

УДК 681.5:621.314.57

DOI <https://doi.org/10.32782/IT/2024-1-13>

Сергій ТКАЧЕНКО

кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, 49005

ORCID: 0000-0003-1156-3151

Researcher ID: AAI-7727-2020

Дмитро БЕШТА

кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, 49005

ORCID: 0000-0003-2848-2737

Лілія БЕШТА

асистент кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, 49005

ORCID: 0000-0001-5041-0962

Бібліографічний опис статті: Ткаченко, С., Бешта, Д., Бешта, Л. (2024). Метод керування переміщенням виконавчого органу маніпулятора з трьома ступенями свободи у складі кіберфізичній системі. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 1, 109–116, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2024-1-13>

МЕТОД КЕРУВАННЯ ПЕРЕМІЩЕННЯМ ВИКОНАВЧОГО ОРГАНУ МАНІПУЛЯТОРА З ТРЬОМА СТУПЕНЯМИ СВОБОДИ У СКЛАДІ КІБЕРФІЗИЧНІЙ СИСТЕМИ

Вступ. Сучасні методи підготовки фахівців з розробки й експлуатації кіберфізичних систем передбачає використання навчальних стендів технологічних ліній і виробництв, котрі включають у склад свого обладнання маніпулятори. Застосування в стендах маніпуляторів зумовлює актуальність розробки відповідних методів керування.

У статті досліджується модель маніпулятора, призначеного для захоплення та переміщення деталей на сортувальній фабриці. Рухи маніпулятора виконуються за допомогою реверсивних двигунів постійного струму 24 В з фіксованою швидкістю. Враховуючи особливості конструкції фабрики та обладнання, маніпулятор не може виконувати складні рухи кількома кінематичними парами одночасно. Для вирішення цієї проблеми використовується послідовний підхід до переміщення деталей.

Розглядаються операції з прямого й зворотного переміщення деталей у системах координат під час роботи на сортувальній фабриці. Розглядаються алгоритми повного переміщення деталей та вимоги до безпечного обертання несучої конструкції маніпулятора.

Результати дослідження можуть бути корисними для розробки кіберфізичних систем управління маніпуляторами в промислових середовищах.

Ключові слова: маніпулятор, кіберфізична система, граф позиціонування, матриця переходів, алгоритм переміщення.

Serhii TKACHENKO

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information Technologies and Computer Engineering, Dnipro University of Technology, 19, Dmytra Yavornytskoho ave., Dnipro, Ukraine, 49005, tkachenko.s.m@nmu.one

ORCID: 0000-0003-1156-3151

Researcher ID: AAI-7727-2020

Dmytro BESHTA

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information Technologies and Computer Engineering, Dnipro University of Technology, 19, Dmytra Yavornytskoho ave., Dnipro, Ukraine, 49005, beshta.d.o@nmu.one

ORCID: 0000-0003-2848-2737

Liliia BESHTA

Assistant of the Department of Information Technologies and Computer Engineering, Dnipro University of Technology, 19, Dmytra Yavornytskoho ave., Dnipro, Ukraine, 49005, beshta.l.v@nmu.one

ORCID: 0000-0001-5041-0962

To cite this article: Tkachenko, S., Beshta, D., Beshta, L. (2024). Metod keruvannia peremishchenniam vykonavchoho orhanu manipuliatora z troma stupeniamy svobody u skladi kiberfizychnyi systemy [A method for controlling the movement of the executive body of a manipulator with three degrees of freedom as part of a cyber-physical system]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 1, 109–116, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2024-1-13>

A METHOD FOR CONTROLLING THE MOVEMENT OF THE EXECUTIVE BODY OF A MANIPULATOR WITH THREE DEGREES OF FREEDOM AS PART OF A CYBER-PHYSICAL SYSTEM

Introduction. Contemporary methods of training specialists in the development and operation of cyber-physical systems involve the use of training stands of technological lines and production facilities that include manipulators in their equipment. The use of manipulators in the stands determines the relevance of developing appropriate control methods.

This paper investigates a model of a manipulator designed to grab and move parts in a sorting factory. The manipulator movements are performed using 24 V DC reversible motors with a fixed speed. Given the design features of the factory and equipment, the manipulator cannot perform complex movements with several kinematic pairs at the same time. To solve this problem, a sequential approach to moving parts is used.

