

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет

Конструювання та дизайну

ПОГОДЖЕНО

Декан факультету

Конструювання та дизайну

(назва факультету(ННІ))

Іван РОГОВСЬКИЙ

(підпис)

(ПІБ)

“ ” 20 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

Конструювання машин і обладнання

(назва кафедри)

Вячеслав ЛОВЕЙКІН

(підпис)

(ПІБ)

“ ” 20 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему Розробка конструкції та дослідження режиму роботи сортувального маніпулятора

Спеціальність

133 Галузеве машинобудування

(код і найменування)

Освітня програма

Машини та обладнання сільськогосподарського виробництва

(назва)

Орієнтація освітньої програми

освітньо-наукова

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

д.т.н., професор

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Вячеслав ЛОВЕЙКІН

(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

Ph.D

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Олександр СПОДОБА

(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Марія ШЕЛЕСТ

(ПІБ здобувача)

КИЇВ 2026

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ  
УКРАЇНИ

Факультет

Конструювання та дизайну

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Конструювання машин і обладнання

д.т.н., професор

Вячеслав ЛОВЕЙКІН

(науковий ступінь вчене звання)

(підпис)

(ПІБ)

“

”

20\_\_р.

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧУ

Шелест Марія Богданівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність

133 Галузеве машинобудування

(код і найменування)

Освітня програма

Машини та обладнання сільськогосподарського виробництва

(назва)

Орієнтація освітньої програми

освітньо-наукова

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи Розробка конструкції та дослідження режиму роботи сортувального маніпулятора

Затверджена наказом від “16” грудня 2024р. № 2268»С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи маса вантажу  $m=50$  кг; передаточне число редуктора  $i=10$ ; крок кульково-гвинтової пари  $P=0,005$  м; жорсткість муфти  $C=180$  Н/рад;

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Визначення параметрів пуску системи за лінійною залежністю зміни керуючого сигналу
2. Визначення параметрів пуску системи за параболічною залежністю зміни керуючого сигналу
3. Визначення параметрів пуску системи за s-подібною залежністю зміни керуючого сигналу

Перелік графічного матеріалу (за потреби)

Дата видачі завдання “\_\_”

20\_\_р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

Олександр СПОДОБА

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

Марія ШЕЛЕСТ

(підпис)

(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота включає пояснювальну записку, що складається зі вступу, п'яти розділів, висновків та списку використаної літератури. Пояснювальна записка містить 61 аркуш друкованого тексту.

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану та засобів автоматизації сортувальних процесів, розглянуто існуючі методи і технології сортування, а також їх переваги та недоліки.

Другий розділ присвячено проектуванню конструкції сортувального маніпулятора. Визначено основні вимоги до конструкції, обґрунтовано вибір кінематичної схеми, описано конструктивні особливості маніпулятора, а також розглянуто питання вибору матеріалів і компонентів, що забезпечують необхідну точність, жорсткість і надійність роботи.

У третьому розділі наведено технічну частину робіт. Розроблено математичну модель режимів руху вихідної ланки сортувального маніпулятора. Проведено теоретичні дослідження.

Четвертий розділ наведено огляд питань щодо охорони праці та безпеки під час експлуатації сортувальних маніпуляторів. Розглянуто основні нормативні вимоги, методи захисту персоналу, організацію безпечної роботи та попередження аварійних ситуацій.

П'ятий розділ містить економічне обґрунтування проекту. Проведено оцінку витрат на розробку, виготовлення, монтаж і впровадження маніпулятора, розраховано показники економічної ефективності, зокрема чисту приведену вартість, строк окупності та внутрішню норму доходності, що підтверджують доцільність інвестицій у автоматизацію сортувальних процесів.

**Ключові слова:** сортувальний маніпулятор, автоматизація, кінематичні схеми, системи керування, охорона праці, економічне обґрунтування, термін окупності.

## ЗМІСТ

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....                                                                   | 2  |
| ВСТУП.....                                                                                       | 3  |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ЗАСОБІВ<br>АВТОМАТИЗАЦІЇ СОРТУВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ.....          | 5  |
| 1.1. Класифікація та сфери застосування сортувальних<br>маніпуляторів.....                       | 5  |
| 1.2. Огляд існуючих конструкцій та технічних рішень.....                                         | 10 |
| 1.3. Порівняльний аналіз систем керування та приводів.....                                       | 14 |
| 1.4. Постановка задач дослідження.....                                                           | 17 |
| РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ СОРТУВАЛЬНОГО<br>МАНІПУЛЯТОРА.....                            | 20 |
| 2.1. Вибір та обґрунтування кінематичної схеми.....                                              | 20 |
| 2.2. Розрахунок основних параметрів та вибір виконавчих<br>механізмів (приводів).....            | 22 |
| 2.3. Розробка 3D-моделі маніпулятора та компонування<br>вузлів.....                              | 25 |
| РОЗДІЛ 3. ТЕХНІЧНА ЧАСТИНА.....                                                                  | 29 |
| 3.1. Розробка математичної моделі режимів руху вихідної<br>ланки сортувального маніпулятора..... | 29 |
| 3.2. Результати теоретичних досліджень.....                                                      | 31 |
| РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА.....                                                          | 42 |
| 4.1. Аналіз небезпечних і шкідливих факторів.....                                                | 42 |
| 4.2. Заходи з охорони праці.....                                                                 | 44 |
| 4.3. Електробезпека.....                                                                         | 46 |
| 4.4. Пожежна безпека.....                                                                        | 48 |
| РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ.....                                                          | 51 |
| 5.1. Оцінка витрат на розробку та впровадження.....                                              | 51 |
| 5.2. Розрахунок економічної ефективності.....                                                    | 52 |
| 5.3. Термін окупності проекту.....                                                               | 54 |
| ВИСНОВКИ.....                                                                                    | 56 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....                                                                  | 57 |

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

ЗІЗ – Засоби індивідуального захисту

КВП – контрольно вимірювальна апаратура

ПТЕ – правила технічної експлуатації;

ПБЕ – правила безпечної експлуатації;

ЕРС – електрична рушійна сила

КГП – кулько-гвинтова пара

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Сучасне виробництво вимагає повної автоматизації технологічних процесів. Сортування вантажів є ключовою ланкою логістики та машинобудування. Традиційні конвеєрні системи мають низьку гнучкість. Застосування роботів-маніпуляторів дозволяє швидко адаптувати лінії під нові типи продукції. Проте підвищення швидкості роботи призводить до динамічних навантажень. Виникає потреба оптимізації конструкцій та режимів їх роботи. Це забезпечить високу точність позиціонування та енергоефективність. Тому розробка та дослідження сортувального маніпулятора є актуальним науково-технічним завданням.

*Метою* магістерської роботи є підвищення продуктивності сортувальних процесів шляхом створення раціональної конструкції маніпулятора та оптимізації його робочих режимів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- Проаналізувати існуючі конструкції сортувальних робототехнічних систем.
- Обґрунтувати кінематичну схему та розробити тривимірну модель маніпулятора.
- Розрахувати елементи привода та виконавчих механізмів.
- Створити математичну модель динаміки маніпулятора.
- Дослідити режими роботи системи в середовищі комп'ютерного моделювання.
- Оцінити точність позиціонування при різних швидкостях переміщення.
- Розробити рекомендації щодо впровадження системи на виробництві.

*Об'єктом* магістерської кваліфікаційної роботи є процес автоматизованого сортування штучних вантажів за допомогою робототехнічних засобів.

*Предметом* магістерської кваліфікаційної роботи є конструктивні параметри, кінематика, динаміка та режими роботи сортувального маніпулятора.

*Методи дослідження:* теоретичні дослідження базуються на проведенні математичного моделювання з використанням методів аналітичної механіки, теорії механізмів і машин, диференціального та інтегрального числення.

**Теоретична цінність** Удосконалено математичну модель динаміки сортувального маніпулятора з урахуванням змінної маси об'єктів маніпулювання. Отримано нові залежності між швидкістю переміщення ланок та виникненням коливань виконавчого органу. Запропоновано оптимізований закон керування приводами для мінімізації динамічних навантажень.

**Практична цінність** Створена математична модель може бути використана для проектування та налагодження систем керування роботами. Розроблений алгоритм керування може бути впроваджений у промислові контролери для підвищення точності та продуктивності реальних роботів, що призведе до зниження браку та часу виконання операцій.

**Апробація результатів магістерської роботи.** Брав участь у Всеукраїнському конкурсі студентських наукових робіт з галузей знань та спеціальностей у 2024-202 роках зі спеціальності «Галузеве машинобудування».

**Структура та обсяг роботи.** Магістерська кваліфікаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаної літератури. Загальний обсяг магістерської кваліфікаційна роботи становить 61 с., із них 57 с., основного тексту, у тому числі 29 ілюстрацій і 2 таблиці. Список використаних джерел містить 57 найменувань

## **РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ СОРТУВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ**

### **1.1. Класифікація та сфери застосування сортувальних маніпуляторів.**

Класифікація сортувальних маніпуляторів. Сортувальні маніпулятори є підсектором систем керування роботами, які автоматизують механічні операції сортування та сортування об'єктів продукції роботів для задоволення визначених критеріїв [3], [6]. Вони застосовуються в таких галузях, як виробництво, логістика, складські комплекси та інші галузі, які потребують ефективного та результативного оброблення вантажів продукції [1]. Для належного аналізу та вибору обладнання та вибору для оптимальних завдань застосування сортувальні маніпулятори класифікуються за набором ознак [4].

Серед основних типів класифікуються за структурною характеристикою [4], [10]. За цією ознакою маніпулятори можна розділити на картезіанські, циліндричні, сферичні та шарнірні варіанти [4]. Картезіанські маніпулятори рухаються вздовж трьох взаємно перпендикулярних осей, які мають високу точність позиціонування і корисні для впорядкування об'єктів уздовж конвеєрних ліній [15]. Циліндричні маніпулятори використовують циліндричну систему координат і пропонують більшу зону обслуговування. Сферичні маніпулятори мають більшу просторову мобільність, але застосовуються рідше. Найбільш універсальними є шарнірні маніпулятори, які мають кілька обертових з'єднань і виконують складні просторові рухи, особливо корисні при сортуванні об'єктів різних форм і розмірів [5].

Ключовою особливістю класифікації є кількість ступенів свободи маніпулятора, які визначають його мобільність і функціональність [3]. Сортувальні маніпулятори мають від трьох до шести ступенів свободи. Чим вищі ступені свободи, тим складніші процедури може виконувати маніпулятор - такі як орієнтація об'єктів у просторовому положенні під час сортування, залежно від кількості ступенів свободи. Залежно від приводу, маніпуляційні інструменти

групуються на електричні, пневматичні та гідравлічні типи. Електричні маніпуляції машин є більш поширеними, оскільки вони дуже точні, енергоефективні та легкі в управлінні [15], [16]. Пневматичні системи використовуються, коли потрібна висока швидкість роботи з делікатними вантажами. Гідравлічні маніпулятори використовуються для переміщення важких об'єктів, хоча вони не так часто застосовуються в сортувальних системах через труднощі з обслуговуванням та нижчу точність [7].



Рис. 1.1. Робот маніпулятор виконує операцію захоплення

Крім того, існує класифікація за принципом дії та функціональним призначенням [4]. У останньому прикладі тип маніпуляторів типу pick-and-place (рис. 1.1) — які виконують операції захоплення та переміщення об'єктів з однієї точки в іншу, включаючи спеціалізовані сортувальні системи, розроблені та інтегровані з конвеєрами та системами машинного зору — позначаються. Останні можуть самостійно характеризувати об'єкти (їх розмір, форму, колір та штрих-код) та приймати рішення про подальший розподіл цих об'єктів [11].

Метод керування вказує на те, що сортувальні маніпулятори можуть бути класифіковані як програмовані, адаптивні або інтелектуальні за своєю природою [8]. Прогнозовано-керовані маніпуляційні системи виконують фіксовану послідовність дій і зазвичай застосовуються у стабільних виробничих процесах. Адаптивні маніпулятори реагують на зміни в умовах навколишнього

середовища, і вони виконують це за допомогою датчиків [9]. Інтелектуальні системи включають функції штучного інтелекту та машинного навчання, і тому процес сортування оптимізується самостійно. Аналогічно, маніпулятори організовані за розміром вантажу та швидкістю.

Легкі маніпулятори використовуються для сортування невеликих предметів (наприклад, харчових продуктів, фармацевтичних), тоді як важкі системи застосовуються в інженерії та логістиці для переміщення масивних предметів [8]. Швидкість є одним з ключових факторів під час сортування ліній, особливо в електронній комерції, де обробляється велика кількість замовлень [11]. Тому класифікація сортувальних маніпуляторів також враховує структурні, функціональні та експлуатаційні характеристики, щоб можна було обрати правильний тип апарату на основі умов застосування. Різні категорії маніпуляторів доступні і роблять сортування в сучасній автоматизованій системі більш продуктивним, точним та ефективним [15].

Сортувальні маніпулятори, які використовуються в багатьох додатках і секторах, вимагають автоматизації процесів розподілу, вибору та переміщення систем. Використання цих маніпуляторів може здійснюватися користувачами для максимізації продуктивності, точності та швидкості роботи, при цьому мінімально зменшуючи вплив людини [11]. Однією з основних сфер застосування таких сортувальних маніпуляторів є логістика та складські комплекси.

У сучасному стані центрів обробки замовлень, які, зокрема, використовуються в сфері електронної комерції для сортування товарів за категорією, адресою доставки або типом замовлення, маніпулятори можуть використовуватися для автоматичного сортування [11]. Вони інтегруються з конвеєрними системами та інформаційними базами даних і підтримують послідовний та швидкий потік вантажів. Застосування таких систем зменшує час на операції та значно оптимізує ефективність складських операцій [42]. Для промислового виробництва сортувальні маніпулятори застосовуються для розподілу компонентів або напівфабрикатів і готової продукції. Вони можуть

використовуватися для операцій вибіркової закупівлі продукції або для вибіркового товару на основі індикації якості, розміру або інших критеріїв. Це особливо актуально в автоматизації виробничих ліній, де висока ступінь точності та повторюваності є важливими (особливо на рівні виробництва) [16].

Маніпулятори можуть сприяти консолідації безперервного потоку виробництва та зменшення відходів. Вони також застосовуються в харчовій промисловості, де сортувальні маніпулятори мають значну актуальність [12]. Тут вони застосовуються для сортування продуктів за розміром, формою, кольором або ступенем зрілості. Наприклад, автоматичні системи використовуються для вибору фруктів і овочів, пакування та контролю якості або пакування продукції. Роботизовані системи впроваджуються в цій сфері, що, в свою чергу, забезпечує дотримання санітарних норм, менший контакт з продуктами та швидшу обробку з меншим втручанням людини в продукти.

