

Платов І.М.

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

Павловська Ю.О.

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ КРОКУЮЧОГО ГЕКСАПОДА ВІД ТРАЄКТОРІЇ РУХУ КІНЦІВОК В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Стаття присвячена вдосконаленню системи керування рухом крокуючого робота гексапода за рахунок оптимізації споживання енергії при різних рухах кінцівок.

Високомобільні крокуючі роботи можуть рухатись як в горизонтальній площині так і в вертикальній, з врахуванням того, що алгоритмічно такі рухи суттєво не відрізняються, крім ступеня навантаженості серводвигунів і їхнього енергоспоживання, тому в статті розглядається споживання серводвигунів саме при вертикальному русі гексапода як найбільш екстремального режиму роботи.

На основі проведеного аналізу зроблено висновок, що для практичного впровадження запропонованих методик і алгоритмів потрібен комплексний підхід, який забезпечить створення адаптивного та енергоефективного алгоритму управління рухом гексапода в умовах невизначеності.

Для розробки такого алгоритму керування було створено математичну модель, яка враховує особливості вертикального руху гексапода, проведено моделювання та розрахунок енерговитрат при різних траєкторіях руху кінцівок та різних режимах ходи. Досліджено енергоефективність для найбільш поширених типів ходи гексаподів: трипедальної, біпедальної та хвильової. При цьому запропоновано використовувати дві моделі генерації траєкторій руху кінцівки для кращої адаптивності та універсалізації алгоритму керування: дуга еліпса та циклоїда. У відповідності до отриманих результатів моделювання в середовищі MATLAB було встановлено, що максимальну енергоефективність при вертикальному підйомі гексапода має трипедальна хода, однак вона найменш стійка для вертикального руху за рахунок сил тертя кінцівок та поверхні. Натомість хвильова хода має найбільше енергоспоживання та найменшу швидкість, проте є більш стійкою. Біпедальна хода має оптимальне відношення енергоспоживання до стійкості.

Запропоновано та обґрунтовано використання модифікованого алгоритму керування рухом кінцівок з перемиканням типу траєкторії та ходи, залежно від зміни умов навколишнього середовища для підвищення енергоефективності системи вцілому.

Ключові слова: моделювання, енергоспоживання, хода, траєкторія, робот, гексапод, кінематика, кінцівка, невизначені умови, MATLAB.

Постановка проблеми. Крокуючі роботи, на відміну від колісних або гусеничних машин, мають кращу прохідність та маневреність на нерівних поверхнях за рахунок більшого кліренсу [1]. Шестиногі крокуючі роботи (гексаподи) є найбільш оптимальним конструктивним рішенням, яке зберігає баланс між енергоспоживанням та стійкістю, порівняно з октоподами, або квадроподами. Також гексаподи мають досить велику кількість потенційних варіацій ходи, що дає можливість реалізувати широкий діапазон керування. Але незважаючи на ці переваги, крокуючі роботи мають суттєво більше енергоспоживання, порівняно з колісними/гусеничними роботами.

Зазвичай в колісному транспорті застосовують один (або декілька, у випадку, коли двигун безпосередньо зв'язаний з колесом) двигун на вісь та механічну систему передачі обертового моменту до коліс [2]. Крокуючі роботи мають по декілька двигунів на кінцівку, при цьому для реалізації ходи треба щонайменше дві ступені свободи, тому сумарно гексапод має містити як мінімум 12 двигунів, відповідно його маса та габарити значно збільшуються [3]. Проте, при такій кількості ступенів свободи гексапод стає менш мобільним, втрачається можливість виконувати складні рухи та зменшується швидкість пересування, тому рекомендована кількість ступенів свободи на кін-

цівку – три, що відповідає 18 серводвигунам на конструкцію. Варто зауважити, що чим більше ступенів свободи реалізовано для кожної кінцівки, тим більший діапазон керування та ступінь адаптивності, але це збільшує кількість двигунів (масу конструкції) і енергоспоживання, відповідно.

Автономний рух крокуючих роботів – це досить складна задача, яка вимагає ретельних досліджень та налаштувань, перш ніж роботів можна буде використовувати для вирішення реальних задач. Головною задачею є керування кінцівками, оскільки вони є рушіями платформи, на якій може бути розташоване корисне навантаження або робочий інструмент. Тому для якісного функціонування гексапода в реальних умовах, необхідні різноманітні методи керування ходом, з урахуванням енергоефективності.

Наразі існують роботи, присвячені дослідженню енергоспоживання для різних типів ходи та для різних умов застосування гексаподів. Проте ці дослідження спрямовані, перш за все, на ходу в горизонтальній площині або по нерівній поверхні [4–7]. Слід зазначити, що алгоритмічно рух в горизонтальній чи вертикальній площині підпорядкований одним і тим самим принципам, проте підйом вгору напряму пов'язаний із збільшенням навантаження на елементи конструкції і відповідно збільшенням споживання енергії. Тому далі в статті буде розглядатись саме вертикальний рух робота в режимі підйому, хоча всі запропоновані алгоритми будуть актуальні і для руху в горизонтальній площині.

Останні розробки показали, що можливо реалізувати підйом робота між двома стінами та його утримання за рахунок сил тертя між кінцівками та поверхнею [8]. Це перспективний та недостатньо досліджений напрямок, котрий значно розширює спектр задач, що може вирішувати робот.