The paper considers operations for the forward and reverse movement of parts in coordinate systems during operation at a sorting factory. The algorithms for the complete movement of parts and the requirements for the safe rotation of the manipulator's supporting structure are considered.

The results of the study can be useful for the development of cyber-physical control systems for manipulators in industrial environments.

Key words: manipulator, cyber-physical system, positioning graph, transition matrix, movement algorithm.

Актуальність проблеми. Для підготовки фахівців з розробки й експлуатації кіберфізичних систем профільні навчальні центри й заклади використовують відповідні тренувальні стенди та макети технологічного обладнання. Зокрема, макет сортувальної фабрики від Fischertechnik з повним набором приводів та датчиків представлений в одній з лабораторій НТУ «Дніпровська політехніка». Він призначений для досліджень, а також для підготовки студентів спеціальностей 123 та 141 з дисциплін, пов'язаних з мехатронікою, кіберфізичними системами, програмно-технічними засобами комп'ютерних систем. Fischertechnik має власні навчальні контролери, але у даному випадку стенд обладнаний контролерами серії S7-1200 фірми Siemens, що більше відповідає задачам спеціальностей.

Центральним узгоджувачим механізмом макету є маніпулятор для переміщення макетів деталей між іншим обладнанням сортувальної фабрики. Наразі для побудови програмно-технічного рішення кіберфізичної системи керування цим маніпулятором актуальною є проблема обґрунтування методу керування позиціонуванням виконавчого органу маніпулятора між початковою і цільовими позиціями захоплення і відпускання деталей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Остання публікація докладно описує стенд-макет саме того екземпляру сортувальної фабрики від Fischertechnik, який використовується в одній з лабораторій НТУ «Дніпровська політехніка» (Ткаченко, 2023, с. 81). Опис стосується переліку й роботи макетів обладнання стенду, моделей застосованих промислових контролерів, технології передачі даних між розподіленими вузлами кіберфізичної системи. У роботі обґрунтована схема функціональної структури кіберфізичної системи сортувальної фабрики, де, в якості підсистеми, розкрита також і функціональна структура керування маніпулятором, в якій він іменується «робот з вакуумним захопленням». Згідно публікації (Ткаченко, 2023, с. 81), задача зводиться до розробки методів функціонального блоку «Робот з вакуумним захопленням. Граф керування». За умови наявності первинних перетворювачів координат для реалізації цього графу необхідно обґрунтувати методи опису положення і руху органу вакуумного захоплення деталі у просторі. У цьому напрямку на сьогодні існує достатня кількість робіт, які описують рух робота як системи кінематичних ланок, застосовуючи при цьому координатні матриці положення і переміщення (Попов, 2019; Кіницький, 2002; Цвіркун, 2017; Fu, 1987). Враховуючи,

що відкриті джерела (Fischertechnik Training models, 2024; Fischertechnik Factory Simulation 24V Datasheet, 2024) містять доскональний опис маніпулятора з точки зору конструкції, давачів і виконавчих органів, для обґрунтування методу керування переміщенням маніпулятора від початкової позиції до цільової попередньо необхідно описати матрицю його руху у деякій системі координат.

Визначення мети дослідження. Обґрунтування методу керування переміщенням вакуумного захоплювача маніпулятора у системі координат тривимірного простору від початкової позиції до цільових, придатного для використання у кіберфізичній системі позиціонування на основі промислових контролерів серії S7-1200, використаних у загальній кіберфізичній системі керування стендом-макетом сортувальної фабрики, виходячи з аналізу конструкції, давачів та виконавчих органів, кінематичної схеми рухів діючої моделі маніпулятора, наявних датчиків та виконавчих механізмів.

Викладення основного матеріалу дослідження. Діюча модель маніпулятора, використана на стенді-макеті сортувальної фабрики, представлена на рис. 1 (Fischertechnik Training models, 2024).