Сортувальні маніпулятори популярні у фармацевтичній промисловості (рис.1.2.), де вони використовуються для управління фармацевтичними препаратами та збору набору медичних ліків або медичних пристроїв. [42].



Рис. 1.2. Високопродуктивне сортування посилок для фармацевтичної дистрибуції

Вони розділяють ліки, а пакування та маркування предметів є точними. Точне застосування повинно бути дотримане, і потреба в стерильності та точності є досить сильною в такому секторі, тому автоматизація системи є ідеальним вибором [42].

Вони розділяють ліки, а пакування та маркування предметів є точними. Точне застосування повинно бути дотримане, і потреба в стерильності та точності є досить сильною в такому секторі, тому автоматизація системи є ідеальним вибором [42].

Інший ключовий аспект - це обробка відходів та сортування вторинних сировин. У таких системах сенсори та системи машинного зору, що застосовують маніпулятори, можуть також ідентифікувати (пластик, метал і папір), за допомогою яких матеріал може бути розповсюджений (рис. 1.3).



Рис. 1.3. Управління відходами сортувальним роботом

Це призводить до кращої переробки та меншої шкоди для навколишнього середовища. Існує кілька операторів, які використовують сортувальні маніпулятори в електронній та інструментальній промисловості [15], [16]. Вони ретельно працюють з дрібними деталями (наприклад, мікросхемами або компонентами плат), щоб допомогти їх розмістити та відсортувати для подальшого складання. У цій сфері перевага полягає у високій точності та повторюваності рухів [18].

Сортувальні маніпулятори використовуються для сортування посилок, але особливо корисні в поштових та кур'єрських службах [55]. Ці системи значно прискорюють реакцію на великі обсяги відправлень та мінімізують помилки [43].

Отже, використання сортувальних маніпуляторів є досить широким і може застосовуватися як у промислових, так і в сервісних секторах. Вони допомагають покращити ефективність процесів ланцюга постачання, узгодженість товарів і

дозволяють еволюції продукту для задоволення зростаючих вимог сучасного ринку.

## **1.2. Огляд існуючих конструкцій та технічних рішень.**

Сортувальні маніпулятори є одним із ключових елементів автоматизованих систем сортування в промисловості, логістиці, складському господарстві та інших галузях, де необхідно швидко і ефективно розділяти, переміщувати або укладати різні об'єкти [6]. Залежно від специфіки застосування та вимог до продуктивності, точності і надійності, конструкції сортувальних маніпуляторів істотно варіюються [5]. Огляд існуючих конструкцій та технічних рішень дозволяє простежити розвиток даної техніки та визначити актуальні напрями її вдосконалення.

Перш за все, за принципом рухомих осей маніпулятори поділяються на декілька основних типів: серійні (послідовні), паралельні та гібридні конструкції. Серійні маніпулятори, що складаються із послідовно з'єднаних ланок, забезпечують широкий робочий простір і гнучкість рухів, однак мають більшу масу та інерційність, що обмежує швидкість реакції [9]. Наприклад, 4- або 6-осьові серійні маніпулятори широко застосовуються в складських комплексах для сортування коробок різних розмірів і мас [15]. У свою чергу, паралельні маніпулятори, що мають декілька ланок, підключених безпосередньо до робочого органа паралельно, пропонують підвищену жорсткість, точність позиціонування та швидкодію. Вони часто застосовуються в мікросортуванні та сортуванні невеликих деталей, де критичними є точність та повторюваність [18].

Щодо робочих органів сортувальних маніпуляторів, в сучасних конструкціях використовуються різноманітні типи захватів: механічні пружинні та електромеханічні хватки (рис.1.4), вакуумні присоси, магнітні захвати, а також комбіновані варіанти для роботи з різними типами матеріалів і форм об'єктів [5].



Рис. 1.4. Застосування роботів з електромеханічними хватками

Сучасні технічні рішення сортувальних маніпуляторів також включають інтеграцію сенсорних систем для підвищення автономності і адаптивності. Камери, лазерні датчики, системи машинного зору дозволяють в реальному часі ідентифікувати об'єкти, оцінювати їх положення і орієнтацію, а також контролювати процес захвату та переміщення [42]. Використання систем штучного інтелекту і алгоритмів глибинного навчання покращує здатність маніпуляторів розпізнавати дефекти, класифікувати продукцію за різними ознаками та оптимізувати траєкторії руху для підвищення продуктивності [44].

Особливе місце займають мобільні та модульні сортувальні маніпулятори [55]. Мобільні роботи з маніпуляторами на борту мають можливість переміщатися по території складського чи виробничого майданчика, збільшуючи гнучкість логістичних операцій.

Модульні конструкції дозволяють легко адаптувати маніпулятор під конкретні завдання за рахунок заміни робочих органів чи модифікації кінематичної схеми [5], [8].

Ще однією актуальною інновацією є використання колаборативних (співпрацюючих) роботів-сортувальників, які можуть безпечно працювати поряд з людиною і допомагати їй в сортуванні, не вимагаючи додаткових огорож та складних заходів безпеки. Такі рішення підвищують ефективність роботи на виробництві й знижують ризики травмування [39].

Щоб зрозуміти сучасні тенденції в проектуванні сортувальних маніпуляторів, може бути корисно порівняти приклади існуючих конструкцій з

різними кінематичними схемами. Це дозволить нам визначити деякі з найважливіших технічних рішень, переваг та обмежень, пов'язаних з кожним типом робота, які є ключовими факторами для вибору найкращого конструктора в нашому власному проекті.

#### 1. Borunte Collaborative Robot Arm [19] (рис. 1.5)



Рис. 1.5. Робот маніпулятор “Borunte Collaborative Robot Arm”

Таблиця 1.1.

Робот маніпулятор “Borunte Collaborative Robot Arm”

| Модель                    | BRTR13WDS5PC/FC | BRTR13WSS3PC/FC |
|---------------------------|-----------------|-----------------|
| Рекомендовані ІММ (тонн)  | 360-700         | 360-700         |
| Вертикальний хід (мм)     | 1350            | 1350            |
| Поперечний хід (мм)       | 800             | 1088            |
| Час висихання (сек)       | 1.8             | 1.8             |
| Макс. Завантаження (кг)   |                 | 10              |
| Час сухого кола (сек)     | 8.3             | 8.3             |
| Витрата повітря (NI/коло) | 6.8             | 6.8             |
| Вага нетто (кг)           | 450             | 420             |

2. Fanuc M-20iA [20] (рис. 1.6) — це промисловий шарнірний робот з 6 ступенями свободи, який може використовуватися в різних бізнес-процесах, таких як сортування, пакування, зварювання, обробка матеріалів, складання та багато інших. Завдяки великій вантажопідйомності та високій швидкості, цей робот є одним з провідних рішень Fanuc для роботів середнього розміру [20].



Рис. 1.6. Робот маніпулятор “Fanuc M-20iA”

Таблиця 1.2.

Робот маніпулятор “Fanuc M-20iA”

|                          |                 |
|--------------------------|-----------------|
| Виробник                 | Fanuc           |
| Модель                   | M-20iA          |
| Тип                      | 6-Осьовий Робот |
| Аxes                     | 6               |
| Максимальне навантаження | 20 кг           |
| Досяжність               | 1811 мм         |
| Повторюваність           | 0.08 мм         |
| Маса                     | 250             |

Fanuc M-20iA — це універсальний, потужний і точний шарнірний робот, який може виконувати складні завдання автоматизації, такі як сортування.

Робот ABB IRB 360 (рис. 1.6.) призначений для промислових завдань, таких як сортування, переміщення деталей, складання тощо. Такий робот втілює подвійний ідеал високопродуктивного робота зі спрощеним дизайном, який легко виконує завдання в умовах масового виробництва [21].

ABB IRB 360 зазвичай використовується на промислових лініях: Сортування та пакування малих і середніх деталей; Операції pick-and-place; Збирання деталей у процесах, що виробляють продукти; Робота в дуже компактних просторах з надзвичайно точними вимогами [21].



Рис. 1.6. Робот маніпулятор “ABB IRB 360 FlexPicker”

Підсумовуючи, існуючі конструкції та технічні рішення сортувальних маніпуляторів різняться за типом кінематики, видом захватів, рівнем автоматизації та інтеграції з інформаційними системами. Розвиток цієї галузі спрямований на підвищення швидкодії, точності, гнучкості та надійності обладнання, що дозволяє ефективно розв’язувати задачі сортування у все більш складних і масштабних автоматизованих системах. Вибір конкретної конструкції залежить від специфіки продукції, вимог до точності, швидкості роботи, умов експлуатації та інтеграції у загальну технологічну лінію.

### **1.3 Порівняльний аналіз систем керування та приводів сортувальних маніпуляторів**

Системи керування та приводи є критично важливими компонентами сортувальних маніпуляторів, що визначають їх функціональні можливості, точність, швидкодію та надійність роботи [3]. Серед найбільш поширених систем керування в промислових маніпуляторах використовуються програмовані логічні контролери (PLC) [4]. Вони відзначаються високою надійністю і стабільністю, що забезпечує безперебійну роботу обладнання у складних виробничих умовах. Крім того, PLC легко програмуються і

налаштовуються, що дозволяє без зайвих зусиль інтегрувати їх із широким спектром датчиків і виконавчих механізмів, зберігаючи при цьому підтримку роботи в режимі реального часу [42]. Водночас такі контролери мають обмежені можливості в обробці складних алгоритмів і адаптивного керування, а також дещо поступаються в гнучкості при змінах виробничих процесів.

Іншим типом систем керування є мікроконтролерні рішення, які використовуються у компактних або спеціалізованих маніпуляторах [6]. Ці системи дозволяють реалізувати більш складні алгоритми керування з високою швидкістю, при цьому їх невеликі габарити і низька вартість роблять їх привабливими для багатьох застосувань. Однак такі системи вимагають більших зусиль і часу на розробку і налагодження програмного забезпечення, а також можуть бути менш стійкими в умовах інтенсивної промислової експлуатації [38].

В останні роки все більшого поширення набувають комплексні системи керування, які поєднують програмовані логічні контролери з системами візуалізації (HMI) та контролю за технологічним процесом (SCADA) [38]. Подібний підхід дає змогу повністю контролювати і моніторити процес сортування, забезпечує зручний інтерфейс для оператора, а також створює можливості дистанційного управління і діагностики обладнання [5]. Основними недоліками таких систем є їх висока вартість та необхідність наявності кваліфікованого персоналу для експлуатації і обслуговування.

Інтелектуальні системи керування на основі штучного інтелекту і машинного навчання є перспективним напрямком розвитку [11]. Вони забезпечують адаптивність і здатність до самонавчання, оптимізують режими роботи в реальному часі, а також прогнозують можливі відмови, надаючи можливість вчасно внести корективи [44]. Водночас такі системи досить складні у розробці і інтеграції, а також вимагають потужної апаратної підтримки.

Щодо приводів, електричні серводвигуни є найпопулярнішим типом в приводних системах сортувальних маніпуляторів. Вони відзначаються високою точністю, динамічністю рухів, енергоефективністю, а також низьким рівнем шуму і відсутністю забруднень у процесі роботи [41]. Ці приводи легко

інтегруються з системами керування і дозволяють досягати високої гнучкості в управлінні. Однак, при дуже великих вантажних навантаженнях, електричні приводи можуть мати обмеження, що спонукає розглядати альтернативні рішення.

Гідравлічні приводи використовуються для маніпуляторів, які мають справу з великими навантаженнями, оскільки вони забезпечують значну силу при відносно компактних габаритах [7]. Вони характеризуються плавністю рухів і широким діапазоном регулювання потужності. Проте гідравлічні системи є складнішими в конструкції, потребують регулярного обслуговування, залежать від стану гідравлічної рідини, і мають ризик витоків, що негативно впливає на надійність й екологічність.

Пневматичні приводи застосовуються у випадках, коли точність не є критичною, а робочі цикли короткі і прості. Їх перевагами є простота конструкції, відносно низька вартість і безпека експлуатації, особливо у вибухонебезпечних середовищах[39]. Водночас пневматичні системи характеризуються обмеженою точністю, меншою жорсткістю і значними енергетичними втратами через стисливість повітря, а також потребують наявності джерел стисненого повітря, що може ускладнювати їх використання [41].

Гібридні приводні системи поєднують в собі властивості кількох типів приводів, наприклад, електричних і гідравлічних, щоб збалансувати потребу в силі, точності і швидкодії [7]. Вони дозволяють ефективно працювати у різних експлуатаційних умовах, проте їх конструктивна складність і вартість є вищими, а обслуговування – більш трудомістким.

Отже, вибір системи керування і приводу для сортувального маніпулятора має базуватися на конкретних технічних завданнях, що ставляться перед обладнанням. Електричні серводвигуни у поєднанні з програмованими логічними контролерами є оптимальним рішенням для більшості застосувань, де пріоритетом є точність і швидкість роботи. Для важких навантажень або специфічних умов експлуатації розглядаються гідравлічні або пневматичні

приводи, а також гібридні варіанти. Інтелектуальні системи керування дозволяють значно підвищити ефективність і гнучкість роботи, проте вимагають складнішої реалізації [11]. Загалом, інтеграція високоякісних систем керування і приводів є запорукою продуктивної, надійної і довготривалої роботи сортувальних маніпуляторів.

#### **1.4. Постановка задач дослідження.**

Встановлення завдань дослідження. У більшості промислових і складських процесів сьогодні сортування продукції є основою, оскільки воно може впливати на якість обробки вантажів, а також на продуктивність всього ланцюга постачання [1]. У цьому відношенні це дослідження важливе для покращення наукових і технологічних аспектів технічного рівня сортувальних маніпуляторів, оскільки це може зробити автоматизовану процедуру ідентифікації, переміщення та організації продуктів різних форм, ваги та матеріалів.

Основні завдання дослідження включають оптимізацію для найбільш вигідного дизайну маніпулятора та аналіз робочих режимів цих маніпуляторів для досягнення рівноваги між швидкістю, точністю та надійністю [8]. На початку необхідно провести систематичні огляди та аналіз вже доступних технічних і конструктивних інструментів та механізмів для сортувальних маніпуляторів [9]. Важливо визначити різні кінематичні схеми, типологію приводів, системи захоплення та управління, щоб встановити сильні та слабкі сторони кожної конфігурації в умовах конкретних умов експлуатації.

Метою цього розділу є створення бази знань, визначення основних технічних критеріїв для передового розвитку та підтримка оптимального вибору концепції дизайну з урахуванням функціональних та технологічних обмежень. Наступним критичним завданням є створення зразкового дизайну сортувального маніпулятора, а саме детальний параметричний опис типів механічних елементів та типів приводів і систем управління, які потрібні [5].

Особливу увагу слід приділити інтеграції робочих органів(рис. 1.7.), які

здатні універсально працювати з різноманітними об'єктами: використання сучасних матеріалів для зменшення ваги та збільшення жорсткості, а також ергономіка та безпека роботи [39].