Тому дана робота буде присвячена питанню підвищення енергоефективності крокуючих гексаподів при різних типах ходи і видах рухів кінцівок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема енергоефективності завжди обмежувала широке застосування крокуючих роботів, тому дослідники даного аспекту намагались оптимізувати енергоспоживання без переробки системи живлення, базуючись на аналізі параметрів та типів ходи. В результаті даному питанню було присвячено багато робіт, з яких можна виділити [4], де були проведені експерименти з різними типами ходи та швидкостями з навантаженнями 1.16 та 2.9 кг. Енергоефективність ходи підбира-

лася за діаграмою енергоспоживання, також був розроблений алгоритм руху для мінімізації енергоспоживання. Результати досліджень показали, що пульсуюча (ripple) та тетрапедальна (tetrapod) типи ходи не є енергоефективними. Дослідники акцентують увагу, що варто застосовувати хвильову ходу для малих швидкостей, та трипедальну для більших швидкостей. Використовуючи алгоритм перемикання типу ходи під час руху, вдалося знизити енергоспоживання на приблизно 7.7–21%.

В роботі [5] розглядається вплив висоти підйому кінцівки та вплив висоти платформи на енергоспоживання. Використовувались трипедальна, тетрапедальна та хвильова типи ходи. Для експериментів було обрано п'ять різних значень висоти платформи та підйому кінцівки. Споживання енергії розраховувались для переміщення на відстань 10 м. Результати показали, що енергоспоживання не залежить від висоти платформи або ходи, але залежить від висоти підйому кінцівки. Автори стверджують, що найменш ефективною ходом є хвильова, а найефективнішою є трипедальна, обґрунтовуючи це тим, що при хвильовій ході приводи мають найбільшу швидкість, а при трипедальній – найменшу.

Автори в статті [7] провели дослідження енергоефективності для трипедальної ходи по горизонтальній поверхні з перешкодами. Траєкторія кінцівки була сформована як половина дуги синусоїди. Оцінка енергоспоживання проводилася при різних значеннях висоти та довжини кроку кінцівки. Запропонований метод заснований на зміні конфігурації траєкторії руху кінцівки для оминання перешкод на місцевостях різної складності. Експериментальні дослідження показали, що запропонована методика дозволяє знизити середнє енергоспоживання більш ніж на 17%.

Постановка завдання. Аналіз останніх досліджень і відповідних публікацій показав актуальність проблеми оптимізації енергоспоживання крокуючих роботів у різних умовах їх функціонування. Проте, водночас, відсутні дослідження енергоспоживання гексаподів при підйомі та утриманні між двома стінами за рахунок сил тертя кінцівок і поверхні.

Тому метою статті є необхідність вдосконалення та адаптації існуючих систем керування гексаподом, які забезпечать максимальну енергоефективність і час функціонування, при використанні різних типів ходи під час вертикального руху як найбільш екстремального режиму роботи.

Виклад основного матеріалу. За основу розрахунку споживання енергії візьмемо попередньо

розроблену в [9] кінематичну схему для однієї кінцівки, загальна схема розташування серводвигунів на прямокутному корпусі та спрощена кінематика наведена на рисунку 1, де L_{1-3} – довжини ланок; J_{1-3} – суглоби; L_{I-III} – номери кінцівок з лівої сторони платформи, R_{I-III} – номери кінцівок з правої сторони платформи, S_{I-III} – номери серводвигунів.

Оскільки кінцівки розташовані симетрично та мають однакові параметри, для спрощення подальших обрахунків надалі будемо наводити вирази лише для однієї кінцівки. Згідно наведеної кінематичної схеми, координати стопи матимуть вигляд (1):

$$\begin{aligned} x &= -\cos(\alpha) * (l_1 + l_3 * \cos(\beta + \gamma) + l_2 * \cos(\beta)) \\ y &= \sin(\alpha) * (l_1 + l_3 * \cos(\beta + \gamma) + l_2 * \cos(\beta)) \\ z &= -l_3 * \sin(\beta + \gamma) - l_2 * \sin(\beta) \end{aligned} \quad (1)$$

де α, β, γ – кути повороту суглобів J_{1-3} ; l_1-3 – довжини ланок кінцівки.

Рівняння (1) вирішують пряму задачу кінематики. Для вирішення зворотної задачі був застосований ітераційний метод Ньютона-Рафсона [10]. При застосуванні ітераційного підходу обрахунки потребують більшу кількість обчислень тригонометричних функцій, порівняно з геометричним методом, що може бути критичним для деяких малопотужних обчислювальних ядер. Але при цьому модифікація конструкції не впливає на зберігається можливість легкої адаптації, оскільки даний метод не має прив'язки до конкретної кінематичної схеми, на відміну від геометричного підходу, який пропонується в роботі [11], тобто достатньо отримати вирази для прямої задачі кінематики будь-яким методом [12].

Метод Ньютона-Рафсона є розширенням метода Ньютона для багатовимірних нелінійних рівнянь (2):

$$x^{k+1} = x^k - J(x^k)^{-1} F(x^k) \quad (2)$$

де $F(x^k)$ – вектор рівнянь координат (1); $J(x^k)$ – Якобіан.

Якобіан $J(x^k)$ для (1) матиме вигляд (3):

$$J(x^k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial F1}{\partial \alpha} & \frac{\partial F1}{\partial \beta} & \frac{\partial F1}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial F2}{\partial \alpha} & \frac{\partial F2}{\partial \beta} & \frac{\partial F2}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial F3}{\partial \alpha} & \frac{\partial F3}{\partial \beta} & \frac{\partial F3}{\partial \gamma} \end{bmatrix} \quad (3)$$

де $F1-3$ – це x, y, z з виразу (1).