Модель маніпулятора побудована на основі конструктора від Fischertechnik і включає:

- несучий стіл 1 для кріплення обладнання маніпулятора;
- несуча конструкція 2 маніпулятора, що складається з пластикових кріплень та легкосплавних профілів, яка несе на собі, у тому числі, кінематичну ланку-консоль зі можливістю лінійних рухів вгору-вниз 3 та телескопічну для рухів уперед-назад 4 відносно вертикалі;

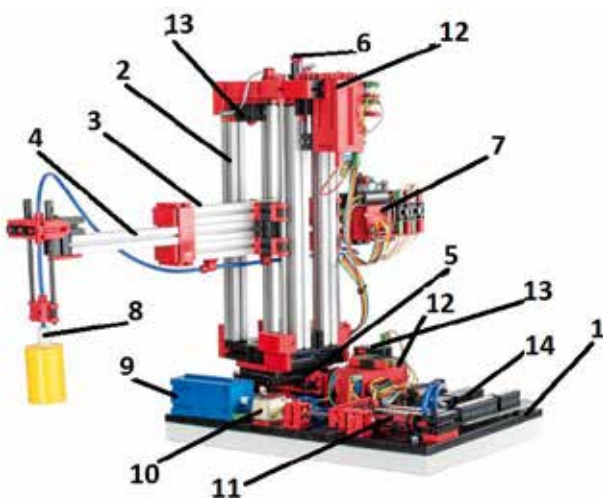


Рис. 1. Діюча модель маніпулятора сортувальної фабрики

– реверсивний електродвигун та зубчата електропередача 5, розміщені на несучому столі для обертання несучої конструкції навкруги вертикальної осі;

– реверсивний мотор-редуктор та черв'ячна передача 6 для лінійних рухів консолі по вертикалі;

– реверсивний мотор-редуктор та черв'ячна передача 7 для лінійних рухів телескопічної ланки 4 по горизонталі;

– вакуумний захоплювач деталей 8;

– компресор 9 із пневматичним акумулятором для пневмосистеми макету;

– однокерований пневмоклапан 10 для перетворення електричного сигналу захоплення деталі у пневматичний;

– пневмоперетворювач сигналу захоплення 11 деталі із форми «тиск» у форму «вакуум»;

– енкодери 12 вимірювання кутового положення маніпулятора у горизонтальній площині та лінійних положень кінематичних ланок по вертикалі й горизонталі;

– кінцеві вимикачі 13 типу «сухий контакт» визначення початкових позицій рухомих елементів маніпулятора;

– інтерфейсна плата 14 керування компонентами маніпулятора.

Усе електронне і електричне обладнання моделі маніпулятора сортувальної фабрики, включаючи мотор-редуктори і електродвигун, розраховане на живлення струмом постійної напруги 24 В (Fischertechnik Factory Simulation 24V Datasheet, 2024).

Початкове положення маніпулятора наступне:

– маніпулятор розвернутий проти часової стрілки на кут приблизно 270° відносно зони видачі конвеєра сховища;

– консоль вертикального руху виведена у крайнє верхнє положення;

– телескопічна ланка горизонтального руху повністю втягнута у консоль.

Схема рухів системи кінематичних пар маніпулятора у просторі показана на рис. 2 і є достатньо типовою для маніпулятора з трьома ступенями свободи (Цвіркун, 2017).

Згідно рис. 2 модель маніпулятора включає (Попов, 2019; Киницький, 2002):

– кінематичну пару р5 першого виду (несучий стіл – несуча конструкція), що задає обертальний рух несучої конструкції навкруги вертикальної осі, причому рушієм є реверсивний двигун постійного струму з редуктором у вигляді пари шестерен;

– кінематичну пару р5 другого виду (несуча конструкція – консоль), що визначає

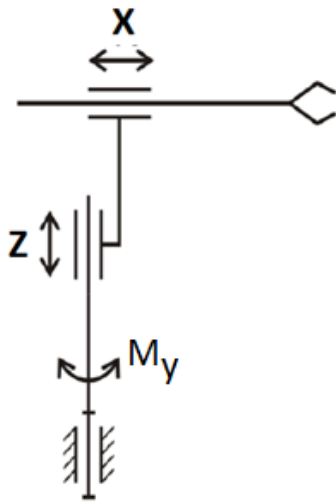


Рис. 2. Схема рухів маніпулятора: М – горизонтальний обертовий у полярній системі координат; X – горизонтальний лінійний; Z – вертикальний лінійний

рух консолі вздовж вертикальної осі, причому рушієм є реверсивний двигун постійного струму, який передає зусилля на вертикальний вал черв'якової передачі, вздовж якої здійснюється рух;

– кінематичну пару р5 другого виду (консоль – телескопічна ланка із захоплювачем), що визначає рух ланки вздовж горизонтальної осі, причому рушієм є реверсивний двигун постійного струму, який передає зусилля на горизонтальний вал черв'якової передачі.

