

УДК 621.865.8(031)

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/01>**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»

## МОДИФІКАЦІЯ СТОПИ КРОКУЮЧОГО МОБІЛЬНОГО РОБОТА

Однією з проблем експлуатації крокуючих роботів, зокрема антропоморфних конструкцій, є забезпечення їх стійкості під час руху поверхнями з різними фізико-механічними характеристиками. Домінуючими факторами впливу на стійкість крокуючого робота є швидкість і прискорення його руху, маса робота, включаючи корисне навантаження, положення центру тяжіння, а також питомий тиск на ґрунт, яким переміщається робот. Запропонована у статті принципово нова конструкція ступні ноги крокуючого робота дозволяє регулювати питомий тиск на ґрунт за допомогою зміни площі опорної поверхні робота. При переході крокуючого робота з твердої поверхні на сипучі ґрунти, наприклад, такі як пісок, сніг, м'які болотисті ґрунти та інші, нова конструкція ступні дозволяє в автоматичному режимі збільшувати площу опори і тим самим зменшує питомий тиск на ґрунт, а отже, підвищує стійкість робота. І, навпаки, при переході мобільного робота з м'якого ґрунту на тверду поверхню бажано зменшувати площу опорної поверхні робота для збільшення швидкості його руху. Така зміна режиму руху робота досягається завдяки оснащенню стоп його ніг індуктивними датчиками, що контролюють величину заглиблення крокуючого робота у сипучий ґрунт. При чому, вказаними датчиками оснащена кожна нога робота, що надає додаткову перевагу, а саме зберігати стійкість руху при різних питомих тисках на ногах крокуючого робота. Регулювання в автоматичному режимі питомого тиску робота на ґрунт дозволяє здійснити адаптацію стійкості крокуючого робота до різноманітних топологій поверхонь, за якими рухається робот.

В рамках даних досліджень отримані аналітичні залежності для розрахунку параметрів нової ступні крокуючого робота, а саме величини переміщень пальців ступні, їх швидкості, змінної опорної площі ступні, питомого тиску на ґрунт та міцності пружних елементів ступні робота. Також наведено графічні залежності зазначених параметрів у вигляді діаграм, які допоможуть дослідникам та інженерам створювати подібні конструкції зі змінним тиском на ґрунт. Головною мотивацією даних досліджень було підвищення стійкості крокуючого робота внаслідок регулювання питомого тиску різні ґрунти, якими може рухатися мобільний робот.

**Ключові слова:** мобільні роботи, крокуючі механізми, антропоморфні конструкції, педипулятори, стійкість робота.

**Постановка проблеми.** Не дивлячись на різноманітність сучасних моделей крокуючих роботів, досі відсутні антропоморфні конструкції, спрямовані на зміну площі опорної поверхні робота з метою регулювання тиску на ґрунт. Крім конструктивних рішень зазначених роботів, необхідно також визначити аналітичні залежності між такими параметрами, як величини переміщень пальців ступні, їх швидкості, змінної опорної площі ступні, питомого тиску на ґрунт та міцності пружних елементів ступні робота.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Теоретичні та експериментальні дослідження в галузі синтезу крокуючих роботів обумовлені їхньою більшою універсальністю функцій у порівнянні з роботами на колісній або гусеничній трансмісії. У роботі [1, с. 1016–1012] запропоновано конструкцію ніг робота на основі інтелектуального управління сервоприводами. Однак у цій роботі стопи ніг робота не мають здатності до трансформації їх форми або розмірів. У роботі [2, с. 7–9] зазначено, що дизайн стопи дуже

впливає на якість контакту із землею, а в статті [3, с. 2–3] запропонована конструкція гнучкої ступні робота для амортизації ударних навантажень ступні. Однак у цих дослідженнях не передбачається зміни розмірів ступні робота у процесі ходьби. Результати досліджень [4, с. 3–5] свідчать про необхідність урахування впливу фізико-механічних властивостей різних ґрунтів на динаміку ходьби робота, у тому числі й сипучих ґрунтів. У роботі [5, с. 4] надана інформація про контактні сили між стопою та землею на основі вимірювання сили тривісним сенсорним пристроєм.

Дослідження [6, с. 520] ілюструють ходьбу гуманоїдного робота, який має по 6 ступенів свободи в кожній нозі та по 1 ступені свободи в кожній ступні. Однак у зазначених роботах не передбачається можливість зміни форми ступні робота. Оригінальні конструкції ступні ноги крокуючого робота наведені в роботах [7, 8], але загальною ознакою наведених технічних рішень є відсутність зміни питомого тиску ніг робота на ґрунт. Податливі механізми ступні робота [9] і гуманоїдна стопа робота з м'язовими приводами [10, с. 2904–2906], а також робот-гуманоїд [11, с. 2–6] і мініатюрний робот [12, с. 189–190] дозволяють адаптувати ноги робота до різних топологій ґрунтів, по яких переміщається робот, що крокує, проте без зміни питомого тиску на ґрунт.

