

УДК 621.09.04

## Дослідження особливостей кінетостатичних параметрів маніпуляторів наземних роботизованих комплексів спеціального призначення

Струтинський С. В., Семенчук Р. В.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

*Анотація:* Мобільні роботизовані комплекси, що оснащені високоточним маніпулятором набувають широкого застосування при виконанні спеціальних завдань. Зважаючи на велику кількість схемних та конструктивних рішень актуальною темою досліджень є кінетостатичний аналіз маніпуляторів на етапі розроблення технічного рішення та системи керування. Досліджено кінетостатику трьохланкового маніпулятора, шляхом розв'язку системи рівнянь у декартовій системі координат. Розроблена кінетостатична математична модель маніпулятора, дослідження виконані у програмному комплексі Mathcad. Визначено максимальні моменти, що діють у поворотних вузлах, що в подальшому дає змогу оцінити напружено деформований стан механічної передачі. Отримані результати моделювання дозволяють врахувати вплив кінетостатичних параметрів на точність вихідної ланки маніпулятора у режимі реального часу.

*Ключові слова:* роботизований комплекс; маніпулятор; поворотний вузол; математична модель; високоточний вузол, кінетостатичні параметри маніпуляторів.

Сучасні роботизовані комплекси спеціального призначення (рис.1) являють собою складні автоматизовані системи, що включають точну механічну частину, що приводиться у рух за допомогою прогресивних конструкцій електродвигунів оснащених інтелектуальною системою управління [1].

Наявне різноманіття існуючих конструкцій роботизованих комплексів, математичних моделей, що описують робочі процеси їх складових частин породжують складність їх дослідження та аналізу результатів та надають особливу актуальність проблемі проведення моделювання та подальшого використання отриманих результатів при проектуванні роботизованих комплексів спеціального призначення. Зважаючи на наявність відпрацьованих конструкцій елементної бази, що реалізує переміщення, маніпулятори можуть бути створені із використанням лише серійного обладнання та матеріалів. Проте необхідність в моделюванні з метою забезпечення високих технічних показників виникає як на етапах проектування так і при експлуатації роботизованого комплексу.

Одним із ключових етапів розробки та проектування роботизованого комплексу, є проектування маніпулятора, що має на меті забезпечення необхідних характеристик, шляхом використання оптимальної кінематичної схеми, та вибору елементної бази, комплектуючих та матеріалів. Однією з важливих задач виділених за такого підходу є кінематичний та динамічний аналіз механізму маніпулятора. Дослідження особливостей статичних та динамічних процесів у поворотних вузлах маніпулятора під дією корисного навантаження дозволяє врахувати вплив діючих динамічних навантажень на технічні характеристики системи, зокрема на точність позиціонування. Враховуючи особливості робочого простору маніпулятора та діючих у даний момент часу зовнішні навантаження стає можливим визначення характеристик точності маніпулятора у режимі реального часу.

При проектуванні роботизованого комплексу виникає необхідність у виконанні кінематичного та кінетостатичного аналізу обраної просторової кінематичної схеми (рис.2).

Для опису геометричних параметрів маніпулятора найбільш доцільно застосовувати метод перетворення координат. При цьому використовуються системи координат, жорстко зв'язані із ланками маніпулятора. Система координат побудована таким чином: вісь  $X_i$  направлена вздовж ланки; вісь  $Y_i$  доповнює побудовану вісь та повинна своїм напрямком створити правосторонню систему координат; у якості початку системи координат як правило використовується точка перетину ланок.

Математична модель яка описує кінематику маніпулятора, може бути представлена за допомогою система із 12 рівнянь [2]. Оскільки маніпулятор роботизованого комплексу (рис. 1) складається із ланок, з'єднаних поворотними вузлами (O, A, B, C, D), то робочі процеси поворотних вузлів визначають характеристики всієї механічної системи. Деформації ланок OA, AB, BC та CD, що мають довжини  $L_1, L_2, L_3, L_4$  також впливають на точність.

На основі даних, що визначають закон руху вихідної ланки, проводиться розрахунок траєкторії схвату у т. D. При розрахунках та кінетостатичному аналізі виникає необхідність у чисельному розв'язку рівнянь, оскільки ці розрахунки мають вестися у режимі реального часу.