Оскільки всі рухи здійснюються за допомогою реверсивних двигунів постійного струму 24 В без можливості регулювання останньої, можна вважати, що всі три види рухів здійснюються з постійною швидкістю. Таким чином, кількісні параметри переміщення можуть бути задані як у вигляді просторових, так і у вигляді часових координат. Іншими словами, для обліку поточної просторової координати виконавчого органу, який рухається, можна використовувати і кількість імпульсів енкодерів руху, і внутрішні таймери підрахунку тривалостей переміщення елементів рухомих маніпулятора того контролера, який має бути використаний для реалізації кіберфізичної системи. Отже, на будь-який момент виконання операції, строки матриці руху (Цвіркун, 2017) захоплювача М маніпулятора можуть бути представлені за допомогою трьох пар значень:

$$M([p1; n1]; [p2; n2]; [p3; n3]), \quad (1)$$

або

$$M([q1; n1]; [q2; n2]; [q3; n3]) \quad (2)$$

або

де $p1, p2, p3$ – кількість імпульсів, яка надійшла від енкодерів, починаючи з початку руху від деякого положення маніпулятора без урахування напрямку руху;

$q1, q2, q3$ – кількість імпульсів лічильників, яка відділяє поточне положення М від початкового положення маніпулятора і є, фактично, координатами;

$n1, n2, n3 \in (-1; 0; 1)$ – числове вираження напрямку руху конструкції та кінематичних ланок маніпулятора, умовно: реверсивний, відсутній, прямий.

І для елементів $p1, p2, p3$, і для $q1, q2, q3$ у (1) та (2) можуть бути використані не лише фізичні енкодери, і внутрішні таймери контролера.

Слід відрізнити (1) і (2), оскільки у першому випадку мова йде про простий підрахунок імпульсів енкодерів, починаючи з деякого попереднього положення, а у другому – підрахунок реверсивний, в залежності від напрямку руху, котрий виконується відносно деякого початкового положення для всіх рухомих елементів маніпулятора. Тобто випадок (2) передбачає, з одного боку, деяку загальну систему координат маніпулятора, з іншого – має бути використана схема підключення і енкодери, технічні можливості котрих дозволяють рахувати суму імпульсів і у бік збільшення, і у бік зменшення, надаючи, таким чином, просторові координати захоплювача у згаданій системі координат.

Просторове положення обладнання стенду-макету сортувальної фабрики, а також особливості конструкції контейнерів деталей, ділянок приймання й видачі деталей не дозволяють маніпулятору здійснювати складні рухи кількома кінематичними парами одночасно. Ця обставина, а також необхідність отримання просторових координат емпіричним шляхом, позбавляють необхідності у конкретному випадку вирішувати зворотну задачу кінематики (Fu, 1987).

Розглянемо роботу маніпулятора в системах координат (1), (2) під час виконання операцій з прямого й зворотного переміщення деталей у складі сортувальної фабрики (Fischertechnik Training models, 2024).

Виходячи з огляду можливих операцій на стенді-макеті сортувальної фабрики (Fischertechnik Factory Simulation 24V Datasheet, 2024), повний цикл рухів маніпулятора, незалежно від поточної операції, складається з послідовності, показаній на рис. 3.

Звичайно, якщо мова йде про переміщення групи деталей, доцільнішим з точки зору мінімізації кількості рухів здається переміщення між