Досить ефективні конструкції ступні ніг робота для стабілізації ходьби запропоновані в роботах [13, 14], а також біотехнологічна роботизована стопа [15, с. 631–632] з конічним зубчастим зачепленням дозволяє компенсувати момент нищпорення при двоногій ходьбі, що також вирішує задачу стабілізації руху робота. У роботі [16, с. 110] у конструкції ступні робота застосовані плоскі пружини з торсіонною підвіскою, яка знижує чутливість ступні до динамічних збурень. Однак, як і в попередніх роботах, ступні робота мають постійну площу опори на ґрунт, що не дозволяє змінювати питомий тиск на ґрунт при переміщенні сипучими ґрунтами. У роботі [17] запропоновано конструкцію ступні робота у вигляді гнучкої пластини зі змінною жорсткістю. Дане технічне рішення забезпечує адаптацію ступні до поверхні переміщення та забезпечує надійний контакт ступні з поверхнею. Антропоморфні конструкції ніг робота також дозволяють адаптувати переміщення робота до поверхонь із різною топологією [18, с. 728]. Однак в обох зазначених випадках загальна площа ступні залишається постійною і не змінюється під час пере-

ходу ноги робота з твердого ґрунту на сипучий ґрунт, що не дозволяє змінювати питомий тиск на поверхню при переміщенні робота. У дослідженнях [19, с. 22; 20, с. 7; 21, с. 58] підвищення стійкості крокуючих роботів пропонуються вдосконалені алгоритми управління ходьбою робота, але без зміни конструкції ступні ніг робота.

Таким чином, аналіз наведених вище досліджень показує, що проблема підвищення стійкості крокуючих роботів на основі регулювання питомого тиску на ґрунт за допомогою зміни площі опори ступні залишається актуальною.

**Постановка завдання.** Необхідно створити стопу крокуючого робота з перемінною площею опорної поверхні, що дозволить змінювати питомий тиск робота на поверхню переміщення і, тим самим, сприяти стабілізації стійкості крокуючого робота. Також для надійного функціонування вказаної стопи необхідно розробити аналітичні залежності між величинами переміщень пальців ступні, їх швидкості, змінної опорної площі ступні, питомого тиску на ґрунт та міцності пружних елементів ступні робота. На основі отриманих аналітичних залежностей необхідно здійснити моделювання функціонування стопи.

**Виклад основного матеріалу.** *Конструкція стопи.* Для кращого розуміння запропонованої нижче аналітичної моделі спочатку розглянемо принципово нову конструкцію [22, с. 5–8] стопи. На рис. 1 показана 3D модель стопи крокуючого робота, яка має здатність змінювати площу опори, а на рис. 2 наведено кінематична схема ступні. Ступня ноги мобільного робота містить центральний палець, який на рис. 1 умовно показаний у перерізі для кращого розуміння його приводу.

Центральний палець утворює корпус ступні і в ньому розміщена самогальмуюча гвинтова передача. Ця гвинтова передача складається з гвинта та гайки, яка встановлена у напрямних центрального пальця і створює з ним кінематичну пару поступального руху. Гвинт встановлений на підшипниках кочення та через муфту з'єднаний з електричним двигуном. На валу електричного двигуна встановлений енкодер, тобто пристрій, який перетворює кут повороту вала двигуна в електричний сигнал для управління двигуном.

По обидва боки центрального нерухомого пальця симетрично розміщені рухомі пальці 1, 2 і пальці 3, 4. Рухомі пальці встановлені в корпусі ступні на шарнірних опорах і з'єднані з гайкою гвинтової передачі важелями, які також встановлені на шарнірних суглобах гайки та кожного рухомого пальця. Таким чином, рухомі пальці

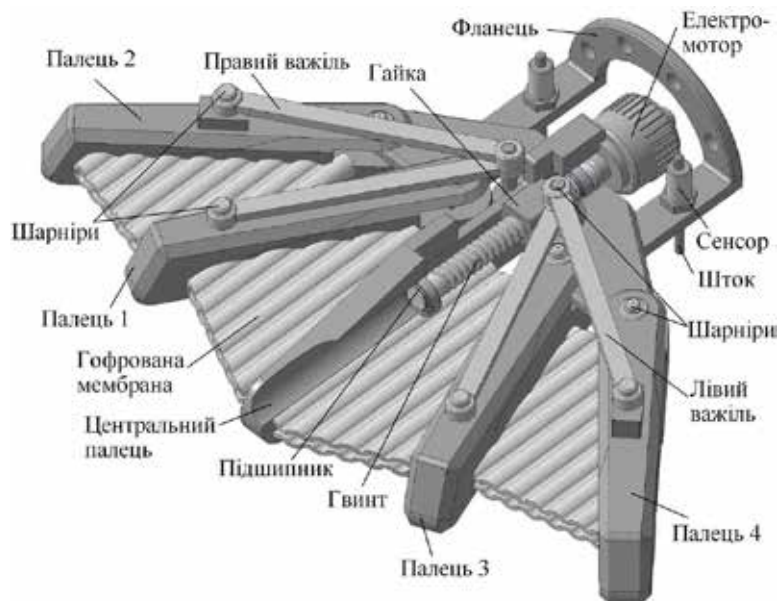


Рис. 1. Конструкція ступи крокуючого робота

утворюють з корпусом ступні та гайкою обер-тальні кінематичні пари. Між рухомими паль-цями закріплені еластичні гофровані перетинки, які мають здатність розтягуватися зі збільшенням площі опори ступні на ґрунт. На корпусі ступні, який утворює центральний палець, встановлені датчики зі штоками для контролю величини зану-рення ступні в сипучий або м'який ґрунт, яким рухається крокуючий робот. Фланець з отворами призначений для кріплення ступні до гомілки ноги крокуючого робота.