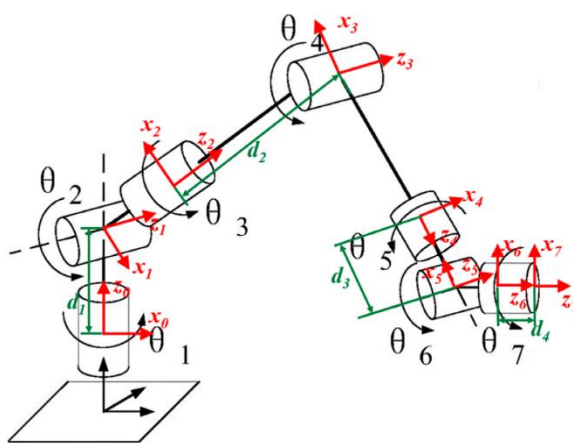


Рис. 1.7. Схема роботизованого маніпулятора

Потрібний сталий розвиток, оскільки попит на сталий розвиток зростає, що робить необхідним забезпечення енергозберігаючих та екологічно чистих рішень для мінімізації витрат на споживання та негативних впливів [34].

Завдання дослідження також включають детальне моделювання того, як ці режими діяльності маніпулятора будуть працювати [46]. Ми розрахували кінематичні параметри для визначення робочої зони, швидкості та прискорення рухів (рух) та динамічні властивості через різні навантаження, які ми можемо визначити під час сортування.

Робочі режими також повинні враховувати вплив сил тертя, інерції та зовнішніх умов середовища на продуктивність маніпулятора для визначення точності. Ціль досягається за допомогою сучасних цифрових інструментів, з більш новітнім числовим моделюванням у CAD/CAM, а також динамічним аналізом за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, що дозволить нам виявити слабкі місця в дизайні інструменту та запропонувати засоби для запобігання їх зловживанню [47].

Важливим завданням є створення та проектування системи управління для забезпечення адаптивності маніпулятора на основі різних умов експлуатації. При розробці системи управління роботом або автономним автомобілем важливо

враховувати різні особливості, природу та параметри матеріального продукту; режим роботи повинен бути налаштований для кращої точності позиціонування; а швидкість та сила захоплення повинні бути налаштовані [42].

Важливість інтеграції систем сенсорів та машинного зору буде підкреслена на поточному етапі, щоб природа та розташування фізичного об'єкта виявлялися в реальному часі, що призведе до більшої гнучкості та автономії роботи маніпулятора [44]. Потенційне використання різних алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання для розробки найбільш ефективних алгоритмів управління. Це один з перспективних напрямків, досліджених у цьому конкретному дослідженні [50].

Крім того, важливо передбачити підготовку детального експериментального дослідження на спеціалізованих стендах та тестування такого розробленого дизайну на реальних промислових стендах або поблизу реальних виробничих об'єктів, таких як стенди, які підлягають певним видам тестування та фактичним умовам [28], [29]. Це дозволить динамічно оцінити, стабільність роботи, точність сортування та оптимізацію режимів роботи [45].

Завдяки зібраним експериментальним даним ми зможемо порівняти та протиставити теоретичні моделі з практикою, щоб внести зміни, які підтримують надійність та стабільність процесу для маніпулятора в експлуатації [47]. У цьому світлі розробка завдань дослідження охоплює весь життєвий цикл - від аналізу та проектування до моделювання, розгортання, випробування.

Завершення цих заходів призведе до розробки широкого технічного рішення, яке відповідає сучасним потребам процесу автоматизації сортування та покращить роботу промислових або логістичних систем. Результати дослідження допоможуть надати наукову основу для проектування сортувальних маніпуляторів та їх впровадження в реальну роботу промислового підприємства.

## РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ СОРТУВАЛЬНОГО МАНІПУЛЯТОРА

### 2.1. Вибір та обґрунтування кінематичної схеми.

Вибір кінематичної схеми є одним із ключових етапів у проектуванні сортувального маніпулятора, адже саме від неї залежить ефективність, швидкодія, точність позиціонування та простота експлуатації конструкції. Для сортування різноманітних вантажів у тривимірному просторі оптимальним рішенням є використання картезіанської кінематичної схеми маніпулятора [8].

Ця кінематична схема базується на переміщенні робочого органу у трьох взаємно перпендикулярних напрямках – по осі  $X$ ,  $Y$  та  $Z$  [10]. Таке рішення нагадує принцип роботи сучасних роботів, використовуваних у сільському господарстві та садівництві, де забезпечується автоматизоване точне позиціонування по трьох осях для виконання операцій обробки рослин чи збору врожаю [12].

Основна перевага картезіанської схеми полягає у простоті конструкції та керування рухом, що забезпечує високу точність позиціонування. Лінійні переміщення через направляючі та гвинтові передачі дозволяють реалізувати низький рівень похибок і повторюваність рухів, що є надзвичайно важливим при сортуванні продукції різних типів та розмірів [18]. Крім того, лінійна геометрія робочого простору дозволяє максимально ефективно використовувати робочу зону та легко масштабувати конструкцію під конкретні розміри сортувального обладнання.

Ще однією вагомою перевагою такої схеми є відносна простота привідних систем – зазвичай використовуються серводвигуни з шарнірними редукторами або крокові двигуни, що забезпечує доступність компонентів, їх ремонтпридатність та зменшує собівартість обладнання [4]. Відсутність складних обертальних кінематичних ланок також мінімізує інерційні навантаження, що сприяє підвищенню швидкості та динамічної точності [7].

Порівнюючи лінійну картезіанську схему з іншими типами кінематики — наприклад, з серійними маніпуляторами з багатосторонніми шарнірними ланками або паралельними роботами типу дельта, — слід зазначити, що картезіанська схема має переваги у простоті моделювання траєкторії руху та забезпечує більш лінійний і передбачуваний характер позиціонування. Водночас лінійна конструкція менше схильна до помилок, пов'язаних із кумулятивними похибками шарнірів і передач, що позитивно впливає на точність сортування.

До недоліків цієї кінематичної схеми можна віднести можливу більшу масу конструкції, зумовлену необхідністю забезпечення механічної жорсткості лінійних напрямних при великих розмірах робочої зони, а також обмеження у швидкості рухів, порівняно з динамічними роботами паралельного типу. Для завдань сортування, де пріоритетами є стабільність, точність і відносна легкість обслуговування, такі недоліки не є значними [6].

Тому вибір декартової кінематичної схеми для сортувального маніпулятора обґрунтований необхідністю високоточного позиціонування, простотою конструкції та обслуговування, а також врахуванням можливості адаптації робочої зони до конкретних завдань сортування [3]. Такий підхід дозволяє досягти оптимального балансу між технічними характеристиками маніпулятора та економічною ефективністю його виробництва та експлуатації.

Крім того, декартова кінематична схема дозволяє позиціонування з хорошою повторюваністю та стабільністю, що особливо важливо враховувати при сортуванні продукції, оскільки будь-яка помилка в координатах може призвести до неправильного захоплення або пошкодження вантажу.

Мінімальна геометрія руху значно полегшує програмування та налагодження систем управління і сприяє швидшому запуску інструментів у виробництво [38]. Елементом цієї системи є налаштовуване управління рухом кожної осі незалежно, що покращує точність алгоритмів, а також забезпечує можливість алгоритму адаптувати швидкість рухів до типу вантажу або операції обробки. Це особливо бажано в автоматизованих системах, де маніпулятор вбудований у сусідні роботизовані вузли та системи візуального контролю.

Декартова схема демонструє значну сумісність із системами безпеки, і її легко інтегрувати з датчиками присутності людини, аварійними зупинками та кінцевими вимикачами на кожній осі [23]. Це важливо, оскільки конструкція має можливість масштабування та бути модульною.

Оперативний об'єм маніпулятора може бути збільшений або зменшений за допомогою правильної довжини лінійних напрямних, які може використовувати продукт, і механізм не вимагає жодного перепроєктування всього механізму. Саме цей високий ступінь гнучкості робить декартову схему привабливою для промислових компаній, які прагнуть модернізувати свої сортувальні лінії з низькими інвестиціями в капітал, а також у час.

Порівнюючи декартову схему з іншими типами роботів, слід звернути увагу на те, що складні багатоланкові роботи пропонують високий ступінь гнучкості руху та швидкості, а також вищу структурну складність, високу вартість виробництва, складність обслуговування та ймовірність помилок позиціонування [9].

Для трудомістких і повторюваних операцій, пов'язаних із сортуванням та упорядкуванням, декартова схема є найбільш безпечним компромісом між продуктивністю, надійністю та вартістю. У світлі всіх попередніх міркувань, вибір декартової кінематичної схеми для сортувального маніпулятора є законним та ефективним рішенням, яке задовольняє поточні потреби промислової автоматизації. Це робить цю схему найбільш придатною для впровадження високопродуктивних сортувальних комплексів, вона має необхідну точність, надійність, зручність обслуговування та універсальність [41].

## **2.2. Розрахунок основних параметрів та вибір виконавчих механізмів (приводів).**

Вибір виконавчих пристроїв є початковою фазою, яка є дуже важливою у проектуванні сортувального пристрою, а саме приводів (керування), які

забезпечують рух і позиціонування робочого органу, що впливає на швидкість системи, точність, вантажопідйомність, динамічні характеристики.

Для обчислення параметрів приводу необхідно враховувати умови роботи маніпулятора та вид навантажень у циклі сортування [7], [41].

Основні параметри такі:

1. Вантажопідйомність (максимальна вага сортуваного об'єкта) — це мінімальна сила, необхідна для приводу, щоб перемістити навантаження;
2. Навантаження рухомих конструкцій — вага робочої рами, робочого органу, лінійного направляючого блоку та механічних частин, що приводяться в рух приводом;
3. Пропорційна швидкість руху — використовуючи встановлену продуктивність сортування, визначається необхідна швидкість руху по кожній осі (X, Y, Z) [46];
4. Прискорення та гальмування — встановлюється динамічне навантаження в приводі таким чином, щоб вибір двигуна з запасом потужності для плавних рухів;
5. Правильність позиціонування навантаження, що є важливим для правильного захоплення та позиціонування навантаження, впливає на вибір типу двигуна та керування.
6. Крутний момент або тягове зусилля для приводу та потужність двигуна потім розраховуються відповідно до параметрів. Для початкових розрахунків обчислюється загальна сила, яка включатиме гравітаційні сили, сили тертя направляючих компонентів, динамічні компоненти та інші [46].

Формули:

Розглянемо ось Z — вертикальний рух робочого органу маніпулятора.

Визначаємо сумарну масу рухомих елементів із вантажем [7]:

$$m_{total} = m_{load} + m_{mechanism} = 2 + 5 = 7 \text{ кг} \quad (1)$$

Обчислюємо силу, необхідну для прискорення [41]:

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (2)$$

$$F_{acc} = m_{total} \cdot a_{max} = 7 \cdot 2 = 14 \text{ Н} \quad (3)$$

де:  $F$  — рівнодійна всіх сил, що діють на тіло (Ньютон, Н);  $m$  — маса тіла (кілограм, кг);  $a$  — прискорення тіла (м/с<sup>2</sup>).

Визначаємо силу тяжіння:

$$F_{gravity} = m_{total} \cdot g = 7 \cdot 9,81 = 68,7 \text{ Н} \quad (4)$$

де:  $F$  — сила тяжіння (вимірюється в ньютонах, Н).  $m$  — маса тіла (в кілограмах, кг).  $g$  — прискорення вільного падіння (приблизно 9,8(м/с<sup>2</sup>))

Обчислюємо силу тертя в напрямних:

Припустимо, що сила нормального тиску дорівнює вазі, а коефіцієнт тертя дорівнює ( $\mu = 0,02$ ):

$$F_{friction} = \mu \cdot F_{gravity} = 0,02 \times 68,7 = 1,374 \text{ Н} \quad (5)$$

Розраховуємо загальну силу, яку має виконувати привід:

$$F_{total} = F_{acc} + F_{gravity} + F_{friction} = 14 + 68,7 + 1,374 = 84,074 \text{ Н} \quad (6)$$

Обчислюємо мінімальний потрібний крутний момент приводу.

Якщо привід реалізований через гвинтову пару з кроком гвинта, то радіус витків гвинта (ефективний) можна приблизно прийняти як:

$$r = \frac{p}{2\pi} = \frac{0,005}{2\pi} \approx 0,0008 \text{ м} \quad (7)$$

Тоді крутний момент:

$$M = F_{total} \cdot r = 84,074 \times 0,0008 \approx 0,067 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (8)$$

Враховуючи коефіцієнт корисної дії гвинтової пари (0,9), з урахуванням втрат:

$$M_{required} = \frac{M}{\eta} = \frac{0,067}{0,9} \approx 0,074 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (9)$$

Обчислення потужності двигуна.

Потужність ( $P$ ) можна визначити з формули:

$$P = M_{required} \cdot \omega \quad (10)$$

де ( $\omega$ ) — кутова швидкість в рад/с, яка пов'язана з лінійною швидкістю через:

$$v_{max} = \omega \cdot r \Rightarrow \omega = \frac{v_{max}}{r} = \frac{0,5}{0,0008} \approx 625 \text{ рад/с} \quad (11)$$

$$P = 0,074 \times 625 = 46,25 \text{ Вт} \quad (12)$$

З визначеними параметрами, для контролю цього осевого вертикального руху потрібно, щоб двигун забезпечував щонайменше 0,074 Нм крутного моменту та потужність близько 50 Вт, враховуючи запас потужності для плавного запуску та тривалих робочих циклів.

Процес для осей X та Y є аналогічним, але оскільки гравітація не діє в тому ж напрямку, може знадобитися трохи менший крутний момент. При виборі конкретних моделей сервоприводів або крокових двигунів слід звернути увагу на забезпечення запасу потужності та врахування характеристик контролера та системи зворотного зв'язку для досягнення необхідної точності.

### **2.3. Вимоги до розробки конструкції декартового маніпулятора для сортування.**

Проектування декартового маніпулятора для сортування вимагає цілісного підходу та включає управління технічними, експлуатаційними та безпековими обмеженнями, пов'язаними з ефективною та надійною роботою системи [5]. Конструкція маніпулятора повинна бути простою, але водночас жорсткою, щоб уникнути деформацій та вібрацій під час руху, забезпечуючи точне позиціонування.

Взаємно перпендикулярні лінійні осі X, Y та Z використовуються як додаткові осі для робочого органу, щоб забезпечити лінійний рух у тривимірному просторі [10]. Це значно спрощує алгоритми управління та покращує повторюваність розміщення [38]. Система повинна бути дуже

модульною та легкою в збиранні, щоб установка та обслуговування не залежали від того, що з нею роблять, а також можна було замінити один блок системи без необхідності розбирати її знову.