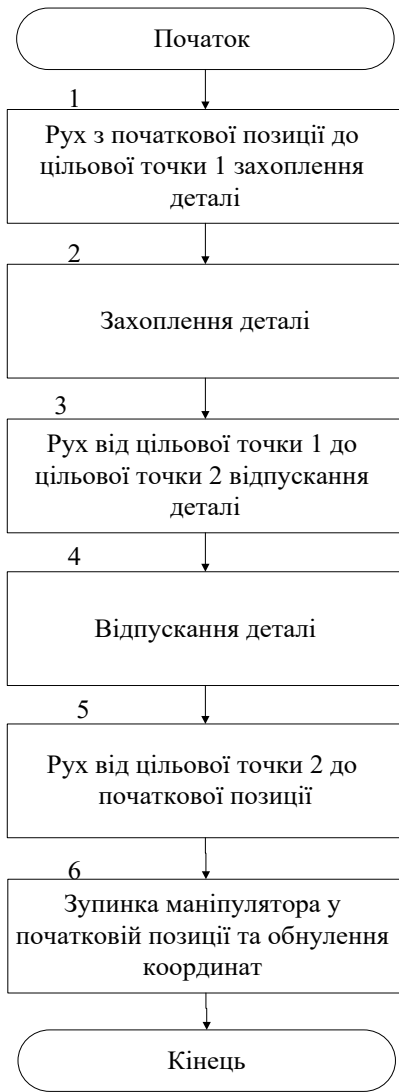


Рис. 3. Загальний алгоритм повного переміщення деталі маніпулятором

цільовими позиціями 1 і 2 без повернення кожного разу у початкову. Але тут варто врахувати, що умовні координати у системах (1) і (2) мають кількісні характеристики, які отримані за допомогою обладнання з деякою похибкою, і алгоритм без повернення у початкову позицію буде цю похибку накопичувати. Типовим рішенням у засобах позиціонування (Цвіркун, 2017) для таких випадків є використання кількох початкових позицій або, принаймні, точок калібрування координат. Таке калібрування у системах позиціонування здійснюється по спрацюванню кінцевих дискретних давачів, виставлених на калібрувальних точках по траєкторії руху маніпулятора. По спрацюванню цих давачів у системи координат (1) чи (2) вносяться відповідні скориговані дані. У використовуваному обладнанні (Fischertechnik Factory Simulation 24V Datasheet, 2024) комплект давачів і конструктивне виконання самої моделі передбачає по одній калібрувальній точці на кожен кінематичну пару, і розташовані ці точки у початковій позиції несучої конструкції маніпулятора та початкових положеннях ланок лінійних рухів.

Проаналізуємо блоки алгоритму повного переміщення деталі на рис. 3 з метою опису дій маніпулятора на більш низькому функціональному рівні, а також на предмет встановлення вхідних та вихідних інформаційних ознак.

Маємо три повноцінних рухи маніпулятора між цільовими й початковою позиціями. Їх об'єднують наступні вимоги:

- обертальний рух несучої конструкції маніпулятора навкруг осі має бути технологічно безпечним, тобто таким, у результаті якого не буде

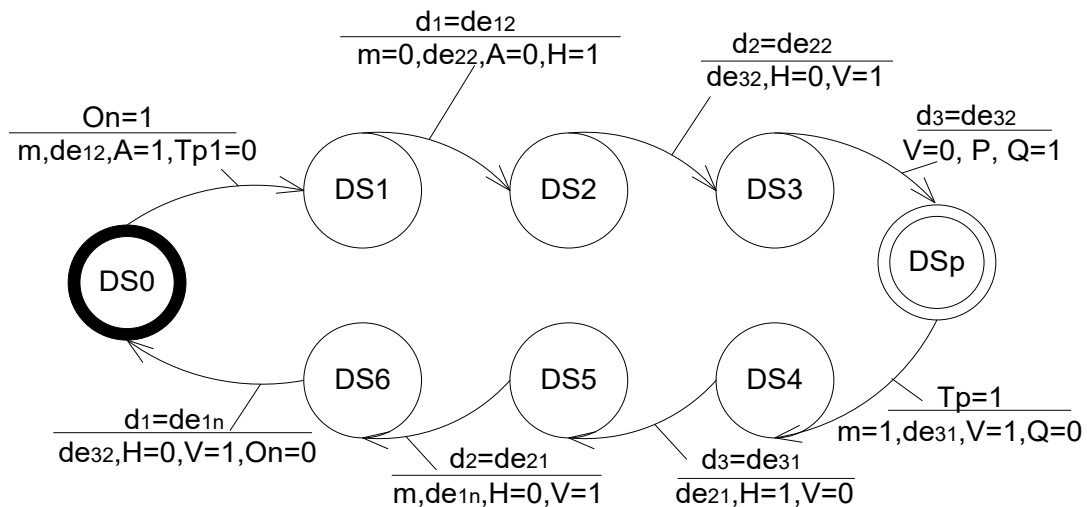


Рис. 4. Граф позиціонування маніпулятора між парою позицій

зіткнень рухомих частин маніпулятора з іншими елементами стенду-макету;

– горизонтальна консоль маніпулятора має спозиціонуватись над ділянкою з точністю, яка дозволяє після подальшого переміщення телескопічної ланки із захоплювачем захопити деталь з ділянки завантаження та помістити у ділянку вивантаження, у тому числі й з контейнером вертикального сховища.

