

**ФІЛІПОВА МАРИНА**

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

<https://orcid.org/0000-0003-4910-3249>e-mail: [m.filippova@kpi.ua](mailto:m.filippova@kpi.ua)**ДЕМЧЕНКО МАРІЯ**

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

<https://orcid.org/0000-0003-0436-1092>e-mail: [dmariia@gmail.com](mailto:dmariia@gmail.com)**МИРЗА ДЕНИС**

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

<https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>e-mail: [sakkran566@gmail.com](mailto:sakkran566@gmail.com)**БОГДАН ГАЛИНА**

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

<https://orcid.org/0000-0001-6745-1509>e-mail: [bogdangalya@gmail.com](mailto:bogdangalya@gmail.com)

## АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ МАНІПУЛЯЦІЙНИМИ РОБОТАМИ

В роботі розглянуто можливості розроблення автоматизованої системи управління маніпуляційними роботами на основі математичної моделі робота та використання мобільного пристрою на платформі Android для дистанційного керування. Акцент зроблено на необхідності системного підходу до управління маніпуляційними механізмами в умовах реального часу, що є критично важливим для забезпечення точності та швидкості виконання завдань у різних сферах діяльності. Використання математичних моделей дозволяє здійснювати деталізований аналіз кінематики та динаміки маніпулятора, що забезпечує оптимальне керування рухами робота та підвищує гнучкість його взаємодії з навколишнім середовищем.

Ключові слова: маніпуляційна система, математична модель, рівняння Лагранжа, Bluetooth, програма для управління на базі Android, конструювання, моделювання.

FILIPPOVA MARYNA, DEMCHENKO MARIIA, MYRZA DENYS, BOHDAN HALINA

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

## AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR MANIPULATION ROBOTS

The article deals with the development of an automated control system for manipulative robots based on a mathematical model and the use of an Android mobile device for remote control. The main goal of the study is to create a prototype of a robotic arm that can be controlled using wireless technology, which provides convenience and efficiency in real-time control. The 4-degree-of-freedom robotic arm was created and is controlled through a mobile application developed using MIT App Inventor, which is based on Bluetooth technology. Data from the application is transmitted serially via a Bluetooth transmitter, processed by the receiver and used to control the robot's movements. The development and implementation of such a control system is an important step in the development of robotic technologies, as it not only provides a high level of automation but also allows robots to be used in various fields of activity, such as industry, medicine, logistics and other areas where the accuracy and speed of task performance are critical. A systematic approach to real-time control of manipulation mechanisms allows for high precision in control, which is especially important in a dynamically changing working environment. One of the key features of this system is the use of mathematical models that allow for a detailed analysis of the manipulator's kinematics and dynamics. This makes it possible to optimally control the robot's movements, which increases its flexibility in interacting with the environment. Mathematical models provide the ability to predict and correct robot actions in real time, which minimises the risk of errors and increases the overall efficiency of the system. One of the main advantages of using an Android mobile application is its accessibility and ease of use. Modern mobile devices have considerable computing power, which makes it possible to integrate complex control algorithms into the application and control robotic systems without the need for expensive specialised equipment. The application, created using MIT App Inventor, allows the user to easily configure robot control parameters, receive real-time feedback and control all aspects of the robot through a user-friendly interface. Bluetooth data transmission is another important component of the system, as it provides reliable and fast communication between the mobile device and the robot. The data is transmitted sequentially, which allows for precise coordination of the robot's movements in accordance with the commands coming from the app. This approach also minimises delays in the transmission of commands, which is key for real-time tasks. During the experiments, successful tests of the linear movement of the robotic arm were conducted, which confirmed the system's performance and its potential for further development. The tests demonstrated that the robot is able to accurately perform tasks related to linear movement, which is the basis for its use in more complex scenarios. This opens up wide opportunities for the introduction of such robots in various fields where it is necessary to perform tasks with high accuracy and speed. In general, the proposed system combines advanced technologies such as mathematical modelling, wireless communication and mobile applications, which ensures high flexibility and efficiency in the management of robotic systems. The use of mathematical models allows not only for precise control of the robot's movements, but also for adaptation to changes in the environment, which makes the system more stable and reliable in use.

Keywords: manipulation system, mathematical model, Lagrange's equation, Bluetooth, Android-based control application, design, modeling.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

За останні 20 років роботи впроваджуються в усі сфери життя людини [1] – [3] від охорони здоров'я до виробництва. Сучасні роботи працюють енергоефективно та використовуються для зниження споживання енергії у виробництві. Завдяки їхній точній роботі виробляється менше браку та дефектної продукції, що позитивно впливає на використання ресурсів і підвищує ефективність виробництва [4]. Доцільність

використання роботів підтверджується багатьма дослідженнями та практичними результатами їх ефективної роботи [5], [6].

Однією з ключових проблем розроблення системи управління для роботів є створення ефективних математичних моделей маніпуляційних роботів, які б одночасно описували динаміку системи з достатньою точністю та були придатними для практичної реалізації у цифровій формі. Така модель має забезпечувати високу точність позиціонування кінцевого ефектора робота та враховувати динамічні особливості руху ланок. Іншим аспектом є зручність управління маніпуляційними роботами [7]. Для ефективної взаємодії з такими системами все частіше застосовуються мобільні пристрої, зокрема на платформі Android, що дозволяють оператору управляти роботом дистанційно та в режимі реального часу. Однак, інтеграція мобільних пристроїв у систему управління маніпуляційними роботами потребує вирішення ряду технічних завдань, пов'язаних із передаванням команд, обробкою даних у реальному часі та забезпеченням надійності зв'язку [8].

### Аналіз досліджень та публікацій

В роботі [9] надано результати дослідження розвитку автоматизованих систем управління маніпуляційними роботами, їх застосування в різних сферах та вплив технологій на підвищення ефективності виробництва. Зокрема, Девол та Енгельбергер створено Unimate #001, першу роботизовану руку, у 1959 році. Пізніше Unimation створила роботів для зварювальних робіт та інших задач у швидко зростаючій автомобільній промисловості. У роботі Шинде, Соноване та Гайквада [17] детально описано розвиток промислових роботизованих маніпуляторів, які широко застосовуються у виробництві для виконання складних та повторюваних задач. Системи автоматизації таких роботів спираються на чітко налаштовані алгоритми управління, які дозволяють контролювати рухи маніпулятора з високою точністю. Тут використовується принципи прямої та зворотної кінематики, що дозволяють розраховувати положення кінцівки маніпулятора, базуючись на положенні та кутах повороту кожного суглоба, що є важливим для забезпечення точності рухів у промислових процесах, таких як зварювання, монтаж чи обробка матеріалів. Інший варіант модернізації розглянуто Денкеном, Бергманом та Леппером [18], а саме оптимізацію роботизованих систем для обробки матеріалів, особливо в контексті підвищення їх ефективності та продуктивності. Ці автори використали математичні методи оптимізації для налаштування траєкторії руху робота з метою мінімізації часу обробки та енергетичних витрат. У таких системах активно застосовуються алгоритми оптимізації та методи, які базуються на моделюванні динаміки руху маніпулятора, що дозволяє забезпечити точну координацію рухів при роботі з різними типами матеріалів.

