних значень технологічних навантажень, а також обирати відповідне до вище вказаних обмежень технологічне оснащення мобільного робота залежно від його виробничого призначення.

Таким чином, реалізація другого принципу синтезу, надає можливість досягати довільної орієнтації крокуючого мобільного робота в різних робочих просторах: прямокутної Декартові, сферичної й циліндричної систем координат.

Цей ефект забезпечує розширення технологічних можливостей робота, що суттєво для мобільних роботів сільськогосподарського призначення, де орієнтація власне об'єктів обслуговування, від дерев до плодово-ягідних культур, априорі не визначена.

Висновки

1. Реалізація принципу накопичення потенціальної енергії та перетворення її в кінетичну енергію руху дозволяє збільшити ресурс автономних джерел живлення мобільних роботів за рахунок заощадження енергії, що витрачається на приводи руху робота.

2. Принцип інтеграції приводів надає можливість мобільному роботу працювати в різноманітних системах координат, що суттєво для обслуговування таких об'єктів сільського господарства, як плоді дерева, кущі та їм подібних, для яких притаманна невизначеність їх орієнтації у просторі.

3. Реалізація пропонованих принципів синтезу мобільних роботів і заснованих на цих принципах інженерних методик проектування дозволить створити досить ефективні засоби автоматизації сільського господарства в різних секторах садівництва й плодовоовочевих господарств.

Список літератури

1. Кузнецов Ю. Н. Вызовы четвертой промышленной революции «Индустрия 4.0» перед учеными Украины. Вестник ХНТУ, Херсон, №2 (61), 2017. С. 67–75.
2. Developments in wall climbing robots: a review. International journal of engineering research and general science. Volume 2, issue 3, April-May 2014. P. 37.
3. Tin Lun Lam, Yangsheng Xu. Tree Climbing Robot: Design, Kinematics and Motion Planning. Springer Heidelberg. New York. 2012. P. 37–46.
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. 2005. P. 13.
5. Yampolskiy L., Polishchuk M. and Persikov V. Method and Device for Movement of Pedipulators of Walking Robot. Patent UA 111021. 2016.

6. Заявка № а201807976 на выдачу патенту України UA МПК B62D 57/032. Крокуючий мобільний робот Кузнецова – Поліщука; заявлено 18.07.2018. Київ. Укрпатент, 2018. 25 с.

7. Polishchuk Mikhail, Opashnianskyi Mark, Suyazov Nikita. Walking Mobile Robot of Arbitrary Orientation. International Journal of Engineering and Manufacturing, 2018, Vol. 8, No 3. P. 1–11.

References

1. Kuznetsov, Y. N. (2017). The challenges of the fourth industrial revolution "Industry 4.0", the scientists of Ukraine. Bulletin of KnTU. Kherson. No 2 (61), 67-75.

2. *Developments* in wall climbing robots: a review. (2014). International journal of engineering research and general science. Volume 2, issue 3, April-May 37.

3. Tin Lun Lam, Yangsheng Xu. (2012). Tree Climbing Robot: Design, Kinematics and Motion Planning. Springer Heidelberg. New York. 37-46.

4. Saundersa, A., Goldmanb, D.I, Fullb, R.J. and Buehlera, M. (2005). The RiSE Climbing Robot: Body and Leg Design. Boston Dynamics, Unmanned Systems Technology VIII. Proc. of SPIE. 13.

5. Yampolskiy, L., Polishchuk, M., Persikov, V. (2016). Method and Device for Movement of Pedipulators of Walking Robot. Patent UA 111021.

6. Application. (2018). No. а201807976 for a patent of Ukraine EN IPC B62D 57/032. Walking mobile robot Kuznetsov – Polishchuk declared 18.07.2018. Kiev. Ukrpatent, 25.

7. Polishchuk, Mikhail, Opashnianskyi, Mark, Suyazov, Nikita. (2018). Walking Mobile Robot of Arbitrary Orientation. International Journal of Engineering and Manufacturing, Vol. 8, No 3. 1-11.

MOBILE ROBOTS FOR FRUIT AND VEGETABLE FARMS

Kuznetsov Yu. N., Polishchuk M. N.

Annotation. New constructions of mobile robots of arbitrary orientation are proposed. Described are patented devices and mathematical models of robots. The difference between robot designs is the ability to move the robot through surfaces of arbitrary orientation in different coordinate systems. The proposed technical solutions are based on the principles of accumulation and conversion of energy of motion and integration of drives for moving the robot in the technological space. These principles of the synthesis of mobile robots can reduce their overall weight and ensure the universality of their applicability to different coordinate systems, where the orientation of actual objects of service, from trees to fruit and berry crops, is not determined a priori.

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

МОБИЛЬНЫЕ РОБОТЫ ДЛЯ ПЛОДОВООЩНЫХ ХОЗЯЙСТВ

Ю. Н. Кузнецов, М. Н. Полищук

Аннотация. В работе предложены новые конструкции мобильных роботов произвольной ориентации в пространстве. Изложены описания патентованных устройств и математических моделей шагающих роботов. Отличие конструкций роботов состоит в возможности перемещения робота по поверхностям произвольной ориентации в различных системах координат. Предложенные технические решения основаны на принципах накопления и преобразования энергии движения и интеграции приводов перемещения робота в пространстве. Данные принципы синтеза мобильных роботов позволяют уменьшить их суммарную мощность и обеспечить универсальность их применимости к различным системам координат, где ориентация собственно объектов обслуживания, от деревьев до плодово-ягодных культур, априори не определена.

Ключевые слова: мобильные роботы, шагающие механизмы, роботы вертикального перемещения, педипуляторы.