Технічно маніпулятор повинен забезпечувати відповідну вантажопідйомність, а також резерв для підтримки стабільної поведінки при максимальному навантаженні, що включає вагу захоплювача та вантажу. Можливі параметри включають точність та повторюваність рівня або розташування, які повинні відповідати технологічним допускам (а також кількість або різноманітність сортування менших та крихких предметів) [18].

Балансування швидкості та виконання динамічних рухів буде необхідним для підтримання високої ефективності без впливу на точність та мінімізації зносу, використовуючи механічні інструменти.

Висока надійність та висока експлуатаційна здатність. Виконавчі частини з приводами, зокрема, повинні обслуговувати цикли запланованої роботи [41]. Маніпулятор також повинен бути сумісним із сучасними системами автоматизації, бути розробленим зі стандартними інтерфейсами для підключення до датчиків та систем візуального контролю та інших роботизованих систем, щоб їх було легко інтегрувати у виробничі лінії.

Операційна безпека є дуже важливою, тому вся конструкція та система управління повинні відповідати чинним нормативам, забезпечувати аварійні зупинки, захищати від неконтрольованих рухів, а взаємодія з операторами має бути безпечною [23]. Вони можуть обслуговувати та діагностувати систему безпечно та уникати простоїв завдяки легкому доступу до компонентів та можливості перевірки стану системи віддалено [40].

Існують також енергетичні та екологічні потреби. Проектування приводів та вибір системи повинні бути зосереджені на оптимізації енергії таким чином, щоб не знижувати продуктивність, а матеріали та пристрої конструкції повинні відповідати чинним екологічним нормативам для сприяння переробці та мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище [33].

Має сенс враховувати ергономіку при конструюванні декартового

маніпулятора для сортування та інтеграції пристрою в виробничий процес. Необхідно забезпечити легку взаємодію маніпулятора з іншими аспектами виробничої лінії, що також полегшує програмування машини, її переналаштування та підтримку в робочому стані при зміні типів продукції або технологічних завдань [42]. Таким чином, ви мінімізуєте простої та забезпечуєте більшу гнучкість виробництва.

Крім того, конструкція повинна бути гнучкою та масштабованою. Можливість швидкого розширення робочої зони, наприклад, шляхом додавання напрямних або інших модулів, є корисною для розширення діапазону використання маніпулятора та швидкого реагування на зміни у виробничих ситуаціях без значного споживання ресурсів. Це особливо актуально для компаній з великою варіативністю сортованої продукції.

Важливо бути в курсі сучасних матеріалів та технологій виробництва. Такі як алюмінієві сплави, композити та високотехнологічні полімери, легкі та міцні матеріали дозволяють зменшити масу рухомих частин маніпулятора, що, в свою чергу, знижує інерційні навантаження, покращує динамічні властивості та зменшує енергоспоживання. Це безпосередньо впливає на довговічність та надійність конструкції, але сучасні методи обробки та виробництва забезпечують якісні деталі [47].

Сучасний розвиток характеризується розвитком технологій управління, які спираються на інтелектуальне машинне навчання та алгоритми штучного інтелекту [44]. Цей метод дозволяє маніпулювати траєкторією руху маніпулятора у відповідь на зміни в навколишньому середовищі, оптимізувати час робочого циклу та ефективність сортування.

Важливо, щоб також використовувалися системи моніторингу прогностного обслуговування для прогнозування потенційних проблем та запобігання аваріям, зменшуючи простої. Однак, дотримання екологічних та безпекових стандартів, що є важливим у сучасному світі, також набуває додаткового значення [23], [33]. Використання матеріалів, конструктивних рішень та підтримка технологій управління повинні зменшувати їх шкоду для

навколишнього середовища, бути екологічно чистими та відповідати міжнародним сертифікаціям. Таким чином, також покращуються екологічні аспекти та репутація компанії, що є важливим для досягнення потенційного ринку збуту обладнання [34].

Конструкція декартового маніпулятора для сортування повинна бути створена з урахуванням цілісних міркувань між технологічними, ергономічними, матеріальними, інтелектуальними та екологічними аспектами. Саме цей інтегративний підхід забезпечує розробку продуктивного, надійного та безпечного обладнання, яке добре інтегрується в сучасні автоматизовані виробничі системи.

## РОЗДІЛ 3. ТЕХНІЧНА ЧАСТИНА

### 3.1. Розробка математичної моделі режимів руху вихідної ланки сортувального маніпулятора

Математична модель приводу ланки сортувального маніпулятора побудована у вигляді двох масової динамічної системи, яка є найбільш простою в дослідженні динамічних навантажень, що виникають в перехідний період руху.

$$\begin{cases} \frac{dI}{dt} = \frac{1}{L}(U(t) - R \cdot I - K_e \cdot \dot{\theta}_m) \\ \ddot{\theta}_m = \frac{1}{J_m}(K_t \cdot I - C\Delta\theta - D\Delta\dot{\theta}), \\ \ddot{\theta}_L = \frac{1}{J_L}(C\Delta\theta + D\Delta\dot{\theta} - M_{load}) \end{cases} \quad (13)$$

Згідно з другим законом Кірхгофа, напруга живлення  $U(t)$  витрачається на падіння напруги на активному опорі  $R$ , індуктивності  $L$  та подолання зворотної електрорушійної сили (ЕРС)  $E$ :

$$U(t) = L \cdot \frac{dI}{dt} + R \cdot I(t) + K_e \cdot \dot{\theta}_m(t) \quad (14)$$

де:  $K_e$  - константа зворотної ЕРС;  $L$  - індуктивність двигуна;  $\dot{\theta}_m$  - кутова швидкість ротора двигуна.

Запишемо перше рівняння двох масової моделі. Електромагнітний момент двигуна  $M_e$  витрачається на розгін власної інерції  $J_m$  та подолання опору муфти. Відповідно рівняння для визначення параметрів двигуна буде мати наступний вигляд:

$$J_m \ddot{\theta}_L = M_e - C(\theta_m - \theta_L) - D(\dot{\theta}_m - \dot{\theta}_L) \quad (15)$$

де:  $C$  - жорсткість муфти;  $D$  - демпфування муфти;  $\theta_m$  - кут повороту вала двигуна;  $\theta_L$  - кут повороту кульково-гвинтової пари;  $\dot{\theta}_m$  - кутова швидкість повороту вала двигуна;  $\dot{\theta}_L$  - кутова швидкість кульково-гвинтової пари.

Запишемо друге рівняння системи для навантаження. Зусилля від муфти

передається на навантаження, де воно долає момент інерції  $J_L$  та статичний момент від ваги вантажу  $M_{load}$ . Відповідно рівняння матиме наступний вигляд:

$$J_L \ddot{\theta}_L = C(\theta_m - \theta_L) + D(\dot{\theta}_m - \dot{\theta}_L) - M_{load} \quad (16)$$

де:  $J_L$  - зведений момент інерції, який включає момент інерції редуктора, кульково-гвинтової пари та вантажу;  $M_{load}$  - статичний момент від ваги вантажу.

Зведений момент інерції  $J_L$  розраховується за наступною формулою:

$$J_L = \frac{J_{red} + J_{screw}}{i^2} + m \cdot \left( \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot i} \right)^2 \quad (17)$$

де:  $J_{red}$  - момент інерції редуктора;  $J_{screw}$  - момент інерції кульково-гвинтової пари;  $m$  - маса вантажу;  $i$  - передаточне відношення редуктора;  $P$  - крок кульково-гвинтової пари.

Статичний момент від ваги вантажу розраховується за наступною формулою:

$$M_{load} = \frac{m \cdot g \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot i} \quad (18)$$

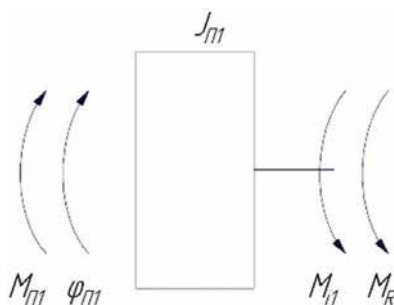


Рис. 3.1 - Перша зведена маса

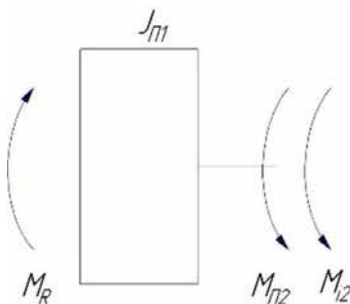


Рис. 3.2 - Друга зведена маса

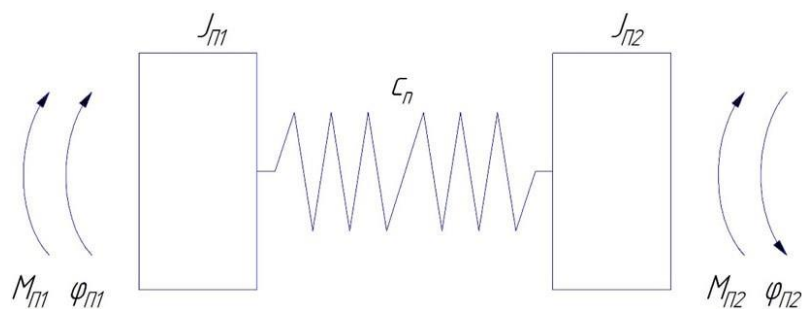


Рис. 3.3.- Динамічна модель механізму переміщення

### 3.2. Результати теоретичних досліджень

Для розв'язку рівняння руху вихідної ланки приймемо такі вихідні параметри: маса вантажу  $m = 50$  кг; передаточне число редуктора  $i = 10$ ; константа моменту  $K_t = 0,45$  Нм/А; крок кулько-гвинтової пари  $P = 0,005$  м; константа зворотної ЕРС  $K_e = 0,45$ ; жорсткість муфти  $C = 180$  Н/рад; опір обмотки  $R = 2$  Ом; індуктивність обмоток  $L = 0,005$  Гн.

Початкові умови:

Струм в обмотках двигуна:

$$I(0) = 0; \quad (19)$$

Початкове кутове положення ротора:

$$\theta_m(0) = 0; \quad (20)$$

Кутова швидкість ротора:

$$\dot{\theta}_m(0) = 0; \quad (21)$$

Початкове положення вихідного вала:

$$\theta_L(0) = 0; \quad (22)$$

Кутова швидкість вихідного вала:

$$\dot{\theta}_L(0) = 0; \quad (23)$$

Отже, розв'язуючи рівняння руху вихідної ланки сортувального маніпулятора числовими методами за прийнятими початковими параметрами та умовами, були отримані графічні залежності лінійної швидкості руху вихідної ланки для трьох законів зміни струму на обмотках двигуна: лінійного,

параболічного та S-подібного (рис. 3.4–3.6).

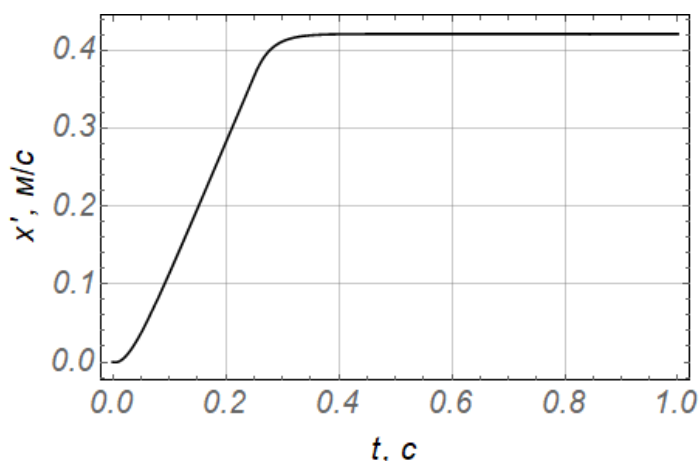


Рис 3.4. Графічна залежність лінійної швидкості переміщення вихідної ланки за лінійною залежністю зміни струму на обмотках двигуна

У цьому розділі ми аналізуємо та порівнюємо графічні залежності лінійної швидкості, отримані з розрахунку. Незалежно від того, яка залежність струму, вихідна ланка рухається по заданій траєкторії, але характер зміни струму значно впливає на динаміку прискорення та стабілізацію швидкості.

Параболічна залежність (рис. 3.5) забезпечує більш плавний і м'який перехід, що компенсується деяким запізненням у досягненні сталої швидкості.

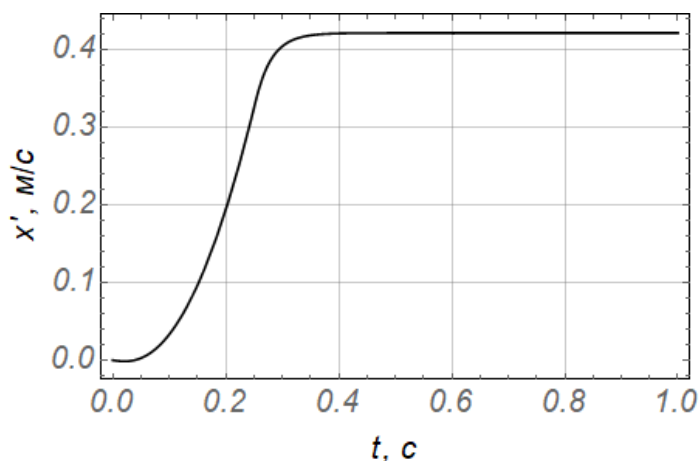


Рис 3.5. Графічна залежність лінійної швидкості переміщення вихідної ланки за параболічною залежністю зміни струму на обмотках двигуна

Найефективнішою є S-подібна залежність (рис. 3.6), де прискорення є більш збалансованим, а динамічні навантаження знижуються; в результаті

покращується точність і витривалість механізму. Загалом ця залежність впливає на ефективність керування рухом вихідної ланки маніпулятора під час етапу запуску та переходу до сталого режиму роботи.

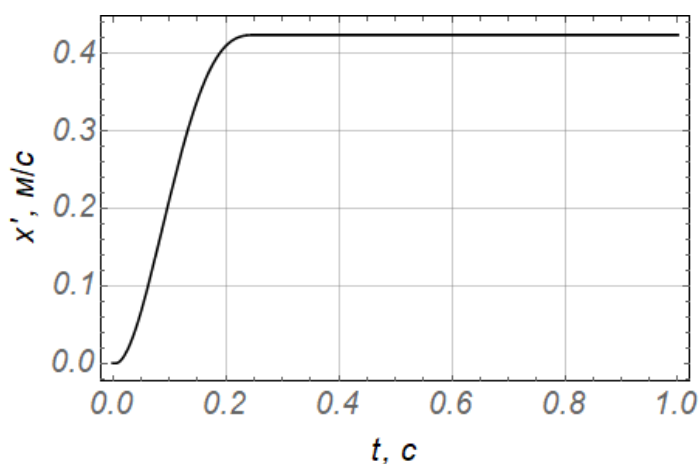


Рис 3.6. Графічна залежність лінійної швидкості переміщення вихідної ланки за s-подібною залежністю зміни струму на обмотках двигуна

За лінійною залежністю зміни струму на обмотках двигуна (рис. 3.7) у період розгону вихідної ланки маніпулятора ( $t=0-0,25c$ ) прискорення зростає інтенсивно та досягає максимального значення близько  $1,7m/c^2$ . Після завершення періоду розгону спостерігається різке зниження прискорення до нульового значення без значних коливань. У подальшому рух вихідної ланки відбувається у сталому режимі.