Для здійснення безпечного обертання несучої конструкції має виконуватись умова: у секторі, де відбувається рух конструкцій, всі нерухомі конструкції стенду-макету сортувальної фабрики під час руху повинні розміщуватись нижче нижніх поверхонь консолі, телескопічної ланки, вакуумного захоплювача, нижньої поверхні переміщуваної деталі на відповідних

траєкторіях переміщення. Досягти цього можливо, піднявши консоль на необхідну висоту, і втягнувши телескопічну ланку у безпечну зону. Геометричні особливості обладнання стенду-макету сортувальної фабрики такі, що у точках завантаження і вивантаження деталей можливо здійснювати лише вертикальний рух. Таким чином, щоб захопити чи відпустити деталь, консоль маніпулятора повинна спочатку переміститись на безпечну висоту з урахуванням порожнього захоплювача чи захоплювача з деталлю в залежності від ситуації, потім телескопічна ланка має втягнутись до безпечного радіусу, а потім стає можливим обертальний рух. Як наслідок, рух у точку, визначену системою координат (1) можна описати матрицею:

$$M(p,n) = s^* \begin{pmatrix} [d_{11}; (-1)^m] & [d_{21}; 0] & [d_{31}; 0] & [d_{32}; 0] & [d_{22}; 0] & [d_{12}; 0] \\ [d_{12}; 0] & [d_{21}; (-1)^m] & [d_{31}; 0] & [d_{32}; 0] & [d_{22}; 0] & [d_{12}; 0] \\ [d_{12}; 0] & [d_{22}; 0] & [d_{31}; (-1)^m] & [d_{32}; 0] & [d_{22}; 0] & [d_{12}; 0] \\ [d_{12}; 0] & [d_{22}; 0] & [d_{32}; 0] & [d_{32}; (-1)^m] & [d_{22}; 0] & [d_{12}; 0] \\ [d_{12}; 0] & [d_{22}; 0] & [d_{32}; 0] & [d_{31}; 0] & [d_{22}; (-1)^m] & [d_{12}; 0] \\ [d_{12}; 0] & [d_{22}; 0] & [d_{32}; 0] & [d_{31}; 0] & [d_{21}; 0] & [d_{12}; (-1)^m] \end{pmatrix} \quad (3)$$

Приймемо, що d_{11} – координата початкового осьового положення несучої конструкції маніпулятора, представлена у потрібних розробнику одиницях, яка може бути приведена до системи $M(p,n)$ за допомогою нормуючого коефіцієнта s . Щодо одиниць представлення – розробник може представити координату, наприклад, в імпульсах, секундах часу, кутових градусах, міліметрах, відносних одиницях і т.д., в залежності від його програмно-технічного рішення;

d_{21} – координата початкового лінійного положення по горизонталі телескопічної ланки із захоплювачем, виражена у необхідних розробнику одиницях, аналогічно d_{11} ;

d_{31} – координата початкового лінійного положення по вертикалі кінематичної ланки-консолі, виражена у відносних одиницях, аналогічно d_{11} ;

Тоді d_{12} – координата цільового осьового положення несучої конструкції маніпулятора, виражена у необхідних одиницях, яка може бути приведена до системи $M(p,n)$ за допомогою нормуючого коефіцієнта s ;

d_{22} – координата цільового лінійного положення по горизонталі кінематичної ланки із захоплювачем, виражена у необхідних одиницях, аналогічно d_{12} ;

d_{32} – координата цільового лінійного положення по вертикалі кінематичної ланки-консолі, виражена у необхідних одиницях, аналогічно d_{12} ;

$m = 0$, якщо переміщення йде до цільового положення, $m = 1$, якщо рух йде у початкове положення,

$$n = \begin{cases} 0 & , \text{якщо немає руху} \\ (-1)^m & , \text{якщо рух є} \end{cases} \quad \text{– показник напрямку руху.}$$

Для системи координат (2) матриця (3) буде аналогічною, з тією різницею, що елементи d_{11} , d_{21} , d_{31} завжди будуть нульовими, оскільки тут розглядаються відносні координати для позиціонування між одною парою позицій.