Роботизовані руки найчастіше використовуються у промисловому виробництві. Типовий роботизований маніпулятор складається з семи металевих сегментів, з'єднаних шістьма шарнірами. Мікроконтролер робота обертає окремі крокові двигуни, прикріплені до кожного з'єднання. Роботизовані руки - це пристрої, яким можна доручити виконати певне завдання або обов'язок з надзвичайною точністю, швидкістю та ефективністю [4]. Вони часто мають моторний привід і використовуються для важких та часто повторюваних завдань, які повинні виконуватися швидко і послідовно протягом тривалих періодів часу. Їх особливо цінують у промисловому виробництві, обробці та складанні.

Більшість роботів, адаптовані до маніпулятивного керування під час роботи, відповідно оператор за допомогою пульта управління подає сигнал про початок роботи чи її кінець тощо. Але керування має недоліки, серед яких можна відокремити:

1. Обмежені можливості адаптації. Системи управління мають жорсткі закріплені алгоритми дій і не можуть швидко адаптуватися до змін у зовнішньому середовищі. Це робить їх непридатними для роботи у складних або мінливих умовах.

2. Точність управління. Нелінійні задачі, що виникають при управлінні багатоланковими системами, такими як роботизовані руки, призводять до неточності у рухах маніпулятора. Нестабільність у виконанні завдань особливо критична в контексті промислових процесів, де кожна помилка може спричинити серйозні наслідки.

3. Відсутність ефективних засобів дистанційного керування. Багато систем не мають можливостей гнучкого управління на відстані, що обмежувало їх застосування в умовах, коли оператор не може постійно перебувати поруч із роботом.

Основна проблема в автоматизованих системах управління маніпуляційними роботами полягає у відсутності універсальних і гнучких алгоритмів управління, які могли б адаптуватися до зовнішніх змін і забезпечувати дистанційний контроль. Способами вирішення цієї проблеми є розроблення нової математичної моделі, яка мінімізує неточності, використання та створення пристрою на платформі Android як інтерфейсу для управління і моніторингу роботом на відстані, а також створення нових алгоритмів роботи.

Таким чином, результати цих досліджень демонструють важливість автоматизації у виробництві та роль робототехніки у підвищенні продуктивності та точності виконання завдань. Застосування сучасних математичних моделей у поєднанні з технологіями дистанційного керування створює нові можливості для оптимізації роботи маніпуляційних роботів.

### Формулювання цілей статті

**Метою роботи є:** розробка автоматизованої системи управління маніпуляційними роботами, що базується на математичній моделі робота та мобільному пристрої на платформі Android для забезпечення дистанційного керування.

### Виклад основного матеріалу

Для вирішення поставленої задачі необхідним є створення системи на базі мініатюрного робота з чотирма ступенями свободи з використанням мікроконтролера Arduino (Keystudio V4.0 Control Board) і модуля зв'язку на базі Bluetooth. Система дозволяє точно відтворювати рухи маніпуляційного робота під час піднімання, переміщення, опускання та відпускання об'єктів, забезпечуючи високу точність і гнучкість управління. Управління роботом здійснюється через мобільний додаток, що дозволяє операторам контролювати маніпулятор у режимі реального часу.

Основою системи є математична модель [8], яка описує динаміку рухів робота, аналогічно до рухів людської руки, де кожен суглоб виконує певну функцію — "Захват", "рухи вперед – назад (лікоть)", "рухи вгору – вниз (плече)", "рухи платформи (основа)". Ця модель є ключовою для забезпечення точності рухів і зручності управління. Наступним способом вирішення задачі являється розробка мобільного додатка на базі Android, що дозволяє не тільки задавати команди роботу з дїсплея і за допомогою голосу, але й спостерігати за його станом у реальному часі, забезпечуючи гнучке та ефективне керування [10].

На рисунку 1 показані всі необхідні основні компоненти розробленого робота маніпулятора на базі мікроконтролера, який керується за допомогою віддаленого пристрою. Через модуль Bluetooth, пристрій передає сигнал на мікроконтролер, включаючи голосові команди, що приводить в дію 4 серводвигуни. Чотири двигуни системи керуються сигналами, виробленими мікроконтролером. Driver Shield визначає напрямки обертання чотирьох двигунів [11]. Механічна сила робота здатна піднімати, переміщати, опускати і відпускати невеликі об'єкти, при цьому дуже нагадуючи або посилаючись на рух людської руки, яка складається з плечового суглоба, ліктьового суглоба, променезап'ясткового суглоба і, нарешті, пальців, всі вони з'єднані між собою.

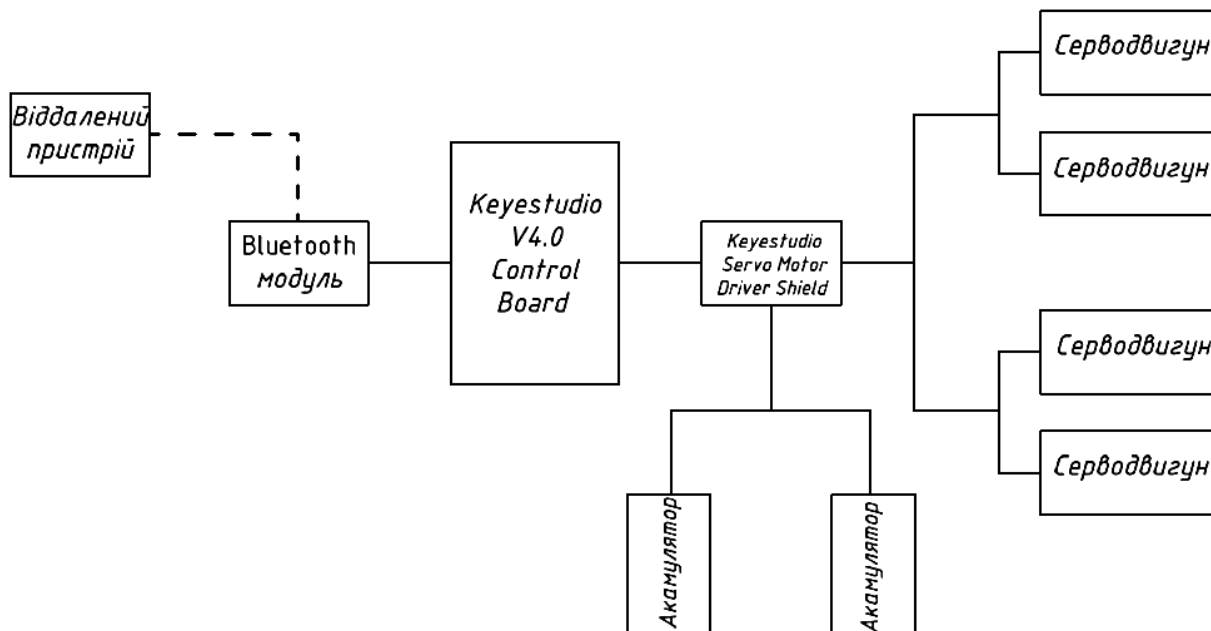


Рис. 1. Структурна схема системи управління

Для забезпечення високої точності та швидкодії автоматичної системи керування маніпулятором робота необхідно створити його математичну модель. У рамках цього етапу запропоновано застосувати метод Денавіта-Хартенберга в комбінації з Лагранжевими рівняннями. Використання цих підходів дозволить отримати рівняння динаміки ланок маніпулятора, що дасть можливість детально дослідити його поведінку. Створена таким чином математична модель дозволить розробити ефективну систему керування та оптимізувати вибір параметрів для підвищення продуктивності та точності управління [12].