Ступня працює в такий спосіб. У початко-вому стані, тобто при переміщенні ніг робота по твердих ґрунтах, пальці 1 і 2 (також пальці 3 і 4) знаходяться під мінімальними кутами  $\alpha_1$  і  $\beta_1$  (див. рис. 2) щодо центрального пальця, що забез-печує мінімально можливу площу опори ступні.

У разі зміни топології поверхні, якою руха-ється крокуючий робот, тобто коли ноги робота переходять на сипучі або м'які ґрунти (наприклад, пісок, сніг або заболочені ґрунти) виникає загроза заглиблення ніг робота в ґрунт і як наслідок втрата стійкості робота. Для попередження такого явища після контакту з м'яким ґрунтом штоки входять у індуктивні датчики (див. рис. 1) і цим виробля-ється пропорційний сигнал на включення елек-тричного двигуна. Останній передає гвинту обер-тання, що повідомляє лінійний рух гайки на певну величину «X» (див. рис. 2). Після проходження гайкою цієї відстані важелі повертають рухомі пальці 1 і 2 (а також пальці 3 і 4) на відповідні кути повороту  $\alpha_2$  та  $\beta_2$ . Нове положення пальців показано на рис. 2 штрих-пунктирними лініями.

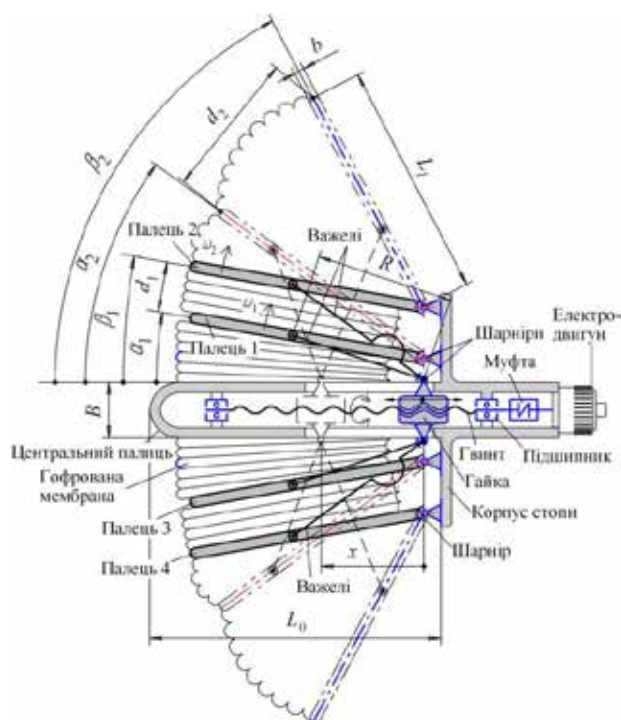


Рис. 2. Кінематична схема ступи зі змінною площею опори на ґрунт

Рухливі пальці при повороті навколо шарнірних суглобів розтягують гофровані перетинки, встановлені між пальцями. В результаті повороту пальців та деформації гофрованих перетинок збільшується площа опори ступні на ґрунт. Внаслідок збільшення площі опори ступні на ґрунт зменшується питомий тиск ніг робота на ґрунт, яким вони рухаються. В результаті запобігається

заглиблення стопи в м'який або сипучий ґрунт. Таким чином зазначені дії сприяють підвищенню стійкості крокуючого робота.

Для можливості проектування аналогічних стоп із змінною площею опори на ґрунт далі пропонується методика розрахунку параметрів, яка включає кінематичний аналіз та розрахунок змінної площі стопи для визначення питомого тиску на ґрунт. Також наведено аналітичні та графічні залежності параметрів стопи, які можуть бути використані дослідниками та інженерами для моделювання аналогічних конструкцій стопи.

**Кінематичний аналіз стопи.** На рис. 3 показано кінематичну схему пальця 1 (див. також рис. 2). Аналогічну конструкцію має і симетричний палець 3. Палець 1 має довжину  $AA_1$ , шарнірно встановлений у суглобі і при включенні електродвигуна повертається навколо точки суглоба  $A$ . Важіль  $CB$ , який передає рух пальцю  $AA_1$ , закріплений шарнірно в точці  $C$  на пальці і в точці  $B$  на приводній гайці, яка здійснює поступальний рух на величину « $x$ ». Початковий кут нахилу пальця 1 (також симетричного пальця 3) дорівнює  $\alpha_1$ . У процесі повороту пальця відстань  $AC$  залишається постійною, тобто  $AC = AC_1 = \text{Const}$ .

