

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) Навлально-Науковий Інженерно-технічний
інститут ім. І.С. Гулого
Кафедра Мехатроніки та пакувальної техніки

«До захисту в ЕК»

Директор інституту(декан факультету)

Сергій БЛАЖЕНКО
(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

«12» грудня 2025р.

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Людмила КРИВОПЛЯС-ВОЛОДИНА
(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

«12» грудня 2025р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

Зі спеціальності

131 «Прикладна механіка»

(шифр та назва спеціальності)

Освітньої програми Прикладна механіка

на тему: Дослідження характерних параметрів роботи та взаємодії роботів у складі автоматизованої пакувальної лінії

Виконав: здобувач

Заріпа Юрій Олександрович

(Прізвище, ім'я, по-батькові)

Керівник Деренівська Анастасія Василівна

(Прізвище, ім'я, по-батькові)

(підпис)

Консультанти

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

Рецензент

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

Я як здобувач(ка) Національного університету харчових технологій розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я не надавав(-ла) і не одержував(-ла) незарплатованої допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідні джерела

Здобувач

Юрій ЗАРІПА
(ім'я, ПРІЗВИЩЕ, підпис)

Київ - 2025р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) Навчально-Науковий Інженерно-технічний інститут ім. І.С. Гулого

Кафедра Мехатроніки та пакувальної техніки

Освітній ступінь Магістр

Спеціальність 131 «Прикладна механіка»

(шифр і назва)

Освітня програма «Прикладна механіка»

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МІТ

Людмила КРИВОПЛЯС-ВОЛОДИНА

« 01 » листопада 2025 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Заріпи Юрія Олександровича

(ПРИЗВИЩЕ Ім'я По батькові)

- Тема Дослідження
Характерних параметрів роботи та взаємодії роботів у складі автоматизованої пакувальної лінії
керівник роботи доц. канд. тех. наук, Деренівська Анастасія Василівна
(вчений ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ Ім'я По батькові)
затверджено наказом по Університету від "17" 12 2025 року №712-КС
- Строк подання роботи здобувачем 05.12.2025р
- Вихідні дані до роботи види вантажів, технології та обладнання для переміщення, мехатронні схеми для забезпечення різних режимів роботи, електро-пневматичні схеми керування.
- Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
1. Аналіз робототехнічних систем у пакувальній галузі. 2. Дослідження фізико-механічних параметрів та динаміки маніпулятора. 3. Розрахунок та модернізація конструкції пневматичного пристрою захоплення. 4. Експериментальна верифікація роботи мехатронної системи. 5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.
- Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
1. Презентація на 15 листів.

РЕФЕРАТ

Магістерська робота містить **108** сторінок, **27** рисунків, **8** таблиць, **23** джерела.

Об'єкт дослідження — процеси функціонування та взаємодії мехатронних модулів у складі автоматизованих пакувальних ліній.

Предмет дослідження — методи розрахунку динамічних навантажень, кінематичні схеми та конструктивні параметри пневматичних захоплюючих пристроїв.

Мета роботи — підвищення продуктивності та надійності операцій пакування шляхом розробки уточненої методики розрахунку параметрів пневмоприводу та модернізації конструкції виконавчого органу маніпулятора.

Методи дослідження. У роботі використано методи теоретичної механіки та термодинаміки (для моделювання руху приводу), методи інженерного синтезу механізмів, 3D-моделювання (CAD), а також експериментальні методи дослідження кінематичних характеристик і точності позиціонування.

Результати роботи. Виконано аналіз сучасного стану роботизованих пакувальних систем. Розроблено математичну модель динаміки пневматичного циліндра, що враховує інерційні навантаження та особливості стисливості повітря. Запропоновано інженерну методику розрахунку необхідного зусилля затиску з урахуванням коефіцієнта запасу надійності. Здійснено синтез модернізованої конструкції захоплюючого пристрою з використанням клинового механізму та змінних накладок, виготовлених за технологією 3D-друку (FDM), що дозволило зменшити

масу рухомих частин та забезпечити адаптивність до форми продукції. Експериментально підтверджено працездатність системи та досягнення необхідної точності позиціонування. Розроблено заходи з охорони праці та безпеки експлуатації обладнання.

Ключові слова: МЕХАТРОННА СИСТЕМА, ПРОМИСЛОВИЙ РОБОТ, ПНЕВМАТИЧНИЙ ЗАХВАТ, ДИНАМІКА, МОДЕЛЮВАННЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ ПАКУВАННЯ.

ABSTRACT

The Master's thesis consists of **108** pages, **27** figures, **8** tables, and **23** references.

The object of research is the processes of functioning and interaction of mechatronic modules within automated packaging lines.

The subject of research is the methods for calculating dynamic loads, kinematic schemes, and design parameters of pneumatic gripping devices.

The aim of the work is to increase the productivity and reliability of packaging operations by developing a refined methodology for calculating pneumatic drive parameters and modernizing the design of the manipulator's executive organ.

Research methods. The thesis utilizes methods of theoretical mechanics and thermodynamics (for modeling drive motion), methods of engineering synthesis of mechanisms, 3D modeling (CAD), as well as experimental methods for investigating kinematic characteristics and positioning accuracy.

Results. An analysis of the current state of robotic packaging systems has been performed. A mathematical model of the pneumatic cylinder dynamics, taking into account inertial loads and air compressibility features, has been developed.

An engineering methodology for calculating the required gripping force, considering the reliability safety factor, is proposed. A modernized design of the gripping device utilizing a wedge mechanism and replaceable pads manufactured using 3D printing (FDM) technology has been synthesized, which allowed reducing the mass of moving parts and ensuring adaptability to the product shape. The operability of the system and the achievement of the required positioning accuracy have been experimentally confirmed. Occupational safety measures regarding equipment operation have been developed.

Keywords: MECHATRONIC SYSTEM, INDUSTRIAL ROBOT, PNEUMATIC GRIPPER, DYNAMICS, SIMULATION, PACKAGING AUTOMATION.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ.....	1
ABSTRACT.....	2
ЗМІСТ.....	3
ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РОБОТОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ У ПАКУВАЛЬНІЙ ГАЛУЗІ.....	7
1.1. Класифікація та принципи функціонування промислових роботів	7
1.2. Огляд технологічних рішень застосування промислових роботів на автоматизованих пакувальних лініях	12
1.3. Постановка проблеми підвищення ефективності робототехнічних комплексів в пакувальній лінії	20
Висновки до розділу 1	23
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ.....	25
2.1. Структурний та кінематичний аналіз різновидів промислових роботів.....	25
2.2. Динамічне моделювання процесу транспортування вантажу пристроєм захоплення.....	30
2.3. Аналіз факторів, що впливають на точність та енергоефективність системи.....	40
Висновки до розділу 2	48
РОЗДІЛ 3. МЕТОДОЛОГІЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ТА РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ПРИСТРОЮ ЗАХОПЛЕННЯ	50
3.1. Класифікація та аналіз конструкцій пристроїв захоплення для пакувальної продукції	50

3.2. Розробка методики розрахунку параметрів та зусилля затиску пневматичного захвату.....	54
3.3. Синтез та модернізація конструкції елементів захоплення	62
Висновки до розділу 3	70
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВЕРИФІКАЦІЯ РОБОТИ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ	72
4.1. Опис експериментального стенду та методики проведення досліджень	72
4.2. Дослідження кінематичних та динамічних характеристик.....	76
4.3. Аналіз точності позиціонування та надійності захоплення	80
Висновки до розділу 4	86
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	87
5.1. Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів при експлуатації мехатронної системи	87
5.2. Інженерно-технічні заходи з безпеки пневматичного обладнання .	88
5.3. Розрахунок штучного освітлення робочої зони	88
5.4. Електробезпека та пожежна профілактика	90
Висновки до розділу 5	91
ВИСНОВКИ	92
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	94

ВСТУП

У сучасному промисловому виробництві, особливо в харчовій галузі, ключовим фактором конкурентоспроможності стає здатність підприємства швидко адаптуватися до змінних вимог ринку при мінімізації операційних витрат. Визначальну роль у забезпеченні такої гнучкості відіграють автоматизовані пакувальні лінії, де інтеграція робототехнічних систем та мехатронних модулів дозволяє досягти високої продуктивності та стабільності технологічних процесів [1]. Проте, незважаючи на значне поширення засобів автоматизації, існує низка техніко-економічних викликів, що стримують подальший розвиток галузі.

Актуальність теми обумовлена необхідністю вирішення протиріччя між високими вимогами до швидкодії та точності пакувального обладнання та обмеженими можливостями наявних мехатронних систем щодо їх адаптивності. Більшість існуючих рішень, особливо закордонного виробництва, мають високу вартість та складність у технічному обслуговуванні, що робить їх малодоступними для широкого кола вітчизняних підприємств. Водночас, стандартні маніпулятори часто потребують тривалого часу на переналагодження при зміні формату пакування, що призводить до простоїв лінії та зниження загальної ефективності обладнання (ОЕЕ) [2].

Окремим аспектом проблеми є енергоефективність. Традиційні пневматичні та електромеханічні приводи, що використовуються у пристроях захоплення, часто працюють за застарілими алгоритмами, які не враховують динамічні характеристики об'єкта маніпулювання, що призводить до надмірних витрат енергії та пришвидшеного зносу компонентів.

Метою роботи є підвищення ефективності функціонування робототехнічних комплексів у пакувальних лініях шляхом удосконалення їх структурно-кінематичних схем, оптимізації параметрів пристроїв захоплення та розробки адаптивних алгоритмів керування.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі **завдання**:

1. Провести аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку робототехнічних систем у пакувальній галузі.
2. Дослідити фізико-механічні параметри роботи промислових роботів, зокрема кінематику та динаміку маніпулювання вантажами.
3. Розробити методику розрахунку та оптимізації конструкції пристроїв захоплення (зокрема пневматичних) для забезпечення надійного утримання продукції без її пошкодження.
4. Здійснити експериментальну верифікацію запропонованих рішень та побудувати математичну модель для оцінки ефективності роботи модернізованого вузла.

Об'єктом дослідження є процеси маніпулювання об'єктами в автоматизованих пакувальних системах.

Предметом дослідження є методи оптимізації та модернізації мехатронних модулів роботів-маніпуляторів, а також їхніх робочих органів.

Практична цінність роботи полягає у розробці уніфікованих підходів до модернізації пакувального обладнання, що дозволить вітчизняним підприємствам зменшити залежність від дороговартісних імпорتنих комплектуючих, підвищити надійність технологічних ліній та забезпечити відповідність стандартам Індустрії 4.0.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РОБОТОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ У ПАКУВАЛЬНІЙ ГАЛУЗІ

1.1. Класифікація та принципи функціонування промислових роботів

Історичний генезис розвитку виробничих сил наприкінці ХХ — на початку ХХІ століття ознаменувався кардинальними змінами у підходах до організації технологічних процесів. Поява та стрімке поширення роботизованих виробничих систем (РВС) стали закономірною відповіддю індустрії на глобальні виклики, пов'язані з необхідністю підвищення гнучкості виробництва. Традиційні засоби «жорсткої» автоматизації, які домінували в епоху масового виробництва, виявилися неспроможними задовольнити зростаючий попит на індивідуалізацію продукції та скорочення її життєвого циклу. В умовах сучасної пакувальної галузі, де зміна формату упаковки, дизайну тари чи вагових параметрів продукції відбувається регулярно, саме гнучкість обладнання стає визначальним фактором конкурентоспроможності підприємства.

Основою для побудови таких гнучких систем став промисловий робот (ПР) (Рис. 1.1.). Аналіз науково-технічної літератури свідчить про відсутність єдиного, універсального визначення цього поняття, що зумовлено різноманітністю конструктивних рішень та сфер застосування. У вітчизняній нормативній базі промисловий робот визначається як автоматична машина, що складається з виконавчого пристрою у вигляді маніпулятора та перепрограмованого пристрою керування для виконання рухових і керуючих функцій у виробничому процесі. Ключовою відмінністю робота від традиційних механізмів є його універсальність (здатність виконувати різні операції) та переналагоджуваність (можливість зміни алгоритму дій без суттєвих змін у конструкції). [1, 22]



Рис. 1.1. Промисловий робот

В японській промисловій термінології, яка значною мірою вплинула на світову робототехніку, поняття робота трактується ширше і включає будь-які автомати зі змінною програмою. При цьому проводиться антропоморфна аналогія, де роботу приписуються фізичні (маніпуляційні), функціональні (адаптивні) та, у випадку сучасних моделей, розумові (когнітивні) можливості.

Для глибокого розуміння принципів побудови пакувальних ліній необхідно детально розглянути класифікацію промислових роботів, яка базується на низці конструктивних та функціональних ознак.

1. Класифікація за поколіннями (рівнем інтелектуальності)

Еволюція робототехніки пройшла три ключові етапи, кожен з яких сформував окреме покоління машин, що і досі співіснують на виробництві:

- **Роботи першого покоління (програмні роботи).** Це найбільш поширений клас машин, які функціонують за жорсткою, заздалегідь

визначеною програмою. Їхня система керування працює за принципом відтворення записаної послідовності координат або технологічних команд. Такі роботи не мають засобів зворотного зв'язку із зовнішнім середовищем (сенсорів), тому вони «сліпі» до змін у робочій зоні. У контексті пакувального обладнання це означає, що об'єкт маніпулювання (наприклад, пляшка чи коробка) повинен знаходитися у суворо визначеному місці та мати чітку орієнтацію. Будь-яке зміщення об'єкта призводить до збою або пошкодження продукції. Попри це, роботи першого покоління залишаються економічно виправданими для стабільних, високошвидкісних ліній з великими партіями однотипної продукції.

- **Роботи другого покоління (адаптивні роботи).** Цей клас обладнання характеризується наявністю сенсорного забезпечення, що дозволяє реалізувати принцип керування «ситуація — дія». Система керування отримує інформацію про стан зовнішнього середовища (наявність об'єкта, його положення, колір, вага) та може коригувати керуючу програму в реальному часі. Наприклад, якщо пакувальна одиниця на конвеєрі зміщена або перевернута, система технічного зору передає координати контролеру, який вносить поправки в траєкторію руху маніпулятора. Це забезпечує значно вищу гнучкість та надійність процесу пакування, зменшуючи вимоги до точності позиціонування тари.
- **Роботи третього покоління (інтелектуальні роботи).** Це вершина сучасної робототехніки, що базується на використанні елементів штучного інтелекту. Такі системи здатні не просто реагувати на зміни, а й розпізнавати складні образи, навчатися на основі досвіду та самостійно планувати свої дії для досягнення поставленої мети. Хоча такі роботи, як лабораторний комплекс ADAM, демонструють вражаючу автономність, у масовому пакувальному виробництві їх

застосування поки що обмежене через високу вартість та надлишкову функціональність для рутинних операцій.

2. Класифікація за кінематичною структурою та системою координат

Конструктивне виконання маніпулятора визначає форму його робочої зони та можливості доступу до обладнання. Виділяють чотири основні типи:

- **Прямокутна (декартова) система координат.** Маніпулятор здійснює лінійні переміщення вздовж трьох взаємно перпендикулярних осей (X , Y , Z). Робоча зона має форму паралелепіпеда. Такі роботи (портального або мостового типу) відрізняються високою жорсткістю конструкції та точністю позиціонування, що робить їх ідеальними для операцій палетування важких вантажів. Однак вони займають значну площу і мають обмежену маневреність.
- **Циліндрична система координат.** Робот має одну обертальну пару (поворот колони) та дві поступальні (підйом та висунення руки). Робоча зона — порожнистий циліндр. Це компактне рішення, зручне для обслуговування пакувальних машин, розташованих навколо робота.
- **Сферична (полярна) система координат.** Поєднує дві обертальні пари та одну поступальну (телескопічна рука). Робоча зона — сфера. Такі роботи забезпечують широкий діапазон рухів при відносно невеликій основі, що дозволяє ефективно використовувати їх для переміщення вантажів зі складних позицій.
- **Ангулярна (кутова) або шарнірна система.** Маніпулятор складається з ланок, з'єднаних обертальними шарнірами, імітуючи руку людини. Це найбільш універсальний тип (наприклад, роботи PUMA або SCARA), що забезпечує максимальну маневреність та

здатність огинати перешкоди. У пакувальній галузі шарнірні роботи незамінні для складних операцій укладання продукції в коробки (case packing).

3. Класифікація за типом силового приводу

Вибір приводу визначає динамічні характеристики робота, його вантажопідйомність та енергоефективність:

- **Пневматичний привод.** Використовує енергію стисненого повітря. Характеризується простотою конструкції, високою швидкістю, пожежо- та вибухобезпекою, що є критично важливим для харчових виробництв. Пневмопривод широко застосовується в пристроях захоплення (гріперах) та простих маніпуляторах циклової дії (автооператорах) для переміщення легких об'єктів. Головним недоліком є складність забезпечення плавного регулювання швидкості та точного позиціонування в проміжних точках.
- **Гідравлічний привод.** Базується на використанні рідини під тиском. Забезпечує найбільшу питому потужність та плавність руху при значних навантаженнях. Використовується переважно у важких промислових роботах для палетування вантажів масою понад 100 кг. Недоліком є ризик витоку робочої рідини, що неприпустимо в умовах чистого харчового виробництва.
- **Електромеханічний привод.** Найпоширеніший тип у сучасній робототехніці. Використовує серводвигуни або крокові двигуни. Відрізняється високою точністю, зручністю керування, відсутністю потреби у складних комунікаціях (трубопроводах) та високим ККД. Електропривод дозволяє реалізувати складні закони руху та забезпечує високу повторюваність позиціонування, що є необхідним для сучасних швидкісних пакувальних ліній.