Типовим представником робота маніпулятора, в якому відтворюються всі види рухів людської руки, є чотирьохланковий робот, який представлений на рис. 2 а. Основними складовими частинами робота є: основа, плече, лікоть та захват. На рис. 2 б показано кінематичну схему даного робота, яка складається з чотирьох ланок  $a_1, a_2, a_3, a_4$ .

З кінематичної схеми, наведеної на рис. 2 б визначаємо основні параметри системи координат ланок, що зазначені в таблиці 1. Де  $a_i$  – довжини ланок;  $\alpha_i$  – кут між осями  $z_i$  та  $u_i$  навколо осі  $x_i$ ;  $\theta_i$  – кут обертання навколо осі  $z_i$ ;  $d_i$  – відстань вздовж осі  $z_i$ .

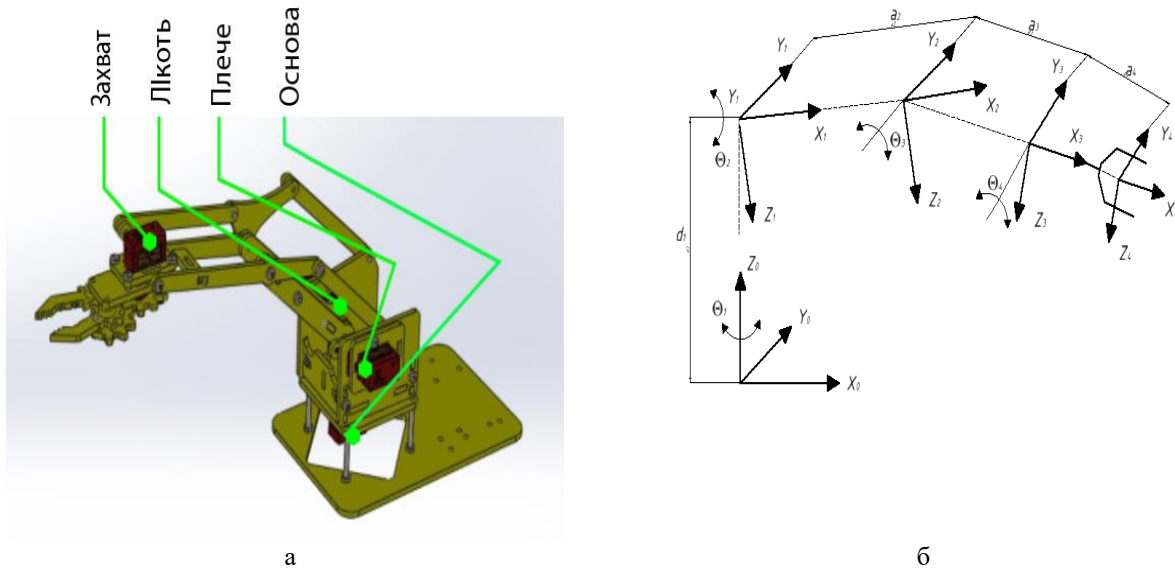


Рис. 2 Чотирьохланковий робот  
а) модель роботу; б) кінематична схема

Таблиця 1

Параметри системи координат

№ Ланки	$\theta_i$	$\alpha_i$	$a_i$	$d_i$
1	$\theta_1$	$90^\circ$	0	$d_1$
2	$\theta_2$	0	$a_1$	0
3	$\theta_3$	0	$a_2$	0
4	$\theta_4$	0	$a_3$	0

Для опису динамічного рівняння скористаємось матрицею однорідного перетворення для однорідного руху [13]:

$$A_i^{i-1} = \begin{vmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & \alpha_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & \alpha_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (1)$$

Якщо відомі координати точки  $r_i$  в  $i$ -й системі координат, то за допомогою матриці перетворення (1) можна визначити координати цієї точки в системі координат, пов'язаній з попередньою, тобто  $i-1$  системою координат:

$$r_i^{i-1} = A_i^{i-1} \cdot r_i^i, \quad (2)$$

де  $r_i^{i-1} = |x_{i-1} \ y_{i-1} \ z_{i-1} \ 1|^T$  – координати точки  $r_i$  в  $i-1$ -й системі координат;  $r_i = |x_i \ y_i \ z_i \ 1|^T$  – координати точки  $r_i$  в  $i$ -й системі координат.

Перемноживши матриці перетворення для суміжних систем координат, отримуємо матрицю перетворення, яка встановлює зв'язок між координатною системою  $i$ -тої ланки та базовою системою координат.

Положення  $i$ -ланки відносно основи маніпулятора визначається наступним чином:

$$A_i^0 = A_1^0 \cdot A_2^1 \cdot A_3^2 \cdot A_4^3 \cdot \dots \cdot A_i^{i-1} \quad (3)$$

Для прийнятих систем координат, на підставі табл. 1 та матриці  $A_i^{i-1}(1)$ , знайдемо однорідні матриці перетворення для маніпулятора робота:

$$A_1^0 = \begin{vmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4)$$

$$A_2^1 = \begin{vmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & a_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & a_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (5)$$

$$A_3^2 = \begin{vmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & a_3 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & a_3 \sin \theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (6)$$

$$A_4^3 = \begin{vmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & a_4 \cos \theta_4 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & a_4 \sin \theta_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (7)$$

Після отримання значень для  $A_1^0, A_2^1, A_3^2, A_4^3$ , наступним кроком є їх послідовне об'єднання для спрощення, яке виконується наступним чином:

$$A_4^2 = A_3^2 \cdot A_4^3; \quad A_4^1 = A_2^1 \cdot A_4^2; \quad A_4^0 = A_1^0 \cdot A_4^1 \quad (8)$$

Щоб скласти диференціальні рівняння руху маніпулятора, звернемося до рівнянь Лагранжа у векторно-матрицевій формі, записуючи його таким чином [14]:

$$\tau(t) = D(q(t)) \cdot \ddot{q}(t) + h(q(t), \dot{q}(t)) + C(q(t)), \quad (9)$$

де  $\tau(t)$  – вектор узагальнених сил (моментів), які створюються силовими приводами в зчленуваннях маніпулятора;  $q(t)$  – вектор приєднаних змінних;  $\dot{q}(t)$  – вектор узагальнених швидкостей;  $\ddot{q}(t)$  – вектор узагальнених прискорень;  $D(q)$  – симетрична матриця розмірністю  $n \times n$ ;  $h(q, \dot{q})$  – вектор коріолісових і відцентрових сил;  $C(q)$  – вектор гравітаційних сил (моментів).

