



РОЗРАХУНОК КІНЕМАТИКИ ТА МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЛЕБІДКИ ПІДВІСНОГО РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА

Угольніков Г. Г.*

Аспірант

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
54007, вул. Героїв України, 9, м. Миколаїв, Україна

<https://orcid.org/0009-0003-0508-1997>

e-mail: genchik98@gmail.com

Герасін О. С.

Кандидат технічних наук, доцент

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
54007, вул. Героїв України, 9, м. Миколаїв, Україна

<https://orcid.org/0000-0001-5107-9677>

e-mail: oleksandr.gerasin@nuos.edu.ua

Анотація. Стаття присвячена вивченню конструктивних і кінематичних особливостей кабельних роботів на підвісних системах, які демонструють високу адаптивність до нерівних рельєфів та можуть ефективно працювати в умовах складного середовища. Проаналізовано основні принципи функціонування цих роботів, зокрема управління довжиною кабелів, забезпечення їх постійного натягу та контроль просторового положення рухомої платформи за допомогою тягових лебідок. Визначено, що значною перевагою підвісних роботів є можливість закріплення опор на складних рельєфах, таких як схили, нерівності чи інші нестандартні поверхні, що є актуальним для вирішення інженерних задач, пов'язаних з будівництвом, обслуговуванням інфраструктури, моніторингом або іншими технічними потребами. Особливу увагу в статті приділено побудові кінематичної моделі такого робота-маніпулятора, яка дозволяє описати взаємодію між окремими лебідками та розрахувати необхідні параметри руху за умов довільного розташування опор підвісної системи. Крім того, запропоновано математичну модель окремої тягової лебідки, оснащеної приводним двигуном постійного струму. На базі цієї моделі сформовано імітаційну модель системи керування лебідкою у середовищі Simulink, яка використовується для натягу кожного троса кабельного робота, формуючи його відповідне положення у просторі. Отримані результати показують, що запропонована модель дозволяє визначати необхідні довжини тросів для заданих просторових координат (рішення зворотної задачі кінематики) та забезпечувати їх тяговими лебідками за умов постійного навантаження. Представлена модель має значний потенціал для розширення та врахування факторів робочого середовища, що буде корисним для розроблення та удосконалення роботизованих систем кабельного типу із широким спектром застосувань.

Ключові слова: кабельний робот; маніпулятор; моделювання; кінематика; система керування; ПІД-регулятор, приводний двигун, автоматизація, інтерфейс.

Запропоноване посилання: Угольніков, Г. Г., & Герасін, О. С. (2025). Розрахунок кінематики та моделювання роботи лебідки підвісного робота-маніпулятора. *Методи та прилади контролю якості*, 1(54), 101-108. doi: 10.31471/1993-9981-2025-1(54)-101-108

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Вступ

Кабельні роботи-маніпулятори, що належать до класу паралельних роботів, відкривають нові перспективи у робототехніці завдяки своїй унікальній конструкції, яка поєднує гнучкі кабелі замість жорстких ланок. Ці роботи знаходять застосування у широкому спектрі завдань – від будівництва до логістики та виробництва. Основною перевагою таких роботів є їх здатність працювати у великих робочих зонах, висока вантажопідйомність і адаптивність до складних рельєфів.

Проте використання підвісних роботів-маніпуляторів супроводжується низкою технічних складностей. Головною проблемою є забезпечення постійного натягу кабелів і точного позиціонування рухомої платформи, що є критичним для виконання складних завдань. Ще однією складністю є необхідність адаптації систем керування до роботи на нерівних поверхнях.

Вирішення вказаних проблем доцільно розпочинати з розробки математичних та імітаційних моделей складових робота-маніпулятора та його системи керування, які дозволять на етапі попередньої розробки удосконалювати його конструкцію та керуючі алгоритми.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Підвісні кабельні роботи активно досліджуються завдяки їх унікальним характеристикам, що дозволяють вирішувати складні задачі у промисловості та наукових проектах. Вони є роботизованими маніпуляторами, що класифікуються до паралельних роботів, в яких жорсткі ланки замінені гнучкими кабелями. Підвісні роботи-маніпулятори мають високу вантажопідйомність, меншу масу і, на відміну від інших паралельних роботів, можуть мати великі робочі зони [1].