Умовою завершення роботи ітераційного методу є досягнення певного порогу похибки, яка визначається як $\epsilon = x^k - x^{k+1}$.

В результаті, підставивши вирази (1) в (3) та (2), отримуємо кути, на які потрібно повертати суглоби для переносу кінцівки в нові бажані положення. Ці положення визначаються траєкторією руху кінцівки. Для побудови траєкторії зазвичай застосовують циклічні функції або поліноми, оскільки хода гексапода в загальному випадку є шаблоною [13, 14].

Для генерації траєкторії використаємо прості функції, а саме циклоїду та дугу еліпса. Циклоїда визначається параметрично рівняннями (4):

$$\begin{aligned} x &= rt - r \sin(t) \\ y &= r - r \cos(t) \end{aligned} \quad (4)$$

Дана функція має період $2\pi r$, де r – радіус фіксованої точки кола. Тому її зручно використовувати для побудови траєкторії руху кінцівки, оскільки варіюючи лише одним параметром r можна змінювати як висоту підйому кінцівки, так і відстань переносу в нове положення. Довжина арки циклоїди дорівнює $8r$.

З іншого боку перевага генерації траєкторії циклоїдою є недоліком, оскільки не в усіх випадках потрібно масштабувати одразу довжину та висоту

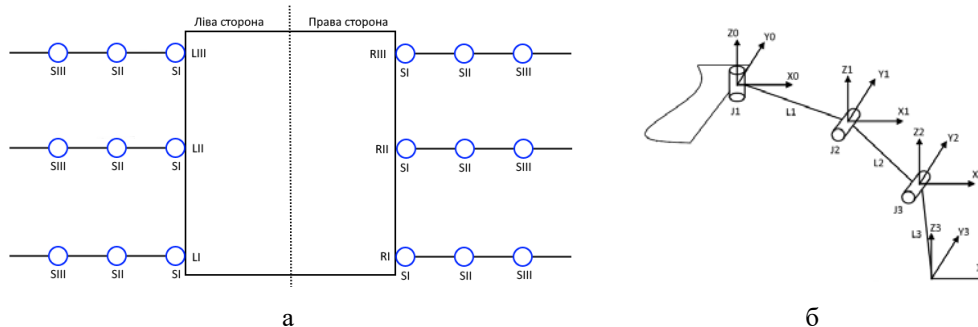


Рис. 1. а – умовне позначення кінцівок гексапода; б – системи координат суглобів кінцівки

дуги, особливо з урахуванням енергоспоживання. Тому іншим підходом є використання еліпса, параметричні рівняння якого мають вигляд (5):

$$\begin{aligned} x &= a \cdot \cos(t) \\ y &= b \cdot \sin(t) \end{aligned} \quad (5)$$

В даному випадку для налаштування використовуються два параметри a , b – велика та мала піввісі. Параметр t лежить в межах $0 \leq t \leq 2\pi$. Для генерації траєкторії будемо використовувати дугу еліпса, яка знаходиться в межах двох квадрантів площини: $\frac{\pi}{2} \leq t \leq \frac{3\pi}{2}$. Довжина дуги еліпса визначається вираженням інтегралу:

$$a \int_{t_0}^{t_2} \sqrt{1 - e^2 \cos^2(t)} dt,$$

де e – ексцентриситет.

Як було зазначено в роботах [15, 16], найбільш розповсюдженими типами ходи для гексаподів є: трипедальна, біпедальна та послідовна (або хвильова). В першому випадку три кінцівки знаходяться в стані переносу, а інші три знаходяться в контакті з поверхнею, рисунок 2. В другому випадку – дві в стані переносу, інші чотири в контакті з поверхнею, рисунок 3. В останньому випадку лише одна знаходиться в стані переносу, рисунок 4.

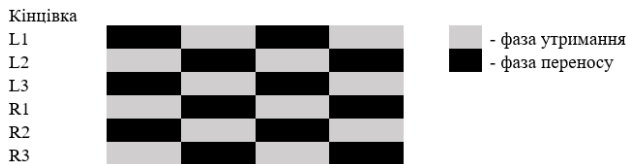


Рис. 2. Фази трипедальної ходи

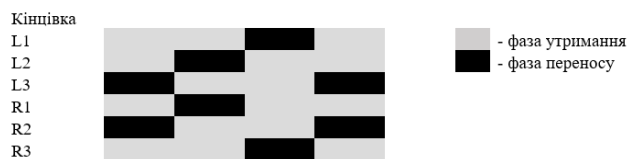


Рис. 3. Фази біпедальної ходи

На відміну від пересування по горизонтальній поверхні, вертикальний підйом потребує обрхунку сил, що діють на всі елементи конструкції. При цьому часто сили оцінюють як статично невизначені. Такий підхід доцільний, якщо вважати, що конструкція та поверхня не є абсолютно жорсткими, а деформаціями, які виникають внаслідок взаємодії кінцівки і поверхні (а також сили реакції в суглобах), не можна знехтувати. В даному випадку ми розглядатимемо сили як статично визначені, оскільки серводвигуни які застосовувались для побудови макету не в змозі розвивати достатній момент, щоб істотно дефор-

мувати конструкцію робота, або поверхні, між якими встановлюється контакт, тобто між кінцівками та стінами.