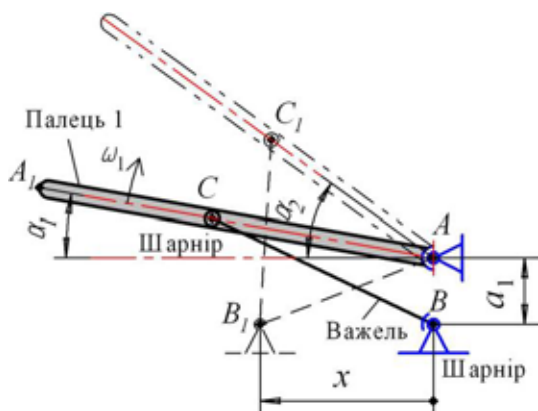


Рис. 3. Кінематична схема механізму пальця 1 (див. також рис. 2)

З трикутника  $\triangle ABC$  за теоремою косинусів маємо співвідношення

$$BC^2 = AC^2 + AB^2 - 2ACAB \cos(\angle CAB), \quad (1)$$

де  $AB = a_1$ ,  $\angle CAB = 90^\circ + \alpha_1$ .

З рівняння (1) знаходимо:

$$AC = \sqrt{R^2 - (a_1 \cos(\alpha_1))^2 - a_1 \sin(\alpha_1)} \quad (2)$$

Після переміщення гайки на величину  $BB_1 = x$  із трикутника  $\triangle ABB_1$  визначаємо:

$$AB_1 = \sqrt{x^2 + a_1^2}, \quad (3)$$

а з трикутника  $\triangle AB_1C_1$  знаходимо кут  $\angle C_1AB_1$

$$\angle C_1AB_1 = \arccos \left( \frac{AC^2 + a_1^2 + x^2 - R^2}{2AC\sqrt{x^2 + a_1^2}} \right). \quad (4)$$

Тоді, у довільний момент часу кут нахилу пальця 1 ( $AA_1$ , див. також рис. 3) у напрямку руху обчислюємо за формулою:

$$\alpha_2 = \angle C_1AB_1 + \angle B_1AB - \frac{\pi}{2} = \arctg \left( \frac{x}{a_1} \right) + \arccos \left( \frac{AC^2 + a_1^2 + x^2 - R^2}{2AC\sqrt{x^2 + a_1^2}} \right) - \frac{\pi}{2}. \quad (5)$$

Якщо гвинт робить  $N$  об/хв., його кутова швидкість  $\omega = \frac{\pi N}{30} \text{ рад/с}$  і переміщення « $x$ » гайки протягом  $t$  секунд, а також її лінійна швидкість « $V$ » дорівнюватиме

$$x = \frac{Ns}{60}t; \quad V = \frac{dx}{dt} = \frac{Ns}{60} \text{ м/с}, \quad (6)$$

де  $s$  – крок гвинтової лінії приводного гвинта. Знайдемо кутову швидкість повороту пальця 1 (також і симетричного пальця 3)

$$\omega_1 = \frac{d\alpha_2}{dt} = \frac{Ns}{60} \left( \frac{a_1}{a_1^2 + x^2} - \frac{x \left( 1 + \frac{R^2 - AC^2}{a_1^2 + x^2} \right)}{2AC \sin(\angle C_1AB_1) \sqrt{x^2 + a_1^2}} \right) \quad (7)$$

На рис. 4 показана кінематична схема пальця 2 (див. також рис. 2). Аналогічну конструкцію має симетричний палець 4. Початковий кут нахилу пальця 2 (також і симетричного пальця 4) дорівнює  $\beta_1$ . У процесі повороту пальця відстань  $A_2C_2$  залишається постійною, тобто  $A_2C_1 = A_2C_2 = \text{Const}$ .

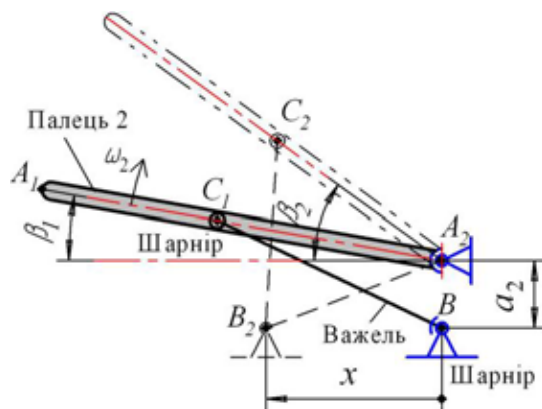


Рис. 4. Кінематична схема механізму пальця 2 (див. також рис. 2)