4. Класифікація за характером керування

Залежно від способу формування траєкторії руху виділяють:

- **Позиційні системи (Point-to-Point).** Забезпечують переміщення робочого органу з однієї заданої точки в іншу без контролю траєкторії між ними. Це достатньо для більшості транспортних операцій (pick-and-place).
- **Контурні системи.** Забезпечують рух робочого органу за чітко визначеною неперервною траєкторією з контрольованою швидкістю.

Це необхідно, наприклад, для операцій нанесення клею або герметика на упаковку перед закриттям.

Для систематизації різноманіття існуючих рішень та спрощення процесу вибору обладнання для конкретних виробничих завдань доцільно навести узагальнену схему класифікації промислових роботів (рис. 1.2). Вона об'єднує розглянуті вище конструктивні ознаки з функціональним призначенням машин. [2]



Рис. 1.2. Узагальнена класифікація промислових роботів за конструктивними та технологічними ознаками

Наведена схема демонструє, що окрім типу приводу та системи координат, критично важливою ознакою є ступінь спеціалізації. У пакувальній галузі найчастіше використовуються спеціальні роботи (розроблені виключно для однієї операції, наприклад, укладання пляшок у ящик) або багатоцільові (здатні виконувати різні операції після зміни робочого органу). Такий комплексний підхід до класифікації дозволяє точніше визначити вимоги до мехатронного модуля ще на етапі проектування лінії.

Таким чином, сучасний парк промислових роботів представляє собою широкий спектр технічних рішень, вибір яких для конкретного пакувального завдання вимагає комплексного аналізу параметрів продуктивності, точності, вантажопідйомності та умов експлуатації.

1.2. Огляд технологічних рішень застосування промислових роботів на автоматизованих пакувальних лініях

Сучасний етап розвитку пакувальної індустрії характеризується переходом від використання окремих напівавтоматичних машин до створення комплексних автоматизованих ліній, де ключову роль відіграють робототехнічні системи (РТС). Інтеграція промислових роботів у технологічний процес пакування дозволяє вирішити низку інженерних протиріч, зокрема між продуктивністю та гнучкістю обладнання. Аналіз технологічних рішень показує, що ефективність роботизованих комплексів залежить не лише від характеристик самого маніпулятора, але й від архітектури всієї лінії та способу організації матеріальних потоків.

Класифікація ділянок пакувальних ліній за характером переміщення та обробки продукції

Ефективність застосування робототехнічних систем у пакувальних лініях значною мірою визначається характером руху продукції вздовж лінії та способом організації матеріального потоку між окремими технологічними модулями. Залежно від функціонального призначення, структури лінії та кінематики переміщення продукції, пакувальні лінії доцільно класифікувати на кілька класів, кожен з яких висуває специфічні вимоги до систем керування та роботизованих модулів.

1. Дискретної дії (I клас) - переміщення продукції між технологічними операціями здійснюється з періодичними зупинками. Робототехнічні операції, такі як захоплення, переорієнтація або укладання продукції в тару, виконуються у моменти повної зупинки виробу відносно робочого органу. Робот взаємодіє з нерухомим об'єктом, після чого відводиться у вихідне положення до початку наступного циклу.

Такі лінії характеризуються відносною простотою реалізації та керування, оскільки не потребують синхронізації руху маніпулятора з транспортною системою. Водночас їх продуктивність обмежується інерційними навантаженнями, що виникають при частих циклах розгону та гальмування, а також тривалістю пауз між операціями.

2. Безперервної дії (II та III класи) - технологічні операції виконуються під час безперервного руху продукції вздовж транспортної системи. У таких схемах роботизований модуль повинен забезпечувати синхронізовану взаємодію з рухомим об'єктом, що реалізується за допомогою функції супроводження (conveyor tracking). При цьому вектор швидкості та прискорення робочого органу робота узгоджується з кінематикою руху продукції на конвеєрі.

Лінії цього класу забезпечують найвищу продуктивність та мінімальні втрати часу між операціями, що є критично важливим для високошвидкісних пакувальних процесів. Разом із тим вони характеризуються підвищеною складністю проектування, налаштування та алгоритмічного забезпечення систем керування, а також висувають жорсткі вимоги до точності роботи транспортних, накопичувальних і сенсорних підсистем.

Класифікація технологічних схем пакувального обладнання

Ефективність застосування роботів значною мірою залежить від типу руху продукції в пакувальній машині. Відповідно до функціонального призначення та кінематики потоків, пакувальне обладнання поділяється на кілька класів, кожен з яких висуває свої вимоги до робототехнічних систем:

1. **Машини дискретної дії (I клас).** Характеризуються тим, що технологічна операція (наприклад, захоплення продукту та його

вкладання в тару) відбувається у момент зупинки продукції. Робочий орган робота рухається до нерухомого об'єкта, виконує маніпуляцію і відводиться. Такі схеми є простішими в реалізації, оскільки не вимагають складної синхронізації траєкторій, проте їхня продуктивність обмежена інерційністю системи при частих циклах розгону-гальмування.

2. **Машини безперервної дії (II і III класи).** У цьому випадку технологічні операції виконуються під час руху продукції. Це вимагає від системи керування робота здатності реалізовувати функцію «tracking» (супроводження), коли вектор швидкості робочого органу збігається з вектором швидкості конвеєра. Такі рішення забезпечують найвищу продуктивність, але є значно складнішими в проектуванні та налаштуванні.

Класифікація промислових роботів для пакувальних ліній

Промислові роботи, інтегровані в сучасні пакувальні лінії, характеризуються значною різноманітністю конструктивних, функціональних та експлуатаційних параметрів. З метою систематизації підходів до їх вибору та проектування доцільно здійснювати класифікацію за сукупністю ознак, що відображають характер виконуваних операцій, ступінь спеціалізації, галузь застосування, кінематичну структуру, вантажопідйомність і принципи керування.

1. Класифікація за характером виконуваних операцій

Залежно від ролі в технологічному процесі пакування промислові роботи поділяються на:

Технологічні (виробничі) — безпосередньо виконують пакувальні операції: захоплення та укладання продукції (pick-and-place);

формування групової упаковки;

фасування, закупорювання, етикетування;

орієнтацію та позиціонування виробів.

Допоміжні (підйомно-транспортні) — забезпечують внутрішньолінійну логістику:

переміщення продукції між модулями лінії;

розвантаження та завантаження накопичувальних зон;

палетування та депалетування.

Універсальні — здатні виконувати як технологічні, так і транспортні операції в межах однієї пакувальної лінії шляхом зміни робочого органу та програмного забезпечення.

2. Класифікація за ступенем спеціалізації

За рівнем адаптивності до номенклатури продукції промислові роботи в пакувальних лініях поділяються на:

Спеціальні — призначені для виконання однієї чітко визначеної операції (наприклад, укладання пляшок у ящики).

Спеціалізовані (цільові) — орієнтовані на обмежену групу операцій у межах однієї стадії пакування.

Багатоцільові — застосовуються на різних стадіях пакування (primary, secondary, tertiary) з мінімальними змінами конфігурації.

3. Класифікація за галуззю та видом пакувальних операцій

У межах пакувальних ліній промислові роботи використовуються для виконання таких основних операцій:

Фасування — дозування та укладання продукції в первинну тару.

Закупорювання — встановлення кришок, ковпачків, герметизація.

Етикетування — нанесення або позиціонування маркувальних елементів.

Палетування — укладання транспортної тари на палети.

Термообробка — робота з термозбіжною плівкою.

Нанесення покриттів — клей, захисні шари, герметики.

Транспортно-складські операції — внутрішньолінійне переміщення та буферизація.

4. Класифікація за системою координат і типом переміщень

Залежно від кінематичної структури маніпулятора виділяють:

Декартові роботи — характерні для палетування та переміщення важких вантажів.

Полярні прості — застосовуються для циклових операцій із фіксованими траєкторіями.

Полярні складні (шарнірні) — універсальні роботи для складних просторових маніпуляцій.

Паралельні (дельта-роботи) — використовуються на стадіях первинного пакування для високошвидкісних операцій.

5. Класифікація за числом ступенів рухомості

Промислові роботи пакувальних ліній поділяються на:

роботи з одним ступенем рухомості — для простих циклових операцій;

роботи з двома ступенями рухомості — для площинних переміщень;

роботи з трьома і більше ступенями рухомості — для повноцінного просторового позиціонування та орієнтації продукції.

6. Класифікація за вантажопідйомністю

Залежно від маси об'єкта маніпулювання виділяють:

Надлегкі — до 1 кг (primary packaging, харчова продукція);

Легкі — до 10 кг;

Середні — до 100 кг;

Важкі — до 1000 кг;

Надважкі — понад 1000 кг (палетування).

7. Класифікація за мобільністю

Стаціонарні — жорстко інтегровані в структуру пакувальної лінії.

Пересувні — використовуються в гнучких виробничих системах та модульних лініях.

8. Класифікація за типом силового приводу

У пакувальних лініях застосовуються роботи з такими приводами:

електромеханічним;

пневматичним;

гідравлічним;

комбінованим.

9. Класифікація за характером програмного керування

За рівнем інтелектуальності систем керування розрізняють:

жорстко програмовані;

адаптивні;

гнучко програмовані.

10. Класифікація за характером програмування швидкості руху

позиційні — переміщення між заданими точками;

контурні — рух за неперервною траєкторією;

комбіновані — поєднання обох режимів

Узагальнення

Запропонована класифікація дозволяє комплексно охарактеризувати промислові роботи, що використовуються на всіх стадіях пакування в пакувальних лініях, та створює методологічну основу для обґрунтованого вибору робототехнічних модулів з урахуванням вимог продуктивності, гнучкості та енергоефективності.

Застосування роботів на різних етапах пакувального процесу

Аналіз технологічних карт сучасних виробництв дозволяє виділити три основні зони інтеграції роботів, кожна з яких має свою специфіку:

- **Первинне пакування (Primary Packaging).** На цьому етапі відбувається безпосередній контакт робота з продуктом (харчовим, фармацевтичним тощо). Головними вимогами тут є висока швидкість та санітарна безпека. Для цих операцій найчастіше застосовуються дельта-роботи (паралельна кінематика) або швидкісні SCARA-роботи. Технологічне рішення передбачає використання систем технічного зору для визначення координат хаотично розташованих об'єктів на стрічці конвеєра.
- **Вторинне пакування (Secondary Packaging).** Цей етап передбачає групування вже упакованих одиниць продукції та їх вкладання в транспортну тару (короби, ящики). Тут застосовуються антропоморфні або декартові роботи, здатні оперувати групами товарів. Важливим аспектом є формування правильного патерну (рисунка) укладання для оптимізації об'єму тари.
- **Палетування (Tertiary Packaging).** Це фінальна стадія, що передбачає укладання коробок на палети. Технологічні рішення для палетування базуються на використанні потужних 4-х або 6-осьових роботів з великою вантажопідйомністю. Ключовою вимогою є забезпечення стабільності палети, що досягається спеціальними алгоритмами перев'язки рядів.

Гнучкі виробничі системи (ГВС) з робототехнічними комплексами як вершина еволюції пакувальних ліній

Сучасний етап розвитку пакувальної індустрії характеризується переходом від жорстко спеціалізованих автоматизованих ліній до гнучких виробничих систем (ГВС), здатних швидко адаптуватися до змін номенклатури

продукції, формату пакування та вимог ринку. У таких системах ключову роль відіграють робототехнічні комплекси (РТК), які виступають базовими мехатронними модулями, що забезпечують універсальність, масштабованість і інтеграцію пакувальних процесів.

На відміну від традиційних пакувальних ліній, побудованих за принципом послідовного з'єднання спеціалізованих машин, ГВС реалізують модульну архітектуру, у якій окремі технологічні вузли (роботи-маніпулятори, пристрої захоплення, транспортно-накопичувальні системи, системи технічного зору) об'єднуються в єдиний інформаційно-керований простір. Це дозволяє виконувати переналагодження переважно на програмному рівні без суттєвих змін у механічній структурі обладнання.

Структурні особливості ГВС пакувальних ліній

Типова гнучка виробнича система пакування включає:

робототехнічні комплекси для операцій захоплення, укладання, орієнтації та палетування продукції;

транспортні та накопичувальні конвеєрні системи, що забезпечують буферизацію матеріального потоку;

адаптивні пристрої захоплення з можливістю швидкої зміни конфігурації;

сенсорні підсистеми та системи технічного зору для ідентифікації та позиціонування виробів;

багаторівневу систему керування, інтегровану з системами планування виробництва (MES) та управління підприємством (ERP).

Завдяки такій структурі ГВС здатні функціонувати в умовах змінної продуктивності окремих модулів, автоматично перерозподіляючи

матеріальні потоки між накопичувальними зонами та роботизованими комірками.

Роль робототехнічних комплексів у гнучких пакувальних системах

Робототехнічні комплекси в складі ГВС виконують не лише функції виконавчих механізмів, але й роль інтелектуальних вузлів, що забезпечують адаптацію системи до зовнішніх і внутрішніх збурень. Зокрема, роботи-маніпулятори можуть:

змінювати траєкторії руху залежно від положення продукції на конвеєрі (conveyor tracking);

працювати з виробами різної геометрії та маси без заміни обладнання;

взаємодіяти з накопичувальними системами, компенсуючи нерівномірність потоку;

виконувати кілька технологічних операцій у межах одного робочого циклу.

Таким чином, робот у ГВС переходить від ролі жорстко запрограмованого виконавця до адаптивного мехатронного модуля, здатного функціонувати в умовах неповної визначеності параметрів процесу.

Переваги ГВС порівняно з традиційними пакувальними лініями

Основними перевагами гнучких виробничих систем пакування є:

скорочення часу переналагодження (changeover time) при зміні асортименту продукції;

підвищення коефіцієнта загальної ефективності обладнання (OEE) за рахунок зменшення простоїв;

зниження капітальних витрат у довгостроковій перспективі шляхом повторного використання робототехнічних модулів;

покращення енергоефективності завдяки оптимізації режимів роботи приводів і транспортних систем;

відповідність концепції Індустрії 4.0, з можливістю збору та аналізу даних у реальному часі.

ГВС як елемент цифрового пакувального виробництва

У контексті цифрової трансформації виробництва гнучкі пакувальні системи з робототехнічними комплексами є основою для створення цифрових двійників пакувальних ліній, що дозволяє моделювати сценарії роботи, прогнозувати вузькі місця та оптимізувати параметри процесів ще на етапі проєктування. Інтеграція ГВС з системами моніторингу та аналітики відкриває можливості для впровадження предиктивного обслуговування та адаптивного керування продуктивністю лінії.

ГВС з робототехнічними комплексами є логічною вершиною еволюції пакувальних ліній, оскільки поєднують високу продуктивність автоматизованих систем із гнучкістю та адаптивністю, притаманними сучасним мехатронним рішенням. Саме такі системи формують технологічну основу для розвитку високоефективних, енергоощадних та конкурентоспроможних пакувальних виробництв.

Загальна структура пакувальної лінії з робототехнічними комплексами

Сучасна пакувальна лінія з робототехнічними комплексами являє собою ієрархічно організовану мехатронну систему, що об'єднує технологічні,

транспортні, накопичувальні та керувальні підсистеми в єдиний автоматизований комплекс. Така структура забезпечує безперервність матеріального потоку, узгодженість роботи окремих модулів та адаптивність до змін виробничих умов.

1. Технологічна підсистема пакування

Технологічна підсистема включає обладнання, безпосередньо задіяне у виконанні пакувальних операцій на різних стадіях пакування:

операції первинного пакування (формування, наповнення, закривання одиничної тари);

операції вторинного пакування (групування, укладання в короби, термоусадка);

операції третинного пакування (палетування, формування транспортних одиниць).

У складі цієї підсистеми ключову роль відіграють робототехнічні комплекси, оснащені змінними пристроями захоплення, що дозволяє виконувати декілька операцій без механічної перебудови лінії.

2. Робототехнічні комплекси як ядро пакувальної лінії

Робототехнічний комплекс у пакувальній лінії зазвичай складається з:

промислового робота-маніпулятора;

пристрою захоплення (механічного, вакуумного, пневматичного або комбінованого);

системи технічного зору або датчиків положення;

локального контролера керування.

Роботи можуть виконувати як технологічні функції (захоплення, укладання, орієнтація продукції), так і логістичні (переміщення між модулями, робота з накопичувальними зонами). У гнучких пакувальних лініях робототехнічні комплекси організовуються у вигляді роботизованих комірок, з'єднаних транспортною системою.

3. Транспортно-накопичувальна підсистема

Транспортна підсистема забезпечує переміщення продукції між окремими вузлами пакувальної лінії та включає:

стрічкові, роликові або ланцюгові конвеєри;

поворотні, підйомні та розподільчі модулі;

накопичувальні (буферні) зони.

Накопичувальні системи виконують функцію компенсації різниці продуктивностей між окремими технологічними операціями та робототехнічними модулями. Завдяки цьому забезпечується стабільність роботи лінії у випадку короткочасних зупинок або зміни режимів роботи окремих вузлів. Рух продукції в буферних зонах, як правило, організується за принципами FIFO.

4. Сенсорна та інформаційна підсистема

Для забезпечення адаптивної роботи пакувальної лінії застосовується розгалужена сенсорна підсистема, що включає:

системи технічного зору для визначення положення та орієнтації продукції;

енкодери транспортних систем;

датчики наявності, маси та стану продукції;

засоби контролю якості пакування.