За останні два десятиліття розробниками досягнуто значного прогресу в проектуванні та впровадженні великомасштабних роботів по всьому

світу. П'ятисотметровий апертурний сферичний радіотелескоп (FAST) розроблений як великомасштабний кабельний робот для зв'язку та астрономічних досліджень [2]. Кабельна система аерофотозйомки Spidercam широко використовується на стадіонах по всьому світу [3]. У дослідженнях [4, 5] описані приклади використання кабельних роботів у виробничих процесах, де вони демонструють високу ефективність завдяки своїй адаптивності до великих робочих зон. Аналогічно побудований NU-Spidercam – аграрний підвісний робот-маніпулятор для роботи на полях [6, 7].

У роботі [8] розглянуто основні кінематичні особливості кабельних роботів, а також методи розрахунку зворотної та прямої кінематики. При цьому значна увага приділяється питанням забезпечення натягу кабелів, які є критичними для стабільності роботи таких систем.

Сучасні дослідження також акцентують увагу на розвитку систем керування. Так, у [9] керування кабельними роботами здійснюється за допомогою схеми робастного синхронізаційного керування. Попри досягнутий дослідниками прогрес, питання інтеграції підвісних роботів-маніпуляторів у складні середовища залишається недостатньо вивченим.

Мета роботи

Метою даної роботи є розробка моделі кінематики підвісного робота-маніпулятора з урахуванням нерівного рельєфу робочої поверхні та моделювання роботи його окремої ланки під керуванням ПІД-регулятора. Дослідження спрямоване на підвищення точності, стабільності та ефективності функціонування такого робота шляхом застосування системного підходу.

Основний матеріал

Типова схема підвісного робота-маніпулятора складається з рухомої платформи, що з'єднана з базовою рамою за допомогою кабелів (рис. 1). Приводні

двигуни встановлені на жорсткій рамі та приводять у рух лебідки. Кабель, намотаний на ці лебідки, спрямовується через вихідні точки з блок-роликами, які розташовані на рамі, до точок кріплення на рухомій платформі. Змінюючи довжину кабелів, можна досягти бажаного положення та орієнтації рухомої платформи [10].

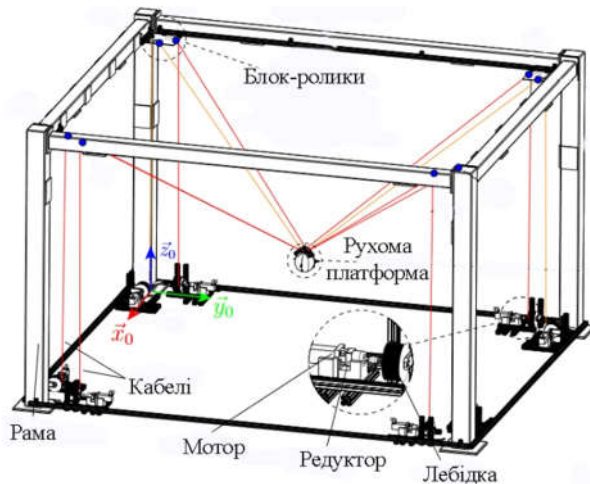


Рисунок 1 – Типова схема роботи на підвісній системі

Основний принцип роботи кабельного робота полягає в тому, що рухома платформа переміщується двигунами-лебідками через кабелі, які змінюють довжину і підтримують натяг. Необхідною умовою для роботи є те, що кабелі завжди повинні підтримувати натяг, оскільки кабелі можуть лише тягнути, а не штовхати [8].

Кінематика кабельних роботів

Першою проблемою, яку необхідно вирішити для керування підвісним роботом, є обернена кінематика положення (ОКП) [4]. Задача ОКП полягає у визначенні активних довжин кабелів за відомим бажаним положенням рухомої платформи (рис. 2). Рівняння для розрахунку довжини кабелю:

$$L_i = \sqrt{(X_{Bi} - X_{Ai})^2 + (Y_{Bi} - Y_{Ai})^2 + (Z_{Bi} - Z_{Ai})^2}, (1)$$

де L_i – довжина i -го кабелю, $i = 1..N$, N – кількість кабелів; (X_{Ai}, Y_{Ai}, Z_{Ai}) – координати кріплення на рамі;

(X_{Bi}, Y_{Bi}, Z_{Bi}) – координати кріплення на рухомій платформі.