Згідно з даним описом, векторно-матрицеве рівняння чотириохланкового робота матиме вигляд:

$$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \\ \ddot{\theta}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{bmatrix} \quad (10)$$

де  $D_{ik}$  – коефіцієнти, які встановлюють зв'язок сил, моментів, що діють у зчленуваннях з прискореннями приєднаних змінних;  $h_i$  – коефіцієнти, які встановлюють зв'язок сил і моментів, що діють у зчленуваннях, із швидкостями зміни приєднаних змінних;  $C_i$  – коефіцієнти, які враховують силу тяжіння, що діє на кожен ланку.

Елементи матриці  $D$  визначаються згідно з виразом (11):

$$D_{ik} = \sum_{j=\max(i,k)}^n Tr(U_{jk} J_j U_{ji})^T, \quad (11)$$

де  $i, k = 1, 2, 3, 4; n = 4$  – кількість ланок.

Для кінематичної системи, що розглядається, рівняння (11) має вигляд:

$$\begin{aligned} D_{11} &= Tr(U_{11} J_1 U_{11})^T + Tr(U_{21} J_2 U_{21})^T + Tr(U_{31} J_3 U_{31})^T + Tr(U_{41} J_4 U_{41})^T; \\ D_{12} &= D_{21} = Tr(U_{21} J_2 U_{21})^T + Tr(U_{32} J_2 U_{31})^T; \\ D_{13} &= D_{31} = Tr(U_{33} J_3 U_{31})^T; \\ D_{22} &= Tr(U_{22} J_2 U_{22})^T + Tr(U_{32} J_2 U_{31})^T; \\ D_{23} &= D_{32} = Tr(U_{33} J_3 U_{32})^T; \\ D_{33} &= Tr(U_{33} J_3 U_{33})^T; \end{aligned} \quad (12)$$

Матриця  $U_{ji}$  описує зміну положення  $i$ -ї ланки, яке спричинене рухом в  $j$ -му зчленуванні і обчислюється за виразом (13) [15]:

$$U_{ji} = \frac{\partial A_i}{\partial q_j} = \{A_{j-1}^0 \cdot Q_j \cdot A_i^{j-1}, \text{ якщо } j \leq i, \quad (13)$$

де  $Q_i$  – матриця для обертового та поступального зчленувань.

Звідси отримуємо, що

$$\begin{aligned} U_{11} &= Q_1 \cdot A_1^0; \\ U_{21} &= Q_1 \cdot A_2^0; \\ U_{31} &= Q_1 \cdot A_3^0; \\ U_{22} &= A_1^0 \cdot Q_1 \cdot A_2^0; \\ U_{32} &= A_1^0 \cdot Q_2 \cdot A_3^1; \\ U_{33} &= A_2^0 \cdot Q_3 \cdot A_3^2; \end{aligned} \quad (14)$$

Елементи матриці  $J_i$  обчислюються за відомими виразами, а саме розрахунок лінійної та кутової швидкості кінцевого ефектора робот [15].

Для визначення складових, які описують відцентрові і коріолісові сили, використаємо вираз (15):

$$h_i = \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^n h_{ikm} \dot{q}_k \dot{q}_m, \quad (15)$$

де  $i = 1, 2, 3, 4; n = 4$ .

В нашому випадку вираз (15) матиме наступний вигляд:

$$\begin{aligned} h_1 &= \sum_{k=1}^4 \sum_{m=1}^4 h_{1km} \dot{q}_k \dot{q}_m \\ &= h_{111} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_1 + h_{112} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + h_{113} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + h_{114} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 + h_{121} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_1 + h_{122} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_2 + h_{123} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + h_{124} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_4 \\ &\quad + h_{131} \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_1 + h_{132} \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_2 + h_{133} \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_3 + h_{134} \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_4 + h_{141} \dot{\theta}_4 \dot{\theta}_1 + h_{142} \dot{\theta}_4 \dot{\theta}_2 + h_{143} \dot{\theta}_4 \dot{\theta}_3 + h_{144} \dot{\theta}_4 \dot{\theta}_4; \\ h_2 &= \sum_{k=1}^4 \sum_{m=1}^4 h_{2km} \dot{q}_k \dot{q}_m \\ &= h_{211} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_1 + h_{212} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + h_{213} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + h_{214} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 + h_{221} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_1 + h_{222} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_2 + h_{223} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + h_{224} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_4 \\ &\quad + h_{231} \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_1 + h_{232} \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_2 + h_{233} \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_3 + h_{234} \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_4 + h_{241} \dot{\theta}_4 \dot{\theta}_1 + h_{242} \dot{\theta}_4 \dot{\theta}_2 + h_{243} \dot{\theta}_4 \dot{\theta}_3 + h_{244} \dot{\theta}_4 \dot{\theta}_4; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
h_3 &= \sum_{k=1}^4 \sum_{m=1}^4 h_{2km} \dot{q}_k \dot{q}_m \\
&= h_{311} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_1 + h_{312} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + h_{313} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + h_{314} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 + h_{321} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_1 + h_{322} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_2 + h_{323} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + h_{324} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_4 \\
&\quad + h_{331} \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_1 + h_{332} \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_2 + h_{333} \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_3 + h_{334} \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_4 + h_{341} \dot{\theta}_4 \dot{\theta}_1 + h_{342} \dot{\theta}_4 \dot{\theta}_2 + h_{343} \dot{\theta}_4 \dot{\theta}_3 + h_{344} \dot{\theta}_4 \dot{\theta}_4; \\
h_4 &= \sum_{k=1}^4 \sum_{m=1}^4 h_{2km} \dot{q}_k \dot{q}_m = h_{411} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_1 + h_{412} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + h_{413} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + \\
&\quad h_{414} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 + h_{421} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_1 + h_{422} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_2 + h_{423} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + \\
&\quad h_{424} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_4 + h_{431} \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_1 + h_{432} \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_2 + h_{433} \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_3 + \\
&\quad h_{434} \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_4 + h_{441} \dot{\theta}_4 \dot{\theta}_1 + h_{442} \dot{\theta}_4 \dot{\theta}_2 + h_{443} \dot{\theta}_4 \dot{\theta}_3 + h_{444} \dot{\theta}_4 \dot{\theta}_4; \tag{16}
\end{aligned}$$

Коефіцієнти  $h_{ikm}$  знаходимо з виразу:

$$h_{ikm} = \sum_{j=\max(i,k)}^n \text{Tr}(U_{jk} J_j U_{ji})^T, \tag{17}$$

де  $i, k, m = 1, 2, 3, 4; n = 4$ .