Інформація з сенсорів використовується системами керування для реалізації функцій супроводження рухомих об'єктів (conveyor tracking), автоматичної корекції траєкторій руху роботів та оптимізації режимів роботи лінії.

5. Система керування пакувальною лінією

Система керування має багаторівневу структуру та включає:

нижній рівень — локальні контролери приводів і роботів;

середній рівень — програмовані логічні контролери (PLC), що координують роботу окремих модулів;

верхній рівень — системи диспетчеризації, моніторингу та інтеграції з MES/ERP.

Така архітектура дозволяє реалізувати гнучке керування матеріальними потоками, автоматичне переналагодження лінії та впровадження елементів предиктивної діагностики.

Загальна структура пакувальної лінії з робототехнічними комплексами є багатокомпонентною системою, в якій робототехнічні модулі виконують роль універсальних адаптивних вузлів, а транспортно-накопичувальні та керувальні підсистеми забезпечують узгодженість і безперервність виробничого процесу. Такий підхід створює передумови для побудови гнучких, високопродуктивних та енергоефективних пакувальних ліній, що відповідають сучасним вимогам промислового виробництва.

У сучасних автоматизованих системах, зокрема на високопродуктивних пакувальних лініях, вибір типу маніпулятора є критичним етапом

проектування, що визначає продуктивність, точність та робочу зону комплексу. Залежно від будови механічної системи та виду кінематичних пар, промислові роботи класифікуються на основні групи: порталні, циліндричні (SCARA), антропоморфні, роботи з паралельною кінематикою (Delta), а також окремий клас — колаборативні роботи.

1. Портальні роботи (Cartesian / Gantry robots)

Це роботи, що працюють у прямокутній (декартовій) системі координат. Їх кінематика базується на трьох лінійних переміщеннях уздовж осей X, Y, Z.

- Особливості: Висока жорсткість конструкції, простота системи керування, здатність переміщувати важкі вантажі. Робоча зона має форму прямокутного паралелепіпеда.
- Застосування: Використовуються для операцій палетування, переміщення великогабаритних вантажів та обслуговування верстатів, де потрібна висока точність позиціонування на великих відстанях.

2. Роботи системи SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm)

Кінематична схема SCARA базується на двох обертальних зчленуваннях з паралельними вертикальними осями та однією поступальною віссю. Це забезпечує податливість у горизонтальній площині та високу жорсткість у вертикальній.

- Особливості: Висока швидкість операцій у горизонтальній площині, компактність.
- Застосування: Ідеально підходять для операцій складання (assembly) та переміщення (pick-and-place) об'єктів невеликої маси на конвеєрних стрічках.

3. Антропоморфні маніпулятори (Articulated robots)

Найбільш поширений тип універсальних роботів, кінематика яких імітує рухи людської руки. Зазвичай мають від 4 до 6 ступенів вільності (обертальні шарніри).

- Особливості: Максимальна гнучкість та маневреність, здатність обходити перешкоди та змінювати орієнтацію робочого органу в просторі під будь-яким кутом.
- Застосування: Зварювання, фарбування, складні маніпуляції з об'єктами довільної форми, палетування.

4. Роботи з паралельною кінематикою (Delta robots)

Конструкція складається з нерухомої основи, до якої кріпляться три (або більше) ідентичні кінематичні ланцюги, що сходяться в одній точці — на рухомій платформі з робочим органом.

- Особливості: Надзвичайно висока швидкість та прискорення (до 10–15 G) завдяки мінімальній інерції рухомих частин, оскільки важкі приводи закріплені нерухомо на станині.
- Застосування: Високошвидкісне пакування, сортування легкої продукції (харчова промисловість, фармацевтика), операції «pick-and-place» з рухомого конвеєра.

5. Колаборативні роботи (Cobots)

Окремим еволюційним напрямком є колаборативні роботи. На відміну від традиційних роботів, які працюють в ізолюваному просторі, коботи спроектовані для безпечної фізичної взаємодії з людиною у спільній робочій зоні.

- Особливості: Інтегрована система безпеки (датчики моменту та сили, технічний зір), що миттєво зупиняє робота при контакті.
- Застосування: Допоміжні операції на лініях пакування, робота на підприємствах малого бізнесу без встановлення захисних огорожень.

Для наочного порівняння характеристик розглянутих типів роботів складено зведену таблицю (Таблиця 1.1).

Таблиця 1.1.

Тип робота	Робоча зона	Вантажопідйомність	Швидкість	Точність	Основна сфера застосування
Портальний	Прямокутна	Висока	Низька/Середня	Висока	Палетування, важке машинобудування
SCARA	Циліндрична	Середня	Висока	Середня	Складання, пакування електроніки

Антропоморфний	Сферична	Висока	Середня	Висока	Зварювання, універсальні задачі
Delta	Напівсферична	Низька	Дуже висока	Середня	Швидкісне сортування та пакування
Cobot	Сферична	Низька/Середня	Середня	Висока	Спільна робота з персоналом

Аналіз наведених кінематичних схем дозволяє зробити висновок, що для задач високошвидкісного промислового пакування та переміщення об'єктів малої маси найбільш доцільним є використання роботів типу Delta або SCARA. Водночас, для задач палетування готової продукції перевагу мають антропоморфні або порталні системи, а для гнучких дрібносерійних виробництв перспективним є впровадження колаборативних роботів.

Аналіз принципів побудови та алгоритмічного забезпечення систем технічного зору

Впровадження систем технічного зору (СТЗ / Machine Vision) у структуру роботизованих пакувальних ліній є визначальним етапом переходу від «жорсткої» автоматизації до гнучких виробничих систем (Flexible Manufacturing Systems). Використання оптичних сенсорів дозволяє

маніпулятору адаптуватися до змінного робочого середовища, нівелюючи вимоги до точного позиціонування продукту механічними засобами.

Апаратна архітектура системи технічного зору

Ефективність СТЗ визначається не лише роздільною здатністю камери, але й комплексним підбором компонентів оптичної системи. Типова архітектура включає чотири базові елементи:

1. **Сенсор зображення (Image Sensor):** Для динамічних задач пакування переважно використовуються CMOS-сенсори з кадровим затвором (Global Shutter). На відміну від рядкового затвора (Rolling Shutter), вони експонують усі пікселі матриці одночасно, що дозволяє отримувати чітке зображення об'єктів, які рухаються на конвеєрі з високою швидкістю, без геометричних спотворень.
2. **Оптика (Lenses):** Вибір об'єктива базується на розрахунку фокусної відстані (f) залежно від необхідного поля зору (FOV) та робочої дистанції (WD). Критичним параметром є мінімізація дисторсії (викривлення зображення по краях), яка вносить похибки у визначення координат.
3. **Освітлення (Lighting):** Найважливіший компонент, що забезпечує стабільність розпізнавання. Для задач пакування виділяють такі методи:
 - *Контржурне освітлення (Backlight):* Розміщується під конвеєрною стрічкою. Створює чіткий чорний силует об'єкта на білому фоні, що ідеально підходить для визначення геометрії та орієнтації.
 - *Пряме кільцеве освітлення (Ring Light):* Використовується для зчитування маркування та розпізнавання кольору поверхні.
 - *Коаксіальне освітлення:* Дозволяє уникнути бликів на глянцевах поверхнях пакування (плівка, фольга).

4. Обчислювальний модуль: Промисловий контролер або спеціалізований процесор, що виконує попередню обробку та аналіз відеопотоку в реальному часі (з затримкою ≤ 50 мс).

Алгоритмічне забезпечення обробки зображень

Процес перетворення відеосигналу в координати керування роботом відбувається у декілька етапів:

А. Попередня обробка (Preprocessing)

Сире зображення часто містить шуми (зернистість, нерівномірність освітлення). Застосовуються фільтри Гаусса для згладжування або оператори Собеля/Кенні для виділення границь об'єкта. Також на цьому етапі проводиться бінаризація — перетворення кольорового зображення у чорно-біле за пороговим значенням яскравості (Thresholding).

Б. Сегментація та Блоб-аналіз (Blob Analysis)

Це базовий метод для задач "Pick-and-Place". Алгоритм виділяє зв'язні області пікселів (блоби), що відповідають продукту, та обчислює їх геометричні моменти.

Центр мас об'єкта (x_c, y_c) розраховується через моменти зображення M_{ij} :

$$x_c = \frac{M_{10}}{M_{00}}, \quad y_c = \frac{M_{01}}{M_{00}}$$

де M_{00} — площа об'єкта (нульовий момент).

Кут орієнтації головної осі інерції (Θ) визначається через центральні моменти другого порядку:

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2\mu_{11}}{\mu_{20} - \mu_{02}} \right)$$

В. Зіставлення з еталоном (Pattern Matching)

У складніших випадках, коли об'єкти частково перекриваються або мають складну текстуру, використовується кореляційний пошук. Система шукає на зображенні область, яка має максимальний коефіцієнт кореляції з попередньо завантаженим шаблоном продукту. Це дозволяє розпізнавати об'єкт незалежно від його повороту та масштабу.

Математична модель калібрування "Камера-Робот"

Для коректної роботи системи необхідно встановити математичний зв'язок між піксельною системою координат камери (U, V) та фізичною системою координат робота (X, Y).

Цей процес називається калібруванням і вирішує дві задачі:

1. **Виправлення дисторсії об'єктива:** Компенсація радіальних та тангенціальних спотворень.
2. **Трансформація координат:** Визначення матриці переходу (Homography matrix).

Рівняння трансформації координат для пласкої сцени має вигляд:

$$\begin{bmatrix} s \cdot X_{rob} \\ s \cdot Y_{rob} \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{pix} \\ V_{pix} \\ 1 \end{bmatrix}$$

де H — матриця гомографії, коефіцієнти якої визначаються на етапі налаштування шляхом розпізнавання калібрувального шаблону (наприклад, "шахової дошки") з відомими геометричними розмірами.

Для порівняння ефективності типів систем зору наведено таблицю (Таблиця 1.2).

Таблиця 1.2.

Характеристика	2D-системи	3D-системи
Складність обробки даних	Низька (швидкі алгоритми)	Висока (потребує потужних обчислювачів)
Чутливість до освітлення	Висока (критично важливо)	Низька (менш залежні)
Точність по глибині (вісь Z)	Відсутня (тільки розрахункова)	Висока
Вартість	Низька/Середня	Висока
Типова сфера	Pick-and-Place з конвеєра	Депалетування, Bin Picking

Синхронізація з рухомими об'єктами (Conveyor Tracking)

Особливістю пакувальних ліній є безперервний рух продукту. Система технічного зору фіксує координати в момент часу t_0 (момент знімка). Оскільки обробка зображення та передача даних займають певний час Δt , робот повинен отримувати не статичні координати, а прогнозовані.

Система керування використовує буфер черги (FIFO), де зберігається кожен розпізнаний об'єкт. Його координата динамічно оновлюється за даними енкодера конвеєра:

$$X(t) = X_{vision} + \int_{t_0}^t V_{conv}(\tau) d\tau$$

Це дозволяє маніпулятору виконувати плавний захват продукту без зупинки конвеєрної стрічки.

Таким чином, сучасна система технічного зору є складним програмно-апаратним комплексом. Для проектованої пакувальної лінії доцільно обрати 2D-систему на базі смарт-камери з інтегрованим процесором, що використовує алгоритми блоб-аналізу для швидкої локалізації об'єктів та підтримує протоколи промислового Ethernet для прямої передачі даних у контролер робота.

1.3. Постановка проблеми підвищення ефективності робототехнічних комплексів в пакувальній лінії

Незважаючи на значний прогрес у розвитку засобів автоматизації, сучасні пакувальні лінії стикаються з низкою системних проблем, які обмежують їхню загальну ефективність (Overall Equipment Effectiveness — OEE). Аналіз досвіду експлуатації робототехнічних комплексів на вітчизняних підприємствах харчової промисловості свідчить, що просте впровадження роботів-маніпуляторів не завжди гарантує очікуваний економічний ефект. Часто виникає ситуація, коли високошвидкісний робот змушений працювати на знижених швидкостях через обмеження з боку периферійного обладнання або недосконалість виконавчих органів (захватів).

Проблема адаптивності та часу переналагодження

Однією з найгостріших проблем є протиріччя між гнучкістю, яку теоретично надає робот, і жорсткістю конструкції його оснащення. В умовах дрібносерійного виробництва, коли номенклатура продукції змінюється кілька разів за зміну, критичним параметром стає час переналагодження (Changeover Time).

Більшість існуючих мехатронних модулів, особливо закордонного виробництва, проектуються під вузькоспеціалізовані завдання. Зміна типорозміру пакувальної тари часто вимагає не лише вибору іншої керуючої програми, але й фізичної заміни захватного пристрою, переналаштування магазинів-накопичувачів та напрямних конвеєра. Це призводить до значних простоїв обладнання. Статистика показує, що на лініях з частою зміною асортименту втрати часу на переналагодження можуть сягати 15–20% від загального фонду робочого часу.

Технічні протиріччя в динаміці маніпулювання

Підвищення продуктивності пакувальної лінії неминуче веде до збільшення швидкостей та прискорень руху робочих органів маніпулятора. Це породжує комплекс динамічних проблем, які стають обмежувальним фактором:

1. **Інерційні сили:** При високих прискореннях на об'єкт маніпулювання діють значні інерційні сили (відцентрові та тангенціальні). Якщо сила утримання, яку забезпечує захват, розрахована лише на статичну вагу вантажу, виникає ризик його зміщення або випадіння під час транспортування. З іншого боку, надмірне збільшення сили затиску може призвести до деформації або пошкодження крихкої упаковки (йогурти, кондитерські вироби).

2. **Вібрації та точність:** Високошвидкісні переміщення масивних ланок маніпулятора викликають пружні коливання в металоконструкції, що знижує точність позиціонування в кінцевій точці. Це особливо критично для операцій укладання продукції в блістери або комірки корексів, де допуски вимірюються міліметрами.

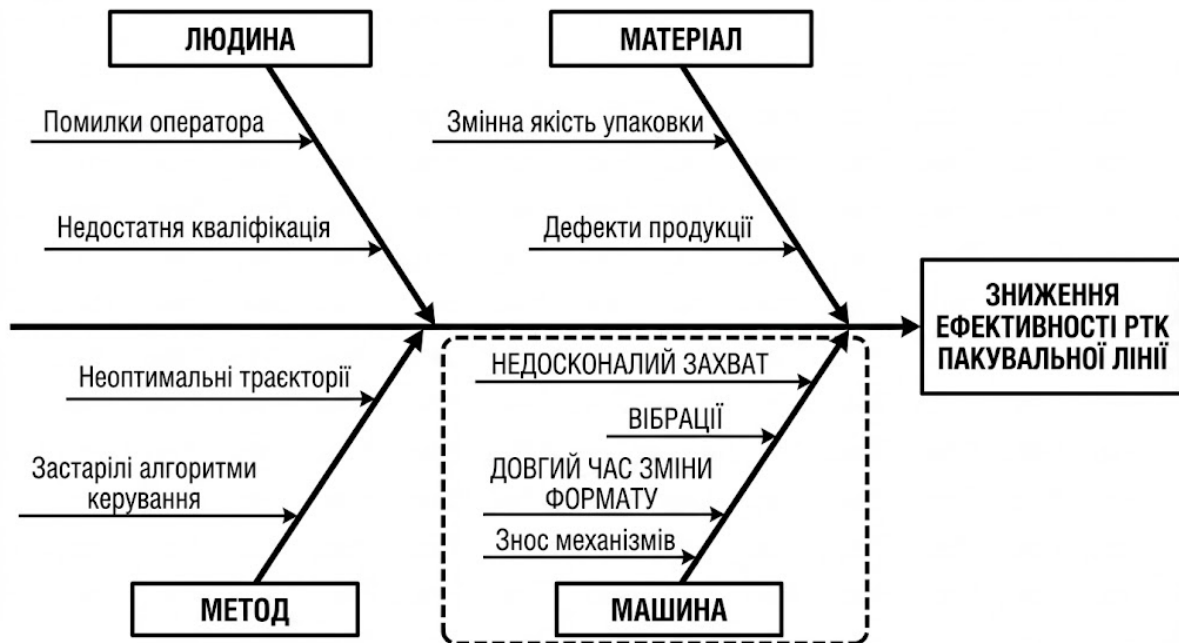


Рис. 1.3. Діаграма Ісікави (Cause-and-Effect Diagram)

Наведена на рисунку 1.3. діаграма причинно-наслідкових зв'язків чітко демонструє, що значна частина факторів зниження ефективності зосереджена в зоні взаємодії робота з продуктом, тобто в конструкції та алгоритмах роботи пристрою захоплення.

Енергетична ефективність та проблеми пневматичних систем

Значна частина сучасних хватних пристроїв використовує пневматичний привод через його простоту, дешевизну та високу питому потужність. Однак, з точки зору енергоефективності, такі системи часто є недосконалими.

Класичні схеми керування пневмоциліндрами працюють за принципом «від упору до упору» з подачею повного тиску мережі, незалежно від реального навантаження. Це призводить до нераціонального використання стисненого повітря, яке є одним з найдорожчих видів енергоносіїв на підприємстві. Крім того, відсутність адаптивного керування зусиллям затиску ускладнює роботу з об'єктами змінної жорсткості.

Ще однією проблемою є аеродинамічний опір. При переміщенні великогабаритних плоских вантажів (наприклад, групових упаковок у термозбіжній плівці) на високих швидкостях виникає значна сила лобового опору повітря. Стандартні методики розрахунку часто нехтують цим фактором, що призводить до помилок у виборі приводів та зниження надійності утримання.