Рис. 4. Фази хвильової ходи

В попередній роботі [17] ми визначили сили, що діють на стіни та, відповідно, реакції у вигляді горизонтальної та вертикальної складової. Для руху кінцівок застосовувались серводвигуни MG995 з обертовим моментом 0.98 Н*м, швидкість обертання становить 5.2 рад/с, робоча номінальна напруга 6 В. Для оцінки енергоспоживання для різних траєкторій руху кінцівок були проведені заміри струму серводвигунів, з урахуванням визначених сил притискання, результати наведені в таблиці 1. При цьому варто зазначити, що при підйомі робота були задіяні лише S_{II-III} серводвигуни, як позначено на рисунку 1 а, т. я. S_I обертають кінцівки в горизонтальній площині, тобто на них не діють моменти, що виникають внаслідок реакції опори (стіни) – споживання цих приводів в режимі холостого ходу.

Таблиця 1

Струм споживання серводвигунів при вертикальному підйомі

№ Серводвигуна	Режим роботи	Струм споживання, А
S_I	Холостий хід	0.11
S_{II}	Фаза переносу/утримання	0.13/0.9
S_{III}	Фаза переносу/утримання	0.12/0.9

Різні значення струму для S_{II-III} пояснюються різним навантаженням (довжини ланок) на приводи в стані переносу. Визначимо час різних фаз руху кінцівки. Для цього проведемо моделювання та побудуємо графіки траєкторій в середовищі MATLAB. Заначимо, що загальні габарити робота становлять 0.252x0.665 м (з повністю випрямленими кінцівками), маса конструкції без корисного навантаження становить 2.12 кг. Довжини ланок кінцівки: $l_1 = l_2 = 0.066$ м, $l_3 = 0.113$ м. Початкові кути кожного суглоба $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 60^\circ$, $\gamma = 70^\circ$.

На рисунку 5 позначена циклоїдальна траєкторія та зміни кутів суглобів від початкового до нового положення, радіус $r = 0.01$ м.

При такій конфігурації кінцівка піднімається в гору приблизно на 2 см та переміщується на 6 і займає нове положення.

Для спрощення оцінки енергоспоживання, визначимо середнє значення модуля швидкості, яке для даного випадку становить 1.18 м/с. Таким чином порахувати час переносу від початкового до нового положення можна за формулою:

$$t1 = t0 + \frac{S}{V} \quad (6)$$

Довжина дуги циклоїди $S = 0.08$ м, вважаємо, що $t0 = 0$ с, отже $t1 = 0.06$ с. Відповідно, фаза переносу однієї кінцівки при циклоїдальній траєкторії руху становить 0.06 с.

Порахуємо час переносу для еліпсоїдальної траєкторії. На рисунку 7 позначена еліпсоїдальна траєкторія.