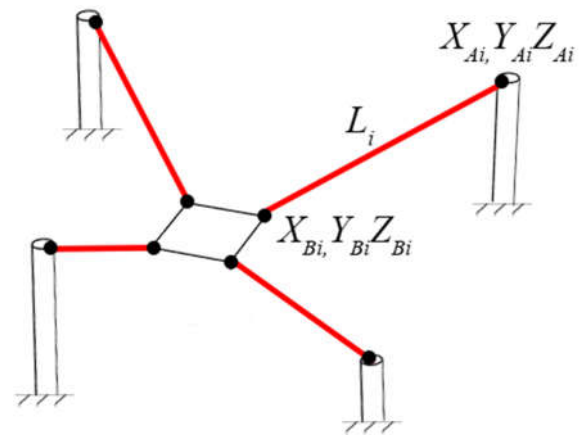


Рисунок 2 – Схема для розрахунку активних довжин кабелів

На основі рівняння (1) розроблена програма оберненої кінематики у MatLab [11] для розрахунку довжини кабелів і візуалізації їх у 3D-виді для підвісного робота на 8 кабелях (рис. 3). Програма дозволяє задавати будь-яке положення опор, змінювати розмір рухомої платформи, задавати координати кінцевого положення рухомої платформи. Завдяки отриманій візуалізації підтверджено можливість розташування рами робота на нерівній поверхні, а також така кінематика підвісного робота не потребує симетричного встановлення опор рами: достатньо тільки знати їх точні координати. Тому такі маніпулятори можна розташовувати на складних рельєфах, гірській місцевості, полях, озерах, що є їх значною перевагою.

Моделювання лебідки з керуванням за положенням та швидкістю

Однією з сучасних систем керування маніпулятором є система сервопривода з двигуном постійного струму. Вона дозволяє досягти високого моменту і точності керування, а також може працювати в широкому діапазоні швидкостей.

Структурна схема двигуна постійного струму незалежного збудження показана на рис. 4.