Аналогічні формули одержуємо і для пальця 2 (також і для симетричного пальця 4). По теоремі косинусів для відрізка  $A_2C_2$  маємо співвідношення

$$A_2C_2 = \sqrt{R_1^2 - (a_2 \cos(\beta_1))^2 - a_2 \sin(\beta_1)}, \quad (8)$$

де  $a_2$  – віддаль від шарніра пальця 12 до шарніра гайки у початковому положенні;  $\beta_1$  – кут, що утворює палець 2 з напрямком руху у початковому положенні. Відповідно, відстань  $A_2B_2$  і кути  $\angle B_2A_2B$ ,  $\angle C_2A_2B_2$  обчислюємо за формулами:

$$\begin{aligned} A_2B_2 &= \sqrt{x^2 + a_2^2}; \quad \angle B_2A_2B = \arctg\left(\frac{x}{a_2}\right); \\ \angle C_2A_2B_2 &= \arccos\left(\frac{(A_2C_2)^2 + a_2^2 + x^2 - R_1^2}{2A_2C_2\sqrt{x^2 + a_2^2}}\right). \end{aligned} \quad (9)$$

Кут між пальцем 12 і напрямком руху у довільний момент часу

$$\begin{aligned} \beta_2 &= \arctg\left(\frac{x}{a_2}\right) + \\ &+ \arccos\left(\frac{(A_2C_2)^2 + a_2^2 + x^2 - R_1^2}{2A_2C_2\sqrt{x^2 + a_2^2}}\right) - \frac{\pi}{2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Знайдемо кутову швидкість повороту пальця 2

$$\omega_2 = \frac{d\beta_2}{dt} = \frac{Ns}{60} \left( \frac{\frac{a_2}{a_2^2 + x^2} - x \left( 1 + \frac{R_1^2 - (A_2C_2)^2}{a_2^2 + x^2} \right)}{2A_2C_2 \sin(\angle C_2A_2B_2) \sqrt{x^2 + a_2^2}} \right) \quad (11)$$

Визначення питомого тиску на ґрунт. Площа контакту ступні із ґрунтом, по котрому рухається робот, складається з площі центрального пальця  $S_o = BL_o$  (див. рис. 2), площі пальців і площі гофрованих перетинок. Площі крайніх пальців 2 і 4 визначимо як  $\dot{u}_{2,4} = 2 \cdot \dots$ . Якщо лінію крайнього пальця 2 продовжити до перетину з центральним пальцем, то утворяться два кругових сектора: один радіуса  $r_1 = L_1 + \frac{a_2}{\sin \beta}$  і другий радіуса  $r_2 = 0.2L_1 + \frac{a_2}{\sin \beta}$ , а загальну пощу контакту ступні із ґрунтом можна визначити так:

$$S = S_o + S_{2,4} + 2\left(\frac{1}{2}\beta r_1^2 - \frac{1}{2}\beta r_2^2\right), \quad (12)$$

де коефіцієнт 2 враховує також площину сектора між центральним пальцем та пальцем 4;  $\beta$  (рад) – центральний кут кругового сектора.

У розгорнутому вигляді площа контакту ступні з ґрунтом визначається як

$$S = BL_o + 2bL_1 + \beta \left( L_1 + \frac{a_2}{\sin \beta} \right)^2 - \beta \left( 0.2L_1 + \frac{a_2}{\sin \beta} \right)^2. \quad (13)$$

Питомий тиск робота на поверхню контакту із ґрунтом знаходимо за формулою

$$\begin{aligned} p &= \frac{\frac{1}{2}(m + 2m_1)g}{S} = \\ &= \frac{\frac{1}{2}(m + 2m_1)g}{BL_o + 2bL_1 + \beta \left( L_1 + \frac{a_2}{\sin \beta} \right)^2 - \beta \left( 0.2L_1 + \frac{a_2}{\sin \beta} \right)^2}, \end{aligned} \quad (14)$$

де  $m$  – маса робота;  $m_1$  – маса однієї ноги робота;  $g$  – прискорення вільного падіння,  $g = 9,82 \text{ м/с}^2$ .

Аналіз результатів моделювання. На основі вище зазначених формул (5) та (10) побудовано графіки зміни кутів повороту пальців (рис. 5) щодо центрального пальця ступні.

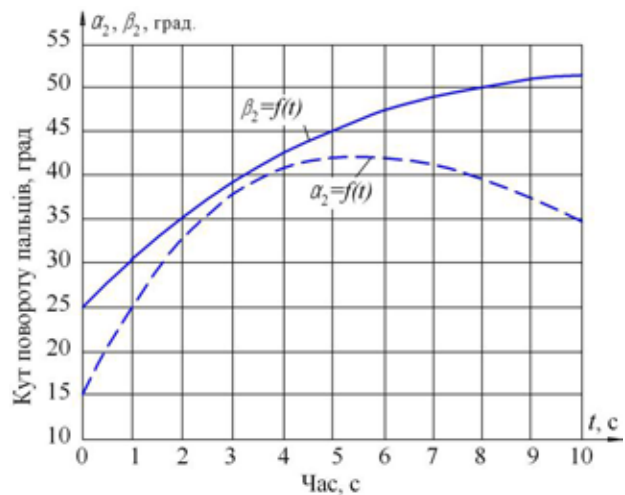


Рис. 5. Графіки зміни кутів повороту пальців відносно центрального пальця: при  $a_1=0,02 \text{ м}$ ;  $a_2=0,04 \text{ м}$ ; довжина важеля  $C_1B=0,04 \text{ м}$  (див. рис. 3); довжина важеля  $C_1B=0,1 \text{ м}$  (див. рис. 4)