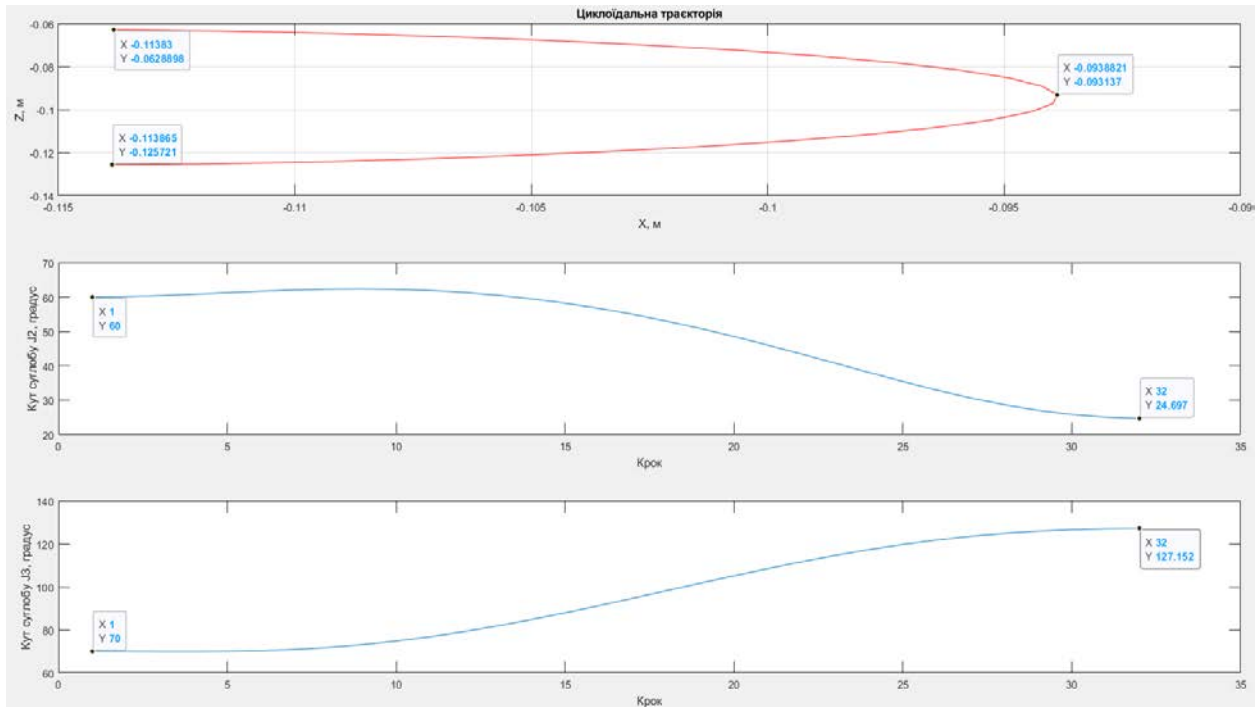


Рис. 5. Циклоїдальна траєкторія руху кінцівки

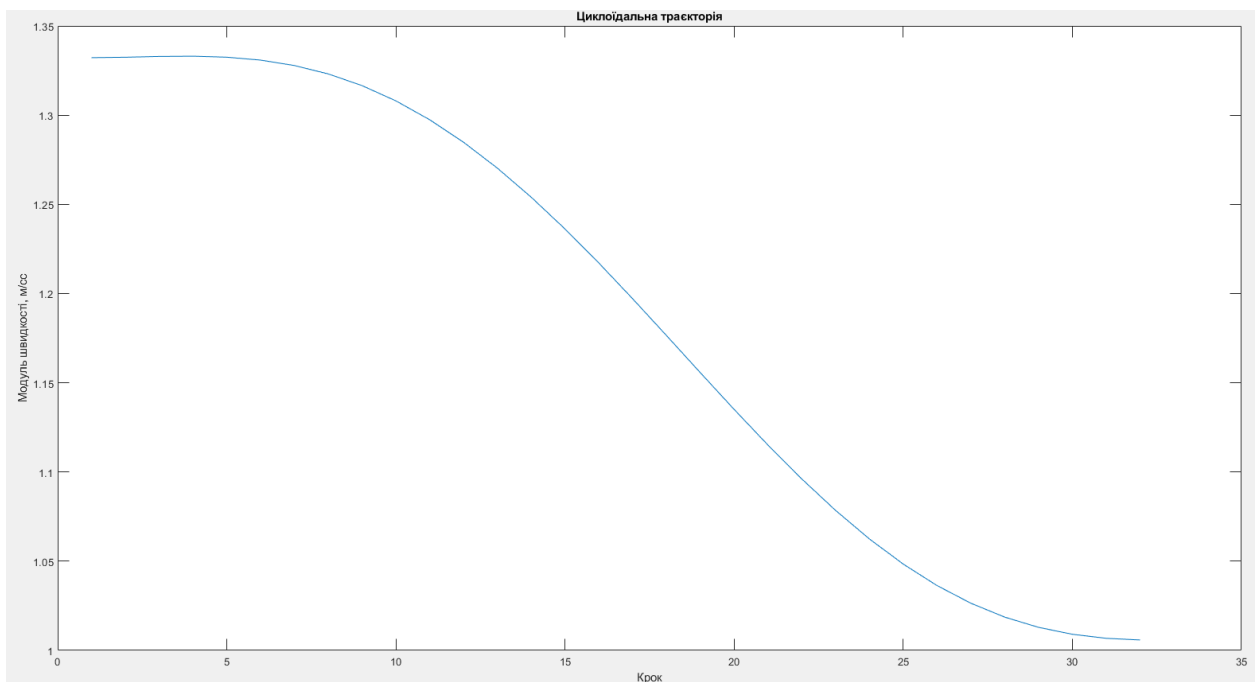


Рис. 6. Модуль швидкості кінцівки при циклоїдальній траєкторії руху

екторія руху кінцівки та кути обертання суглобів. Значення великої та малої піввісі: $a = 0.05$; $b = 0.01$.

Графік модуля швидкості показано на рисунку 8. Даний варіант траєкторії дозволяє відривати кінцівку від поверхні приблизно на 5 см, і переносити її на 2 см вгору. Довжина дуги еліпса в даному випадку становить 0.105 м, а середнє значення

модуля швидкості 1.4 м/с. Для розрахунку часу фази переносу також скористаємося формулою (6). В результаті отримуємо: $t_1 = 0.075$ с.

Знаючи час фази переносу кінцівки, можна розрахувати енергоспоживання для трипедальної, біпедальної та хвильової ходи. Для цього скористаємося формулою обрахунку повної споживаної потужності (7).