Після, того визначаємо значення  $U_{ikm}$  за виразом (18):

$$U_{ikm} = \begin{cases} A_{k-1}^0 \cdot Q_k \cdot A_{m-1}^{k-1} \cdot Q_m \cdot A_m^{m-1}, \text{ якщо } j \geq m \geq k \\ A_{m-1}^0 \cdot Q_m \cdot A_{k-1}^{m-1} \cdot Q_k \cdot A_j^{k-1}, \text{ якщо } j \geq k \geq m \\ 0, \text{ якщо } j < k \text{ або } j < m \end{cases} \tag{18}$$

Вплив гравітаційних сил (моментів), які діють на маніпулятор, визначається за формулою (19) [15]:

$$C_i = \sum_{j=1}^n (-m_j g U_{ji} \bar{r}_j^T), \tag{19}$$

де  $i = 1, 2, 3, 4; n = 4; g$  – вектор рядок, що описує гравітаційне прискорення в базовій системі координат;  $\bar{r}_j^T$  – радіус-вектор центра мас  $i$ -ланки.

Для нашого випадку вирази (19) обчислення гравітаційних моментів запишуться таким чином:

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= -(m_1 g U_{11} \bar{r}_1^T + m_2 g U_{21} \bar{r}_2^T + m_3 g U_{31} \bar{r}_3^T + m_4 g U_{41} \bar{r}_4^T) \\ C_2 &= -(m_2 g U_{22} \bar{r}_2^T + m_3 g U_{32} \bar{r}_3^T + m_4 g U_{42} \bar{r}_4^T) \\ C_3 &= -(m_3 g U_{33} \bar{r}_3^T + m_4 g U_{43} \bar{r}_4^T) \\ C_4 &= -(m_4 g U_{44} \bar{r}_4^T) \end{aligned} \right\} \tag{20}$$

Вектор узагальнених моментів  $\tau(t)$ , які створюються зовнішніми впливами в зчленуваннях, має вигляд:

$$\tau(t) = \begin{bmatrix} M_1 - M_{f1} \\ M_2 - M_{f2} \\ M_3 - M_{f3} \\ M_4 - M_{f4} \end{bmatrix}, \tag{21}$$

де  $M_1, M_2, M_3, M_4$  – моменти, що діють на ланки механізму з боку приводів переміщення;  $M_{f1}, M_{f2}, M_{f3}, M_{f4}$  – моменти зовнішнього в'язкого тертя у відповідних зчленуваннях.

Підставивши знайдені вирази (12), (16), (20), (21) у (10) і виконав необхідні перетворення, отримаємо математичну модель, що описує динаміку чотирьохланкового маніпулятора робота. На основі виведеної математичної моделі з використанням теорії автоматичного керування є можливим синтезувати систему керування роботом маніпулятором.

Реалізація системи керування (рис.1) для маніпуляційного робота складається з двох частин: апаратної та програмної. Апаратна частина включає всі фізичні механізми, а програмна частина — це закодована архітектура шарових комп'ютерних інструкцій, яка забезпечує обробку сигналів. Використані апаратні матеріали, визначені під час процесів проектування та моделювання, є наступними:

1. Мікроконтролер Keystudio V4.0Control Board або Arduino UNO (ATmega328). Використовується для приймання командних сигналів з Android-додатку через Bluetooth-комунікаційний інтерфейс, інтерпретації отриманих команд і надсилання відповідних сигналів ширини імпульсів (PWM) до необхідних сервомоторів для виконання завдання підйому та розміщення.

2. Чотири одиниці сервомоторів SG90: Використовуються як з'єднувачі між руками робота та забезпечують 1 ступінь свободи (DOF) на кожному суглобі руки. Оскільки використано 4 сервомотори, розроблений маніпулятор має 4 ступені свободи.

3. Bluetooth-модуль HC-05. Буде використовуватися як засіб зв'язку між Android-додатком та мікроконтролером ATmega328.

4. Блок живлення (літій-іонні акумулятори). Літій-іонні елементи з'єднані у послідовно-паралельній схемі, щоб забезпечити необхідну потужність для роботи руки. Мінімально оцінена потужність, що має бути подана акумулятором, становить 28 Вт (тобто 7 В і 4 А).

На рисунку 3 зображена електрична принципова схема системи контролю робота маніпулятора.

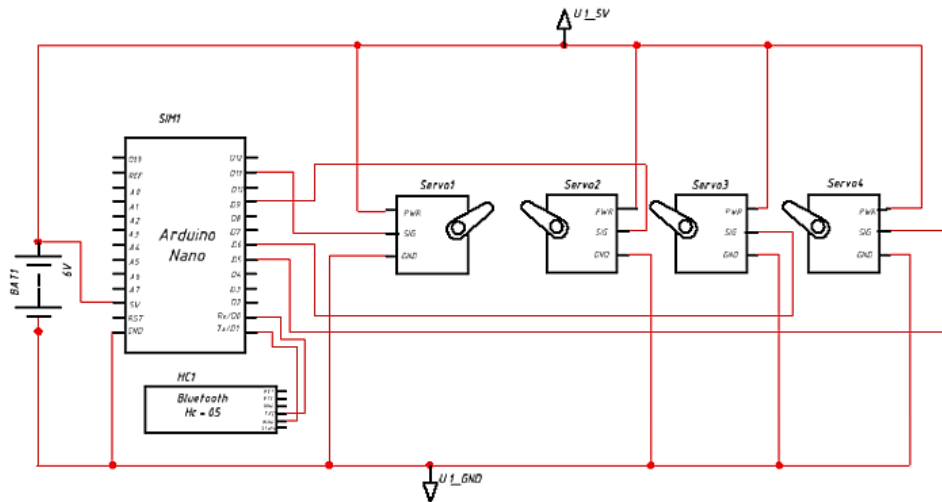


Рис. 3. Електрична принципова схема системи контролю робота маніпулятора

Програмний інтерфейс розроблено за допомогою MIT App Inventor. Розроблений додаток завантажений і запущений на мобільному телефоні з Android. Інтерфейс реалізованої програми керуванні зображений на рисунку 4.

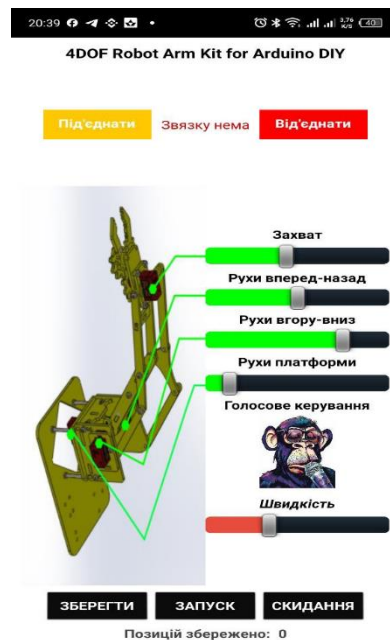


Рис. 4. Інтерфейс програми для керування роботом – маніпулятором

Принцип роботи програми (рис.4) полягає в наступному. Для того, щоб почати роботу, потрібно натиснути кнопку **Під'єднати** і вибрати зі списку пристрій який потрібно. В даному випадку до модуля Bluetooth HC-05. Після успішного контакту, прозвучить звук успішної операції. Сусідня кнопка **Від'єднати** використовує для припинення контакту, яке також супроводжує голосовою командою. Потім з лівого розташовано-зображення руки робота на основі якого проектуємо дану систему керування, а з правого боку знаходиться 4 повзунків для керування сервоприводами:

1. **Захват** – рухома частина маніпулятора, яка виконує роль руки робота (робочий діапазон  $0^{\circ} - 180^{\circ}$ );
2. **Рухи вперед-назад** – відтворює рухи вперед і назад “клешні” робота (робочий діапазон  $0^{\circ} - 180^{\circ}$ );
3. **Рухи вгору-вниз** - відтворює рухи для опускання і відповідно піднімання “клешні” робота (робочий діапазон  $0^{\circ} - 180^{\circ}$ );
4. **Рухи платформою** – кругові рухи всієї конструкції (робочий діапазон  $0^{\circ} - 180^{\circ}$ );

Кожен повзунок має різні початкові, мінімальні та максимальні значення, які відповідають суглобам рук робота. Наступною функцією є голосове керування, яке подає відповідні голосові команди у вигляді сигналів до сервоприводів, що запускає їх рух, для активації потрібно натиснути на зображення **Мавпи з мікрофоном**. Схема голосового управління (рис.5) складається з дій, які виконує користувач і реакцію програми на це, алгоритм полягає у наступному, користувач натискає на мавпу і говорить фразу або слово, далі сигнал передається до телефону, де відбувається перевірка команди зі списку заданих, якщо такої фрази немає,

програма повертає в головне меню. Коли все голосова команда знайдена, вона передається по блютузу на мікроконтроллер і відбувається її виконання.

Ще однією функцією являється коригування швидкості роботи сервоприводів за допомогою повзунка **Швидкість**.

У нижній частині програми є три кнопки: **ЗБЕРЕГТИ**, **ЗАПУСК** та **СКИДАННЯ**, за допомогою яких програмується автоматичний запуск руки робота. Натискання кожної з них, призводить до виникання активації звуку. Нижче також є мітка, яка показує кількість кроків, які на даний момент часу збережені.

В результаті імітаційного експерименту було створено маніпулятор робота, з використанням 4 серводвигунів, Програма керування створена для операційної системи Android через Bluetooth за допомогою Proteus та Arduino, з використанням декількох компонентів, а саме: одного компонента Simulino, Arduino UNO, чотирьох серводвигунів, одного елемента живлення, та блоку Bluetooth HC-05. Схема апаратної реалізації системи керування роботом показана на рис.6 а, на рис. 6 б показано симуляцію роботи маніпулятора (з використанням 4-х серводвигунів), який керується через Bluetooth.

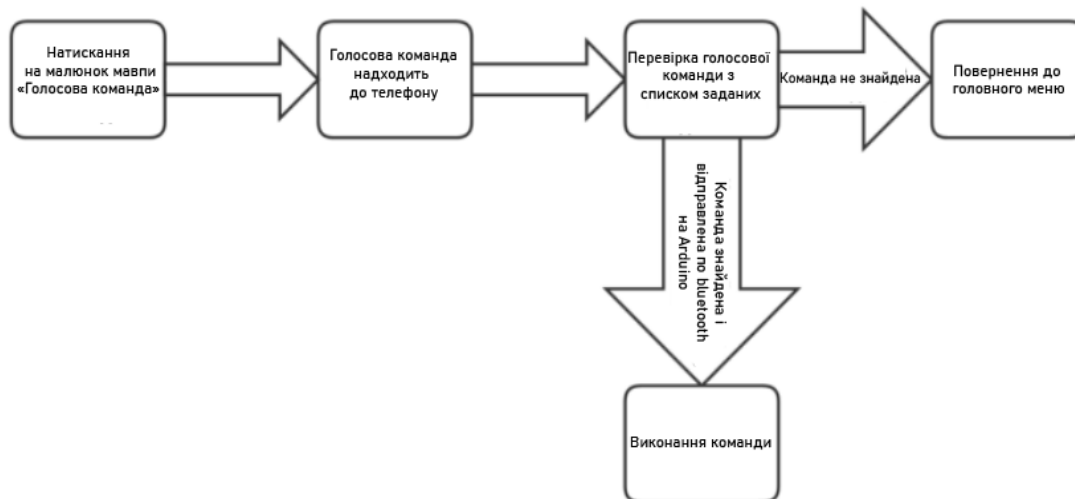


Рис. 5. Схема голосового управління

Для того, щоб реалізувати дану схему потрібно підключити мобільний пристрій для керування до модуля HC - 05 і задати відповідну команду, щоб сервоприводи почали працювати. Підключення здійснено за допомогою емулятора на Android через ПК. Результат симуляції роботи програми показаний на рисунк 6, б.

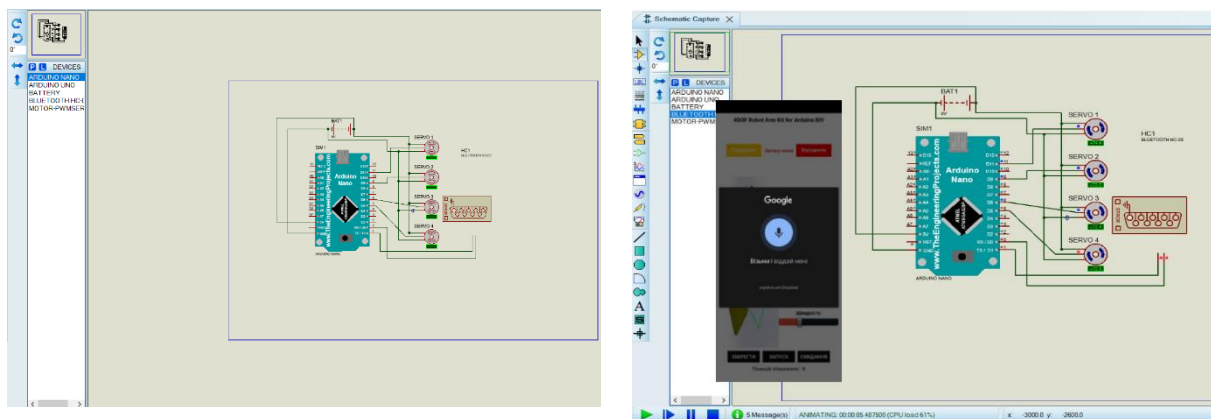


Рис. 6. Апаратна реалізація системи керування  
а) схема апаратної реалізації маніпулятора робота (з використанням 4-х серводвигунів) керуючого через Bluetooth; б) симуляція роботи маніпулятора

Після подачі голосової команди “Візьми і віддай мені”, сигнал надсилається на модуль HC-05 і подається на мікроконтроллер, що приводить до роботи 4 сервоприводи, які відповідають за рух механізму робота на заданий проміжок. Керування системою відбувається за розробленою програмою, що показана на рис. 7, та працює наступним чином.

На початку коду підключається бібліотека Servo, що надає функції для роботи з сервоприводами, і створюються об'єкти для чотирьох сервоприводів.