Проблема імпортозаміщення та вартості

Окремим, але не менш важливим аспектом, є економічна складова. Ринок промислових роботів в Україні на 90-95% сформований закордонним обладнанням (Fanuc, Kuka, ABB, Yaskawa). Висока вартість цих систем, а також складність їх сервісного обслуговування та ремонту в умовах порушених логістичних ланцюжків, ставлять перед вітчизняними інженерами завдання модернізації та розробки власних рішень.

Існує потреба у створенні доступних, модульних систем захоплення, які можна було б адаптувати до вже існуючих на підприємствах маніпуляторів, розширюючи їх функціональність без необхідності повної заміни парку обладнання.

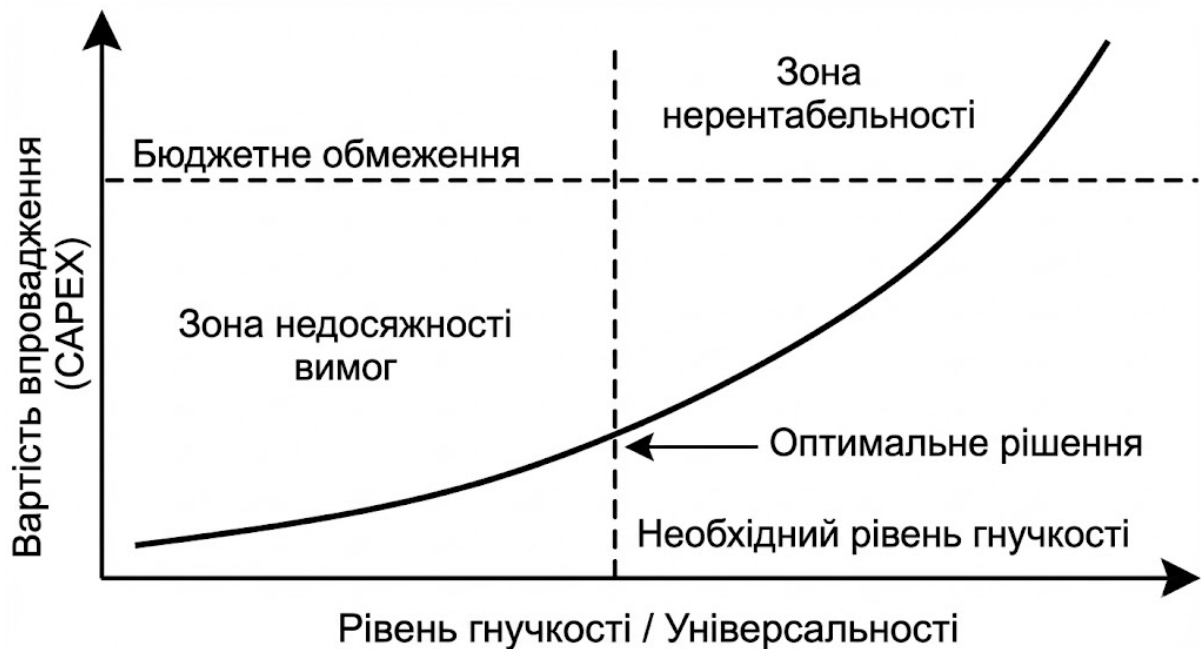


Рис. 1.4. Графік залежності вартості впровадження PTK від рівня його гнучкості.

Формулювання науково-технічного завдання

Узагальнюючи викладене, можна стверджувати, що підвищення ефективності робототехнічних комплексів неможливе без комплексного підходу, що поєднує:

1. **Структурну оптимізацію:** Розробку швидкозмінних та універсальних захватних пристроїв.
2. **Кінематичну оптимізацію:** Розрахунок траєкторій руху з урахуванням мінімізації інерційних навантажень.
3. **Математичне моделювання:** Створення моделей, що враховують вплив аеродинамічних та динамічних сил на надійність утримання вантажу.

Саме вирішенню цих завдань, спрямованих на усунення виявлених технічних протиріч, і присвячена дана кваліфікаційна робота.

Висновки до розділу 1

У першому розділі кваліфікаційної роботи здійснено комплексний аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку робототехнічних систем у пакувальній галузі. За результатами проведеного дослідження можна зробити наступні висновки:

- 1. Еволюція та класифікація.** Встановлено, що сучасний парк промислових роботів, що застосовуються у пакуванні, є гетерогенним і включає як прості програмні маніпулятори, так і високоінтелектуальні адаптивні системи. Найбільш перспективними для високошвидкісних пакувальних ліній є роботи з паралельною кінематикою (дельта-роботи) та шарнірні антропоморфні маніпулятори, оснащені сучасними сервоприводами, які забезпечують необхідну гнучкість та точність позиціонування.
- 2. Технологічні рішення.** Аналіз типових технологічних схем показав стійку тенденцію до переходу від жорстких автоматизованих ліній до гнучких виробничих систем (ГВС). Виявлено, що ефективність таких систем визначається здатністю обладнання швидко переналагоджуватися на нові формати продукції. Роботизовані модулі, стають універсальними ланками, які можуть виконувати як технологічні операції (складання, фасування), так і логістичні функції.
- 3. Проблематика та виклики.** Визначено ключові фактори, що стримують підвищення ефективності існуючих робототехнічних комплексів. Головними проблемами є недостатня адаптивність стандартних захватних пристроїв до різноманітної номенклатури виробів, високі енерговитрати пневматичних систем та ризики пошкодження продукції внаслідок дії інерційних сил при високих прискореннях. Також відзначено проблему високої вартості та

складності обслуговування імпортних рішень, що актуалізує задачу розробки вітчизняних аналогів.

- 4. Обґрунтування подальших досліджень.** На основі аналізу виявлених технічних протиріч сформульовано науково-технічне завдання роботи, яке полягає в оптимізації мехатронної системи пакувальної лінії. Доведено, що підвищення продуктивності та надійності роботи РТК можливе лише шляхом детального дослідження фізико-механічних параметрів процесу маніпулювання, оптимізації конструкції пристроїв захоплення та вдосконалення алгоритмів керування, що і буде реалізовано в наступних розділах роботи.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ

2.1. Структурний та кінематичний аналіз різновидів промислових роботів

Ефективність функціонування будь-якого робототехнічного комплексу у складі пакувальної лінії першочергово визначається досконалістю його механічної структури. З точки зору механіки, маніпулятор промислового робота розглядається як просторовий механізм з розімкненим кінематичним ланцюгом, що складається з твердих тіл (ланок), послідовно з'єднаних між собою за допомогою кінематичних пар. Структурний аналіз такої системи дозволяє визначити її потенційні можливості щодо маневреності, точності позиціонування та вантажопідйомності ще на етапі проектування або модернізації.

Аналіз кінематичних пар та ступенів вільності

Основним елементом, що визначає рухливість маніпулятора, є кінематична пара — з'єднання двох дотичних ланок, яке допускає їх відносний рух. У робототехніці класифікація пар здійснюється за кількістю умов зв'язку S , накладених на відносний рух ланок, або за кількістю ступенів вільності W , які залишаються можливими.

Для промислових роботів найбільш характерним є використання кінематичних пар V класу ($S=5$), які забезпечують лише один ступінь вільності ($W=1$). Це дозволяє спростити систему керування, закріпивши за кожним ступенем вільності окремий привод (сервомотор або пневмоциліндр). Розрізняють два основні типи таких пар:

1. **Обертальна пара (тип R - Rotational):** Забезпечує кутове переміщення однієї ланки відносно іншої. Позначається символом C_5 .
2. **Поступальна пара (тип P - Prismatic):** Забезпечує лінійне переміщення. Позначається символом P_5 .

Рідше зустрічаються пари IV класу (циліндричні) та III класу (сферичні), які зазвичай реалізуються конструктивно як комбінація кількох пар V класу для спрощення кінематичного розрахунку.

Ключовою характеристикою маніпулятора є число ступенів рухливості (вільності), яке визначає його здатність досягати заданої точки простору з певною орієнтацією. Для розрахунку ступенів вільності W просторового механізму використовується структурна формула Сомова-Малишева:

$$W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1 \quad (2.1)$$

де n — число рухомих ланок;

$p_1 \dots p_5$ — кількість кінематичних пар відповідного класу (від I до V).

Оскільки абсолютна більшість сучасних маніпуляторів пакувальних машин (типу SCARA, PUMA, дельта-роботи) будуються на базі пар V класу, формула спрощується до вигляду:

$$W = 6n - 5p_5 \quad (2.2)$$

Для плоских механізмів (наприклад, системи важелів пантографа або плоскі маніпулятори укладання) формула набуває вигляду:

$$W_{пл} = 3n - 2p_5 - p_4 \quad (2.3)$$

Важливо зазначити, що у відкритих кінематичних ланцюгах кількість рухомих ланок n завжди дорівнює кількості пар p_5 . Наприклад, для стандартного антропоморфного робота з 6-ма ступенями вільності (як

KUKA IR-160/60), розрахунок підтверджує наявність 6 незалежних приводів, що дозволяє реалізувати повне просторове позиціонування (3 координати положення + 3 кути орієнтації).

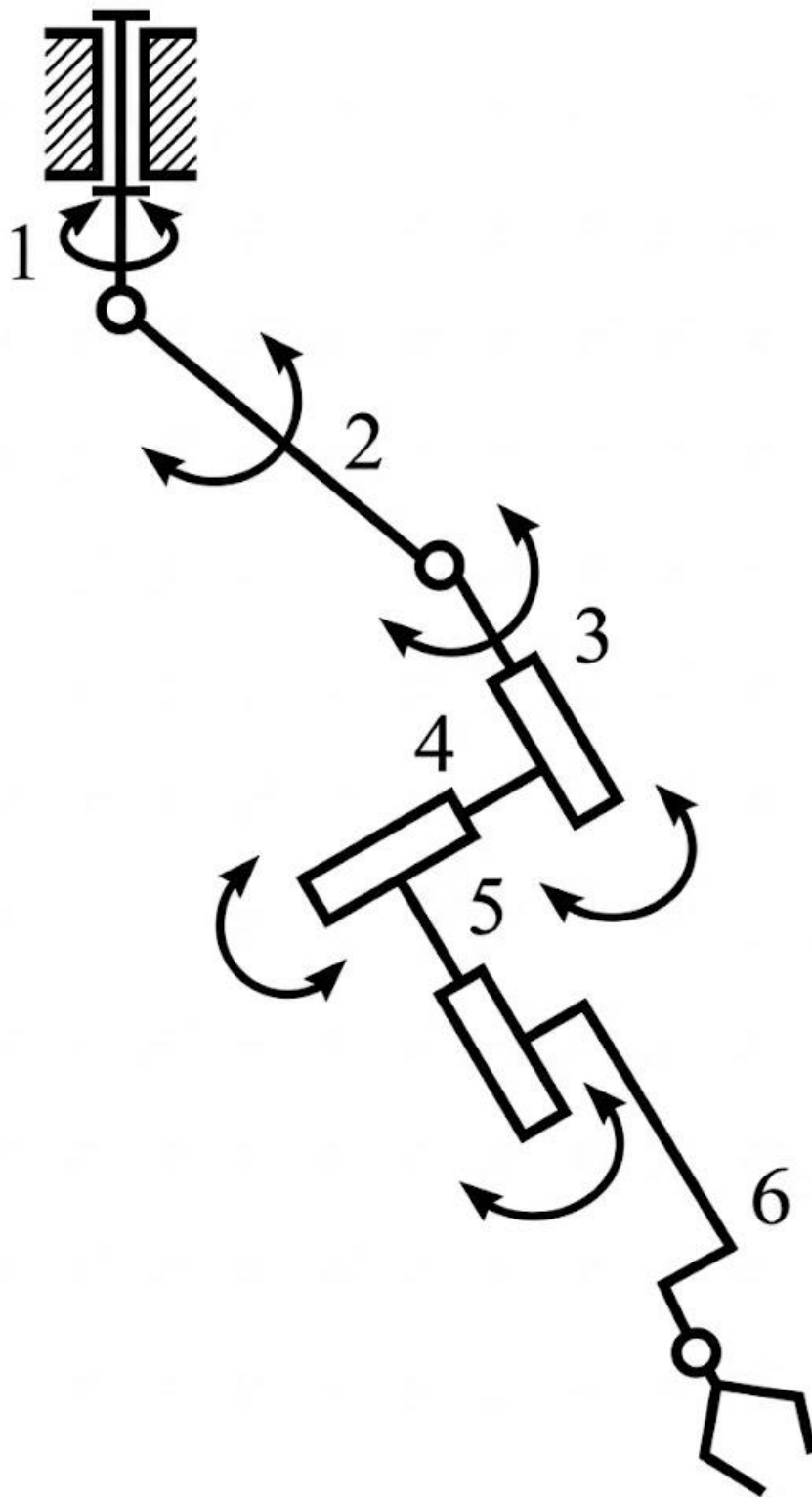


Рис. 2.1. Кінематична схема маніпулятора з позначенням ланок, кінематичних пар та векторів руху.

На наведеній схемі (рис. 2.1) зображено типову структуру маніпулятора, де ланки розподілені на три функціональні групи:

1. **Несуча система (База):** Нерухома ланка, що забезпечує жорсткість конструкції.
2. **Регіональна структура (Рука):** Перші 3 основні ланки, що забезпечують виведення робочого органу в задану область робочого простору (транспортуючі ступені вільності).
3. **Локальна структура (Кисть):** Останні 2-3 ланки, що відповідають за орієнтацію робочого органу (орієнтуючі ступені вільності).

Аналіз робочих зон та систем координат

Геометрія робочої зони робота — це простір, в якому може перебувати робочий орган. Вона безпосередньо залежить від послідовності розташування обертальних та поступальних пар.

1. Декартова система (PPP - Prismatic-Prismatic-Prismatic).

Реалізується у порталних роботах-палетайзерах. Робоча зона має форму прямокутного паралелепіпеда.

- *Переваги:* Постійна роздільна здатність та жорсткість у будь-якій точці зони, простота лінійної інтерполяції.
- *Недоліки:* Велика займана площа, необхідність захисту напрямних від пилу (актуально для пакування сипучих продуктів).

2. Циліндрична система (RPP - Rotational-Prismatic-Prismatic).

Утворюється обертанням колони та двома лінійними переміщеннями. Робоча зона — порожнистий циліндр.

- *Переваги:* Зручність обслуговування конвеєрів, розташованих по колу.

- *Недоліки:* Зміна лінійної швидкості кінця руки залежно від вильоту (радіусу), що ускладнює динамічне керування при високих швидкостях.

3. Сферична система (RRP - Rotational-Rotational-Prismatic).

Характерна для танкових башт або кранів-маніпуляторів. Робоча зона — частина сфери. Дозволяє охопити великий об'єм простору при малій основі, але має складну кінематику для програмування прямих ліній.

4. Ангулярна (шарнірна) система (RRR).

Найбільш поширена схема (роботи PUMA, Fanuc, ABB). Всі основні пари — обертальні.

- *Переваги:* Максимальна маневреність, здатність обходити перешкоди, високе співвідношення робочої зони до займаної площі.
- *Недоліки:* Змінна жорсткість та точність залежно від пози (конфігурації) руки, наявність сингулярних точок, де робот втрачає керованість.

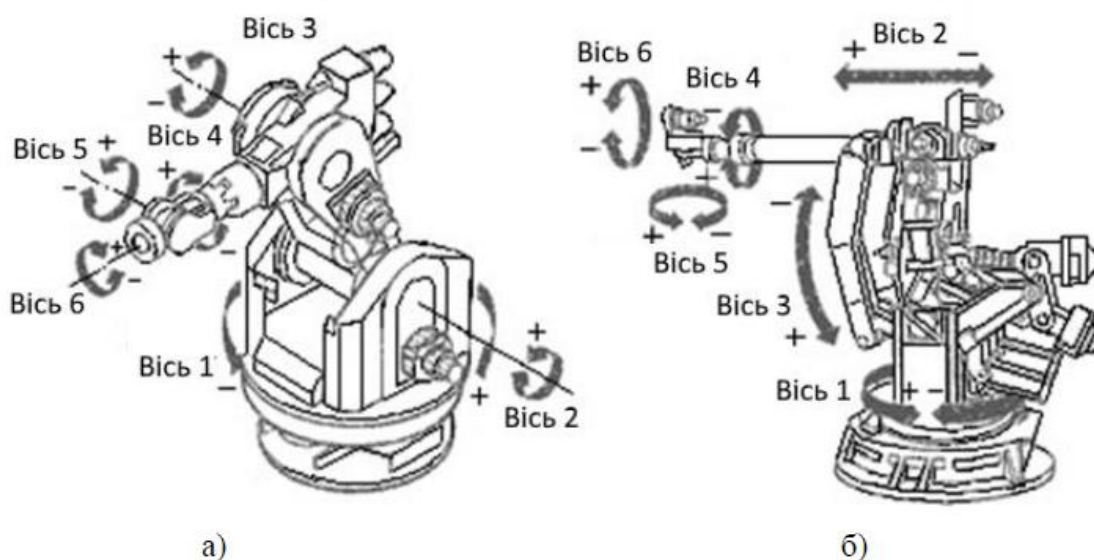


Рис. 2.2. Порівняння форм робочих зон для основних кінематичних схем промислових роботів

Математичне моделювання кінематики

Для опису просторового положення ланок маніпулятора в сучасних системах керування використовується метод перетворення координат, запропонований Денавітом та Хартенбергом (D-H параметри). Суть методу полягає у зв'язуванні з кожною ланкою локальної системи координат та послідовному переході від бази до ефектора за допомогою матриць перетворення 4×4 .