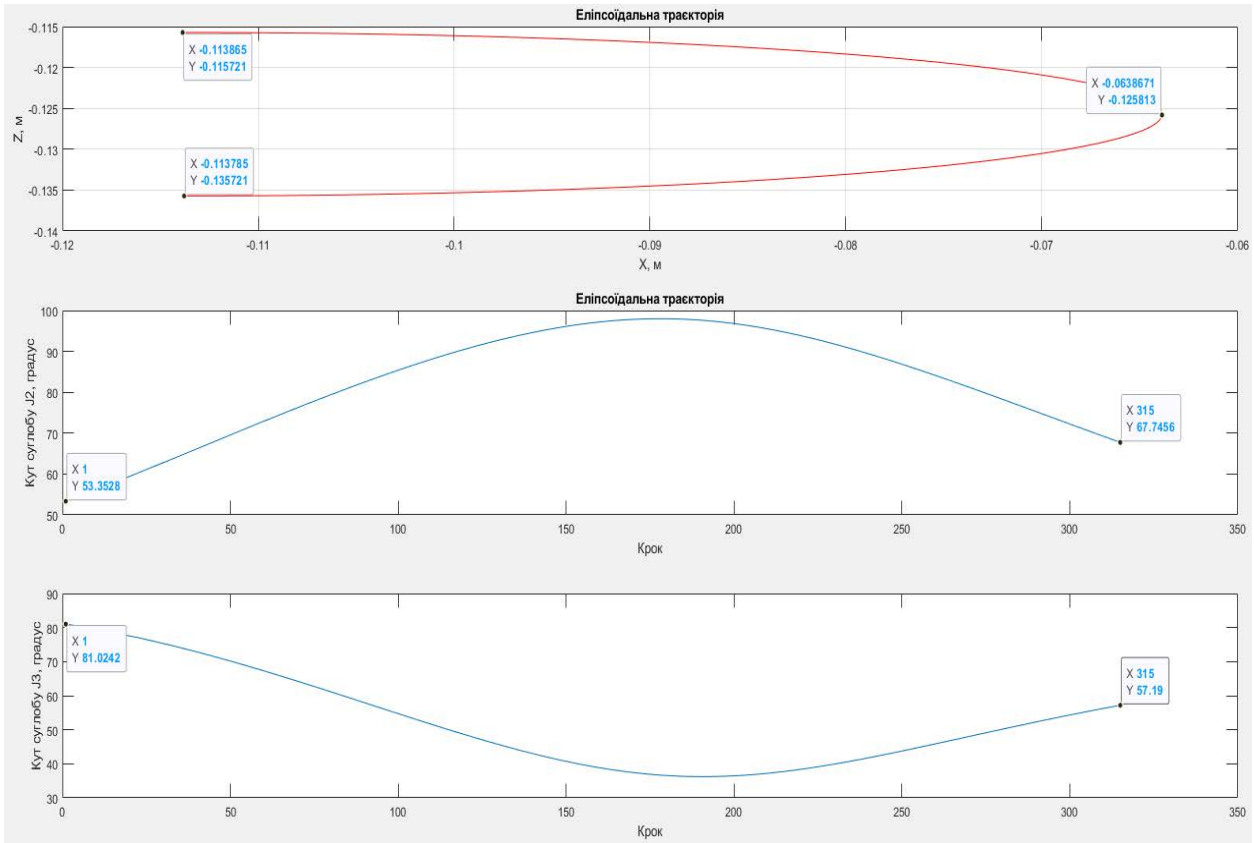


Рис. 7. Еліпсоїдальна траєкторія руху кінцівки

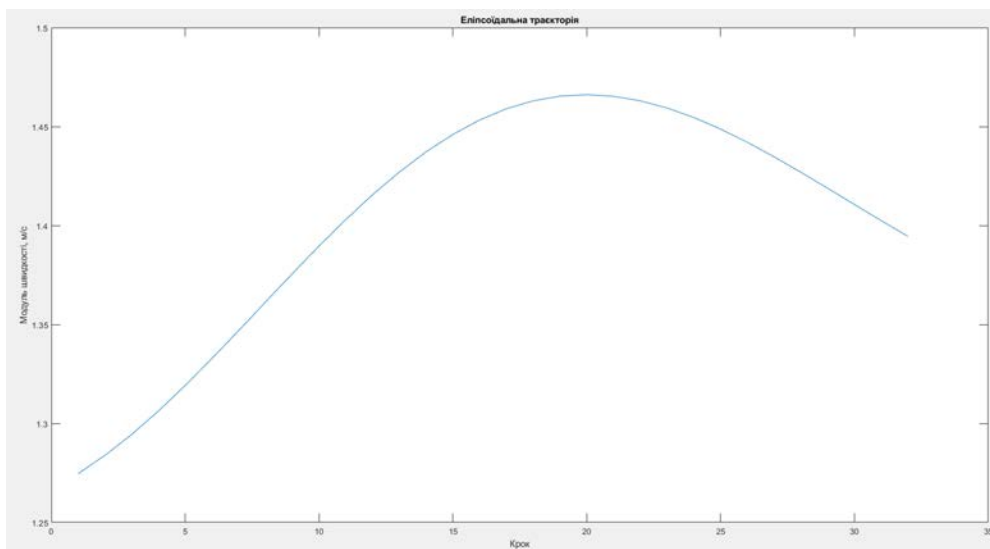


Рис. 8. Модуль швидкості кінцівки при еліпсоїдальній траєкторії руху

$$P = P_{ум} + P_{пер} \quad (7)$$

де $P_{ум}$ – потужність, споживана при утриманні кінцівки; $P_{пер}$ – потужність, споживана при переносі кінцівки.

Для трьох, зазначених раніше, типів ходи, з урахуванням значень струму з таблиці 1, розраховуємо споживану енергію для повного циклу підйому за формулою (8).

$$E = P * t \quad (8)$$

Результати наведені в таблиці 2.

Таблиця 2
Результати енергоспоживання для одного повного циклу ходи

Траєкторія	Е, Вт*год		
	Хода		
	Трипедальна	Біпедальна	Хвильова
Циклоїдальна	0.0061	0.0133	0.0497
Еліпсоїдальна	0.0076	0.016	0.062

Припустимо, що гексапод робить 10 кроків за хвилину хвильовою ходою з еліпсоїдальною траєкторією: $0.062 * 10 = 0.62$ Вт*хв. З урахуванням ємності акумулятора, що становить 10 А*г та напрузі 3.7В отримаємо ємність 37Вт*год. За годину роботи споживання буде $0.62 * 60 = 37.2$ Вт*год, тобто час роботи від даного акумулятора із еліпсоїдальною траєкторією і хвильовою ходою за умови використання розробленої системи живлення, яка описана в роботі [17], становитиме приблизно 1 годину, для трипедальної ходи, час роботи збільшується до 8 годин.

Отримані результати свідчать про те, що найбільш енергоефективна хода – трипедальна, проте для вертикального підйому така хода має найменшу кількість точок опори, що може призвести до втрати стійкості і падіння робота, т. я. при такій ході лише одна кінцівка має контакт з поверхнею з одного боку платформи. Хвильова хода є найстійкішою, але, водночас самою енергоспоживчою, у відповідності до наведених в Таблиці 1 розрахунків – більш ніж у 8 разів. Біпедальна – є проміжною між трипедальною і пульсуючою за значення енергоефективності, надійності та швидкості.