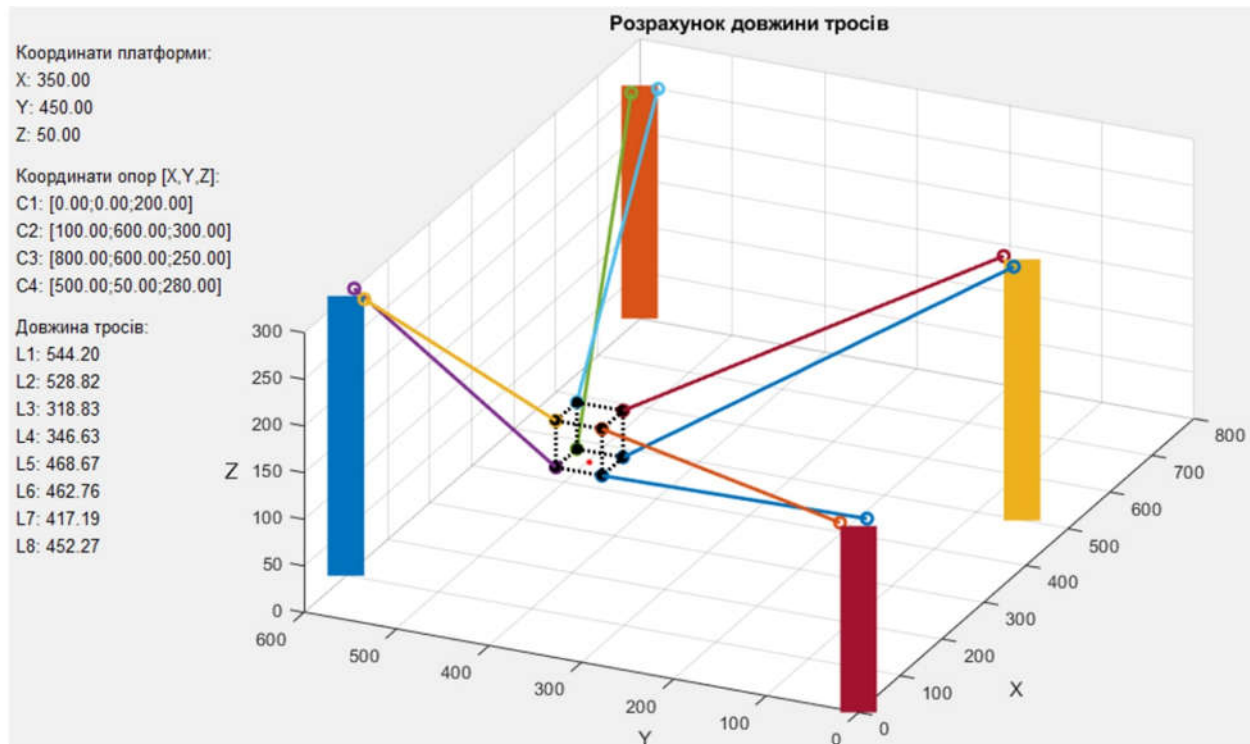


Рисунок 3 - Візуалізація зворотної задачі кінематики для 8-кабельного робота

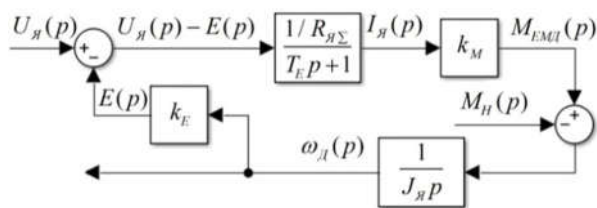


Рисунок 4 – Структурна схема двигуна постійного струму

Рівняння електричної рівноваги для ланцюга якоря [12]:

$$U_{\text{я}} = R_{\text{я}\Sigma} I_{\text{я}} + L_{\text{я}\Sigma} dI_{\text{я}}/dt + E, \quad (2)$$

де $U_{\text{я}}$ – напруга на затискачах якоря; $R_{\text{я}\Sigma}$ – опір ланцюга якоря; $L_{\text{я}\Sigma}$ – індуктивність ланцюга якоря; $I_{\text{я}}$ – значення струму у ланцюзі якоря. $L_{\text{я}\Sigma} dI_{\text{я}}/dt$ – відображує наявність ЕРС самоіндукції яка виникає в обмотках якоря при зміні струму якоря.

Рівняння динаміки обертального руху якоря:

$$J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{EM}} - M_{\text{C}}, \quad (3)$$

де $d\omega/dt$ – кутове прискорення; M_{EM} – електромагнітний момент, який приводить

до обертання якоря двигуна; M_{C} – сумарний момент опору сил, діючих на двигун; J_{Σ} – сумарний момент інерції.

$$M_{\text{EM}} = K_{\text{m}} I_{\text{я}}, \quad (4)$$

$$E = K_{\text{E}} \omega, \quad (5)$$

де ω – кутова швидкість обертання якоря, K_{m} , K_{E} – коефіцієнти пропорційності.

Після застосування перетворень Лапласа рівняння $I_{\text{я}}(p)$ та $\omega_{\text{д}}(p)$ можуть бути задані наступним чином:

$$I_{\text{я}}(p) = \frac{U_{\text{я}}(p) - K_{\text{E}} \omega_{\text{д}}(p)}{R_{\text{я}\Sigma} (T_{\text{E}} p + 1)}, \quad (6)$$

$$\omega_{\text{д}}(p) = \frac{K_{\text{M}} I_{\text{я}}(p) - M_{\text{C}}(p)}{J_{\text{я}}(p)}, \quad (7)$$

де $T_{\text{E}} = L_{\text{я}\Sigma} / R_{\text{я}\Sigma}$ – електромагнітна стала.