Положення кінцевої точки (схвату) визначається добутком матриць переходу між сусідніми ланками:

$$T_n = A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_n \quad (2.4)$$

де A_i — матриця перетворення, що залежить від чотирьох параметрів ланки: довжини (a_i), кручення (α_i), зміщення (d_i) та кута повороту (θ_i).

Для задач пакування, де потрібна висока швидкість, критично важливим є розв'язання не лише прямої задачі кінематики (визначення положення схвату за кутами в шарнірах), а й оберненої задачі кінематики (визначення необхідних кутів приводів для досягнення цільової точки). Складність оберненої задачі полягає в її неоднозначності — одну й ту ж точку простору шарнірний робот може досягти різними конфігураціями ("лікоть вгору" або "лікоть вниз"). Оптимізація вибору конфігурації є одним із завдань, яке вирішується програмним забезпеченням контролера для мінімізації енерговитрат та часу циклу.

Таким чином, структурно-кінематичний аналіз дозволяє обґрунтувати вибір конкретної схеми робота для пакувальної лінії. Для високошвидкісного переміщення легких об'єктів (цукерки, печиво) оптимальною є паралельна

кінематика (дельта-роботи), яка мінімізує масу рухомих частин. Для палетування важких вантажів доцільно використовувати ангулярні або декартові схеми, що забезпечують необхідну жорсткість та вантажопідйомність.

2.2. Динамічне моделювання процесу транспортування вантажу пристроєм захоплення

Сучасні тенденції розвитку пакувального машинобудування, що характеризуються стрімким переходом до концепцій Індустрії 4.0, висувають принципово нові вимоги до етапу проектування робототехнічних систем. Якщо раніше, при розробці маніпуляторів з низькими та середніми швидкостями руху, інженери могли покладатися на методи класичної статички та кінематики, то в умовах високопродуктивних пакувальних ліній такий підхід стає не лише недостатнім, а й хибним. Проектування високоефективних систем вимагає парадигмального зсуву від спрощених розрахункових схем до комплексного динамічного моделювання, яке здатне врахувати повний спектр силових факторів, що виникають у нестационарних режимах роботи обладнання. [5]

Обмеженість статичних методів розрахунку

Традиційні методи розрахунку пристроїв захоплення (гріперів) базуються на припущенні, що система перебуває у стані квазірівноваги, або ж рухається рівномірно і прямолінійно. У таких моделях домінуючою силою вважається гравітаційна складова (вага вантажу), а динамічні навантаження враховуються шляхом введення узагальненого коефіцієнта запасу (k). Зазвичай цей коефіцієнт приймається в межах 1,5...2,5, що має компенсувати всі невизначеності реального процесу.

Однак, такий підхід має два суттєві недоліки, які стають критичними для сучасного виробництва:

- 1. Надлишкова металосмність та енергоємність.** Намагаючись гарантувати надійність утримання вантажу за допомогою високого коефіцієнта запасу, проектувальники закладають надмірні зусилля затиску. Це, в свою чергу, вимагає використання потужніших приводів (пневмоциліндрів великого діаметра, потужних сервомоторів), що збільшує масу самого захоплювача. Збільшення маси кінцевого ефектора призводить до зростання інерційного навантаження на ланки маніпулятора, зниження його корисної вантажопідйомності та погіршення динамічних характеристик всієї системи.
- 2. Ризик пошкодження продукції.** Для багатьох видів пакувальної продукції (кондитерські вироби, йогурти в тонкому пластику, скляна тара, групові упаковки в термозбіжній плівці) надмірне зусилля стиснення є неприпустимим, оскільки призводить до деформації упаковки або руйнування вмісту. Статичний розрахунок не дозволяє знайти точну межу між «надійним утриманням» та «руйнуванням».

Специфіка динаміки високошвидкісного маніпулювання

В умовах сучасної пакувальної лінії, де час циклу вимірюється частками секунди, а швидкості переміщення робочого органу досягають 2–5 м/с при прискореннях до 3g–5g, природа навантажень кардинально змінюється. Сили інерції, що виникають під час розгону, гальмування та зміни траєкторії руху, за своєю величиною можуть у кілька разів перевищувати власну вагу вантажу.

Динамічне моделювання дозволяє врахувати векторний характер цих сил. На об'єкт маніпулювання діють не лише лінійні сили інерції (протилежні вектору прискорення), але й відцентрові сили при русі по дузі, а також коріолісові сили інерції у випадку складного просторового руху ланок

маніпулятора. Нехтування цими компонентами призводить до того, що в певних точках траєкторії сумарний вектор сил може бути спрямований на «викидання» об'єкта із захвату, навіть якщо статичний розрахунок показував достатній запас надійності.

Аеродинамічний фактор

Окремим аспектом, який часто ігнорується в класичних методиках, але набуває ваги при оптимізації швидкісних роботів, є взаємодія об'єкта з повітряним середовищем. При транспортуванні вантажів з великою площею поверхні (наприклад, плоскі коробки, лотки, листові матеріали) на високих швидкостях виникає значний аеродинамічний опір. Сила лобового опору не лише створює додаткове навантаження на приводи робота, але й генерує перекидаючі моменти, які намагаються розвернути вантаж у губках захвату. Це явище є особливо небезпечним для вакуумних та фрикційних захватів, де момент опору може перевищити момент тертя, що призведе до втрати орієнтації або падіння вантажу.

Трибологічні аспекти надійності утримання

Критичним завданням динамічного аналізу є визначення умов контактної взаємодії в системі «робочий елемент захвату — поверхня об'єкта». Коефіцієнт тертя, який у статичних розрахунках приймається константою, в реальних умовах є величиною змінною і стохастичною. На нього впливають вібрації, наявність пилу або вологи на поверхні упаковки (характерно для харчових цехів), а також мікропереміщення об'єкта під дією динамічних навантажень.

Динамічна модель повинна враховувати можливість виникнення режимів мікроковзання, які можуть перерости в повну втрату контакту. Забезпечення надійного утримання вантажу в таких умовах вимагає не

просто збільшення сили стиснення, а пошуку оптимального балансу між силою, формою губок, матеріалом фрикційних накладок та законом руху маніпулятора.

Мета динамічного синтезу

Таким чином, перехід до динамічного моделювання переслідує мету вирішення багатокритеріальної задачі оптимізації, де необхідно:

1. Мінімізувати масу та габарити пристрою захоплення для зниження інерційного навантаження на приводи робота.
2. Забезпечити гарантоване утримання вантажу при максимально можливих прискореннях, що дозволяє скоротити час циклу і підвищити продуктивність лінії.
3. Оптимізувати енергоспоживання пневматичної або електромеханічної системи захвату шляхом уникнення надлишкових зусиль затиску.
4. Зберегти цілісність та товарний вигляд упаковки шляхом адаптивного керування зусиллям взаємодії.

Саме розробка математичного апарату, що описує цей складний комплекс фізичних явищ, і є предметом наступних підрозділів роботи. Тільки на основі детальної динамічної моделі можна виконати обґрунтований вибір параметрів виконавчих механізмів та розробити ефективні алгоритми керування робототехнічним комплексом. [15]

2.2.1. Формалізація сил, що діють на об'єкт маніпулювання

Розглянемо фізичну модель руху вантажу (наприклад, картонної коробки або блоку пляшок), затиснутого у фрикційному захваті. Фрикційний захват

(або захват із силовим замиканням) — це найбільш поширений тип механічних захватних пристроїв (МЗП) у промисловій робототехніці. У загальному випадку на систему діють активні та реактивні сили, баланс яких визначає стабільність положення об'єкта.

Основними силовими факторами є:

- 1. Сили гравітації:** Визначаються масою вантажу m та прискоренням вільного падіння g . Вектор сили завжди спрямований вертикально вниз:
 $G = mg$
- 2. Інерційні навантаження:** При складному просторовому русі маніпулятора виникають сили інерції від переносного та відносного руху. Повна сила інерції F_{in} складається з:
 - Сили інерції поступального руху: $F_{in}^t = -ma$, де a — лінійне прискорення.
 - Відцентрової сили (при обертальному русі ланки): $F_{ц} = m\omega^2 R$, де ω — кутова швидкість, R — радіус обертання.
 - Тангенціальної сили інерції (сили Ейлера): $F_{\varepsilon} = m\varepsilon R$, де ε — кутове прискорення.
- 3. Аеродинамічний опір:** При швидкостях транспортування $v > 1$ м/с, характерних для сучасних дельта-роботів та швидкісних SCARA-систем, суттєвий вплив має опір повітряного середовища. Сила лобового опору Q визначається за формулою:

$$Q = k_{lo} \cdot S \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (2.6)$$

де k_{lo} — аеродинамічний коефіцієнт, що залежить від форми об'єкта

(для призматичних тіл визначається експериментально або за довідниками);

S — площа міделевого перерізу (проекція об'єкта на площину, перпендикулярну вектору швидкості);

ρ — густина повітря;

v — миттєва швидкість руху центру мас вантажу.

2.2.2. Аналіз точності та чутливості силової системи

В реальних умовах експлуатації параметри системи (тиск повітря, розміри деталей) мають певний розкид. Для оцінки надійності захвату необхідно провести аналіз похибки сили притиснення (ΔN) методом лінійних помилок (частинних похідних).

Функція сили притиснення залежить від ряду змінних: $N = f(P, D, l_1, l_2)$.

Повна похибка визначається як:

$$\Delta N = \left| \frac{\partial N}{\partial P} \right| \Delta P + \left| \frac{\partial N}{\partial D} \right| \Delta D + \left| \frac{\partial N}{\partial l_1} \right| \Delta l_1 + \left| \frac{\partial N}{\partial l_2} \right| \Delta l_2 \quad (2.15)$$

де ΔP — коливання тиску в мережі (наприклад, ± 0.05 МПа);

$\Delta D, \Delta l$ — допуски на виготовлення деталей.

Частинні похідні характеризують ступінь впливу кожного фактора:

- Вплив тиску:

$$\frac{\partial N}{\partial P} = \frac{\pi D_p^2 \cdot \Pi_{geom}}{4};$$

$$N = \frac{\pi D_p^2 \cdot \Pi_{geom}}{4} \cdot P$$

- Вплив діаметра поршня:

$$\frac{\partial N}{\partial D} = \frac{2\pi D_p \cdot P \cdot \Pi_{geom}}{4};$$

- Вплив довжини важелів (l_1, l_2) визначається диференціюванням передавальної функції механізму.

Розрахунок показує, що найбільший вплив на стабільність сили затиску мають коливання тиску в пневмомережі, тому в схемі керування необхідно передбачити ресивер або прецизійний регулятор тиску. Умова працездатності системи записується як:

$$N_{ном} - \Delta N > N_{необх}$$

де $N_{необх}$ — мінімальна розрахункова сила утримання з урахуванням динаміки.

2.3. Аналіз факторів, що впливають на точність та енергоефективність системи

Ефективність функціонування роботизованого пакувального комплексу є інтегральним показником, який формується на основі сукупності технічних, технологічних, організаційних та експлуатаційних параметрів. У своїй основі вона базується на двох фундаментальних критеріях: точності позиціонування робочого органу та енергетичній раціональності виконання технологічних операцій. Саме ці характеристики визначають реальний рівень продуктивності, стабільності, надійності та економічної доцільності застосування комплексу у виробничому процесі. Зазначені параметри перебувають у складній діалектичній взаємодії, тому їх оптимізація потребує глибокого розуміння кінематики, динаміки, конструктивних особливостей обладнання та закономірностей технологічного циклу.

Точність позиціонування робочого органу є критично важливою для виконання будь-яких операцій пакування. Вона визначає здатність маніпулятора або іншого виконавчого механізму здійснювати повторювані рухи з мінімальними відхиленнями від заданої траєкторії. У пакувальних процесах це значення має особливо велике значення, оскільки навіть незначні помилки можуть призвести до порушення герметичності упаковки, зміщення дозуючих елементів, неправильного формування пакета або неточного нанесення етикеток. Забезпечення високої точності потребує підвищення жорсткості конструкції, використання точних сенсорів положення, високопродуктивних приводів та систем керування з мінімальною затримкою. У свою чергу, це часто супроводжується збільшенням маси системи, складності механізмів та енергетичних витрат, оскільки жорсткі та масивні конструктивні елементи потребують потужніших приводів для забезпечення необхідної динаміки руху. [8]

Більш того, на точність впливають такі фактори, як температурні деформації матеріалів, наявність люфтів у ведучих парах, якість мастильних матеріалів, стабільність роботи електронних компонентів, а також зовнішні вібрації, що можуть виникати внаслідок роботи суміжного обладнання на виробничій лінії. Для усунення цих небажаних впливів часто необхідно впроваджувати демпфуючі елементи, використовувати складні методи фільтрації сигналів, застосовувати автоматичну калібровку в режимі реального часу, а іноді навіть проводити реконфігурацію всієї структури промислового робота.

Другим не менш важливим критерієм є **енергетична раціональність**. Вона відображає здатність комплексу виконувати всі необхідні технологічні операції з мінімальними витратами електроенергії при збереженні потрібної продуктивності. Умовно кажучи, це показник того, наскільки "економно" система використовує енергію для переміщення робочих

органів, приводу транспортних механізмів, дії дозаторів, формувальних вузлів, систем подачі повітря чи вакууму та інших виконавчих модулів. Енергетична ефективність має прямий вплив на собівартість продукції та рентабельність усього виробництва, адже промислове пакувальне обладнання працює, як правило, у безперервному або багатогодинному режимі.

Скорочення енергоспоживання може досягатися завдяки оптимізації профілів руху, застосуванню сервоприводів із функцією рекуперації енергії, використанню полегшених конструкцій з сучасних матеріалів, а також завдяки впровадженню алгоритмів керування, що мінімізують пікові навантаження. Проте надмірна економія енергії часто призводить до погіршення динамічних характеристик системи: зниження прискорення, уповільнення циклів роботи, збільшення часу на позиціонування та, відповідно, зменшення загальної продуктивності. Таким чином, прагнення знизити енергоспоживання без урахування інших параметрів може негативно вплинути на стабільність та якість технологічного процесу.

У реальних умовах виробництва ці два критерії — точність і енергоефективність — рідко змінюються незалежно один від одного. Зазвичай їх потрібно оптимізувати одночасно, що створює фундаментальне інженерне протиріччя. Наприклад, збільшення точності часто вимагає підвищення жорсткості конструкції, що робить механізми важчими, а отже потребує більших енергетичних витрат для забезпечення тих самих прискорень. У свою чергу, зменшення споживання енергії може передбачати використання легших матеріалів або менш потужних приводів, що потенційно знижує точність позиціонування та підвищує чутливість до зовнішніх впливів. [7]

Важливими додатковими факторами, що впливають на ефективність роботи роботизованого пакувального комплексу, є:

1. **Конструктивна компоновка обладнання.** Раціональне розташування елементів дозволяє зменшити довжину переміщень, оптимізувати задані траєкторії руху та підвищити загальну ефективність системи.
2. **Тип використовуваних приводів.** Електричні сервоприводи забезпечують найвищу точність та керованість, тоді як пневматичні приводи можуть бути енерговигіднішими у повторюваних коротких циклах. Вибір типу приводу безпосередньо впливає як на точність, так і на енергетичні витрати.
3. **Алгоритми керування та оптимізації руху.** Використання передових методів, таких як адаптивне керування, нечітка логіка, предиктивне керування або машинне навчання, дозволяє підлаштовувати поведінку роботи під умови роботи в режимі реального часу, зменшувати паразитні рухи, уникати резонансів та підвищувати стабільність процесу.
4. **Особливості пакувального матеріалу.** Наприклад, робота з тонкими полімерними плівками, ламінатами або біорозкладними пакетами вимагає особливої точності та акуратності, що також впливає на вибір траєкторій, швидкостей та прискорень робочих органів.
5. **Умови експлуатації.** Температурні коливання, вологість, запиленість чи вібрації від іншого обладнання можуть погіршувати

точність та збільшувати енерговитрати системи.

6. Стан технічного обслуговування. Своєчасна діагностика, правильне мастило, регулювання приводів і перевірка калібрування датчиків є обов'язковими умовами забезпечення високої ефективності комплексу.

Варто також враховувати, що в сучасних умовах автоматизації ефективність роботи роботизованого пакувального комплексу дедалі частіше пов'язують не лише з окремими механічними параметрами, а й з рівнем цифрової інтеграції. Системи збору даних, моделі цифрових двійників, програмні модулі для прогнозування зносу та оптимізації потужності дозволяють значно покращити загальну продуктивність. Вони дають можливість аналізувати реальне навантаження на приводи, прогнозувати потенційні відмови, оптимізувати алгоритми руху та зменшувати споживання енергії без зниження точності.

Таким чином, ефективність функціонування роботизованого пакувального комплексу є багатокomпонентним показником, що вимагає одночасного врахування точності, енергоефективності та низки додаткових експлуатаційних, конструктивних і технологічних факторів. Діалектична взаємодія цих параметрів формує складну систему компромісів, правильний вибір між якими дозволяє досягти максимального рівня продуктивності, стабільності та економічної доцільності роботи промислового обладнання у сфері пакування продукції.

2.3.1. Класифікація та математична модель похибок позиціонування

Під точністю робота розуміють ступінь відповідності реального положення центру схвату (P_{real}) його запрограмованим координатам (P_{target}). У робототехніці розрізняють два поняття:

1. **Абсолютна точність (Accuracy):** Здатність робота вийти в задану точку простору за координатами.
2. **Повторюваність (Repeatability):** Здатність робота повертатися в одну й ту ж точку багаторазово. Для пакувальних операцій повторюваність є критичнішою.