При русі по горизонтальній поверхні, отримані значення в таблиці 1 слід враховувати з коефіцієнтом 0.6, т. я. навантаження на серводвигуни значно менше. Проте, для обрання типу ходи, або прийняття рішення про зміну алгоритму треба оперувати не лише даними про споживання системи і швидкість переміщення, а й про рельєф поверхні, тому після проведених розрахунків пропонується

вдосконалити розроблену в роботі [18] систему керування за рахунок реалізації алгоритму перемикання ходи, залежно від стану навколишнього середовища. Блок-схема алгоритму наведена на рисунку 9.

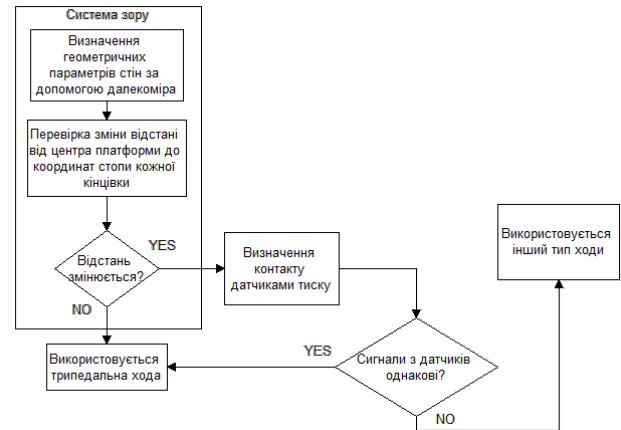


Рис. 9. Блок-схема алгоритму перемикання ходи, залежно від умов навколишнього простору

Розглянемо більш детально принцип роботи розробленого алгоритму. Датчик відстані (далекомір, лідар) вимірює відстань від координат центру платформи до координат стоп кінцівок та стін, визначених за допомогою (1). Якщо відстані незмінні, то приймається рішення про умовно рівний рельєф поверхні, тому застосовується найшвидший та найбільш енергоефективний варіант ходи – трипедальна. Якщо ж за даними далекоміра в околі координат стопи якоїсь з 6 кінцівок відбувається зміна відстані, і це підтверджується зміною показів датчиків тиску який розташований на стопі кінцівки (збільшення тиску відповідає виступаючій перешкоді, відсутність або зменшення – заглибині), то тип ходи перемикається на інший. При цьому, залежно від кількості визначених потенційно небезпечних точок, обирається або біпедальна, або хвильова хода. Кількість точок контакту у яких визначається відхилення від умовного профіля поверхні визначається експериментально в залежності від заданих початкових умов, або від інформації отриманих з інших датчиків.

Перемикання типу ходи при вертикальному підйомі гексапода може відбуватись не тільки за рахунок виявлення суттєвих нерівностей, а й при настанні позаштатної ситуації, наприклад при відмові серводвигуна або пошкодженні кінцівки [12] – алгоритм руху має бути змінений на більш стійкий, або при виході з ладу основного контура живлення (як запропоновано в [19]) при умові можливості живлення від додаткового слабко-

струмового контура, алгоритм руху слід змінити на найбільш енергоефективний, притому зменшити швидкість пересування.

Висновки. В даній роботі були проведені дослідження енергоефективності вертикального руху шестиногого крокуючого робота (гексапода). Для цього була розроблена математична модель та вирішені пряма та зворотна задачі кінематики. На базі цього був запропонований генератор траєкторії руху кінцівки як циклоїда та дуга еліпса. Таке рішення має певні переваги з точки зору адаптивності, оскільки дозволяє налаштовувати висоту та відстань переносу кінцівки в залежності від наявності перешкод та форми рельєфу поверхні. Для цих траєкторій було оцінено енергоспоживання для трипедальної, біпедальної та хвильової ходи.

Моделювання в системі MATLAB із заданими параметрами показало, що у випадку циклоїдної форми траєкторії руху, кінцівка має найменший відрив від поверхні, проте досить значну відстань переносу, а для траєкторії, що описується дугою еліпса відрив більший, проте значно менша відстань переносу. Зазначимо, що такі розрахунки актуальні і для горизонтального руху, відповідно для руху по рівній поверхні з більшою швидкістю і для руху по поверхні із перешкодами.

За заміряним струмом споживання серводвигунів в різних режимах та проведеними розрахунками було встановлено, що найбільш енерго-

витратна та повільна хода – хвильова, проте вона має більше точок контакту із поверхнею, що для вертикального підйому є доволі важливим. Найшвидша хода з мінімальним енергоспоживанням – трипедальна, проте менша кількість точок контакту робить її придатною лише при рівних поверхнях. Різниця у енергоспоживанні при трипедальній і хвильовій ході перевищує 8 раз, що суттєво зменшує час автономної роботи гексапода. Параметри споживання енергії для біпедальної ходи є проміжними між трипедальною і хвильовою. Таким чином, був розроблений адаптивний алгоритм зміни режиму ходи в залежності від показів з датчиків (відстані та тиску), що здатен визначати параметри профілю поверхні і забезпечити оптимальний режим споживання енергії.

Перемикання типу ходи при вертикальному або горизонтальному русі гексапода може відбуватись не тільки за рахунок виявлення суттєвих нерівностей, а й при настанні позаштатної ситуації – при відмові серводвигуна, пошкодженні кінцівки або при виході з ладу основного контура живлення, якщо живлення відбувається від резервного слабкострумowego джерела.

У подальшій роботі авторами буде проведено експериментальне підтвердження отриманих розрахункових значень енергоспоживання і ефективності системи керування в різних умовах на макетному зразку.