Як видно з цих графіків, швидкість повороту пальців достатня для ефективної роботи ступні, причому зазначені графіки мають нелінійний характер, що слід враховувати при програмуванні приводу ступні крокуючого робота. На рис. 6 показано зміну кутових швидкостей пальців ступні залежно від часу.

Відомо, що зміна швидкості характеризує прискорення виконавчих механізмів, у разі це прискорення пальців ступні робота. Збільшення прискорень є небажаним, оскільки може призвести до зростання інерційних навантажень. Тому рекомендується не перевищувати прискорення на графіках рис. 6.



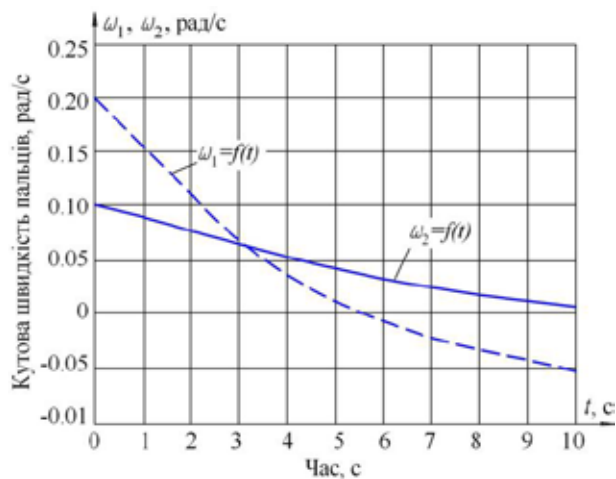


Рис. 6. Зміна кутових швидкостей пальців в залежності від часу: при  $a_1=0,02$  м;  $a_2=0,04$  м; довжина важеля  $CB=0,04$  м (див. рис. 3); довжина важеля  $C_1B=0,1$  м (див. рис. 4)

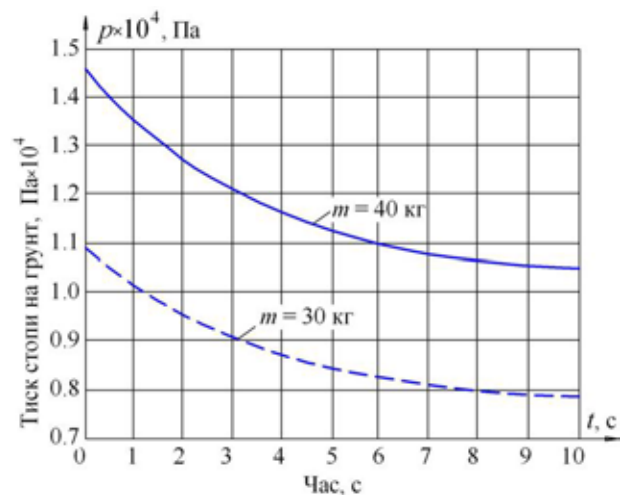


Рис. 8. Графіки зміни питомого тиску стопи робота на ґрунт

На підставі формул (12) та (13) отримані графіки рис. 7 зміни площі опори ступні робота при повороті пальців. Саме від площі опори ступні залежить її питомий тиск на ґрунт. Площа опори ступні та її тиск на ґрунт перебувають у зворотній пропорційній залежності, а саме: чим більша площа опори ступні, тим меншим буде питомий тиск на ґрунт, яким рухається робот.

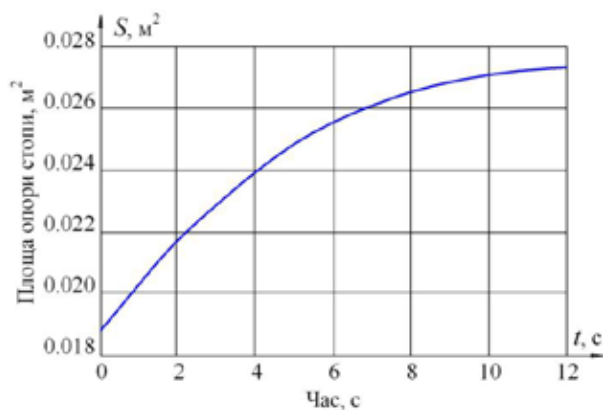


Рис. 7. Графік зміни площі опори стопи робота

На рис. 8 представлені графіки зміни питомого тиску на ґрунт, які отримані на підставі залежності (14) для різних мас робота:  $m = 30$  кг та  $m = 40$  кг. У випадках зміни маси крокуючого робота аналогічні графіки можуть бути отримані на підставі функціональної залежності (14), наведеної вище.