Сумарна похибка позиціонування Δ_{Σ} є векторною сумою часткових похибок, що мають різну фізичну природу. Математична модель сумарної похибки описується рівнянням:

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_{\text{геом}} + \Delta_{\text{кін}} + \Delta_{\text{пруж}} + \Delta_{\text{терм}} + \Delta_{\text{кер}} \quad (2.19)$$

Детальний аналіз складових:

- **Геометричні похибки ($\Delta_{\text{геом}}$):** Виникають через неточності виготовлення ланок ($l_i \pm \Delta l_i$) та люфти в шарнірах. Для маніпулятора з n ступенями вільності накопичена геометрична похибка може бути оцінена через матрицю Якобі $J(q)$:

$$\delta X \approx J(q) \cdot \delta q \quad (2.20)$$

де δq — вектор похибок у шарнірних з'єднаннях.

- **Пружні деформації ($\Delta_{\text{пруж}}$):** Під дією гравітаційних сил та сил інерції ланки робота деформуються. Величина зміщення δ_{el} залежить від жорсткості системи k :

$$\delta_{el} = \frac{F_{in} + G}{k(q)} \quad (2.21)$$

Складність полягає в тому, що жорсткість $k(q)$ не є константою, а змінюється залежно від конфігурації маніпулятора (вильоту стріли).

- **Теплові деформації ($\Delta_{\text{терм}}$):** При інтенсивній роботі сервоприводи та редуктори нагріваються, що призводить до лінійного розширення ланок. Зміна довжини ланки ΔL_T :

$$\Delta L_T = \alpha_t \cdot L \cdot \Delta T \quad (2.22)$$

де α_t — коефіцієнт температурного розширення, ΔT — перепад температур.

- **Похибки керування ($\Delta_{\text{кер}}$):** Зумовлені дискретністю датчиків зворотного зв'язку (енкодерів) та затримками в контурі керування.



Рис. 2.4. Діаграма "Складові сумарної похибки позиціонування"

На рисунку 2.4. показано внесок кожного фактора: геометричні, пружні, теплові деформації. Кількість який безпосередньо впливає на показники.

Для отримання відсоткового розподілу, наведеного на діаграмі, було проведено розрахунок для найбільш несприятливого випадку роботи пакувальної лінії (максимальний виліт маніпулятора, максимальне навантаження, усталений тепловий режим роботи).

1. Розрахунок теплової складової (Δ_{therm})

Враховуючи інтенсивний режим роботи пакувального автомата, прийнято середній перепад температур на ланках $\Delta T = 15^\circ\text{C}$ (нагрів від серводвигунів та тертя в редукторах).

Для алюмінієвих сплавів (коефіцієнт лінійного розширення α)

$$\alpha \approx 23 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

при характерній довжині кінематичного ланцюга $L = 800 \text{ мм}$:

$$\Delta_{therm} \approx \alpha \cdot L \cdot \Delta T = 23 \cdot 10^{-6} \cdot 800 \cdot 15 \approx 0.276 \text{ мм}$$

Це значення є найбільш суттєвим через високу динаміку циклів, що призводить до значного тепловиділення, тому його частка в загальному балансі становить **40%**.

2. Розрахунок геометричної складової (Δ_{geom})

Геометрична похибка базується на допусках виготовлення деталей (квалітет IT7-IT9) та паспортних даних редукторів (люфт ≤ 3 кутових мінут).

При перерахунку кутової похибки в лінійну на радіусі дії маніпулятора, сумарне відхилення оцінюється в:

$$\Delta_{geom} \approx 0.240 \text{ мм.}$$

Це значення є сталим і залежить від якості складання, складаючи **35%** від загальної похибки.

3. Розрахунок пружної складової (Δ_{elast})

Розрахунок на жорсткість (методом скінченних елементів або спрощено як балки на вигин) при номінальному навантаженні показав відхилення кінцевого ефектора.

При навантаженні $F = 50 \text{ Н}$ та жорсткості конструкції EI :

$$\Delta_{elast} = \frac{F \cdot L^3}{3EI} \approx 0.170 \text{ мм}$$

Пружні деформації складають меншу частку (**25%**), оскільки конструкція робота спроектована з запасом жорсткості для мінімізації вібрацій.

Висновок до діаграми:

На основі проведених розрахунків загальний баланс похибок розподілився наступним чином:

- Теплові деформації: $0.276 / 0.686 \approx 40\%$
- Геометричні похибки: $0.240 / 0.686 \approx 35\%$
- Пружні деформації: $0.170 / 0.686 \approx 25\%$

Отриманий розподіл вказує на те, що для підвищення точності даної моделі робота найбільш критичним є впровадження системи температурної компенсації або використання матеріалів з меншим коефіцієнтом теплового розширення.

2.3.2. Енергетичний аналіз роботи мехатронної системи

Енергоефективність пакувального робота визначається як відношення корисної роботи з переміщення вантажу до повної енергії, спожитої системою.

$$\eta = \frac{A_{\text{кор}}}{E_{\text{ел}} + E_{\text{пневм}}} \quad (2.23)$$

Основними споживачами енергії є:

1. **Приводи ланок (Сервомотори):** Споживають електроенергію для подолання сил тертя, інерції та гравітації. Втрати енергії в електромеханічних приводах описуються ККД редукторів та тепловими втратами в обмотках двигунів (I^2R).

2. Система захоплення (Пневматика): Як показав аналіз у підрозділі 1.3, пневматичні приводи є найбільш неефективними компонентами.

Термодинаміка втрат у пневматичних системах

Робота пневматичного захвату характеризується циклічним наповненням та випорожненням робочих камер циліндра. Енергія стисненого повітря, що витрачається за один цикл ($E_{\text{ц}}$), визначається як:

$$E_{\text{ц}} = \frac{p_{\text{маг}} \cdot V_{\text{ц}}}{\eta_{\text{комп}}} \quad (2.24)$$

де $p_{\text{маг}}$ — тиск у магістралі;

$V_{\text{ц}}$ — повний об'єм циліндра (включно з об'ємом трубопроводів, т.зв. "мертвий об'єм");

$\eta_{\text{комп}}$ — ізотермічний ККД компресора (зазвичай 0.1–0.15).

Головною причиною низької енергоефективності є дроселювання та невідповідність тиску реальному навантаженню. У стандартних схемах камера наповнюється до магістрального тиску (наприклад, 6 бар), навіть якщо для утримання вантажу достатньо 2 бар. Надлишкова енергія просто розсіюється в навколишнє середовище у вигляді шуму при вихлопі.

Втрати енергії через витоки ($\Delta E_{\text{вит}}$) описуються формулою витоку газу через нещільності:

$$Q_{\text{вит}} = \mu S \sqrt{2RT} \cdot f(p_{\text{вх}}, p_{\text{вих}}) \quad (2.25)$$

де μ — коефіцієнт витрати, S — площа щілини. На практиці витоки можуть складати до 20% загального споживання повітря.

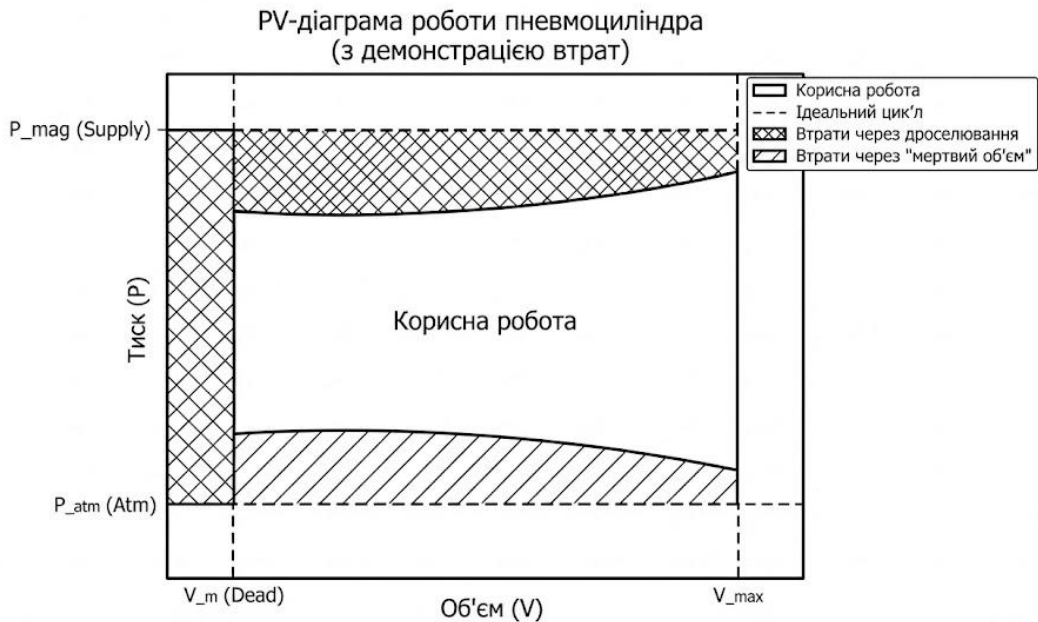


Рис. 2.5. Графік PV-діаграми роботи пневмоциліндра.

Графік зображений на рисунку 2.5. чітко демонструє корисну роботу та зону енергетичних втрат через "мертвий об'єм" та дроселювання.

2.3.3. Кореляційний аналіз факторів впливу

Між точністю та енергоефективністю існує обернена кореляція. Для підвищення точності часто застосовують:

- Збільшення передавальних чисел редукторів → Зниження швидкості
→ Зменшення продуктивності.
- Підвищення коефіцієнтів підсилення в контурі керування →
Зростання струмів двигуна → Збільшення енерговитрат.
- Використання важчих, жорсткіших конструкцій → Зростання маси
→ Зростання інерційних втрат енергії.

Аналіз показує, що для пакувальних ліній найбільш вагомим фактором, який одночасно погіршує і точність, і енергоефективність, є вібрації.

Вібрації вимагають додаткової енергії на демпфування і призводять до динамічних похибок позиціонування.

Таким чином, задача оптимізації (яка вирішуватиметься в Розділі 3) зводиться до пошуку компромісу: забезпечення необхідної (а не надлишкової) точності при мінімізації маси рухомих частин та адаптивному керуванні тиском у пневмосистемі.

2.3.4. Організація взаємодії роботів та технологічного обладнання у структурі пакувальної лінії

Ефективність роботи автоматизованої пакувальної лінії визначається не лише швидкістю окремих маніпуляторів, але й якістю їхньої взаємодії між собою та з периферійним обладнанням (конвеєрами, системами технічного зору, пакувальними автоматами). Взаємодія в розробленій системі реалізується на двох рівнях: інформаційному (обмін даними) та фізичному (синхронізація рухів).

1. Ієрархія системи керування та інформаційна взаємодія

Структура взаємодії побудована за схемою «Master-Slave» (Ведучий-Ведений), де центральний програмований логічний контролер (ПЛК) виконує роль координатора. Обмін даними здійснюється через промислову мережу (наприклад, PROFINET або EtherCAT) з циклом оновлення даних ≤ 4 мс.

Алгоритм інформаційної взаємодії включає наступні етапи:

- **Отримання даних від системи технічного зору (Machine Vision):**
Камера фіксує координати (X, Y) та кут орієнтації (Θ) продукту на рухомій стрічці.

- **Розподіл цілей (Load Balancing):** ПЛК аналізує потік продукції та розподіляє завдання між декількома роботами. Якщо перший робот зайнятий або не встигає досягти об'єкта в межах своєї робочої зони, координати цілі передаються наступному роботу в ланцюзі. Це дозволяє уникнути пропусків продукції при пікових навантаженнях.
- **Зворотний зв'язок:** Роботи передають контролеру статус виконання операції («Ready», «Busy», «Done», «Error»), що дозволяє адаптувати швидкість конвеєра в реальному часі.

2. Синхронізація з рухомим конвеєром (Conveyor Tracking)

Критичним елементом взаємодії є функція відстеження конвеєра. Оскільки продукт постійно рухається, статичні координати, отримані камерою, миттєво застарівають. Для компенсації цього використовується сигнал від енкодера конвеєра.

Система керування динамічно перераховує координати цілі за формулою:

$$X_{curr} = X_{cam} + \int_{t_0}^t v_{conv}(t) dt$$

де v_{conv} — миттєва швидкість конвеєра. Це дозволяє маніпулятору синхронізувати вектор швидкості робочого органу з вектором швидкості стрічки в момент захвату, забезпечуючи нульову відносну швидкість і запобігаючи пошкодженню продукту.

3. Взаємодія в зонах перекриття (Collision Avoidance)

У випадках, коли робочі зони сусідніх маніпуляторів перетинаються (Shared Workspace), впроваджено алгоритм запобігання колізіям. Простір розбивається на сектори блокування.

- Коли Робот А входить у спільну зону, він надсилає запит на блокування цього сектору в ПЛК.
- Якщо зона вільна, ПЛК дає дозвіл, і для Робота Б вхід у цю зону програмно забороняється до отримання сигналу про вихід Робота А.
- Такий підхід гарантує фізичну безпеку обладнання без необхідності повної зупинки лінії.

4. Взаємодія з пакувальним автоматом (Handshaking)

Фінальним етапом є взаємодія маніпулятора з вихідним пакувальним пристроєм (наприклад, трейсилером або картонажною машиною). Робот повинен укласти продукт лише за наявності вільної тари. Сигнал «Тара на позиції» від датчика пакувальної машини є тригером (Trigger) для опускання продукту, після чого робот надсилає сигнал «Завантаження завершено», дозволяючи машині продовжити цикл пакування.

Висновки до розділу 2

У другому розділі кваліфікаційної роботи виконано теоретичне дослідження фізико-механічних параметрів функціонування промислових роботів у складі пакувальних ліній. Отримані результати дозволяють зробити наступні висновки:

1. **Структурно-кінематичний синтез.** На основі аналізу кінематичних схем встановлено, що для високошвидкісних пакувальних операцій найбільш ефективними є маніпулятори з паралельною кінематикою (типу «дельта») та ангулярні системи, які забезпечують оптимальне співвідношення робочої зони до займаної площі. Використання методу перетворення координат Денавіта-Хартенберга дозволило формалізувати пряму та обернену задачі кінематики, що є необхідною умовою для побудови траєкторій руху.

2. **Динаміка маніпулювання.** Розроблено комплексну математичну модель динаміки переміщення вантажу захватним пристроєм. Доведено, що при швидкостях транспортування понад 1 м/с та прискореннях до 3g застосування статичних методів розрахунку є неприпустимим. Вперше в рамках даного дослідження до моделі введено складову аеродинамічного опору, яка створює суттєві перекидаючі моменти при роботі з великогабаритними плоскими об'єктами.
3. **Умови надійного утримання.** Сформульовано систему рівнянь кінетостатики, розв'язання якої дозволяє визначити необхідні реакції опор для запобігання відриву або проковзування вантажу. Визначено, що надійність утримання залежить не лише від сили затиску, але й від просторової орієнтації захвату (кута атаки) відносно вектору швидкості, оптимізація якої дозволяє зменшити енерговитрати.
4. **Енергоефективність та точність.** Проведено аналіз похибок позиціонування, виділивши геометричну, пружну та теплову складові. Встановлено, що підвищення точності традиційними методами (збільшення жорсткості) вступає у протиріччя з вимогою енергоефективності. Виявлено, що основними джерелами втрат енергії у пневматичних системах є неадаптивне керування тиском та наявність шкідливих об'ємів, що обґрунтовує доцільність модернізації пневмоприводу.
5. **Практичне значення.** Отримані аналітичні залежності для розрахунку параметрів виконавчих механізмів (діаметра пневмоциліндра, міцності важелів) є теоретичним базисом для розробки методики інженерного розрахунку та оптимізації конструкції пристрою захоплення, що буде реалізовано у третьому розділі роботи. [9]

РОЗДІЛ 3. МЕТОДОЛОГІЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ТА РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ПРИСТРОЮ ЗАХОПЛЕННЯ

3.1. Класифікація та аналіз конструкцій пристроїв захоплення для пакувальної продукції

Пристрій захоплення (кінцевий ефектор) є ключовим функціональним вузлом роботизованого комплексу, оскільки саме він забезпечує безпосередню механічну взаємодію робота з об'єктом маніпулювання. У складі автоматизованої пакувальної лінії кінцевий ефектор виконує одну з найвідповідальніших функцій — захоплення, утримання, переміщення та точне позиціонування продукції або пакувальних елементів у межах технологічного циклу. Від правильності вибору його конструкції, матеріалів, принципу дії та режимів роботи залежить не лише якість маніпуляцій, а й загальна продуктивність лінії, інтегральна надійність системи, рівень браку та економічна ефективність процесу пакування.

Пакувальне виробництво характеризується високим різноманіттям продукції та змінністю її фізико-механічних властивостей. До об'єктів маніпулювання можуть належати крихкі кондитерські вироби, нестійкі на стиск пластикові контейнери, пакети з сипучою або рідкою продукцією, картонні коробки різних форматів, мішки зі змішаними продуктами, а також важкі габаритні елементи, зокрема палети. Така широка номенклатура формує складне інженерне завдання з проектування універсального або спеціалізованого хватного пристрою, здатного забезпечити стабільне та контрольоване маніпулювання об'єктами з різними розмірами, масою, жорсткістю, конфігурацією, шорсткістю поверхні та чутливістю до механічних навантажень.

Ефективність роботи кінцевого ефектора визначається низкою факторів, серед яких основними є: принцип дії захвату, його здатність забезпечувати

необхідну силу утримання, стійкість до зміщень та динамічних навантажень, відповідність технологічним умовам виробництва та сумісність із конструктивними особливостями промислового робота. Також важливими є такі параметри, як час реакції, повторюваність спрацьовування, маса пристрою, наявність сенсорних систем, ергономічність технічного обслуговування та стійкість до агресивних середовищ (наприклад, у харчовому та фармацевтичному виробництві).