Передавальна функція електричного кола матиме вигляд:

$$W(p) = \frac{1/R_{\text{я}\Sigma}}{T_{\text{E}} p + 1}. \quad (8)$$

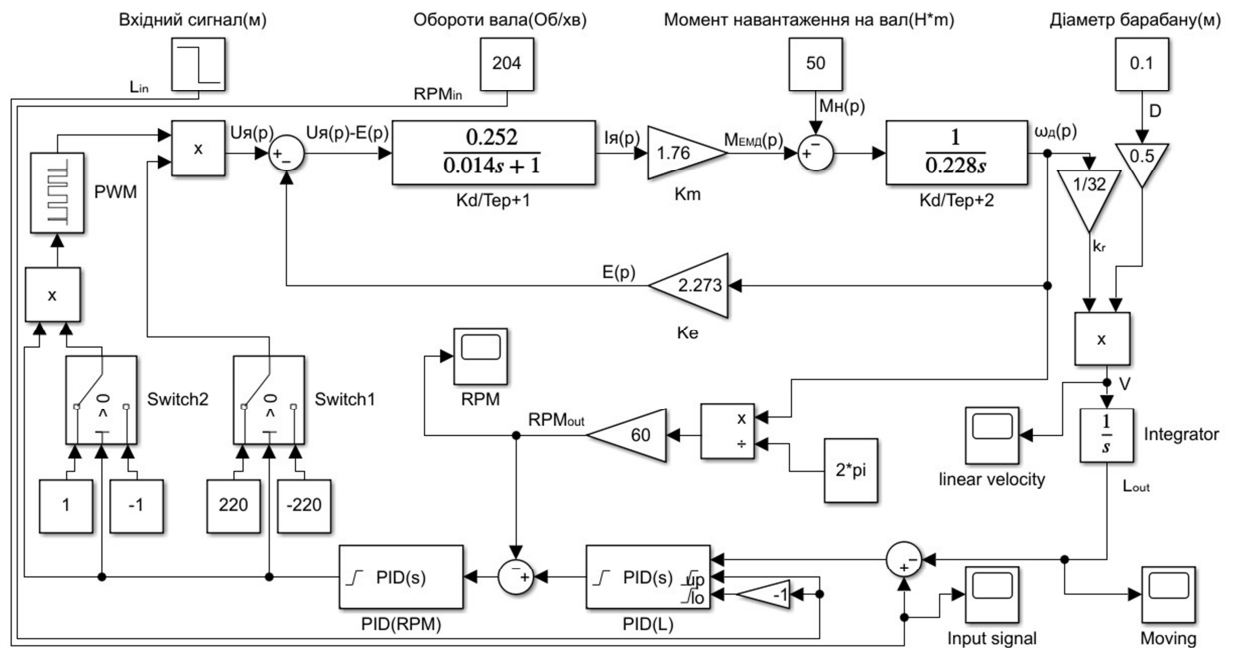


Рисунок 5 – Імітаційна модель системи керування лебідкою робота-маніпулятора

Передавальна функція механічної частини двигуна визначається як

$$W(p) = 1/J_{\Sigma} p. \quad (9)$$

Рівняння розрахунку поточного значення довжини троса, що також враховує передавальне число редуктора та діаметр барабану лебідки має вигляд

$$L_{out} = \int_0^t V dt ; \quad (10)$$

$$V = \frac{\omega}{k_r} \cdot \frac{D}{2} \quad , \quad (11)$$

де V – лінійна швидкість кабелю; k_r – коефіцієнт редуктора; D – діаметр барабана лебідки.