У функції **setup()** ініціалізується серійний зв'язок з комп'ютером на швидкості 9600 біт/с. Потім кожен сервопривід прив'язується до певного піна мікроконтролера: перший сервопривід підключається до піна 11, другий — до піна 9, третій — до піна 6, і четвертий — до піна 5.



```

sketch_sep19a | Arduino 1.8.18
Файл Правка Схеми Інструменти Поміть
sketch_sep19a$
// Ініціалізація 4 сервоприводів
Servo servo1;
Servo servo2;
Servo servo3;
Servo servo4;

// Діагностика для отримання команд з Bluetooth
String command = "";

void setup() {
  // Ініціалізація серіального з'єднання Bluetooth
  Serial.begin(9600);

  // Призначення піків до сервоприводів
  servo1.attach(11); // Серво 1 на пік 9
  servo2.attach(6); // Серво 2 на пік 10
  servo3.attach(4); // Серво 3 на пік 11
  servo4.attach(5); // Серво 4 на пік 12
}

void loop() {
  // Читання команди з Bluetooth
  if (Serial.available() > 0) {
    command = Serial.readString(); // Читання вхідної дані
    command.trim(); // Видалення пробілів з вхідної команди

    // Обробка українськомовної посилаючої команди
    if (command == "відкрий") {
      servo1.write(0); // Повернути перший серво на 0 градусів
    } else if (command == "закрий") {
      servo1.write(180); // Повернути перший серво на 180 градусів
    } else if (command == "вперед") {
      servo2.write(0); // Повернути другий серво на 0 градусів
    } else if (command == "назад") {
      servo2.write(180); // Повернути другий серво на 180 градусів
    } else if (command == "вниз") {
      servo3.write(0); // Повернути третій серво на 0 градусів
    } else if (command == "вверх") {
      servo3.write(180); // Повернути третій серво на 180 градусів
    } else if (command == "ліво") {
      servo4.write(0); // Повернути четвертий серво на 0 градусів
    } else if (command == "праворуч") {
      servo4.write(180); // Повернути четвертий серво на 180 градусів
    } else {
      Serial.println("Невідома команда: " + command); // Виводимо повідомлення про невідому команду
    }
  }
}

```

Рис. 7. Код програми для Arduino IDE

В основному циклі **loop()** програма постійно перевіряє, чи є доступні дані з Bluetooth. Якщо дані є, вона читає їх у змінну **command** і очищає пробіли на початку та в кінці команди. Далі програма обробляє команди, які вводить користувач, і виконує відповідні дії з сервоприводами.

Якщо команда дорівнює "відкрий", перший сервопривід повертається на 0 градусів. Якщо команда "закрий", то повертається на 180 градусів. Аналогічно, друга команда "вперед" повертає другий сервопривід на 0 градусів, а команда "назад" — на 180 градусів. Третій сервопривід також керується відповідно до команд "вверх", "вниз", а четвертий відповідно "вліво" і "вправо".

Крім того, команда "Візьми і віддай мені" виконує одночасне повернення всіх сервоприводів на 180 градусів, що імітує дію підйому та передавання об'єкту. Якщо програма отримує невідому команду, вона виводить повідомлення в серійний монітор про те, що команда не розпізнана.

### Висновки з даного дослідження

#### і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Автоматизовану систему управління маніпуляційних роботів створено та частково запрограмовано. Крім того, створено відповідний Android-додаток для керування маніпулятором. Дія маніпулятора була максимально стабільною, використовуючи математичну модель з використанням параметрів Денавіта-Хартенберга.

Крім того, в системі керування використана технологія Bluetooth для дистанційного керування роботом [15]. Дана система є міні-версією більш складного і технологічного робота, що дозволить виконувати повторювані і трудомісткі завдання, серед них: монтаж і складання компонентів, пакування та сортування продукції, нанесення покриття або фарбування, саперні операції, обслуговування складного обладнання в зонах хімічної і атомної небезпеки. Результати проведених досліджень можуть бути використані для реалізації роботів маніпуляторів, які зможуть вирішувати поставлені задачі в для різних сферах, а саме: військовій, вантажно-розвантажувальній та переробній промисловості, включаючи харчову промисловість, швейну і текстильну промисловість, виробництво напоїв, поліграфічну промисловість, сталепрокатні заводи і т.д. Використання дистанційної системи керування в промислових процесах не лише підвищить якість і кількість продукції, що випускається, але й зменшить кількість відходів, спричинених людськими помилками і втотою. Крім того, це захистить робітників від потенційно смертельних травм.

Наступним етапом дослідження має бути тестування та оптимізація розробленої автоматизованої системи управління маніпуляційними роботами. Це включатиме в себе, створення фізичного макету і під'єднання відповідних модулів, інтеграція і модернізація мобільного пристрою для забезпечення кращої роботи маніпулятора, оптимізація алгоритмів і створення належних умов безпеки.

### Література

1. J. Brüning, B. Denkena, M. A. Dittrich, and H.-S. Park, «Simulation-based planning of machining processes with industrial robots», *Procedia Manufacturing*, vol. 6, pp. 17-24, 2016, doi: 10.1016/j.promfg.2016.11.003
2. Здолбичка Н.В., Ковальчук П.Є. Система керування маніпулятором. Міжнародний науково-практичний семінар молодих вчених та студентів Програмовані логічні інтегральні схеми та мікропроцесорна техніка в освіті і виробництві (12-13 травня 2020 р.) / відп. ред. П.А. Пех. – Луцьк: Вежа-Друк. – 2020, с.45.
3. P. Kah, M. Shrestha, E. Hiltunen, and J. Martikainen, «Robotic arc welding sensors and programming in industrial applications», *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, vol. 10, no. 1, Dec. 2015, doi: 10.1186/s40712-015-0042-y.
4. Н. М. Галєб і А. А. Алі, «Моделювання та керування 2-DOF маніпулятором робота», *Міжнародний журнал передових інженерних досліджень і технологій*, т. 6, № 11, с. 24-31, 2018.