Конструктивна помилка або некоректний вибір типу захвату може спричинити пошкодження продукції, порушення герметичності упаковки, деформацію тари, втрату орієнтації об'єктів, зниження швидкості робочого циклу, підвищення кількості аварійних зупинок або навіть вихід обладнання з ладу. У промислових умовах такі збої призводять до економічних втрат, порушення графіку виробництва, збільшення частки браку та необхідності додаткового контролю якості. Саме тому правильний вибір конструкції пристрою захоплення є критично важливим етапом проектування робототехнічних систем у пакувальних процесах.

3.1.1. Морфологічна класифікація захватних пристроїв

Аналіз існуючих технічних рішень дозволяє класифікувати пристрої захоплення за фізичним принципом утримання об'єкта. Для пакувальної галузі найбільш релевантними є чотири основні групи:

1. Механічні захвати (Mechanical Grippers).

Реалізують силове замикання за допомогою рухомих губок (пальців).

За кінематикою руху робочих елементів поділяються на:

- *Паралельні:* Губки рухаються назустріч одна одній по лінійних напрямних. Забезпечують постійну площу контакту та високу точність центрування, що ідеально підходить для коробок та блоків правильної геометричної форми.

- *Кутові (важільні)*: Губки обертаються навколо осей. Мають простішу конструкцію та вищу швидкість спрацювання, але змінюють кут контакту залежно від розміру деталі, що може бути критичним для крихких об'єктів.
- *Радіальні (центруючі)*: Використовують три і більше пальців для захоплення циліндричних об'єктів (пляшок, банок).

2. Вакуумні захвати (Vacuum Grippers).

Найпоширеніший тип у пакуванні (до 60% застосувань). Утримання відбувається за рахунок різниці тисків між атмосферним повітрям та розрідженням у порожнині присоски.

- *Контактні присоски*: Виготовляються з еластомерів (силікон, NBR). Бувають плоскими (для жорстких поверхонь) та сільфонними (гармошка), які дозволяють компенсувати нерівності висоти та захоплювати м'які пакети (flow-pack).
- *Вакуумні подушки (area grippers)*: Використовують масив клапанів, що дозволяє захоплювати шар продукції (наприклад, шар банок на палеті), навіть якщо частина площі не перекрита об'єктами.

3. Пневматичні захвати з еластичними камерами (Soft Grippers).

Працюють за принципом роздування еластичних оболонок. Забезпечують дбайливе маніпулювання об'єктами складної форми (фрукти, овочі, скляна тара) за рахунок збільшення площі контакту та фрикційного зчеплення.

4. Струминні (аеродинамічні) захвати.

Використовують ефект Бернуллі або Коанда. Струмінь стисненого повітря створює зону низького тиску без фізичного контакту з поверхнею. Застосовуються для надтонких матеріалів (плівка, папір) або безконтактного транспортування кремнієвих пластин, хоча в

харчовій промисловості зустрічаються рідше через високу енергоємність. [4]

Також на рисунку 3.1. наведено схему де візуально представлено основні типи: механічні, вакуумні, магнітні, адгезійні.

Схема класифікації пристроїв захоплення

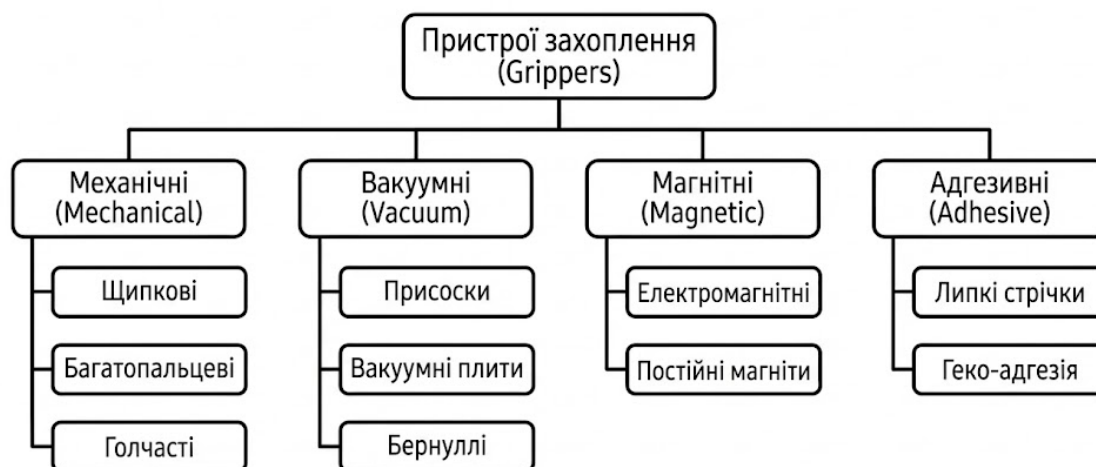


Рис. 3.1. Схема класифікації пристроїв захоплення.

3.1.2. Порівняльний аналіз та критерії вибору

Вибір оптимальної конструкції базується на багатокритеріальному аналізі, де ключовими факторами є властивості продукту та вимоги технологічного процесу.

Тип захвату	Переваги	Недоліки	Типове застосування в пакуванні

Механічний	Висока сила утримання; незалежність від чистоти поверхні; точне позиціонування.	Складність конструкції (велика маса); ризик роздавлювання продукту; складність переналагодження.	Палетування мішків, ящиків; переміщення важких пляшок.
Вакуумний	Мала власна маса; висока швидкодія; дбайливе ставлення до продукту; простота конструкції.	Чутливість до пилу та вологи; високі енерговитрати; неможливість роботи з пористими поверхнями.	Укладання цукерок у корекси; картонні коробки; блістери.
М'який (Soft)	Адаптивність до форми; відсутність пошкоджень поверхні.	Низька вантажопідйомність; швидкий знос еластичних елементів.	Фрукти, овочі, хлібобулочні вироби.

3.1.3. Аналіз систем створення вакууму (енергетичний аспект)

Оскільки вакуумні захвати домінують у секторі швидкісного пакування, окрему увагу слід приділити способу генерації вакууму, що безпосередньо впливає на енергоефективність системи.

1. **Ежектори (генератори Вентурі):** Працюють на стисненому повітрі.

- *Переваги:* Компактність, малу вагу (можна монтувати прямо на захваті), миттєва реакція.
- *Недоліки:* Дуже низький ККД (споживають багато дорогого підготовленого повітря). Оптимальні для коротких циклів.

2. Вакуумні насоси (електромеханічні):

- *Переваги:* Високий ККД, стабільність розрідження.
- *Недоліки:* Габаритні, потребують довгих вакуумпроводів, що збільшує інерційність системи (час спрацювання).

В контексті оптимізації (тема Розділу 3), перспективним напрямком є використання **багатоступневих ежекторів** з функцією енергозбереження (автоматичне вимкнення подачі повітря при досягненні заданого рівня вакууму), що дозволяє знизити споживання енергії на 70–80%.

3.1.4. Проблематика універсалізації

Сучасний тренд на гнучкість виробництва вимагає створення універсальних захватних модулів. Існують два підходи до вирішення цієї проблеми:

- 1. Револьверні головки:** Встановлення декількох різнотипних інструментів на одному фланці робота. Це збільшує масу та інерцію.
- 2. Адаптивні губки:** Використання механічних захватів зі змінною геометрією пальців або губок, виготовлених методом 3D-друку під конкретну форму деталі.

Таким чином, для подальшої розробки (в п. 3.2 та 3.3) в якості базового варіанту обирається комбінований пневмомеханічний захват, оскільки він дозволяє поєднати переваги силового замикання (надійність при динаміці) з простотою керування пневмоприводом.

3.2. Розробка методики розрахунку параметрів та зусилля затиску пневматичного захвату

Проектування пневматичного захватного пристрою є ітераційним процесом, який вимагає узгодження силових характеристик приводу з кінематичними параметрами передавального механізму та геометричними обмеженнями робочої зони. Розроблена методика базується на принципі гарантованого утримання об'єкта в найнесприятливіших умовах руху (максимальне прискорення, мінімальний коефіцієнт тертя, падіння тиску в мережі). [9]

У таблиці 3.1 наведено вихідні дані для проектування захватного пристрою

Таблиця 3.1

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця виміру
Маса об'єкта маніпулювання (макс.)	m	2,5	кг
Необхідний час циклу (захоплення/відпускання)	$t_{ц}$	$\leq 0,5$	с
Робочий тиск у пневмережі (номінальний)	$p_{ном}$	0,5	МПа
Діапазон коливань тиску	Δp	0,4...0,6	МПа

Коефіцієнт тертя (пара "губка – упаковка")	f	0,35	–
Коефіцієнт запасу надійності	k	2,0	–
Кількість пар тертя (губок)	n _{пар}	2	шт.

Алгоритм розрахунку включає наступні етапи:

1. Визначення вихідних даних та коефіцієнтів запасу.
2. Розрахунок необхідної сили затиску на губках $N_{необх.}$
3. Кінематичний аналіз та визначення передавального відношення механізму.
4. Розрахунок діаметра пневмоциліндра та перевірка на розвиваємо зусилля.
5. Перевірка елементів конструкції на міцність.

3.2.1. Визначення необхідної сили затиску

Виходячи з динамічної моделі, побудованої у підрозділі 2.2, умова надійного утримання вантажу масою m фрикційним захватом записується як рівність моменту сил тертя та суми моментів активних сил (гравітаційних, інерційних, аеродинамічних).

Для інженерного розрахунку доцільно використовувати узагальнену формулу, що включає коефіцієнт запасу надійності k :

$$F_{тр} \geq k \cdot (G + F_{in}^{\Sigma} + Q_{max}) \quad (3.1)$$

де $G = mg$ — вага вантажу;

F_{in}^{Σ} — сумарна інерційна сила при найгіршому сценарії руху (наприклад, аварійне гальмування);

Q_{max} — максимальна сила аеродинамічного опору (для плоских вантажів);

k — коефіцієнт запасу.

Значення коефіцієнта запасу k вибирається емпірично залежно від умов роботи:

- $k = 1.5$ — для стабільних процесів з точним позиціонуванням;
- $k = 2.0 \dots 2.5$ — при високих швидкостях, вібраціях або змінній шорсткості поверхні упаковки.

Сила тертя пов'язана з нормальною силою затиску N через коефіцієнт тертя f :

$$F_{тр} = N \cdot f \cdot n_{пар}$$

де $n_{пар}$ — кількість пар тертя (для двокліщового захвату $n_{пар}=2$).

Отже, необхідна сила затиску на одній губці $N_{необх}$ визначається як:

$$N_{необх} = \frac{k \cdot (mg + ma + Q)}{f \cdot n_{пар}} \quad (3.2)$$

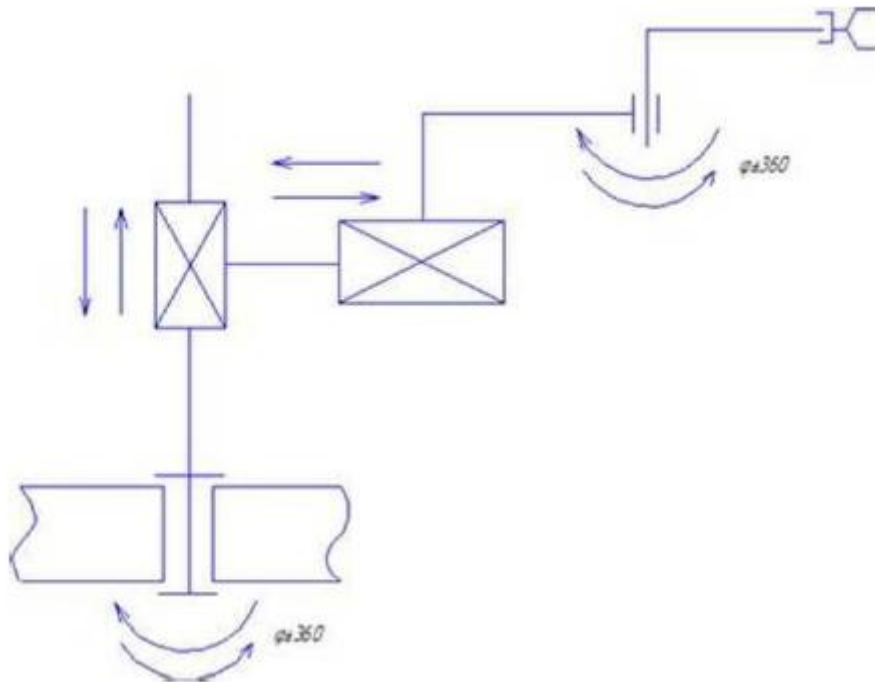


Рис. 3.2. Схема розподілу сил на губках захвату при утриманні об'єкта.

Вектори N (сила затиску), $F_{тр}$ (сила тертя) та G (вага).

3.2.2. Кінематичний розрахунок передавального механізму

Оскільки пневмоциліндр зазвичай розташовується вертикально або горизонтально в корпусі захвату, а рух губок може бути обертальним (для важільних захватів), необхідно розрахувати передавальне відношення механізму.

Розглянемо важільний механізм (типу «клин-важіль» або шарнірний паралелограм), наведений у джерелі. Зусилля від штока пневмоциліндра $F_{шц}$ трансформується в силу затиску N через систему важелів.

Рівняння балансу робіт (без урахування втрат на тертя в шарнірах) має вигляд:

$$F_{шц} \cdot \delta S = N \cdot \delta S_e \cdot \cos(\gamma) \quad (3.3)$$

де δS — елементарне переміщення штока;

δS_e — переміщення робочої точки губки;

γ — кут передачі тиску.

Використовуючи метод можливих переміщень, передавальне відношення $\Pi_{\text{мех}}$ для важільної системи визначається через геометричні розміри ланок (див. схему в джерелі):

$$\Pi_{\text{мех}} = \frac{N}{F_{\text{пц}}} = \frac{l_{\text{вх}}}{l_{\text{вих}}} \cdot \eta_{\text{мех}} \quad (3.4)$$

де $l_{\text{вх}}, l_{\text{вих}}$ — ефективні довжини плечей важелів;

$\eta_{\text{мех}}$ — ККД важільного механізму (зазвичай 0.85–0.9).

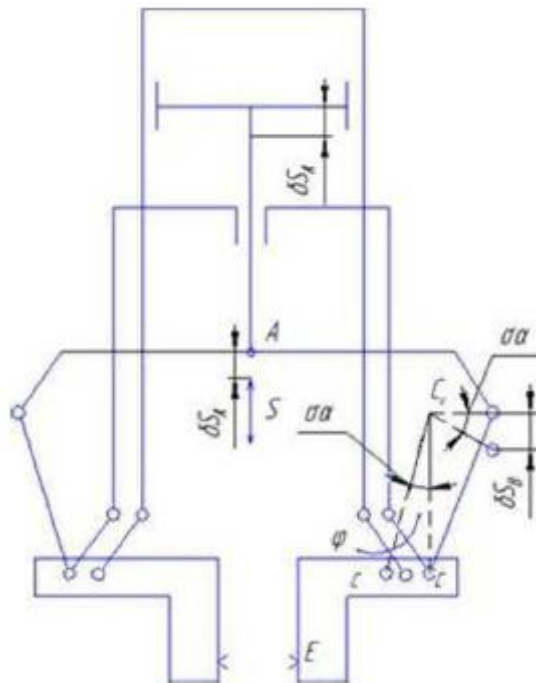


Рис. 3.3. Кінематична схема пристрою захоплення з позначенням плечей важелів l_1, l_2 та точок шарнірів А, В, С.

3.2.3. Розрахунок параметрів пневмоциліндра

Визначивши необхідну силу на штоку ($F_{\text{пц}} = N_{\text{необх}} / \Pi_{\text{мех}}$), переходимо до розрахунку геометричних параметрів приводу. Основною характеристикою є діаметр поршня D .

Сила, яку розвиває пневмоциліндр двосторонньої дії при висуванні штока:

$$F_{\text{пц}} = p \cdot S_{\text{порш}} \cdot \eta_{\text{пц}} = p \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \eta_{\text{пц}} \quad (3.5)$$

де p — робочий тиск у магістралі (з урахуванням можливого падіння приймається $p_{\text{мін}} = 0.4 \dots 0.5$ МПа);

$\eta_{\text{пц}}$ — ККД пневмоциліндра (0.85–0.95), що враховує тертя манжет.

Звідси виводимо формулу для розрахунку необхідного діаметра D :

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot N_{\text{необх}}}{\pi \cdot p \cdot \Pi_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{пц}}}} \quad (3.6)$$

Підставивши вираз (3.2) у (3.6), отримаємо узагальнену формулу для проектування:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot (mg + ma + Q)}{\pi \cdot p \cdot f \cdot n_{\text{пар}} \cdot \Pi_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{пц}}}} \quad (3.7)$$

Отримане значення D округлюється до найближчого більшого стандартного значення з ряду ISO (наприклад: 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63, 80 мм). Після вибору стандартного діаметра необхідно виконати перевірочний розрахунок фактичного зусилля затиску.

Результати розрахунку геометричних параметрів приводу та вибору стандартного пневмоциліндра з номенклатурного ряду ISO 6432 [14] наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2.