Матриця переходів (3) може бути реалізована у вигляді окремого функціонального блоку програми керування позиціонуванням маніпулятора, який у вигляді інформаційних ознак має отримати початковий керуючий вплив від загального алгоритму переміщення на рисунку 3, а також координати d . У свою чергу, координати d мають зберігатись у виділеному сховищі еталонних координат позицій і бути доступними для редагування.

Натомість, блок програми керування позиціонуванням маніпулятора повинен квітувати

відповідним блокам алгоритму на рисунку 3 факти звершення події досягнення чергової позиції руху маніпулятора чи виходу з неї. Граф на основі функціональної мережі Петрі (Стеценко, 2010) для простого позиціонування маніпулятора виглядатиме таким чином:

На рисунку 4 стан DS0 відповідає деякому початковому стану, коли консоль піднята максимально вгору до позиції калібрування, ланка з присоскою максимально втягнута до позиції калібрування, а конструкція знаходиться у деякій позиції, що відповідає початковій позиції з калібруванням, цільовій точці 1, або цільовій точці 2. Позиції DS1-DS6 відповідають номерам стовбців матриці (2.4). DSp – стан технологічної паузи, під час якої має спрацювати вакуумний захоплювач.

Умови переходів графу на рисунку 4 мають наступну систему позначень:

d_1, d_2, d_3 – відповідно, поточні нормовані до необхідних одиниць координати осьового, по горизонталі та по вертикалі положення захоплювача;

de_{12} – еталонна кутова координата деякого цільового положення конструкції маніпулятора відносно вертикальної осі для здійснення поточного руху, визначається в залежності від розташування ділянок захоплення, відпускання та точки калібрування;

de_{22}, de_{32} – відповідно, лінійні координати цільового положення захоплювача для горизонтального та вертикального рухів, визначається в залежності від розташування ділянок захоплення та відпускання;

de_{1n} – еталонна кутова координата деякого початкового положення конструкції маніпулятора відносно вертикальної осі, для здійснення наступного руху, визначається в залежності від розташування ділянок захоплення, відпускання та точки калібрування;

de_{21}, de_{31} – відповідно, лінійні координати початкового й одночасно калібрувального положення захоплювача для наступного горизонтального та вертикального рухів ланок. Ці величини постійні й визначаються конструкцією маніпулятора;

Op – вхідний керуючий вплив на блок позиціонування маніпулятора й одночасно квітація виконання завдання, «Так-Ні»;

Q – вихідна інформаційна ознака паузи між станами DS3 і DS4, необхідної для

відпрацювання вакуумного захоплювача, «Так-Ні»;

P – тривалість паузи між станами DS3 і DS4, необхідної для відпрацювання вакуумного захоплювача, с;

Tr – вхідна інформаційна ознака закінчення інтервалу паузи між станами DS3 і DS4, «Так-Ні»;

A, H, V – вихідні інформаційні ознаки керуючих впливів для руху ланок маніпулятора, відповідно, осьового, горизонтального та вертикального, у формі представлення «Так-Ні». Напрямок визначається показником m .

Висновки і перспективи подальших досліджень. Запропонований алгоритм переміщення деталі маніпулятором, матриця координат переміщень виконавчого органу маніпулятора, граф позиціонування маніпулятора між парою позицій у своїй сукупності представляють метод керування переміщенням вакуумного захоплювача маніпулятора у системі координат тривимірного простору від початкової позиції до цільових. Метод достатньо універсальний для даного типу маніпулятора і дозволяє, за наявності необхідних цільових координат, переміщувати деталь між двома позиціями як на навчальному стенді, так і на реальній виробничій лінії.

Апробацію розробленого методу проведено на лабораторній базі НТУ «Дніпровська політехніка». У ході апробації було створено демонстраційне програмне забезпечення для контролера Simatic S7-1200, який використано для керування обладнанням макету сортувальної фабрики Fischertechnik. Воно включило у себе, у тому числі, функціональний блок позиціонування маніпулятора фабрики. Координати цільових позицій, необхідні для практичного застосування методу, були визначені емпірично. При цьому реалізоване керування прямим переміщенням, коли відбувається вивантаження деталі зі сховища, а також зворотним, коли з трьох різних лотків відсортовані за кольором деталі переміщуються назад у сховище.