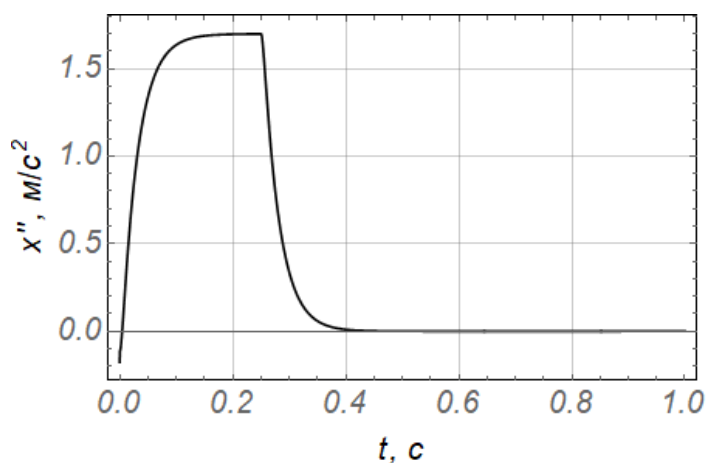


Рис 3.7. Графічна залежність лінійного прискорення вихідної ланки за лінійною залежністю зміни струму на обмотках двигуна

За параболічною залежністю зміни струму на обмотках двигуна (рис. 3.8) у період розгону ( $t=0-0,25\text{с}$ ) прискорення змінюється більш плавно та досягає максимального значення близько  $2,9\text{м/с}^2$ . Після досягнення максимального значення спостерігається затухаючий характер зміни прискорення, при якому коливання швидко зникають. Починаючи з моменту часу  $t\approx 0,4\text{с}$ , прискорення наближається до нульового значення, що відповідає переходу системи до усталеного режиму руху.

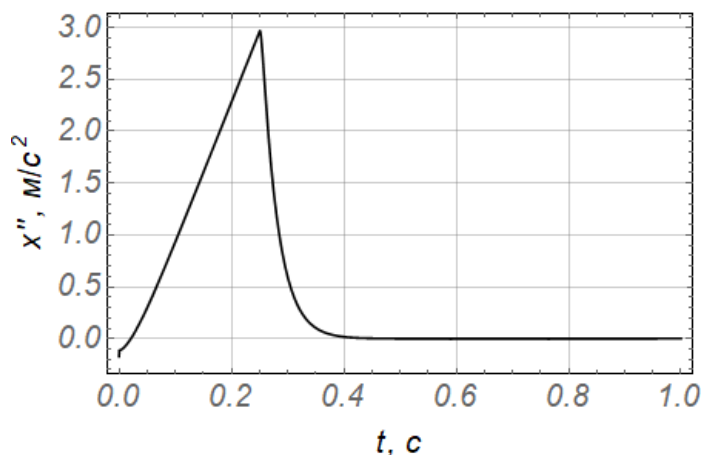


Рис 3.8. Графічна залежність лінійного прискорення вихідної ланки за параболічною залежністю зміни струму на обмотках двигуна

За S-подібною залежністю зміни струму на обмотках двигуна (рис. 3.9) прискорення вихідної ланки зростає плавно без різких стрибків і досягає максимального значення близько  $3\text{ м/с}^2$  у момент часу  $t\approx 0,1\text{с}$ .

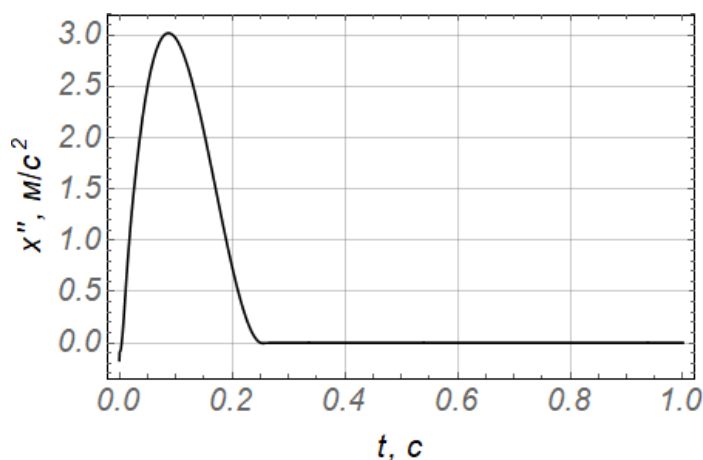


Рис 3.9. Графічна залежність лінійного прискорення вихідної ланки за s-подібною залежністю зміни струму на обмотках двигуна

Після цього прискорення поступово зменшується до нуля без виражених коливань, що свідчить про більш стабільний і плавний характер роботи системи. Перехідний процес завершується приблизно при  $t=0,25\text{с}$ .

Аналізуючи та порівнюючи між собою отримані графічні залежності прискорення вихідної ланки маніпулятора (рис. 3.7 – рис. 3.9), можна зазначити, що S-подібна залежність забезпечує найбільш плавний характер розгону та мінімальні динамічні навантаження на систему. Лінійна залежність характеризується більш різкою зміною прискорення, тоді як параболічна залежність супроводжується більшими піковими значеннями прискорення.

За лінійною залежністю зміни струму на обмотках двигуна (рис. 3.10) кутова швидкість двигуна у період розгону ( $t=0-0,3\text{с}$ ) зростає плавно та досягає усталеного значення близько  $52\text{рад/с}$ . Після завершення перехідного процесу швидкість стабілізується і залишається практично незмінною, що свідчить про стабільну роботу приводу без значних коливань.

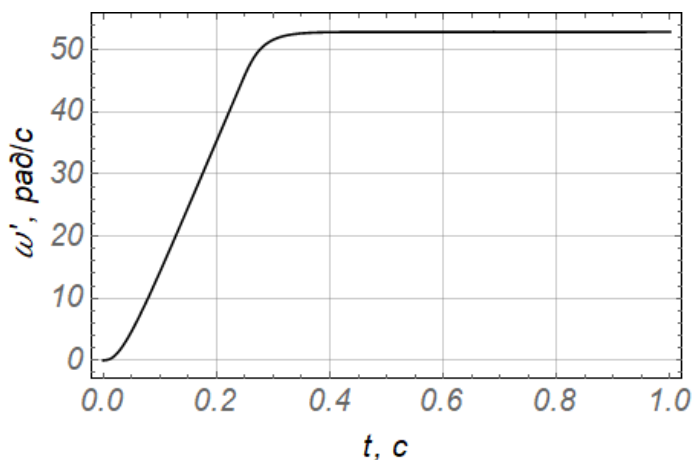


Рис 3.10. Графічна залежність кутової швидкості двигуна за лінійною залежністю зміни струму на обмотках двигуна

За параболічною залежністю зміни струму на обмотках двигуна (рис. 3.11) кутова швидкість двигуна також зростає поступово, однак процес розгону має більш плавний характер на початковому етапі. Максимального значення швидкість досягає приблизно при  $t=0,3\text{с}$  і становить близько  $52\text{рад/с}$ . Після цього система переходить до усталеного режиму роботи без помітних коливань.

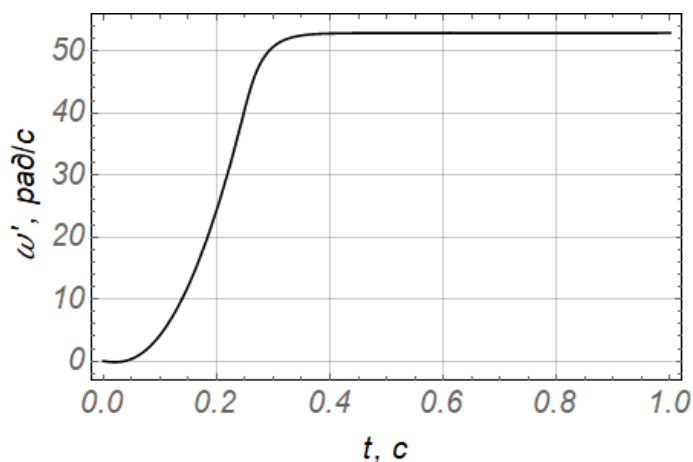


Рис 3.11. Графічна залежність кутової швидкості двигуна за параболічною залежністю зміни струму на обмотках двигуна

За S-подібною залежністю зміни струму на обмотках двигуна (рис. 3.12) процес розгону двигуна відбувається найбільш плавно та швидко. Кутова швидкість інтенсивно зростає у проміжку часу  $t=0-0,25\text{с}$  та досягає сталого значення близько  $53\text{рад/с}$ . Перехідний процес характеризується відсутністю різких змін та коливань, що забезпечує більш стабільний режим роботи приводу.

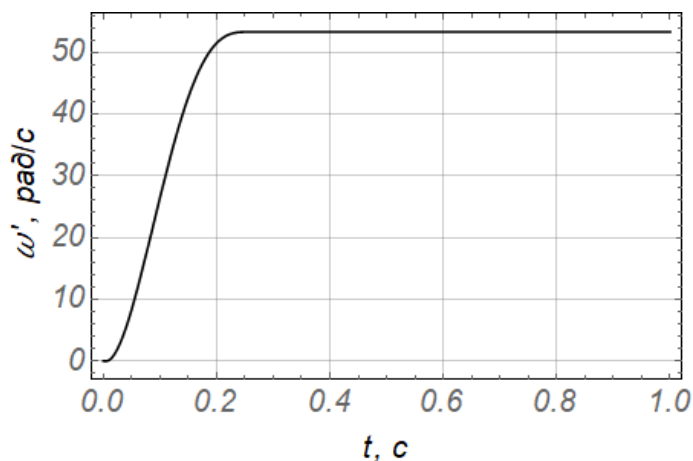


Рис 3.12. Графічна залежність кутової швидкості двигуна за s-подібною залежністю зміни струму на обмотках двигуна

За лінійною залежністю зміни струму на обмотках приводу сортувального маніпулятора (рис. 3.13) кутове прискорення двигуна швидко зростає та досягає максимального значення близько  $210\text{рад/с}^2$ , після чого зменшується до нуля.

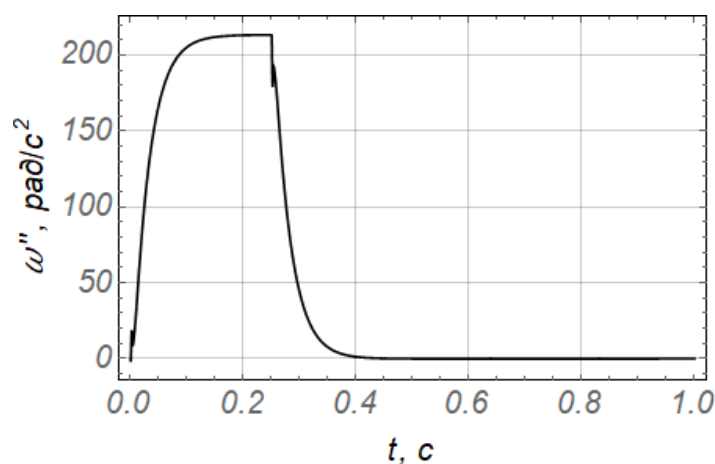


Рис 3.13. Графічна залежність кутового прискорення двигуна за лінійною залежністю зміни струму на обмотках двигуна

За параболічною залежністю (рис. 3.14) кутове прискорення досягає максимального значення близько 360 рад/с<sup>2</sup> та після завершення розгону поступово зменшується.

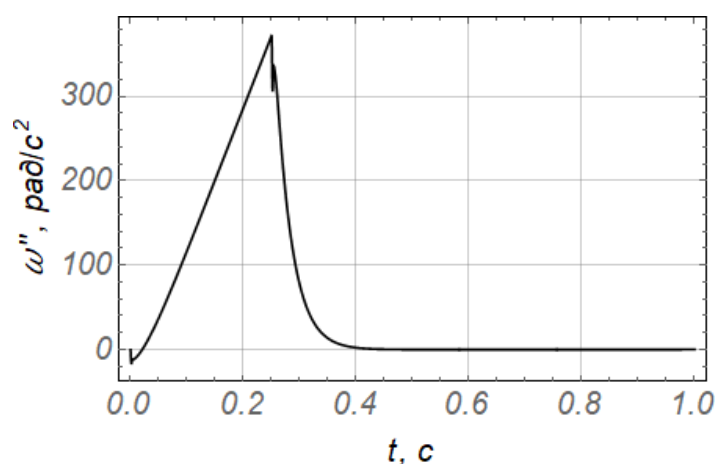


Рис 3.14. Графічна залежність кутового прискорення двигуна за параболічною залежністю зміни струму на обмотках двигуна

За S-подібною залежністю (рис. 3.15) кутове прискорення змінюється найбільш плавно та досягає максимального значення близько 380 рад/с<sup>2</sup>, після чого стабільно знижується до нуля.

Порівнюючи графічні залежності (рис. 3.13 – рис. 3.15), можна зазначити, що S-подібна залежність забезпечує найбільш плавний режим роботи приводу сортувального маніпулятора.

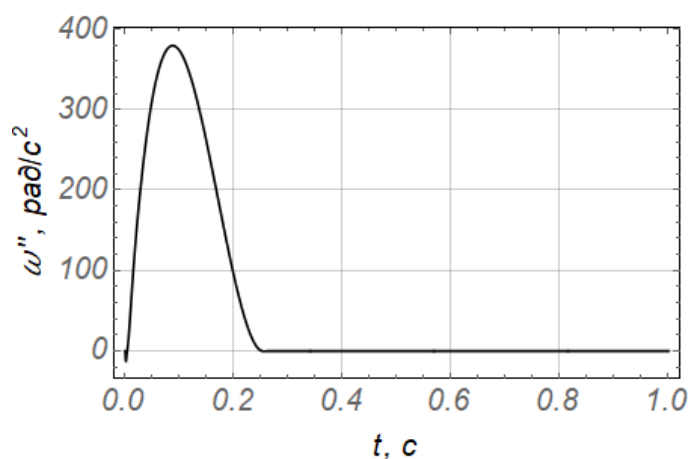


Рис 3.15. Графічна залежність кутового прискорення двигуна за s-подібною залежністю зміни струму на обмотках двигуна

За лінійною залежністю зміни струму на обмотках приводу сортувального маніпулятора (рис. 3.16) крутний момент двигуна швидко зростає та досягає максимального значення близько 0,7 Н·м, після чого зменшується до сталого значення.