5. A. Birk and S. Karpin, 'Rescue robotics - a crucial milestone on the road to autonomous systems,' *Advanced Robotics*, vol. 20, no. 5, pp. 595-605, Jan. 2006, doi: 10.1163/156855306776985577.
6. J. C. Trinkle and R. J. Milgram, 'Complete path planning for closed kinematic chains with spherical joints,' *The International Journal of Robotics Research*, vol. 21, no. 9, pp. 773-789, September 2002, doi: 10.1177/0278364902021009119.
7. J. Y. S. Luh, M. W. Walker, and R. P. C. Paul, «Newton - Euler Formulation of Manipulator Dynamics for Computer Control,» *IFACProc. Vol.*, vol. 12, no. 10, pp. 165-172, 1979, doi: 10.1016/s1474-6670(17)65356-4.
8. B. Denken, B. Bergmann, and T. Lepper, 'Design and optimisation of a machining robot,' *Procedia Manufacturing*, vol. 14, pp. 89-96, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.11.010.
9. M. A. Qassem, I. Abuhadrous, and H. Elaydi, 'Modelling and simulation of a 5 DOF training robotic arm,' in *2010 2nd International Conference on Advanced Computer Control*, 2010, pp. 569-574, doi: 10.1109/ICACC.2010.5487136.
10. Монашко С.Ю., Здолбіцька Н.В., Здолбіцький А.П. Arduino – проект рухомої веб-камери. Міжвузівський збірник Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво – Луцьк: Видавництво ЛНТУ. – Вип. 15. – 2014. – С. 32–36.
11. J. Sudharsan and L. Karunamurthy, 'Trajectory planning and collaborative simulation control of an anthropomorphic 8 DOF robotic arm,' *International Journal of Simulation Modelling*, vol. 15, no. 2, pp. 302-312, Jun. 2016, doi: 10.2507/IJSIMM15(2)9.339
12. S. Gomez, G. S. Anchez, J. Zarama, M. C. Ramos, J. E. Alc'antar, 'A. A. Nunez, J. Torres, S. Santana, and F. Najera, 'Design of a 4-Dof robot manipulator with an optimised inverse kinematics algorithm,' *Int. Journal of Mechan.*
13. A. Singh and A. Singla, 'Kinematic modelling of robotic manipulators,' in *Proceedings of the 2017 National Academy of Sciences of India, Section A - Physical Sciences*, pp. 303-319, 2017.
14. Голубев Л.П., Вовк Д.М. Розробка комп'ютерно-інтегрованої системи управління роботоманіпулятором [Електронний ресурс]. Технології та дизайн. – 2019. – № 3. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/td\\_2016\\_3\\_6](http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2016_3_6)
15. I.B. Alit Swamardika, I N. Budiastara, I N. Setiawan, N. Indra Er "Design of Mobile Robot with Robotic Arm Utilising Microcontroller and Wireless Communication", *International Journal of Engineering and Technology (IJET)*, ISSN (Print) : 2319-8613 ISSN (Online) : 0975-4024
16. R. B. Gillespie, J. E. Colgate, and M. A. Peshkin, "A general framework for cobot control," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 17, no. 4, pp. 391–401, 2001, doi: 10.1109/70.954752
17. M. P. S. Shinde, M. A. M. Sonawane, and M. K. S. Gaikwad, 'A review article on industrial robotic manipulator,' *International Journal of Innovation in Engineering Research and Technology*, pp. 1-3, 2018.
18. B. Denkena, B. Bergmann, and T. Lepper, "Design and optimization of a machining robot," *Procedia Manufacturing*, vol. 14, pp.89–96, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.11.010.

## References

1. J. Brüning, B. Denkena, M. A. Dittrich, and H.-S. Park, 'Simulation-based machining process planning with industrial robots,' *Procedia Manufacturing*, vol. 6, pp. 17-24, 2016, doi: 10.1016/j.promfg.2016.11.003
2. Zdolbitska N.V., Kovalchuk P.E. Manipulator control system. International scientific and practical seminar of young scientists and students Programmable logic integrated circuits and microprocessor technology in education and production (12-13 May 2020) / edited by P.A. Pekh: Vezha-Druk, 2020, p.45.
3. P. Kah, M. Shrestha, E. Hiltunen, and J. Martikainen, 'Robotic arc welding sensors and programming in industrial applications', *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, vol. 10, no. 1, Dec. 2015, doi: 10.1186/s40712-015-0042-y.
4. N. M. Ghaleb and A. A. Ali, 'Modelling and control of 2-DOF robot manipulator,' *International Journal of Advanced Engineering Research and Technology*, vol. 6, no. 11, pp. 24-31, 2018.
5. A. Birk and S. Karpin, 'Rescue robotics - a crucial milestone on the road to autonomous systems,' *Advanced Robotics*, vol. 20, no. 5, pp. 595-605, Jan. 2006, doi: 10.1163/156855306776985577.
6. J. C. Trinkle and R. J. Milgram, 'Complete path planning for closed kinematic chains with spherical joints,' *The International Journal of Robotics Research*, vol. 21, no. 9, pp. 773-789, September 2002, doi: 10.1177/0278364902021009119.
7. J. Y. S. Luh, M. W. Walker, and R. P. C. Paul, 'Newton - Euler Formulation of Manipulator Dynamics for Computer Control,' *IFACProc. Vol.* 12, no. 10, pp. 165-172, 1979, doi: 10.1016/s1474-6670(17)65356-4.
8. B. Denken, B. Bergmann, and T. Lepper, 'Design and optimisation of a machining robot,' *Procedia Manufacturing*, vol. 14, pp.89-96, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.11.010.
9. M. A. Qassem, I. Abuhadrous, and H. Elaydi, 'Modelling and simulation of a 5 DOF training robotic arm,' in *2010 2nd International Conference on Advanced Computer Control*, 2010, pp. 569-574, doi: 10.1109/ICACC.2010.5487136.
10. Monashko S.Y., Zdolbitskaya N.V., Zdolbitsky A.P. Arduino - a project of a moving web camera. Interuniversity collection Computer-integrated technologies: education, science, production - Lutsk: LNTU Publishing House - Issue 15. - 2014. - pp. 32-36.
11. J. Sudharsan and L. Karunamurthy, 'Trajectory planning and collaborative simulation control of an anthropomorphic 8 DOF robotic arm,' *International Journal of Simulation Modelling*, vol. 15, no. 2, pp. 302-312, June. 2016, doi: 10.2507/IJSIMM15(2)9.339
12. S. Gomez, G. S. Anchez, J. Zarama, M. C. Ramos, J. E. Alc'antar, 'A. A. Nunez, J. Torres, S. Santana, and F. Najera, 'Design of a 4-Dof robot manipulator with an optimised inverse kinematics algorithm,' *Int. Journal of Mechan.*
13. A. Singh and A. Singla, 'Kinematic modelling of robotic manipulators,' in *Proceedings of the 2017 National Academy of Sciences of India, Section A - Physical Sciences*, pp. 303-319, 2017.
14. Development of a computer-integrated control system for a robot manipulator [Electronic resource]. Technologies and design. - 2019. - No. 3. - Access mode: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/td\\_2016\\_3\\_6](http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2016_3_6).
15. I.B. Alit Swamardika, I N. Budiastara, I N. Setiawan, N. Indra Er 'Design of Mobile Robot with Robotic Arm Utilising Microcontroller and Wireless Communication', *International Journal of Engineering and Technology (IJET)*, ISSN (Print) : 2319-8613 ISSN (Online) : 0975-4024

- 
16. R. B. Gillespie, J. E. Colgate, and M. A. Peshkin, 'A general framework for cobot control,' *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 17, no. 4, pp. 391-401, 2001, doi: 10.1109/70.954752
  17. M. P. S. Shinde, M. A. M. Sonawane, and M. K. S. Gaikwad, 'A review article on industrial robotic manipulator,' *International Journal of Innovation in Engineering Research and Technology*, pp. 1-3, 2018.
  18. B. Denkena, B. Bergmann, and T. Lepper, 'Design and optimisation of a machining robot,' *Procedia Manufacturing*, vol. 14, pp. 89-96, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.11.010.