У подальшому розглянутий метод керування переміщенням вакуумного захоплювача маніпулятора буде використано для навчання студентів профільних спеціальностей основам програмування промислових кіберфізичних систем, механічну складову яких необхідно переміщувати у межах робочої зони.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Сергій Ткаченко, Дмитро Бешта, Лілія Бешта. Результати дослідження та впровадження у навчальний процес моделі-симулятора автоматизованої фабрики. *Information Technology: Computer science, software engineering and cyber security*, Випуск 2. Національний технічний університет «Дніпровська політехніка». – Дніпро: Видавничий дім «Гельветика» 2023, – стор. 81–89.

2. Попов С.В., Бучинський М.Я., Гнітько С.М., Чернявський А.М. Теорія механізмів технологічних машин: підручник для студентів механічних спеціальностей закладів вищої освіти. – Харків: НТМТ, 2019. 268 с.
3. Кіницький Я. Т. Теорія механізмів і машин: Підручник. – К.: Наукова думка, 2002. 660 с. – ISBN 966-00-0740-X.
4. Цвіркун Л. І. Робототехніка та мехатроніка : навч. посіб. Л.І. Цвіркун, Г. Грулер; під заг. ред. Л. І. Цвіркуна ; М-во освіти і науки України, Держ. вищий навч. закл. «Нац. гірн. ун-т». – 3-тє вид., перероб. і доп. – Дніпро : НГУ, 2017. 224 с.
5. K.S Fu, R.C. Gonsales, C.S.G. Lee. Robotics: Control, Sensing, Vision and Inteligence. – Mcgraw-Hill Book Company, 1987. 580 pages. – ISBN-10 0070226253.
6. Factory Simulation 24V – Training models. URL: <http://surl.li/goofq> (дата звернення 20.03.2024 р.)
7. Factory Simulation 24V – Datasheet. URL: <http://surl.li/googf> (дата звернення 20.03.2024 р.)
8. Стеценко, І.В. Моделювання систем: навч. посіб. [Електронний ресурс, текст] / І.В. Стеценко; М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. – Черкаси : ЧДТУ, 2010. 399 с. ISBN 978-966-402-073-9 (дата звертання: 20.03.2024). <http://surl.li/rtbmj>.

REFERENCES:

1. Tkachenko, Serhii, Beshta, Dmytro & Beshta, Liliia. (2023). Rezultaty doslidzhennia ta vprovadzhennia u navchalnyi protses modeli-symulatora avtomatyzovanoi fabryky [The results of research and implementation of the automated factory simulator model into the educational process]. *Issue 2. National Technical University "Dnipro Polytechnic"*. – Dnipro: Publishing house "Helvetika" 2023, 81–89 [in Ukrainian].
2. Popov, S. V., Buchynskiy, M. Ia., Hnitko, S. M. & Cherniavskiy, A. M. (2019). *Teoriia mekhanizmiv tekhnolohichnykh mashyn [Theory of mechanisms of technological machines]*. Kharkiv: NTMT [in Ukrainian].
3. Kinytskyi, Ya. T. (2002). *Teoriia mekhanizmiv i mashyn [Theory of mechanisms and machines]*. Kyiv: Naukova dumka [in Ukrainian].
4. Tsvirkun, L. I. & Hruler, H. (2017) *Robototekhnika ta mekhatronika [Robotics and mechatronics]*. Dnipro : NHU [in Ukrainian].
5. Fu, K. S., Gonsales, R. C. & Lee, C.S.G. (1987). *Robotics: Control, Sensing, Vision and Inteligence*. Mcgraw-Hill Book Company.
6. Factory Simulation 24V – Training models. (n.d.). Retrieved from: <http://surl.li/goofq>.
7. Factory Simulation 24V – Datasheet. (n.d.). Retrieved from: <http://surl.li/googf>.
8. Stetsenko, I. V. (2010). *Modeliuvannia system [Modeling of systems]*. Cherkasy : ChDTU. Retrieved from: <http://surl.li/rtbmj> [in Ukrainian].