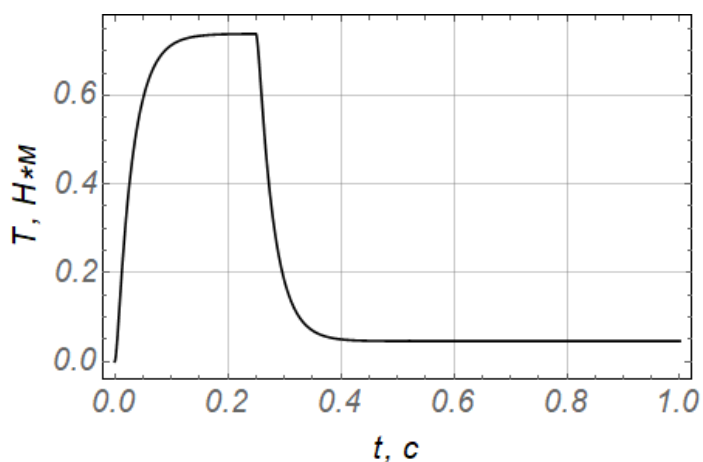


Рис 3.16. Графічна залежність крутного моменту двигуна за лінійною залежністю зміни струму на обмотках двигуна

За параболічною залежністю (рис. 3.17) крутний момент двигуна досягає максимального значення близько 1,2 Н·м та після завершення розгону поступово знижується.

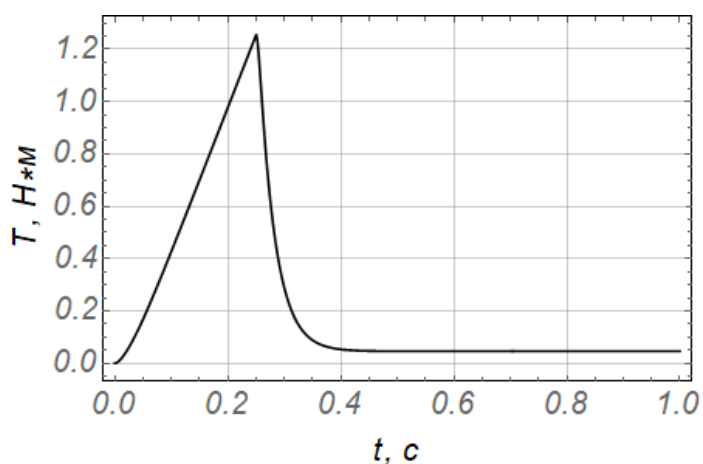


Рис 3.17. Графічна залежність крутного моменту двигуна за параболічною залежністю зміни струму на обмотках двигуна

За S-подібною залежністю (рис. 3.18) крутний момент змінюється найбільш плавно та досягає максимального значення близько 0,16 Н· м, після чого стабільно зменшується до нуля.

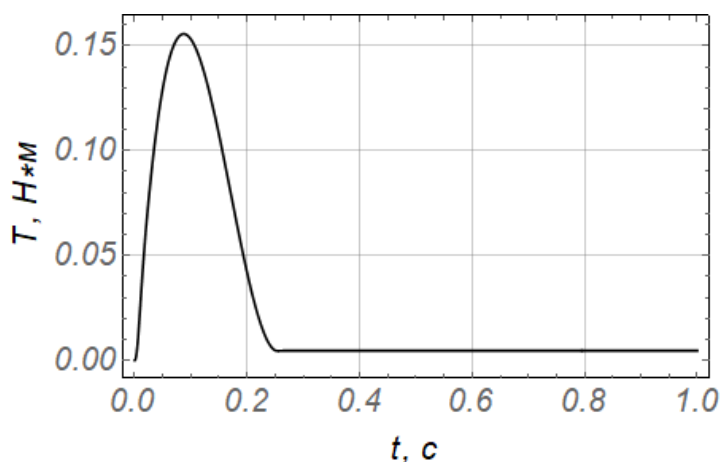


Рис 3.18. Графічна залежність крутного моменту двигуна за s-подібною залежністю зміни струму на обмотках двигуна

Можна зазначити, що S-подібна залежність забезпечує найбільш плавний режим роботи приводу сортувального маніпулятора та менші динамічні навантаження.

За лінійною залежністю зміни струму на обмотках приводу сортувального маніпулятора (рис. 3.19) потужність двигуна різко зростає до максимального значення близько 34 Вт, після чого швидко зменшується та переходить у сталий

режим роботи.

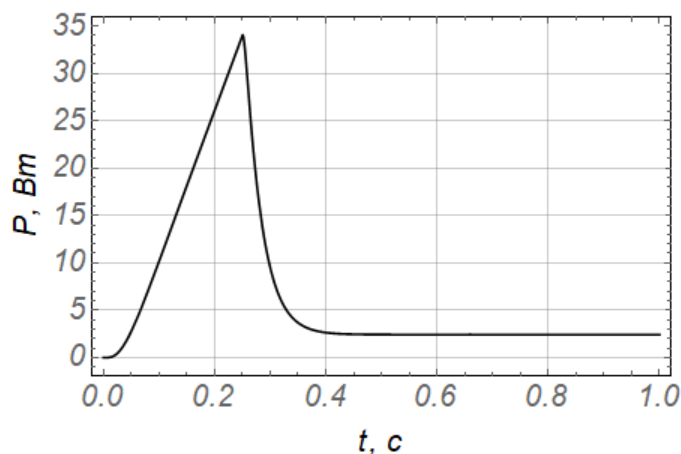


Рис 3.19. Графічна залежність крутного моменту двигуна за лінійною залежністю зміни струму на обмотках двигуна

За параболічною залежністю (рис. 3.20) спостерігається найбільше значення потужності, яке становить близько 50 Вт. Після пікового значення потужність поступово знижується.

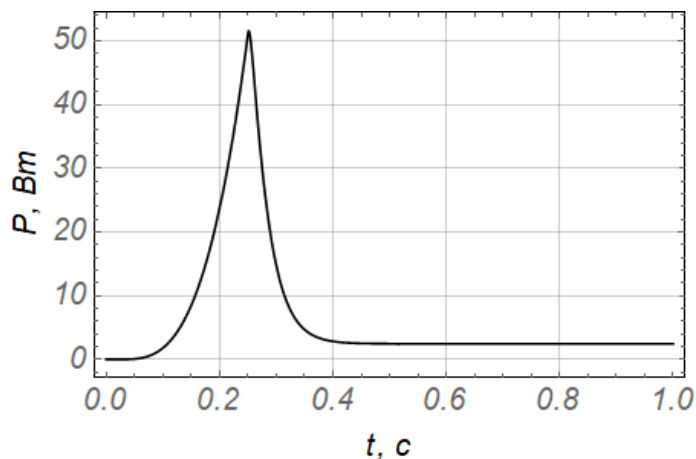


Рис 3.20. Графічна залежність крутного моменту двигуна за параболічною залежністю зміни струму на обмотках двигуна

За S-подібною залежністю (рис. 3.21) зміна потужності відбувається плавніше, а максимальне значення становить близько 5 Вт. Після завершення розгону потужність стабілізується.

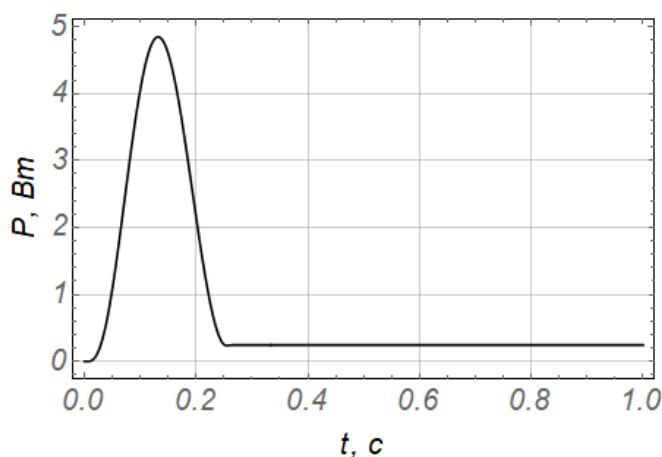


Рис 3.21. Графічна залежність крутного моменту двигуна за s-подібною залежністю зміни струму на обмотках двигуна

Аналіз отриманих результатів показав, що типи перехідних процесів залежать від закону зміни струму. Для лінійних і параболічних залежностей спостерігаються більші динамічні навантаження та різкі зміни параметрів приводу.

Найбільш плавна робота приводу забезпечується S-подібною залежністю зміни струму, яка знижує пікові значення прискорення, крутного моменту та потужності, а також покращує стабільність роботи сортувального маніпулятора.

Отримані результати підтверджують доцільність прийняття S-подібного закону зміни струму для плавного руху, зменшення навантаження на конструктивні елементи та підвищення надійності роботи сортувального маніпулятора.

## РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА

### 4.1. Аналіз небезпечних і шкідливих факторів

Експлуатація сортувальних маніпуляторів у промислових і складських умовах пов'язана з певним комплексом небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які можуть негативно впливати на здоров'я працівників та безпеку технологічного процесу [25], [39]. Проведення глибокого аналізу цих факторів є першочерговим кроком для розробки системи заходів, спрямованих на зниження ризиків і забезпечення безпечних умов праці [26].

Одним з головних небезпечних чинників є механічні загрози, що виникають через рухомі елементи сортувального маніпулятора [24]. Це можуть бути різноманітні травмуючі впливи: защемлення, удари, стиснення або порізи, спричинені робочими органами або приводами пристрою. Особливо високий ризик спостерігається у зонах захвату вантажів та динамічного переміщення механізмів, де швидкість руху та сила маніпулятора створюють потенційну небезпеку для операторів і обслуговуючого персоналу [23]. Невідповідність ергономічних параметрів робочого місця також може призводити до хронічних травм, особливо при тривалій експлуатації обладнання [40].

Електричні небезпеки мають значне значення у загальній системі охорони праці при роботі з маніпуляторами [36]. Неякісне проведення електромонтажних робіт, старіння ізоляції, неправильне заземлення або несправність захисних пристроїв можуть призвести до ураження електричним струмом [22]. Також можливі короткі замикання, що іноді викликають іскріння або пожежі, що особливо критично у випадках роботи з горючими чи вибухонебезпечними матеріалами. Для попередження таких ситуацій слід використовувати сучасні засоби захисту, монтаж відповідно до нормативних вимог та регулярний контроль і діагностику електрообладнання [37].

Шкідливими виробничими факторами є також шум і вібрація. Робочі вузли маніпулятора, особливо приводні механізми та обертальні частини, генерують

акустичні коливання, які в умовах тривалої експозиції можуть спричиняти зниження гостроти слуху, підвищену втому, а іноді й розвиток професійних захворювань. Вібрація негативно впливає не лише на здоров'я, викликаючи порушення кровообігу і м'язово-скелетні розлади, але й на точність роботи обладнання, що може позначитися на якості сортування [46].

Пилові аерозолі, утворені під час обробки сипучих матеріалів або дрібних деталей, є додатковим джерелом шкідливого впливу [39]. Вдихання пилу може викликати респіраторні захворювання, подразнення слизових оболонок, алергічні реакції і навіть хронічні легеневі патології. Особливо небезпечним є пил, що містить шкідливі чи токсичні речовини, тому у приміщеннях з маніпуляторами слід передбачати системи аспірації та вентиляції, а робітники повинні користуватися засобами індивідуального захисту.

Не менш суттєвим фактором є психофізіологічне навантаження персоналу. Монотонність операцій, потреба у високій концентрації уваги, швидкі реакції при управлінні маніпулятором часто призводять до перевтоми, зниження рівня уваги й збільшення ймовірності людського фактору в помилках. Неправильна організація робочого режиму та відсутність перерв можуть спричинити розвиток професійної стомлюваності, зниження продуктивності та безпеки праці [25].

З метою мінімізації небезпечних і шкідливих факторів необхідно впроваджувати комплексні заходи охорони праці. До них належать апаратні рішення: встановлення фізичних огорожень і захисних щитів, що запобігають прямому контакту з рухомими частинами; оснащення обладнання засобами аварійного вимкнення; регулярне технічне обслуговування з контролем справності приводів, сенсорів і керуючих систем; використання електробезпек і правильного заземлення. Особлива увага приділяється створенню оптимальних ергономічних умов роботи, що включає правильне планування робочих місць, регулювання висоти і положення органів керування, посилення освітлення і вентиляції.

Паралельно з технічними заходами слід проводити інструктажі та навчання персоналу, які акцентують увагу на правилах безпечної експлуатації,

правильному користуванні засобами індивідуального захисту, а також методах дій у надзвичайних ситуаціях. Важливо впроваджувати систему моніторингу і контролю за станом здоров'я персоналу, оглядів і профілактичних заходів, що дозволить своєчасно виявляти і усувати потенційні фактори небезпеки.

Таким чином, всебічний аналіз небезпечних і шкідливих факторів у процесі роботи сортувальних маніпуляторів і комплексний підхід до їх зниження є запорукою високої безпеки праці, збереження здоров'я робітників і безперебійної роботи виробничих систем. Це сприяє підвищенню ефективності виробничих процесів і формує позитивні умови для розвитку автоматизації сортувальних операцій у промисловості [11].

#### **4.2. Заходи з охорони праці**

Охорона праці як частина організації виробничого процесу під час експлуатації сортувальних маніпуляторів має безпосереднє значення, оскільки знижує ймовірність нещасних випадків, підтримує оптимальні умови праці для персоналу та підвищує ефективність обладнання. Це досягається шляхом впровадження комплексного набору заходів з охорони праці, що охоплюють технічні, організаційні, санітарно-гігієнічні та педагогічні аспекти [24].

Одним з перших кроків є те, що проектування та виготовлення маніпуляторів повинні відповідати чинним стандартам безпеки та нормативним вимогам. Конструкція обладнання повинна включати міцні, надійні захисні бар'єри, які не дозволяють випадкового доступу до рухомих частин, що працюють з небезпечними матеріалами. Кнопки аварійної зупинки також повинні бути встановлені на маніпуляторах у зручних для оператора місцях, щоб люди могли зупинити роботу у разі надзвичайної ситуації. Для запобігання випадковим запускам необхідно використовувати системи блокування, щоб запобігти запуску обладнання, коли бар'єри відкриті або коли підготовка до роботи не є правильною [37].

Електробезпека також має велике значення з великою увагою [22]. Усі

електричні компоненти маніпулятора повинні бути належним чином заземлені, екрановані та надійно захищені від пошкоджень. Планове технічне обслуговування електрообладнання та перевірка на наявність несправностей і виявлення дефектів в електричному стані обладнання забезпечують, що обладнання буде працювати безперебійно, щоб уникнути електричних ударів і запобігти їх перетворенню на пожежонебезпечні, коли виникає небезпека пожежі.