Список літератури:

1. Tedeschi F., Carbone G. Design Issues for Hexapod Walking Robots. *Robotics*. 2014. Vol. 3, no. 2. P. 181–206.
2. Song Z. et al. Design and analysis of a six-wheeled companion robot with mechanical obstacle-overcoming adaptivity. *Mechanical Sciences*. 2021. Vol. 12, no. 2. P. 1115–1136.
3. Платов І. М. Вдосконалення алгоритмів руху крокуючого робота-гексапода : магістерська дис. : 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. Київ, 2022. 102 с.
4. Luneckas M. et al. Hexapod Robot Gait Switching for Energy Consumption and Cost of Transport Management Using Heuristic Algorithms. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, no. 3. P. 1-13.
5. Luneckas M. et al. Hexapod Robot Energy Consumption Dependence on Body Elevation and Step Height. *Elektronika ir Elektrotechnika*. 2014. Vol. 20, no. 7.
6. Wang G. et al. Minimizing the Energy Consumption for a Hexapod Robot Based on Optimal Force Distribution. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 5393–5406.
7. Luneckas M. et al. Energy-efficient walking over irregular terrain: a case of hexapod robot. *Metrol. Meas. Syst.* 2019. Vol. 26No. 4, P. 645–660.
8. Shirai Y. et al. Risk-Aware Motion Planning for a Limbed Robot with Stochastic Gripping Forces Using Nonlinear Programming. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2020. Vol. 5, no. 4. P. 4994–5001.
9. Platov I. M., Pavlovskiy O. M. Justification for the control system for vertical movement of a small-sized walking robot. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2024. Том 35(74), №3. С. 187–194.
10. Newton-Raphson Method (Multivariate). *IIS Windows Server*. URL: <https://pages.hmc.edu/ruye/MachineLearning/lectures/ch2/node7.html>.
11. Lizarraga J. A. et al. Advances in the Kinematics of Hexapod Robots: An Innovative Approach to Inverse Kinematics and Omnidirectional Movement *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, no. 18. P. 8171. URL: <https://doi.org/10.3390/app14188171>.

12. Короленко Я.Р., Павловська Ю.О. Моделювання руху крокуючого робота з несправною кінцівкою у середовищі MATLAB. *Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 2024.. Том 35 (74), №5.
13. Xia H., Zhang X., Zhang H. A New Foot Trajectory Planning Method for Legged Robots and Its Application in Hexapod Robots. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, no. 19. P. 9217. URL: <https://doi.org/10.3390/app11199217>
14. Isvara Y. et al. Terrain adaptation gait algorithm in a hexapod walking robot 13th *International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV)*, (Singapore, 10–12 December 2014.) 2014.
15. Platov I., Pavlovskiy O., Pavlovskaya Y. Hexapod movement algorithms to avoid interference. angular movement. *Bulletin of Kyiv Polytechnic Institute. Series Instrument Making*. 2021. No. 62(2). P. 58–64.
16. Darbha N. H. An Optimization Strategy for Hexapod Gait Transition. 2017. URL: http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=wright1514915943875043.
17. Platov I., Pavlovskiy O., Pavlovskaya Y. Analysis of circuit solutions for choosing the converter for a walking hexapod robot. *Bulletin of Kyiv Polytechnic Institute. Series Instrument Making*. 2022. No. 63(1). P. 77–81.
18. Platov I. et al. Walking Hexapod for Demining Territory of Postwar Ukraine / International Conference of Young Professionals. *GeoTerrace-2024*. Lviv, Ukraine., 2024. P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510020>
19. Платов І. М., Павловський О. М. Гексапод для діагностики складних споруд та інженерних об'єктів. Система живлення. *Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні* : збірник праць конференції. (Київ, 08-09 грудня 2020 р.). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2020. С. 37–41.

Platov I.M., Pavlovskaya Yu.O. RESEARCH ON THE DEPENDENCE OF THE ENERGY CONSUMPTION OF A WALKING HEXAPOD ON THE TRAJECTORY OF LIMB MOTION UNDER CONDITIONS OF UNCERTAINTY

The article focuses on improving the motion control system of a hexapod walking robot by optimizing energy consumption during different limb movements.

Highly mobile walking robots can move both in the horizontal and vertical planes. Algorithmically, these movements do not differ significantly, except for the load on the servomotors and their energy consumption. Therefore, the article examines the energy consumption of servomotors specifically during the hexapod's vertical motion, as it represents the most extreme operating mode.

Based on the analysis conducted, it was concluded that the practical implementation of the proposed methods and algorithms requires a comprehensive approach. This approach should ensure the development of an adaptive and energy-efficient motion control algorithm for the hexapod under uncertain conditions.

To design such a control algorithm, a mathematical model was developed that takes into account the specific features of the hexapod's vertical movement. Simulations and energy consumption calculations were performed for various limb movement trajectories and gait modes. Energy efficiency was investigated for the most common hexapod gaits: tripod, biped, and wave. Two limb trajectory generation models were proposed to improve adaptability and generalize the control algorithm: elliptical arc and cycloid.

According to the MATLAB simulation results, the tripod gait demonstrated the highest energy efficiency during vertical climbing but was the least stable for vertical motion due to friction forces between the limbs and the surface. Conversely, the wave gait exhibited the highest energy consumption and the lowest speed but proved to be more stable. The biped gait provided an optimal balance between energy consumption and stability.

The use of a modified limb motion control algorithm was proposed and substantiated, involving the switching of trajectory types and gaits depending on changes in environmental conditions to enhance the overall energy efficiency of the system.

Key words: modeling, energy consumption, gait, trajectory, robot, hexapod, kinematics, limb, uncertain conditions, MATLAB.