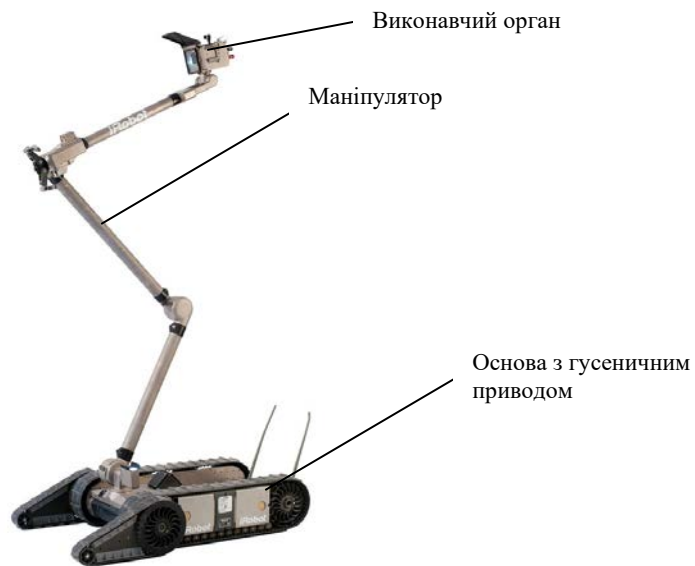


Рис. 1. Наземний роботизований комплекс з маніпулятором

Розрахунки кінетостатичних параметрів проводяться за відомою методикою [2], причому ці розрахунки виконуються окремо, для кожної рухомої частини маніпулятора.

Згідно запропонованої розрахункової схеми за типовою залежністю визначимо статичний момент у вузлі A, що є одним із найбільш навантажених поворотних вузлів маніпулятора:

$$\begin{aligned}
 Mx_A &= (Q + m_D) \cdot (h_{4i} + h_{3i} + h_{2i}) + \\
 &+ m_4 \cdot \left( \frac{h_{4i}}{2} + h_{3i} + h_{2i} \right) + m_C \cdot (h_{3i} + h_{2i}) + \\
 &+ m_3 \cdot \left( \frac{h_{3i}}{2} + h_{2i} \right) + m_D \cdot (h_{2i} + h_{3i} + h_{4i}) + \\
 &+ m_2 \cdot \left( h_{2i} + h_{3i} + \frac{h_{4i}}{2} \right); \\
 Mz_A &= (Q + m_D) \cdot (z_{2i} + z_{3i} - z_{4i}) + m_4 \cdot \left( z_{3i} + z_{2i} - \frac{z_{4i}}{2} \right) + \\
 &+ m_C \cdot (z_{3i} + z_{2i}) + m_3 \cdot \left( \frac{z_{3i}}{2} + z_{2i} \right) + m_D \cdot z_{2i} + m_2 \cdot \frac{z_{2i}}{2}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Відповідно сумарний статичний момент:

$$Ma_i = \sqrt{Mz_A^2 + Mx_A^2}. \tag{2}$$

Отримані аналітичні результати статичного моменту дають можливість зробити дослідження у модулі програмного комплексу CAD/CAE напружено-деформованого

стану ланок маніпулятора та зубців механічної передачі [3]. Також отримані результати аналітичних досліджень дають можливість врахувати особливості робочих процесів при розробці системи управління електричними двигунами, що приводять у рух ланки маніпулятора.

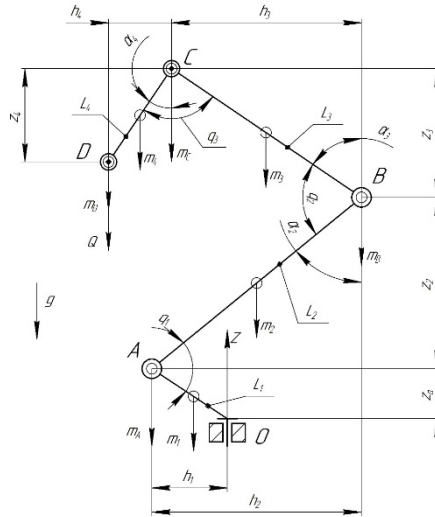


Рис. 2. Розрахункова схема силового навантаження маніпулятора: А, В, С, D, О - поворотні вузли; L1, L2, L3, L4 - довжини ланок;  $\omega_1, q_1, q_2, q_3$  - кути повороту ланок у вузлах;  $h_1, h_2, h_3, h_4$  - відстань між вузлами вздовж осі X;  $z_1, z_2, z_3, z_4$  - відстань між вузлами вздовж осі Z;  $m_1, m_2, m_3, m_4$  - маса ланки;  $m_A, m_B, m_C, m_D$  - маса вузла.

Для оцінки жорсткості ланки необхідно визначити її прогин  $\omega_c$  та кут повороту  $\theta_c$  від дії корисного навантаження, при цьому врахувавши вагу ланок та поворотних вузлів. Для забезпечення необхідної жорсткості, що чинить вплив на точність, задача зводиться до виконання умови, де найбільший прогин ланки (кут повороту) не повинен перевищувати допустимого значення:

$$\theta_D \leq [\theta_i]; \omega_D \leq [\omega_i] \quad (3)$$

Розглянемо статичну рівновагу шарнірів маніпулятора, склавши для кожної із ланок диференціальне рівняння деформованої осі ланки або диференціальне рівняння пружної лінії [4]:

$$\pm \frac{d^2 y}{dz^2} \leq \frac{M_z}{EI_x}, \quad (4)$$

де  $M_z$  – згинальний момент в січній;  $EI_x$  – жорсткість поперечного перетину ланки (балки) при згині.