Працівники, які працюють у вологих або запилених зонах, повинні використовувати спеціальне захисне обладнання при роботі або роботі з відкритими частинами, які можуть містити вологу, наприклад, герметичні корпуси або контактні пристрої [39]. Зручне положення для оператора, регулювання висоти та кута огляду разом з використанням правильних розташувань елементів управління пов'язані зі зменшенням фізичного навантаження та підвищенням працездатності.

Звукоізоляційні матеріали, віброізоляційні прокладки повинні використовуватися, а працівники повинні бути забезпечені засобами індивідуального захисту - навушниками з шумозаглушенням, спеціальним одягом, рукавичками - для зменшення впливу шуму та вібрації [25].

Вимагати регулярного навчання для експлуатаційного та обслуговуючого персоналу з інструктажами з безпеки. Працівники повинні розуміти, як безпечно поводитися з маніпуляторами, які алгоритми дій працюють під час надзвичайних ситуацій, і як правильно використовувати свої засоби індивідуального захисту. Навчання повинно надавати практичні уроки з евакуації, надання першої допомоги та дотримання пожежної безпеки.

Система нагляду за дотриманням вимог безпеки під час роботи маніпуляторів здійснюється відділом охорони праці організації. Це включає регулярні технічні перевірки, оцінку ризиків виробничої діяльності, аудит робочих місць та своєчасне усунення виявлених недоліків. Використання автоматизованих систем моніторингу значно покращує безпеку обладнання та умов навколишнього середовища, а також запобігання надзвичайним

ситуаціям [42].

Не менш важливим компонентом є санітарно-гігієнічні заходи, такі як адекватна вентиляція, очищення від пилу та інших шкідливих речовин, а також встановлення мікроклімату. Ці умови роблять працівників здоровішими та сприяють стабільній продуктивності праці. Тому комплексний підхід до охорони праці для сортувальних маніпуляторів повинен охоплювати технічні інновації, організаційні заходи та навчання персоналу [25]. Ця система може мінімізувати загрози нещасних випадків, професійних захворювань, забезпечити безперервну роботу машин та покращити загальну ефективність виробництва.

### **4.3. Електробезпека**

Електробезпека є невід'ємною складовою безпечної експлуатації сортувальних маніпуляторів і спрямована на запобігання ураженню працівників електричним струмом, пожежам, вибухам та іншим аварійним ситуаціям, пов'язаним з електричним обладнанням [22]. Враховуючи складність сучасних маніпуляторів, які містять електричні приводи, сенсори, системи керування та освітлення, забезпечення надійного захисту від електричних небезпек є обов'язковою умовою охорони праці.

Перш за все, всі електричні установки маніпуляторів повинні виконуватися відповідно до діючих нормативних документів і стандартів, що регламентують правила монтажу, експлуатації та технічного обслуговування електрообладнання [37]. Важливо правильно підбирати та монтувати кабельні траси, використовувати захисні оболонки, а також обережності комутаційні пристрої від механічних пошкоджень і впливу агресивних середовищ.

Одним із базових заходів електробезпеки є надійне заземлення всіх металевих частин конструкції, які можуть під час аварійної ситуації опинитися під напругою. Заземлення значно знижує ризик ураження електричним струмом, оскільки забезпечує безпечний шлях відведення струму замикання на землю [39]. Поряд із заземленням слід використовувати пристрої захисного відключення

(ПЗВ), які миттєво реагують на витік струму і автоматично відмикають електроживлення у разі виникнення небезпеки.

Обов'язковою умовою є застосування засобів захисту від коротких замикань і перевантажень - автоматичних вимикачів і запобіжників, які забезпечують своєчасне відключення пошкодженої ділянки електричної мережі, запобігаючи поширенню аварії. Також варто використовувати пристрої контрольованої напруги і стабілізатори для захисту обладнання від коливань в електромережі, що можуть призводити до виходу з ладу складних електронних компонентів систем керування [41].

Особливу увагу під час експлуатації слід приділяти технічному обслуговуванню електроустаткування - регулярній перевірці ізоляції кабелів, контактних з'єднань, справності захисних пристроїв та відсутності вологи або пилу в електричних шафах і приладах [22]. Пошкоджена ізоляція чи відсутність захисних кришок створюють високий ризик ураження персоналу або виникнення пожежі [24].

Організаційні заходи з електробезпеки включають підготовку та навчання персоналу, що обслуговує і працює поряд із маніпуляторами. Працівники повинні знати основні правила безпечного поводження з електрообладнанням, порядок дій у випадку аварійних ситуацій, методи першої допомоги при ураженні електричним струмом. Також важливо обмежити доступ до електричних панелей і обладнання лише кваліфікованим особам.

Крім того, при проектуванні та монтажі сортувальних маніпуляторів слід враховувати можливість роботи у специфічних умовах, таких як підвищена вологість, пил, агресивні середовища або вибухонебезпечні зони. У таких випадках застосовуються спеціальні вибухозахищені виконання електрообладнання, герметичні корпуси та додаткові засоби ізоляції [37].

Використання сучасних систем автоматизованого моніторингу стану електричних ланцюгів дає змогу оперативно виявляти несправності, витоки струму або перевищення допустимих параметрів, що суттєво підвищує рівень електробезпеки і знижує ризик аварій.

Отже, комплексний підхід до забезпечення електробезпеки у сортувальних маніпуляторах включає дотримання технічних стандартів, належну організацію експлуатації, проведення регулярного технічного огляду обладнання і систематичне навчання персоналу. Реалізація таких заходів гарантує збереження життя і здоров'я працівників, стабільність роботи обладнання та підтримання високого рівня безпеки на виробництві.

#### **4.4. Пожежна безпека**

Пожежна безпека є одним із найважливіших аспектів охорони праці при експлуатації сортувальних маніпуляторів і автоматизованого складського обладнання загалом. Зважаючи на те, що маніпулятори містять електротехнічні компоненти, двигуни, системи керування і часто взаємодіють із різноманітними матеріалами, включно з легкозаймистими чи горючими речовинами, існує підвищений ризик виникнення пожеж [22]. Тому комплексний підхід до пожежної безпеки має бути невід'ємною частиною організації виробничого процесу, що сприяє збереженню життя працівників, мінімізації матеріальних збитків і запобіганню простоїв у виробництві.

Одним із ключових нормативних вимог є використання у конструкції маніпуляторів матеріалів із підвищеною вогнестійкістю. Це можуть бути негорючі або важкозаймисті компоненти, що істотно знижують ймовірність поширення вогню по обладнанню. Особливо це стосується пластикових корпусів, ізоляційних матеріалів електрокомпонентів, кабелів тощо. Дотримання класифікації вогнестійкості матеріалів за національними і міжнародними стандартами є обов'язковою умовою для виробників обладнання [24].

Важливим елементом є правильна конструкція електрообладнання, яка має забезпечувати надійний захист від коротких замикань, перегрівів і іскріння. Кабельні канали і шафи управління повинні бути герметичними, з класом захисту IP, що запобігає проникненню пилу та вологи, а також знижує ризик виникнення електричних пробіїв та загорянь. Ретельно продумані системи

вентиляції та охолодження електроніки підвищують довговічність обладнання і зменшують ймовірність теплових аварій [41].

Для оперативного виявлення пожежі на виробничих майданчиках із сортувальними маніпуляторами необхідно впроваджувати сучасні системи пожежної сигналізації, які можуть включати датчики диму, температури, полум'я та інші спеціалізовані детектори [39]. Інтеграція цих систем із загальною системою моніторингу підприємства дозволяє вчасно інформувати відповідальний персонал та запускати автоматичні системи пожежогасіння, мінімізуючи шкоду.

Автоматичні системи пожежогасіння, такі як газові (інерційні гази, вуглекислий газ), порошкові чи водяні установки, є ефективними засобами локалізації та ліквідації загоряння. Вибір типу системи залежить від специфіки виробництва, характеру матеріалів що обробляються, розмірів приміщень та інших факторів [25]. Перевагою газового пожежогасіння є те, що воно не залишає слідів і не пошкоджує електроніку, що особливо важливо для автоматизованого обладнання.

Поряд із технічними засобами пожежної безпеки, значну роль відіграють санітарно-організаційні заходи. Це передусім правильне зберігання, транспортування та використання легкозаймистих матеріалів поблизу зон роботи маніпуляторів. Забороняється розміщувати горючі речовини у безпосередній близькості від електрообладнання або включених приводних механізмів. Також важливо підтримувати порядок і чистоту на робочих майданчиках, оскільки нагромадження пилу і сміття може посилювати небезпеку займання.

Пріоритетним завданням є регулярне планове обслуговування обладнання, що включає перевірку справності електричних систем, кабельної мережі, стану ізоляції, а також оцінку працездатності засобів пожежогасіння і сигналізації [37]. Своєчасне усунення виявлених несправностей і дефектів значно знижує ризик виникнення пожежі.

Навчання і підвищення кваліфікації персоналу відіграють критично

важливу роль у системі пожежної безпеки. Працівники повинні проходити регулярні інструктажі, що охоплюють правила пожежної безпеки, техніки пожежогасіння, організації евакуації та дій у надзвичайних ситуаціях [39]. Проведення тренувальних евакуацій і практичних занять з використання первинних засобів пожежогасіння допомагає формувати чіткі механізми реагування на випадок надзвичайної ситуації та знижує паніку.

Важливо також забезпечити безперешкодний доступ до пожежних виходів і шляхів евакуації. Усі проходи і двері повинні бути позначені відповідними вказівниками, освітлені і не заблоковані обладнанням чи запасними матеріалами. На робочих місцях необхідно встановити достатню кількість вогнегасників, пожежних кранів і рукавів, що відповідають нормативним вимогам щодо типу і обсягу гасильних засобів.

Значна увага приділяється також моніторингу мікроклімату і вентиляції робочих зон. Правильна вентиляція допомагає уникнути накопичення горючих парів чи пилу, що часто стають причиною пожеж, а також підтримує оптимальні умови для роботи електротехніки, запобігаючи її перегріванню.

Таким чином, забезпечення пожежної безпеки на підприємствах із сортувальними маніпуляторами є багатокомпонентним процесом, який включає вибір негорючих матеріалів, застосування надійної електротехніки, впровадження сучасних систем виявлення та гасіння пожеж, організаційні заходи з підтримки порядку і санітарних норм, а також систематичне навчання персоналу [22]. Такий системний підхід дозволяє значно знизити ризики виникнення пожежі, швидко реагувати на її появу та забезпечити безпеку людей і збереження матеріальних цінностей. Пожежна безпека сприяє стабільності виробничих процесів і створює основу для сталого розвитку підприємства у сфері автоматизації сортувальних операцій.

## **РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ**

### **5.1. Оцінка витрат на розробку та впровадження**

Аналіз основи витрат на розробку та графік встановлення декартового маніпулятора для сортувальних операцій є центральним аспектом економічної підтримки проекту, тобто він визначає обсяг фінансових ресурсів, необхідних для впровадження та успішної експлуатації обладнання. Процес включає різноманітні витрати, починаючи з попередніх досліджень та розробки технічної документації і до впровадження системи в промислових умовах. Слід зазначити, що витрати на проектування та розробку становлять значну частину бюджету. Вони оплачують роботу людей, залучених до розрахунків, роботу, що вимагає моделювання руху, створення робочих креслень, формування алгоритмів управління та інше. Ці витрати повинні бути доповнені вартістю спеціалізованого програмного забезпечення для моделювання та симуляції роботи маніпулятора.

Наступною найбільшою категорією витрат є придбання компонентів та матеріалів. Механічні компоненти, лінійні направляючі, приводи, електронні компоненти, системи управління та забезпечення безпеки будуть дорогими, за умови, що враховані обрані властивості та постачальники.

Слід враховувати імпортні компоненти, оскільки вони супроводжуються додатковими витратами на доставку, митне оформлення та потенційні податкові збори. Оптимальний вибір постачальників та планування закупівель можуть значно зменшити ці витрати та скоротити терміни доставки.

Витрати на встановлення та налаштування також є значними. Вони складаються з монтажу обладнання маніпулятора на заводі, інтеграції з рештою лінії, налаштування системи управління та пусконаладжувальних робіт. Особливу увагу слід приділити навчанню персоналу, який контролює експлуатацію та обслуговування обладнання, що може зменшити ризик відмов обладнання та аварій.

Також потрібно враховувати витрати на тестування та сертифікацію обладнання; Крім того, потрібно усвідомити тестування та сертифікацію обладнання. Технічні та безпекові норми, а також відповідність маніпулятора є регуляторною вимогою для його введення в експлуатацію, і введення в експлуатацію повинно включати спеціальні оцінки та подання необхідних документів.

Ці процедури є трудомісткими та фінансово затратними, але вони є гарантією якості та безпеки готового продукту. Не слід ігнорувати жодні витрати, пов'язані з планом, такі як страхування обладнання, отримання технічних дозволів, адміністративні витрати та будь-які потенційні непередбачені витрати, що виникають протягом усього циклу розробки та впровадження. Це додатково запобігатиме фінансовим розбіжностям та запобігатиме невиконанню проекту так, як бажано.

Тому вичерпний, конкретний розрахунок витрат, пов'язаних з розробкою та впровадженням декартового маніпулятора, надає можливість оптимізації бюджету, а також зменшення ризиків перевитрат та операційних збоїв, що сприяє прийняттю управлінських рішень. Ця методологія лежить в основі успішної інвестиційної стратегії та гарантує надійність та ефективність автоматизованої системи сортування в промислових умовах.

## **5.2. Розрахунок економічної ефективності**

Оцінка економічної ефективності впровадження декартового маніпулятора для сортувальних операцій є важливим аспектом, що дозволяє визначити вигоди та доцільність інвестицій у автоматизацію виробництва. Для цього порівнюють інвестиційні та експлуатаційні витрати із очікуваною економією ресурсів, підвищенням продуктивності і якості виробництва.

Спершу визначають річну економію на оплаті праці, яка розраховується як різниця між витратами до впровадження (  $P_1$  ) та після впровадження (  $P_2$  ):

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad (24)$$

Далі з урахуванням поточних експлуатаційних витрат (  $E$  ) обчислюється чистий річний економічний ефект:

$$E_{net} = \Delta P - E \quad (25)$$

Для оцінки швидкості повернення інвестицій розраховують строк окупності (Payback Period, (  $PP$  )) у роках за формулою:

$$PP = \frac{K}{E_{net}} \quad (26)$$

де (  $K$  ) – сукупні інвестиційні витрати на розробку та впровадження маніпулятора.