Перерахунок обертів двигуна з рад/с (ω) у об/хв (n) проводиться як

$$n = 60 \omega / 2\pi. \quad (12)$$

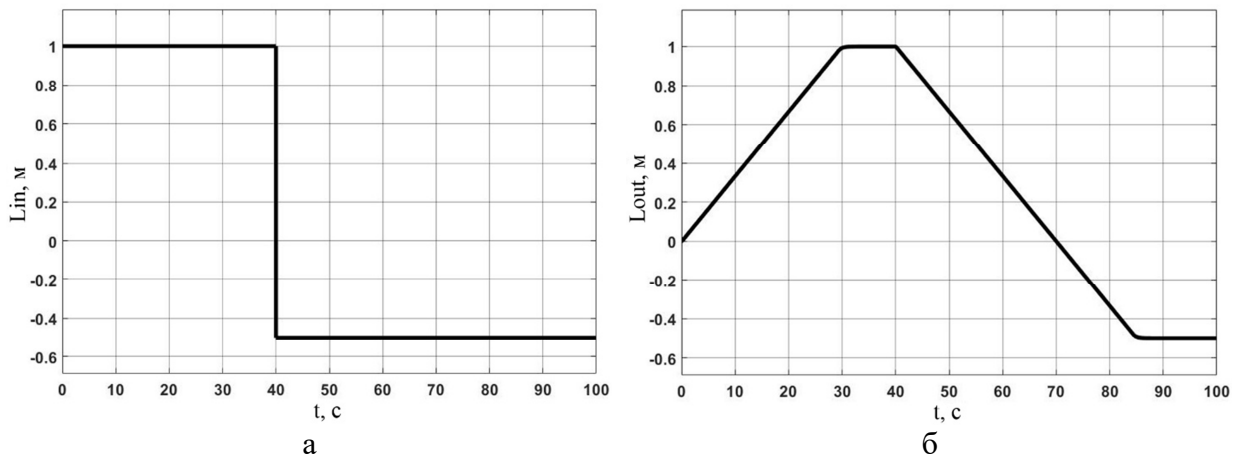
На основі динамічної моделі двигуна постійного струму побудована система керування довжиною троса однієї лебідки за положенням та швидкістю у програмному середовищі Simulink. Схема системи керування показана на рис. 5, де порівнюється поточна довжина троса L_{out} та частота обертання вала двигуна RPM_{out}

із заданими L_{in} та RPM_{in} відповідно, після чого передається сигнал помилки на ПД-регулятори $PID(L)$ та $PID(RPM)$ для точного позиціонування, утримання заданого положення та для контролю швидкості за допомогою ШІМ-сигналу.

Для побудови імітаційної моделі лебідки вибрано двигун постійного струму моделі СЛ-569 з наступними вхідними даними: номінальна напруга, $U_H = 220$ В; номінальний струм $I_H = 7,46$ А; номінальна швидкість обертання двигуна, $n_H = 800$ об/хв; номінальна потужність, $P_H = 1100$ Вт; індуктивність обмотки $L_{\text{Я}} = 0,0055$ Гн; активний опір обмотки $R_{\text{Я}} = 3,97$ Ом; момент інерції якоря $J_{\text{Я}} = 0,03$ кг·м².

Керування лебідкою кабельного робота-маніпулятора здійснюється за допомогою ПІД-регуляторів частоти обертання PID(RPM) та довжини троса PID(L). Налаштування коефіцієнтів ПІД-регуляторів виконувалося методом параметричної оптимізації показників якості керування за критеріями високої точності та відсутності перерегулювання [13].

Перевірка налаштувань регуляторів проведена на основі графічного аналізу перехідних процесів (рис. 6-7). Для моделювання задано вхідний сигнал переміщення L_{in} на +1 м, після 40 с