З цих графіків стає очевидним, що питомий тиск на ґрунт з часом зменшується завдяки збільшенню площі опори ступні робота. Це доводить доцільність регулювання площі опори ступні при

переході крокуючого робота на сипкі або пухкі ґрунти. Зрештою зменшення питомого тиску на ґрунт сприяє підвищенню стійкості крокуючого робота, що й вимагалось довести.

У запропонованій конструкції ступні робота між пальцями ступні встановлені гофровані перетинки з полівінілхлориду. Цей матеріал не є єдиним, можливо використовувати інші еластичні матеріали для перетинок між пальцями ступні. Важливо, щоб новий матеріал перетинок задовольняв умові міцності для унеможливлення руйнування еластичних перетинок між пальцями ступні. При цьому бажано, щоб межа міцності матеріалу еластичних перетинок при розтягуванні була не меншою  $4 \cdot 10^7 \dots 7 \cdot 10^7$  Па, а модуль пружності Юнга був у межах  $E = (2,6 \cdot 10^9 \dots 4,0 \cdot 10^9)$  Па. У цій статті товщина матеріалу перетинків та розміри гофрів прийняті для робіт масою до 50 кг, для робіт більшої маси рекомендується збільшити ці параметри. При цьому зазначені вище формули залишаються справедливими для розрахунку параметрів ступні.

**Висновки.** У цій статті авторами запропоновано принципово нову конструкцію ступні крокуючого робота, основною відмінністю якої є здатність змінювати площу опори ступні при зміні щільності ґрунту, яким переміщається робот. Ця властивість досягається за рахунок виконання ступні ноги робота у вигляді пальців з приводом їхнього повороту та наявності між пальцями ступні гофрованих еластичних перетинок. Позитивний ефект полягає в тому, що при збільшенні площі контакту ступні з ґрунтом зменшується питомий тиск робота на м'який ґрунт або сипу-

чий ґрунт, наприклад, такий як пісок, сніг, м'які ґрунти тощо. Також вперше в ступні застосовані датчики занурення ступні в м'який ґрунт. За сигналами цих датчиків надається можливим своєчасне збільшення площі контакту ступні для виключення втрати стійкості крокуючого робота.

Запропонована методика розрахунку параметрів ступні включає розрахунки розмірів, кінематичних характеристик та умов міцності ступні. Ця нова методика синтезу ступні дозволить дослідникам та інженерам, які працюють у галузі робототехніки, створювати аналогічні конструкції ніг крокуючих роботів. Діаграми зміни кінематич-

них характеристик, а також зміни площі контакту ступні з ґрунтом та питомого тиску на ґрунт, надають можливість моделювання нових аналогічних конструкцій ніг роботів.

В остаточному підсумку результати досліджень сприяють стабілізації руху мобільних роботів поверхнею довільної топології. Основним результатом цих досліджень є підвищення стійкості крокуючого робота за рахунок своєчасного збільшення площі контакту ступні з ґрунтом і, як наслідок, зниження питомого тиску робота на сипкі або м'які ґрунти, якими рухається крокуючий робот.