Відповідно, отримаємо залежності для визначення деформацій ланки ВС, що будуть мати вигляд:

рівняння для визначення кута повороту:

$$\theta_c = \frac{-Z_{23} \cdot h_{3i}^3 + m_c \cdot h_{3i}^3 + \frac{m_3 \cdot h_{3i}^3}{2} - M_{34} \cdot h_{4i}}{EI}; \quad (5)$$

рівняння для визначення прогину:

$$\omega_c = -\theta_c \cdot l_3 - \frac{Q \cdot h_{3i}^2 + \frac{m_c \cdot h_{3i}^2}{6} + \frac{m_3 \cdot h_{3i}^2}{6} - M_{34} \cdot h_{4i}^2}{EI}, \quad (6)$$

де  $h_{3i}$  – горизонтальна відстань (плече) сили;  $M_{34}$  – величина, що враховує корисне навантаження;  $m_c$  – вага поворотного вузла С;  $m_3$  – вага ланки СВ;  $EI$  – характеристики жорсткості ланки, модуль пружності та момент інерції січення, відповідно.

Із аналізу та проведених розрахунків отримуємо шукані величини кутів повороту та переміщень у вузлах, що дають змогу врахувати знайдені кутові похибки позиціонування у аналітичних залежностях, що визначають положення вихідної ланки маніпулятора.

Відповідно до обраної кінематичної схеми маніпулятора була розроблена математична модель, що описує кінетостатичні робочі процеси. Моделювання було виконано у програмному комплексі MATHCAD. У результаті було визначено крутний момент, що виникає у кожному поворотному вузлі маніпулятора та встановлено діапазон зміни інтегрального значення моменту. Отримані результати дозволяють визначити параметри, що характеризують точність позиціонування маніпулятора. Методика розрахунку інтегрального значення моменту має перспективу по широкому практичному застосуванню, оскільки враховує не лише конструктивне виконання маніпулятора, а також режим його роботи та діюче навантаження, причому необхідні обчислення можуть бути здійснені у реальному часі.

Застосування даної методології, яка враховує особливості механічних процесів, що протікають у маніпуляторі, дозволяє підвищити технічний рівень роботизованих комплексів шляхом врахування особливостей робочих процесів та їх впливу на точність усієї системи. При цьому технічна реалізація переваг запропонованої математичної моделі здійснюється за допомогою інтелектуальної системи управління, що оснащена датчиками зусилля та дозволяє визначати, та за необхідності коригувати точність маніпулятора у режимі реального часу.

### Список літератури

1. Maarten de Waard, Maarten Inja, Arnoud Visser, «Analysis of flat terrain for the Atlas robot», Proceedings of the RoboCup IranOpen 2013 Symposium (RIOS13). DOI: 10.1109/RIOS.2013.6595324
2. Serhii Strutynskiy, Roman Semenchuk, «INVESTIGATION OF THE ACCURACY OF THE MANIPULATOR OF THE ROBOTIC COMPLEX CONSTRUCTED ON THE BASIS OF CYCLOIDAL TRANSMISSION» DOI: 10.15587/2706-5448.2021.237326
3. Струтинський С. В., д.т.н., доцент, Семенчук Р. В., аспірант, «Дослідження напружено-деформованого стану циклоїдальної передачі без проміжних тіл кочення» / XIX Міжнародної науково-практичної конференції «МАШИНОБУДУВАННЯ ОЧИМА МОЛОДИХ: прогресивні ідеї – наука – виробництво» м. Суми, 25–26 листопада 2020 року. [https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/download/123456789/80866/3/Mashynobuduvannia\\_2020.pdf;jsessionid=AE6B104C896A2622E3956A12FFE8577E](https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/download/123456789/80866/3/Mashynobuduvannia_2020.pdf;jsessionid=AE6B104C896A2622E3956A12FFE8577E)
4. Писаренко Г.С. «Опір матеріалів. 2-ге вид., допов. і переробл. – К.: Вища шк., 2004 – 655 с.

## Research of features of kinetostatic parameters of manipulators of ground robotic complexes of special purpose

Serhii Strutynskiy, Roman Semenchuk

**Abstract:** Mobile robotic complexes equipped with a high-precision manipulator are widely used for performing special tasks. Due to the large number of circuit and design solutions, we research kinetostatic of manipulators at the stage of developing of the technical solution and control system. The kinetostatics of a three-link manipulator has been studied by solving a system of equations in the Cartesian coordinate system. A kinetostatic mathematical model of the manipulator has been developed, and the research has been performed using Mathcad. The maximum moments acting in the rotary nodes are determined. This allows to estimate the stress state of the mechanical transmission. The obtained simulation results allow to take into account the influence of kinetostatic parameters on the accuracy of the manipulator in real time. **Keywords** robotic complex; manipulator; rotary node; mathematical model; high-precision node, kinetostatic parameters of manipulators.