а – вхідний сигнал довжини L_{in} ; б – вихідна довжина троса лебідки L_{out}

Рисунок 6 – Результати моделювання системи

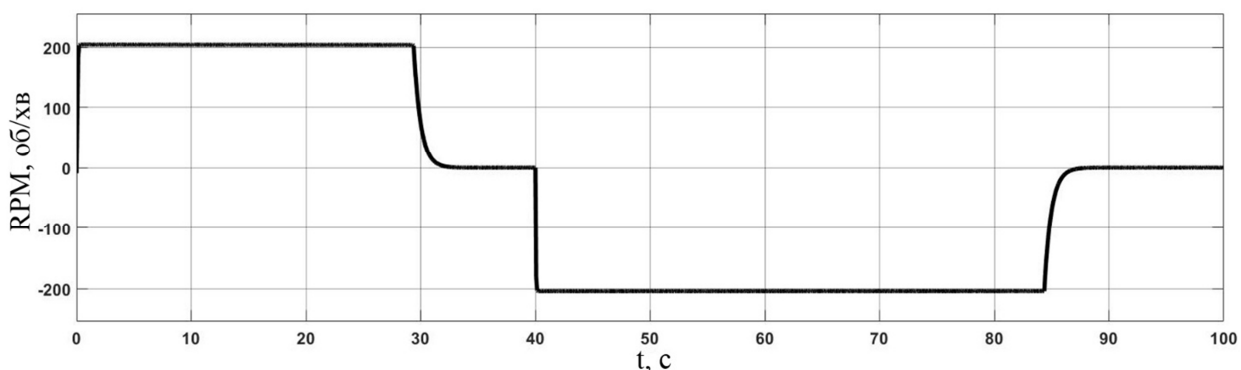


Рисунок 7 – Результати моделювання системи: частота обертання двигуна RPM_{out}

значення змінюється на $-0,5$ м (рис. 6, а). На рис. 6, б видно, що за 30 с довжина кабелю збільшилась з 0 до 1 м, задана довжина утримувалась у заданому положенні ще 10 с. Після чого був змінений сигнал L_{in} на $-0,5$ м, з графіку видно, що довжина з $+1$ м до $-0,5$ м змінилась за 45 с, далі система почала утримувати значення $-0,5$ м. На рис. 7 наведено графік зміни обертів двигуна в діапазоні від -204 до 204 об/хв, що відповідає заданому значенню $RPM_{in} = 204$ об/хв. За результатами моделювання (рис. 6-7) можна зазначити, що система керування лебідкою працює ефективно, з високою точністю та за прийнятний час перехідного процесу відпрацьовує вхідний сигнал за переміщенням, утримує усталене положення (статична помилка за довжиною $\delta_L = 0.078\%$) та частоту обертання (статична помилка за частотою обертання $\delta_n = 0.1\%$) без перерегулювання для заданих вхідних даних.

Висновки

У результаті дослідження кінематики кабельних роботів на підвісних системах доведено можливість використання підвісного робота-маніпулятора в умовах складного рельєфу, а також розроблена система керування окремою лебідкою робота для переміщення рухомої платформи шляхом зміни довжини троса.

Наведено розрахункову модель зворотної кінематики підвісного робота-маніпулятора, яка показує адаптивність таких роботів до специфічних задач без потреби в симетрії чи рівній базовій поверхні, що дозволяє практично довільно встановлювати його опори.

Запропоновано модель системи керування лебідкою з двигуном постійного струму та ПІД-регуляторами довжини кабелю та частоти обертання двигуна, яка має високу функціональність та наочність, відповідно до модельних експериментів, а також забезпечує задані показники якості.

Подальші дослідження в цьому напрямі доцільно зосередити на вдосконаленні моделі кабельного робота врахуванням особливостей динаміки його функціонування та компонентів системи керування шляхом інтеграції технологій штучного інтелекту для підвищення рівня адаптації на складному рельєфі.

Подяки
Відсутні.

Конфлікт інтересів
Відсутній.