### Список літератури:

1. Sujana Warnakulasooriya, Amin Bagheria, Nathan Sherburn, Madhavan Shanmugavel. Bipedal Walking Robot – A Developmental Design. International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors 2012 (IRIS2012). Procedia Engineering 41 (2012) 1016–1021.
2. A. Roennau, G. Heppner, L. Pfozter, R. Dillmann. Foot Design Evaluation for a Six-Legged Walking Robot. Conference Paper September 2012, pp. 7–9. DOI: 10.1142/9789814415958\_0066.
3. Lei Zhang, Xinzhi Liu, Ping Ren, Zenghui Gao and Ang Li. Design and Research of a Flexible Foot for a Multi-Foot Bionic Robot. Appl. Sci. 2019, 9, 3451; p. 19; doi:10.3390/app9173451
4. Briskin E.S., Chernyshev V.V. Modeling the dynamics of changing the stops of walking machines. “Artificial Intelligence” 3’2009; pp. 2–9.
5. Krzysztof Walas. Foot design for a hexapod walking robot. Pomiary Automatyka Robotyka No 2/2013, pp. 3–5.
6. L.B. Xian and M. Xie. Design of Human-Like Leg-Foot for Human-Assisted Biped Walking. ICIRA 2008, Part I, LNAI 5314, pp. 520–527, 2008.
7. Edapin E.N. Walking robot: Patent RU 2043915 Int. Cl. B25J 11/00. Filed: 09/07/1992; date of patent 09/20/1995.
8. Miyazaki Susumu, Takahashi Hideaki. Leg design of a robot moving on legs: Patent RU 2241595 Int. Cl. B25J 5/00. Filed 11/16/2001; date of patent 12/10/2004. Bull. No. 34.
9. Byoung-Ho Kim. Work Analysis of Compliant Leg Mechanisms for Bipedal Walking Robots. International journal advanced robotic systems, 2013, Vol. 10, 334: 2013.
10. Thomas W. Secord, H. Harry Asada. A Humanoid Foot with Polypyrrole Conducting Polymer Artificial Muscles for Energy Dissipation and Storage. 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Roma, Italy, 10–14 April 2007; pp. 2904–2909.
11. Yucong Wu, Yang Pan, Xiaokun Leng and Zhicheng He. Kid-size robot humanoid walking with heel-contact and toe-off motion. (2022), PeerJ Computer science, DOI 10.7717/peerj-cs.797. P. 21.
12. Ilija Stevanović, Boško Rašuo. Development Of a Miniature Robot Based on Experience Inspired by Nature. FME Transactions. Volume 45, 1, 2017. pp. 189–191.
13. Shigeo Takizawa, Fujisawa. Caster for robot filed: Patent US 2002/0088083 Int. Cl. A47B 91/00. Mar. 8, 2002; date of patent: Jul. 11, 2002.
14. Toru Takenaka, Saitama, Keizo Matsumoto, Saitama, et al. Leg type mobile robot: Patent US 2006/02493 Int. Cl. B62D 51/06; filed: Apr. 28, 2005; date of patent: Nov. 9, 2006.
15. Tsung-Yuan Chen, Shunsuke Shigaki & Koh Hosoda. Bevel-gear mechanical foot: a bioinspired robotic foot compensating yaw moment of bipedal walking. Advanced robotics, 2022, Vol. 36, No. 13, 631–640. <https://doi.org/10.1080/01691864.2021.2017343>
16. Martijn Wisse, Daan G.E. Hobbelen, Remco J.J. Rottevel, et al. Ankle springs instead of arc-shaped feet for passive dynamic walkers. HUMANOIDS’06, 2006 IEEE, pp. 110–116.
17. Chernousko F.L., Bolotnik N.N., Gradetsky V.G., et al. Foot for a walking space microrobot: Patent RU 2675327 Int. Cl. B25J 5/00. Filed: 11/17/2017; date of patent 12/18/2018. Bull. No. 35.
18. M. Polishchuk, M. Tkach, A. Stenin. Anthropomorphic Walking Robot: Design and Simulation. FME Transactions. VOL. 50, No 4, 2022, pp. 724–731, doi: 10.5937/fme2204724P
19. Khusainov R.R. Motion control system for a bipedal walking robot. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Kazan, 2018, pp. 22–30.

20. Austen Ya., Formalskiy AM, Chevallro K. Virtual four-legged robot: design, control, modeling, experiments. Fundamental and applied mathematics, 2005, volume 11, no. 8, p. 5–28.
21. Mihailo Lazarević. Optimal Control of Redundant Robots in Human-Like Fashion. FME Transactions, 2005, Vol. 33(2), pp. 53–64.
22. Поліщук М.М., Ткач М.М. Ступня ноги крокуючого мобільного робота: зареєстрована заявка на винахід України № а202303026; МПК В62 D57/02, заявлено 22.06.2023, УКРНОІБІ, 2023, с. 8.

**Polishchuk M.M., Tkach M.M. MODIFICATION OF THE FOOT OF A WALKING MOBILE ROBOT**

*One of the problems of operating walking robots, in particular anthropomorphic structures, is to ensure their stability when moving on surfaces with different physical and mechanical characteristics. The dominant factors influencing the stability of a walking robot are the speed and acceleration of its movement, the mass of the robot, including the payload, the position of the center of gravity, as well as the specific pressure on the ground on which the robot moves. The fundamentally new design of the foot of a walking robot proposed in the article allows regulating the specific pressure on the ground by changing the area of the supporting surface of the robot. When a walking robot moves from a hard surface to loose soils, such as sand, snow, soft marshy soils and others, the new design of the foot allows automatically increasing the support area and thereby reducing the specific pressure on the ground, and, consequently, increasing the stability of the robot. And, conversely, when a mobile robot moves from soft ground to a hard surface, it is desirable to reduce the area of the supporting surface of the robot to increase its speed. This change in the robot's movement mode is achieved by equipping the feet of its legs with inductive sensors that monitor the depth of the walking robot's penetration into loose soil. Moreover, each leg of the robot is equipped with these sensors, which provides an additional advantage, namely, maintaining stability of movement at different specific pressures on the legs of the walking robot. Automatic adjustment of the robot's specific pressure on the ground allows the walking robot's stability to be adapted to the various topologies of the surfaces on which the robot moves. As part of these studies, analytical dependencies were obtained for calculating the parameters of the new foot of the walking robot, namely the magnitude of the toe movements, their speed, the variable support area of the foot, the specific pressure on the ground and the strength of the elastic elements of the robot's foot.*

*Graphic dependencies of these parameters are also provided in the form of diagrams that will help researchers and engineers create similar structures with variable pressure on the ground. The main motivation for these studies was to increase the stability of the walking robot by regulating the specific pressure on various soils on which the mobile robot can move.*

**Key words:** mobile robots, walking mechanisms, anthropomorphic structures, pedipulators, robot stability.