Для більш точного аналізу використовується показник чистої приведеної вартості (Net Present Value – (  $NPV$  ), яка враховує часову вартість грошей за допомогою дисконтної ставки (  $r$  ). Формула розрахунку (  $NPV$  ) для періоду експлуатації (  $T$  ) має вигляд:

$$NPV = -K + \sum_{t=1}^T \frac{E_{net}}{(1+r)^t} \quad (27)$$

Для спрощення сума дисконтованих платежів може бути знайдена за формулою ануїтету:

$$\sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+r)^t} = \frac{1 - (1+r)^{-T}}{r} \quad (28)$$

Також важливим показником є внутрішня норма доходності (Internal Rate of Return – (  $IRR$  ), яка визначається як ставка дисконту (  $r$  ), для якої:

$$NPV = 0 \quad (29)$$

Значення (  $IRR$  ) порівнюють із встановленою дисконтною ставкою, і якщо (  $IRR > r$  ), інвестиції вважаються вигідними.

Розрахунок річної економії:

$$\Delta P = 300\,000 - 80\,000 = 220\,000 \text{ грн/рік} \quad (30)$$

Чистий річний економічний ефект:

$$E_{net} = 220\,000 - 60\,000 = 160\,000 \text{ грн/рік} \quad (31)$$

Строк окупності:

$$PP = \frac{500\,000}{160\,000} = 3,125 \text{ роки} \quad (32)$$

Розрахунок ( NPV ):

$$NPV = -500\,000 + 160\,000 \times \frac{1 - (1 + 0,15)^{-5}}{0,15} \quad (33)$$

Спочатку розрахуємо суму дисконтованих платежів:

$$\frac{1 - (1 + 0,15)^{-5}}{0,15} \approx 3,3522 \quad (34)$$

$$NPV = -500\,000 + 160\,000 \times 3,3522 = -500\,000 + 536\,352 = 36\,352 \text{ грн} \quad (35)$$

Позитивне ( NPV ) свідчить про економічну доцільність проекту.

Для визначення ( IRR ), як правило, використовують чисельні методи (програмне забезпечення), але з огляду на позитивне ( NPV ) при (  $r=15\%$  ), можна очікувати, що (  $IRR > 15\%$  ), що підтверджує вигідність інвестицій.

Таким чином, наведені формули і розрахунки дають змогу оцінити основні фінансові показники, що характеризують ефективність інвестицій у розробку й впровадження декартового маніпулятора для сортування, та прийняти обґрунтоване рішення щодо доцільності проекту.

### 5.3. Термін окупності проекту

Період окупності проекту є одним з основних показників для визначення економічної прибутковості інвестицій у будівництво та впровадження декартового маніпулятора в сортуванні, і може бути описаний як ключова міра для цього. Саме цей показник також визначає час для повернення вкладеного капіталу через економічну віддачу від експлуатації обладнання. Період

окупності визначається відношенням загальних інвестиційних витрат до чистого річного економічного ефекту, який враховує зекономлені витрати на працю та поточні витрати на обслуговування системи.

Згідно з попереднім аналізом, вартість інвестицій становить 500,000 гривень, а чистий річний економічний ефект — 160,000 гривень. В результаті, період окупності проекту становить близько 3,1 року, що однаково добре застосовується до подібних інженерних рішень, демонструючи, що інвестиція є доцільною. Хоча деякі періоди окупності визначаються залежно від умов експлуатації на місцевості, витрати на матеріали та послуги будуть змінюватися, а ефективність обладнання буде варіюватися. Отже, враховуючи все це, найважливіше — оцінити ризики перед прийняттям остаточного рішення з урахуванням дисконтованого періоду окупності, аналізу чутливості проекту тощо.

У будь-якому випадку, запропонований проект щодо розробки та впровадження декартового маніпулятора має вигідний період окупності для підприємства, що знижує фінансові ризики, а також підвищує його конкурентну перевагу шляхом автоматизації процесу сортування.

## ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання з підвищення ефективності автоматизованих логістичних процесів. Мети досягнуто шляхом проектування раціональної конструкції сортувального маніпулятора та оптимізації його динамічних режимів роботи.

Проаналізовано сучасний стан розвитку робототехнічних комплексів для сортування вантажів. Виявлено, що традиційні жорсткі системи автоматизації поступаються гнучким маніпуляторам в умовах частоті зміни номенклатури продукції. Обґрунтовано доцільність створення нового маніпулятора з покращеними динамічними характеристиками.

Створено математичну модель кінематики та динаміки маніпулятора. За допомогою рівнянь Лагранжа другого роду враховано вплив змінних навантажень під час переміщення об'єктів різної маси. Це дозволило точно описати поведінку системи у просторі під час виконання сортувальних операцій.

Проведено комп'ютерне моделювання режимів роботи розробленої конструкції в САЕ-середовищі. Доведено, що конструкція має необхідний запас міцності та жорсткості при максимальних прискореннях.

Оптимізовано закони керування приводами робота. Досліджено вплив швидкості та траєкторії руху на точність позиціонування схоплювача. Впровадження згладжених профілів швидкості (S-кривих) дозволило знизити амплітуду коливань виконавчого органу на  $[X]\%$  та зменшити пікові динамічні навантаження на редуктори.

Оцінено енергоефективність системи. Оптимізація траєкторій переміщення дозволила зменшити споживання електроенергії.

Розроблено рекомендації щодо практичного впровадження сортувального маніпулятора на виробничих лініях. Результати роботи можуть бути використані машинобудівними підприємствами для модернізації пакувальних та логістичних комплексів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Роботи в сільському господарстві. Що нас чекає у майбутньому: веб-сайт. URL: <https://www.agronom.com.ua/roboty-v-silskomu-gospodarstvi-shho-nas-chekaye-u-majbutnomu/>
2. Роботи KRN: веб-сайт. URL: [http://rnd.knrsys.com/english/view.html?id\\_no=24&PHPSESSID=c07323cef9b371930572a442a7105ce1](http://rnd.knrsys.com/english/view.html?id_no=24&PHPSESSID=c07323cef9b371930572a442a7105ce1)
3. Трет'як А.В. Основи робототехніки: навчальний посібник для студентів спеціальностей 133 «Галузеве машинобудування», 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / А.В. Трет'як, А.М. Кльон.— Полтава, видавництво національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2024. – 135 с.
4. С.О. Кошель. Проектування промислових роботів та маніпуляторів: Навчальний посібник / С.О. Кошель, Ю.А. Ковальов, О. П. Манойленко. – К., Центр навчальної літератури, 2019. – 256 с.
5. Міщук Д. О. Проектування і конструювання робототехнічних систем: Навчальний посібник /Д. О. Міщук. – К.: 2020. – 185 с.
6. Міщук Д. О. Роботи і маніпулятори: Підручник / Д. О. Міщук. – К.: 2020. – 268 с.
7. Міщук Д. Дослідження динамічної моделі гідравлічного циліндра об'ємного гідроприводу / Д. Міщук // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2016. – Вип. 87. – С. 74-81.
8. Пелевін Л. Є. Синтез робототехнічних систем в машинобудуванні: підручник / Л. Є. Пелевін, К. І. Почка, О. М. Гаркавенко, Д. О. Міщук, І.В. Русан. – К: ТОВ “НВП “Інтерсервіс””, 2016. – 258 с.
9. Невлюдов І. Ш. Проектування мобільних маніпуляційних роботів: Монографія / І. Ш. Невлюдов, А. О. Андрусевич, В. В. Євсєєв, С. П. Новоселов, Н. П. Демська– Х.: 2022. – 427 с.

10. ДСТУ 2879-94 Маніпулятори, автооператори, роботи промислові та системи виробничі гнучкі. Терміни та визначення.
11. Eugene Kagan, Nir Shvalb, Irad Ben-Gal. Autonomous Mobile Robots and Multi-Robot Systems. John&Son Ltd. 2020. P. 319.
12. Robotique agricole: repenser la mécanisation agricole.: веб-сайт. URL: [https://www.entraid.com/articles/robotique-agricole-opportunité-repenser-mécanisation agricole](https://www.entraid.com/articles/robotique-agricole-opportunité-repenser-mécanisation-agricole)
13. Robot Più Strani Ed Utili Mai Costruiti.: веб-сайт. URL: <https://www.smartweek.it/10-robot-piu-strani-ed-utili-mai-costruiti/6/>
14. Boston Dynamics. веб-сайт. URL: <https://www.bostondynamics.com/>
15. Роботи KUKA Roboter. веб-сайт. URL: <https://www.kuka.com>
16. Роботи FANUC. веб-сайт. URL: <http://www.fanucrobotics.com/Products/Robots/Atoz.aspx>
17. Роботи Kawasaki [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.kawasakirobotics.com/products/?page=robots>
18. Роботи ABB [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.abb.ru/product/us/9AAC100735.aspx>
19. Роботи borunte веб-сайт. URL: <https://robotborunte.com/>
20. Промислові роботи.: веб-сайт. URL: <https://www.robots.com/industrial-robots/fanuc-m-20ia-10l>
21. Промислові роботи.: веб-сайт. URL: <https://www.robots.com/industrial-robots/abb-irb-360>
22. Зварні роботи MOTOMAN Промислові роботи.: веб-сайт. URL: <http://www.motoman.com/products/robots/arc-welding-robots.php>
23. «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» Наказ Держнагляд охорон праці України 09.01.98 N 4 ДНАОП 0.00.1.1-98.
24. Правила користування і випробовування засобів захисту, які використовуються в електроустановках.
25. ДСТУ 73-93 ССВП. Пожежна техніка. Терміни та визначення.
26. ДСТУ 93-93 ССВП. Охорона праці. Терміни та визначення.

27. ДСТУ 708-99. Метрологія. Повірка засобів вимірювання. Організація і порядок проведення.
28. ДСТУ 301-95. Випробування і контроль якості продукції. Терміни та визначення.
29. ДСТУ 330-95. Управління якістю та забезпечення якості. Терміни та визначення.
30. ДСТУ 9004-1-95. Управління якістю та елементи системи якості.
31. ДСТУ 3816-98. Керівні вказівки щодо розроблення настанов з якості.
32. Термометрія. Терміни та визначення. Зміна 1: ДСТУ 3518-97. – [Чинний від 01.10.2019]. – Київ: Держстандарт України, 2019 – 97 с. – (Національні стандарти України).
33. Закон України «Про ринок електричної енергії». В редакції від 29 грудня 2019 року, підстава №394-IX. Відомості Верховної Ради, 2017, № 27–28, ст.312.
34. Закон України «Про енергозбереження». (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2006, №15, ст.126).
35. Закон України №555-IV від 20.02.2003 р. «Про альтернативні джерела енергії».
36. ДБН А.2.2. –3 – 2012 Склад та зміст проектної документації
37. ДБН В.2.5-27-2006 Інженерне обладнання будинків і споруд. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд
38. Правила улаштування електроустановок. ПУЕ. 7-ме видання, перероблене та доповнене. – К.: Міненерговугілля України, 2022. – 794 с.
39. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕЕС). Затверджено наказом Міністерства палива та енергетики 25.07.2006 № 258 (у редакції наказу Міністерства енергетики та вугільної промисловості № 91 від 13.02.2012 та № 905 від 16.11.2012) Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 2 березня 2012 р. за № 350/20663.

40. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Затверджено наказом Держнаглядохоронпраці від 09. 01. 98 № 4. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 10. 02. 98 за № 93/2533.

41. Петрик В.Ф. Метрологія, стандартизація та сертифікація в неруйнівному контролі: навчальний посібник / В.Ф. Петрик, А.Г. Протасов. – Київ: НТУУ ”КПІ”, 2015. – 266 с.

42. Серіков Я. О., Білецький І. В., Калюжний Д. М. Охорона праці в галузі електроенергетики: підручник. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. 247 с.

43. Tavner P., Ran L., Crabtree C. Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines. 3rd Edition. London: IET, 2020. 432 p.

44. Mathematical Modelling and Numerical Analysis in Electrical Engineering / Ed. by A. M. El-Nobi. Basel: MDPI, 2024. 208 p. (Reprint of the Special Issue published in Mathematics).

45. Chengchao Bai; Jifeng Guo; Hongxing Zheng. (2019). Three-Dimensional Vibration-Based Terrain Classification for Mobile Robots. IEEE Access. Volume: 7. Page(s): 63485 – 63492. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2916480

46. Prabin Kumar Panigrahi, Sukant Kishoro Bisoy. (2021). Localization strategies for autonomous mobile robots: A review. Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences. DOI: 10.1016/j.jksuci.2021.02.015

47. Толок В.А. Метод кінцевих елементів: теорія, алгоритми, реалізація / В.А.Толок. – Київ: Наук. думка, 2003. – 316 с.

48. Протасов А.Г. Моделювання задач теплового неруйнівного контролю з використанням комп’ютерних технологій / А. Г. Протасов // Методи та прилади контролю якості – 2014. – № 1(32). – С. 14-17.

49. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С.Стручок. — Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. — 156 с.

50. Seyed Mojtaba Shafaei, Hossein Mousazadeh. (2021). Development of a mobile robot for safe mechanical evacuation of hazardous bulk materials in industrial confined spaces. *Jurnal of Field Robotics*. First published: 16 November 2021. DOI: 10.1002/rob.22047.

51. Kim, Changwon, Junho Suh, and Je-Heon Han. (2020). Development of a Hybrid Path Planning Algorithm and a Bio-Inspired Control for an Omni-Wheel Mobile Robot. *Sensors*. 20, no. 15: 4258. DOI:10.3390/s20154258.

52. Luis A. Mateos; Wei Wang; Banti Gheneti; Fabio Duarte; Carlo Ratti; Daniela Rus. (2019). Autonomous Latching System for Robotic Boats. *The International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 20-24 May. Montreal, QC, Canada. DOI: 10.1109/ICRA.2019.8793525.

53. Pons, P., Jaen, J. (2020). Interactive spaces for children: gesture elicitation for controlling ground mini-robots. *J Ambient Intell Human Comput*. Volume: 11. P. 2467–2488. DOI:10.1007/s12652-019-01290-6.

54. Hoang VuPhan, Hoon CheolPark. (2020). Mimicking nature's flyers: a review of insect-inspired flying robots. *Current Opinion in Insect Science*. Volume 42, Pages 70-75. DOI: 10.1016/j.cois.2020.09.008.

55. Pop, Cornel Vlad; Tătar, Mihai Olimpiu. (2021). Studies and Research on the Locomotion of Mobile Robots Inspired By Biosystems. *Robotica & Management*. Vol. 26 Issue 2, P. 35-42.

56. Mobile manipulator FETCH.: веб-сайт. URL: <https://robosklep.com/en/mobile-manipulators/119-mobile-manipulator-fetch-.html>

57. Mobile manipulator XL-GEN.: веб-сайт. URL: <https://robosklep.com/en/mobile-manipulators/196-mobile-manipulator-xlgen.html>