Список використаних джерел / References

1. Uholnikov H.H., Gerasin O.S. Perevagi zastosuvannya robotiv na pidvisnih sistemah u sudnobuduvanni. *Materialy Mizhnarodnoi naukovo-tehnichnoi konferencii «Innovaciyi v sudnobuduvanni ta okeanotehnici»*, m. Mikolayiv: NUK 2024. P. 997-1000. URL: <https://rep.nuos.edu.ua/server/api/core/bitstreams/12823529-6d4c-40cd-aa1c-3c60a8f51dcd/content> [in Ukrainian]
2. Nan R. Five hundred meter aperture spherical radio telescope (FAST). *Science in China series G*, 2006, 49. P. 129-148.
3. Chesher, Ch. Robots and the Moving Camera in Cinema, Television and Digital Media. *International Workshop in Cultural Robotics. Lecture Notes in Computer Science*, 9549. P. 98-106. doi:[10.1007/978-3-319-42945-8_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-42945-8_9).
4. Harandi M. R. J. Passivity based control of 3-DOF underactuated suspended cable-driven robot (Doctoral dissertation, KN Toosi University of Technology). 2021.
5. Uholnikov H.H., Nedo A.O., Gerasin O.S. Analiz osoblivostej suchasnih robotiv-manipulyatoriv. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia imeni admiralak Makarova*. 2024. No 2 (495). P. 85-94. doi: [10.15589/znp2024.2\(495\).11](https://doi.org/10.15589/znp2024.2(495).11). [in Ukrainian]
6. Bai G., Ge Y., Scoby D., Leavitt B., Stoerger V., Kirchgessner N., Awada, T. NU-Spidercam: A large-scale, cable-driven, integrated sensing and robotic system for advanced phenotyping, remote sensing, and agronomic research. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. Vol. 160. P. 71-81. doi: [10.1016/j.compag.2019.03.009](https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.03.009)
7. Liu N., Topalov A., Karpechenko A., Gerasin, O. Analysis of tasks of monitoring and automatic control of agricultural mobile robot. *Upravlinnia rozvytkom skladnyh system*. 2021. No 47. P. 174-179. doi: [10.32347/2412-9933.2021.47.174-179](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2021.47.174-179) [in Ukrainian]
8. Sridhar, D. M. Mathematical Modeling of Cable Sag, Kinematics, Statics, and Optimization of a Cable Robot (Master's thesis, Ohio University), 2015.
9. Xie F., Shang W., Zhang B., Cong S., Li Z. High-precision trajectory tracking control of cable-driven parallel robots using robust synchronization. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2020. Vol. 17(4). P. 2488-2499.
10. Zhang Z., Shao Z., You Z., Tang X., Zi B., Yang G., Caro, S. State-of-the-art on theories and applications of cable-driven parallel robots. *Frontiers of Mechanical Engineering*. 2022. Vol. 17(3). No. 37. doi: [10.1007/s11465-022-0693-3](https://doi.org/10.1007/s11465-022-0693-3)
11. Topalov A., Leshchuk N., Starychenko Y., Gerasin O., Shkitov A., Nekrasov S. Analysis of Software for Development and 2D/3D Modeling of Robotic Systems in Academia and Industry. In: Ermolayev, V., et al. Information and Communication Technologies in Education, Research, and Industrial Applications. ICTERI 2024. *Communications in Computer and Information Science*, 2025, Vol. 2359. Springer, Cham. doi:[10.1007/978-3-031-81372-6_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-81372-6_8)
12. Gerasin O.S., Kozlov O.V., Kondratenko G.V., Mingxin H. Synthesis and study of the mathematical model of a caterpillar mobile robot for vertical movement. *Problemy informatsiynyh tehnologii*. 2018. No. 1 (23). P. 87-97. [in Ukrainian]
13. Xia X., Zhang B., Ding Y., Li L., Yang, Z. Output-feedback formation tracking control of autonomous surface vessels with collision avoidance. *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 312. 119036. doi: [10.1016/j.oceaneng.2024.119036](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119036)

CALCULATION OF KINEMATICS AND MODELING OF THE WINCH WORK OF A SUSPENDED ROBOT-MANIPULATOR

Ugolnikov G. G.

Postgraduate student

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

54007, 9 Heroes of Ukraine St., Mykolaiv, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0003-0508-1997>

e-mail: genchik98@gmail.com

Gerasin O. S.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

54007, 9 Heroes of Ukraine St., Mykolaiv, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0001-5107-9677>

e-mail: oleksandr.gerasin@nuos.edu.ua

Abstract. The article is devoted to the study of the structural and kinematic features of cable robots on suspended systems, which demonstrate high adaptability to uneven terrain and can work effectively in difficult environmental conditions. The main principles of operation of these robots are analyzed, in particular, controlling the length of cables, ensuring their constant tension and controlling the spatial position of the mobile platform using traction winches. It is determined that a significant advantage of suspended robots is the ability to fix supports on complex terrains, such as slopes, irregularities or other non-standard surfaces, which is relevant for solving engineering problems related to construction, infrastructure maintenance, monitoring or other technical needs. Particular attention is paid in the paper to designing a kinematic model of such a robot-manipulator, which allows describing the interaction between individual winches and calculating the necessary motion parameters under the condition of an arbitrary arrangement of the supports of the suspended system. In addition, a mathematical model of the individual traction winch equipped with a DC drive motor is proposed. Based on this model, a simulation model of the winch control system in the Simulink environment is formed, which is used to tension each cable of the cable robot, forming its corresponding position in space. The results obtained show that the proposed model allows to determine the required cable lengths for given spatial coordinates (solving the inverse kinematics problem) and provide them with traction winches under constant load conditions. The presented model has significant potential for expansion and consideration of working environment factors, which will be useful for the development and improvement of cable-type robotic systems with a wide range of applications.

Keywords: cable robot; manipulator; modeling; kinematics; control system; PID-controller, drive motor, automation, interface.