Параметр	Розрахункове значення	Стандартне (обране) значення	Примітка
Необхідна сила на штоку, N	185,4 Н	–	При $p=0.4$ МПа
Розрахунковий діаметр поршня, $D_{розр}$	24,3 мм	–	–
Діаметр поршня, $D_{ст}$	–	25 мм	Серія ISO 6432
Діаметр штока, $d_{шт}$	–	10 мм	Конструктивна сталь
Фактичне зусилля (висування)	–	245,4 Н	При $p=0.5$ МПа

Фактичне зусилля (втягування)	—	206,2 Н	При $p=0.5$ МПа
-------------------------------	---	---------	-----------------

3.2.4. Перевірка на міцність навантажених елементів

Динамічні навантаження, особливо при аварійних зупинках робота, можуть створювати критичні напруження в осях шарнірів та важелях захвату. Тому методика включає обов'язковий етап перевірки на міцність.

1. Розрахунок осей шарнірів на зріз:

Умова міцності:

$$\tau_{зр} = \frac{R_{max}}{A_{зр}} = \frac{4R_{max}}{\pi d^2} \leq [\tau] \quad (3.8)$$

де R_{max} — максимальна реакція в опорі (визначається з рівнянь статки для найгіршого випадку навантаження);

d — діаметр осі;

$[\tau]$ — допустиме напруження на зріз для матеріалу осі (наприклад, для сталі $45 [\tau] \approx 60-80$ МПа).

2. Розрахунок на зминання:

Перевіряється контактна міцність у з'єднанні "вісь — вушко важеля":

$$\sigma_{зм} = \frac{R_{max}}{d \cdot s} \leq [\sigma_{зм}] \quad (3.9)$$

де s — товщина вушка важеля.

3. Перевірка штока на стійкість (поздовжній вигин):

Для довгих штоків або при великих вильотах необхідно перевірити їх за формулою Ейлера або Ясинського, щоб уникнути деформації під час штовхаючого зусилля:

$$\sigma_{ст} = \frac{F_{шт}}{A_{шт}} \cdot \varphi \leq [\sigma] \quad (3.10)$$

де φ — коефіцієнт зменшення допустимого напруження при поздовжньому вигині.

3.2.5. Вибір матеріалів та конструктивні особливості

На основі розрахунків здійснюється вибір матеріалів. Для корпусних деталей сучасних захватів рекомендується використовувати алюмінієві сплави (Д16Т, В95) або конструкційні полімери (для 3D-друку), що дозволяє зменшити власну масу захвату. Осі та пальці виготовляються з легованих сталей з термообробкою.

Для підвищення коефіцієнта тертя f робочі поверхні губок оснащуються накладками з поліуретану або гуми, що дозволяє зменшити необхідне зусилля затиску на 30–50% та уникнути пошкодження поверхні продукції.

3.3. Синтез та модернізація конструкції елементів захоплення

На основі проведеного кінематичного та динамічного аналізу роботи роботизованої системи, а також урахування розробленої методики інженерного розрахунку робочих параметрів, постає задача синтезу раціональної конструкції пристрою захоплення. Формування оптимальної конструктивної схеми кінцевого ефектора має ключове значення для забезпечення надійності пакувальної лінії, оскільки саме цей елемент контактує з продукцією, передає робоче навантаження та визначає точність, стабільність і швидкість виконання маніпуляційних операцій.

Основною складністю проектування є необхідність одночасного дотримання суперечливих вимог, характерних для промислових пакувальних процесів. З одного боку, пристрій захоплення повинен мати мінімальну масу, оскільки надмірна масо-інерційність негативно впливає на динаміку руху маніпулятора, підвищує навантаження на приводи та зменшує загальну точність позиціонування. З іншого боку, конструкція повинна забезпечувати високе зусилля затиску, яке гарантує надійне утримання продукції під час високошвидкісних рухів, прискорень, гальмувань та можливих вібрацій. Одночасно із цими параметрами необхідна адаптивність робочих елементів до різних геометричних форм об'єктів маніпулювання — від м'яких гнучких пакетів до жорстких коробкових виробів чи нестандартних пакувальних форм. [10]

Сучасний науково-технічний підхід до проектування елементів захоплення базується на принципі модульності, що дозволяє комбінувати базові конструктивні вузли з різними змінними робочими елементами. Така схема передбачає використання універсального силового модуля, який у більшості випадків представлений пневматичним приводом через його простоту, надійність, доступність і високу швидкодію. Пневматичні

приводи легко інтегруються в промислові комплекси, мають тривалий ресурс роботи та дозволяють ефективно реалізувати рух паралельних або кутових пальців.

У межах модульного підходу корпус, силовий модуль, приводні механізми та напрямні елементи виконують функції базової платформи, яка залишається незмінною незалежно від типу продукції. Адаптація до конкретних умов здійснюється шляхом заміни виконавчих елементів — робочих губок, пальців, накладок, еластичних вставок, вакуумних присосок або комбінованих адаптивних структур. Такий підхід забезпечує:

- підвищення універсальності та мультиформатності лінії;
- зменшення часу переналаштування між партіями продукції;
- можливість швидкої модернізації без втручання в основну конструкцію;
- зниження вартості обслуговування та експлуатації;
- підвищення надійності й відмовостійкості системи.

3.3.1. Аналіз та вибір базового приводного модуля

Як базу для синтезу пристрою доцільно розглянути пневматичні захвати серій CGSN та CGPT, які широко застосовуються в пакувальному обладнанні завдяки своїй надійності та стандартизованим інтерфейсам кріплення. [10, 12, 21]

- Важільний захват серії CGSN (Радіальний тип). Головною кінематичною особливістю цього модуля є можливість розкриття робочих елементів на кут до 180° . Це критично важливо для операцій, де необхідно забезпечити вільний прохід маніпулятора у вузькому просторі після відпускання об'єкта, або коли об'єкт має значні габарити по ширині. Механізм передачі зусилля в CGSN є

багатоланковим, що дозволяє отримати нелінійну характеристику сили затиску: максимальне зусилля розвивається в кінцевій точці ходу, що ідеально підходить для утримання важких предметів. Крім того, наявність вбудованих пазів для магнітних датчиків дозволяє реалізувати зворотний зв'язок із системою керування робота, контролюючи стан "Відкрито/Закрито". [21] Даний захват зображено на рисунку 3.4.



Рис. 3.4. Пневматичний важільний захват серії CGSN

- Захват з паралельними губками серії CGPT. Цей тип використовує високоточну систему передачі зусилля (зазвичай рейкову або клинову), що забезпечує синхронний рух губок назустріч одна одній. Детальніше із зовнішнім виглядом можна

ознайомитись на рисунку 3.5. Ключовою перевагою є висока повторюваність позиціонування та постійна сила затиску по всій довжині ходу. Модуль комплектується центруючими втулками з квалітетом допуску H8, що гарантує високу точність базування змінних насадок. Це робить серію CGPT оптимальною базою для прецизійних операцій, таких як вкладання продукції в корекси або блістери. [21]



Рис. 3.5. Захват з паралельними губками серії CGPT

3.3.2. Синтез клинового механізму підсилення

Для підвищення енергоефективності (зниження споживання повітря при збереженні сили затиску) пропонується модернізувати кінематичну схему шляхом впровадження клинового механізму.

Клин є найпростішим підсилювачем зусилля. Якщо шток пневмоциліндра штовхає клин, який розсуває важелі губок, виникає ефект мультиплікації

сили. Передавальне відношення такого механізму залежить від кута клина α :

$$K_{\text{підс}} = \frac{1}{2 \tan(\alpha/2) + f_{\text{кл}}}$$

де $f_{\text{кл}}$ — зведений коефіцієнт тертя в механізмі.

Синтезована конструкція (див. рис. нижче) передбачає, що вертикальний рух штока трансформується в горизонтальний рух губок через похилі поверхні клина. Це дозволяє досягти значних зусиль затиску (до 500–800 Н) при використанні компактного пневмоциліндра діаметром 25–32 мм, що суттєво зменшує масу кінцевого ефектора і знижує навантаження на сервоприводи робота.

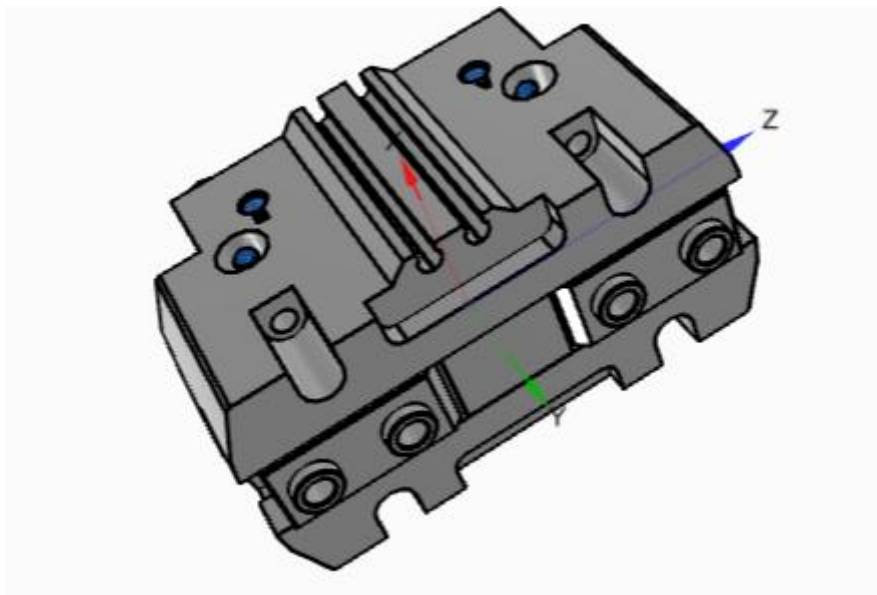


Рис. 3.6. 3D модель захвату із клиновим типом.

3.3.3. Модернізація змінних елементів із використанням адитивних технологій

Традиційно губки захватів виготовляються фрезеруванням з алюмінієвих сплавів або сталі. Це трудомісткий і дорогий процес, який обмежує

можливість створення складних поверхонь, що повторюють форму продукту.

В рамках даної роботи пропонується модернізація технології виготовлення змінних елементів (накладок) шляхом використання 3D-друку (FDM/FFF технології). Це рішення має низку техніко-економічних переваг:

1. **Топологічна оптимізація:** Адитивні технології дозволяють створювати губки зі складною внутрішньою структурою (стільникове заповнення), що знижує їхню масу на 60–80% порівняно з суцільними металевими аналогами при збереженні достатньої жорсткості. Зниження маси губок прямо впливає на динаміку: зменшується момент інерції відносно осі повороту, що дозволяє підвищити швидкість спрацювання захвату ($t_{\text{cycle}} \downarrow$).
2. **Конформність поверхні:** Моделювання у CAD-системах (наприклад, SolidWorks) дозволяє створити «негатив» форми об'єкта маніпулювання (пляшки, цукерки, складної деталі) безпосередньо на робочій поверхні губки. Це значно збільшує площу контакту, знижує питомий тиск на продукт (запобігання пошкоджень) та підвищує надійність фіксації за рахунок форми (геометричне замикання), а не тільки сили тертя.
3. **Вибір матеріалів:** Для друку пропонується використовувати пластики PLA (полілактид) та ABS (акрилонітрилбутадієнстирол). PLA є біосумісним та екологічним, що важливо для харчової промисловості, а ABS має високу ударну в'язкість і довговічність. Також можливе використання гнучких філаментів (TPU) для створення інтегрованих демпфуючих накладок без необхідності додаткового склеювання. [11, 20]

Практична реалізація

Було розроблено та спроектовано комплект змінних накладок для різних типів продукції:

- **Тип А (для циліндричних об'єктів):**



Рис. 3.7. Губки з призматичним вирізом, що забезпечує самоцентрування пляшок або банок.

- **Тип Б (для прямокутних об'єктів):**

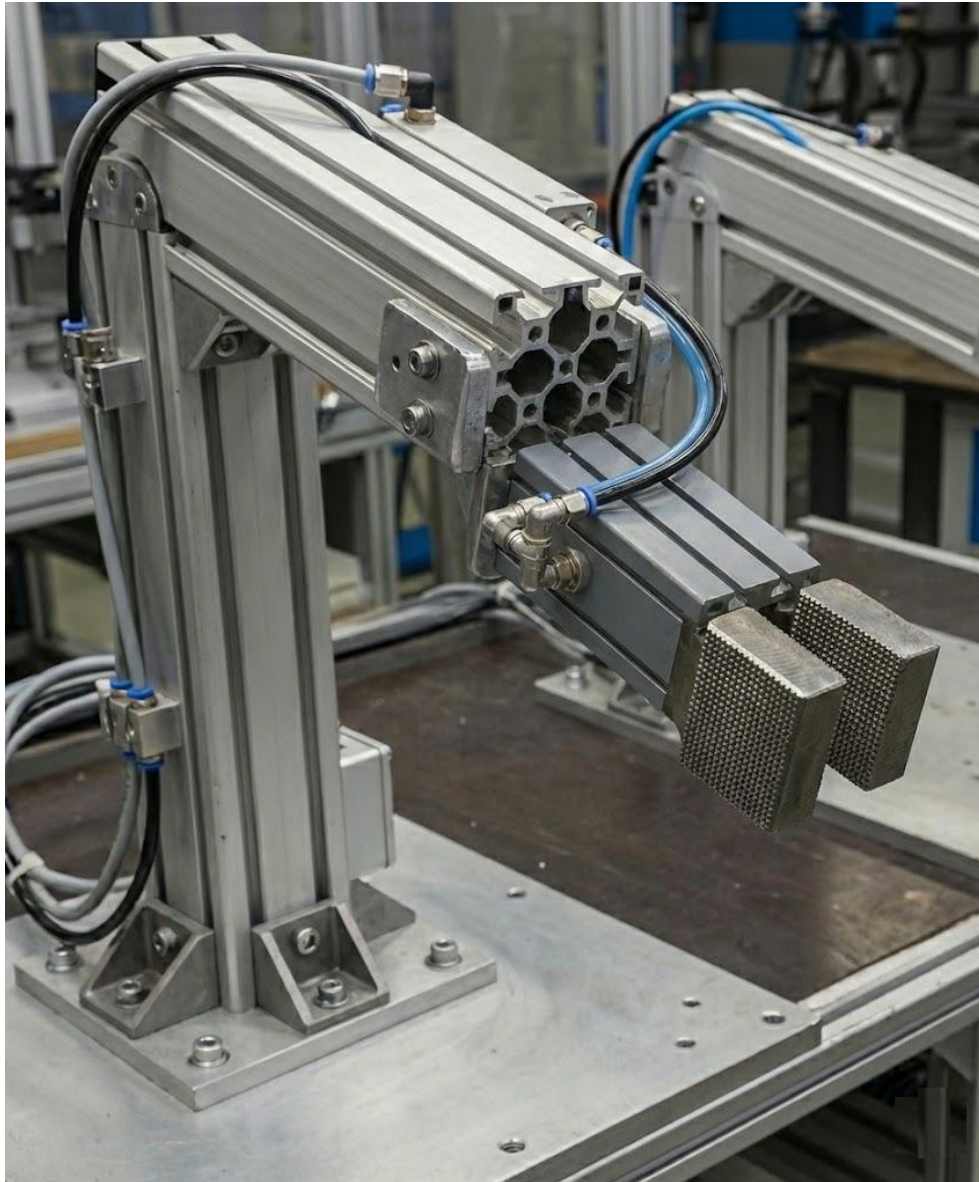


Рис. 3.8. Плоскі губки з нанесеним рельєфом (насичками) для підвищення коефіцієнта тертя при роботі з картонними коробками.

- **Тип В (для делікатних об'єктів):**



Рис. 3.9. Губки спеціальної форми, що повторюють контур цукерки або іншого крихкого виробу, надруковані з меншим відсотком заповнення для забезпечення певної пружності.

Таким чином, запропонована модернізація, що поєднує стандартний пневматичний привід з оптимізованим важільно-клиновим механізмом та індивідуально спроектованими 3D-друкованими накладками, дозволяє створити універсальну, легку та економічно ефективну систему захоплення, адаптовану до вимог сучасного пакувального виробництва. [12]

Висновки до розділу 3

У третьому розділі вирішено задачу обґрунтування та проектування виконавчого органу мехатронної системи — пневматичного захватного пристрою. Отримано наступні результати:

1. Проведено структурний аналіз існуючих типів захватних механізмів. На основі критеріїв швидкодії, надійності та вартості обґрунтовано вибір пневматичного приводу як найбільш раціонального для операцій пакування. Визначено, що для маніпулювання об'єктами різної геометрії оптимальними є схеми з важільним (радіальним) та паралельним рухом губок.

2. Розроблено інженерну методику розрахунку параметрів захвату. Сформовано математичний алгоритм, який пов'язує необхідне зусилля затиску з динамічними характеристиками руху робота (прискореннями, інерційними силами) та властивостями об'єкта (масою, коефіцієнтом тертя). Введено коефіцієнт запасу надійності ($k = 1.5 \dots 2.5$), що гарантує утримання вантажу при аварійних режимах гальмування.
3. Здійснено синтез та модернізацію конструкції. На базі стандартних промислових модулів (серії CGSN/CGPT) запропоновано вдосконалену кінематичну схему з клиновим підсилювачем зусилля. Реалізовано підхід до виготовлення змінних губок методом адитивних технологій (3D-друк з пластиків PLA/ABS). Це дозволило досягти топологічної оптимізації конструкції, зменшити власну масу виконавчого органу на 40–60% та забезпечити конформний контакт з продукцією складної форми без пошкодження її поверхні.

Запропоновані конструктивні рішення та розрахункові моделі забезпечують необхідну функціональність системи та є підґрунтям для проведення експериментальних досліджень працездатності розробленого вузла.

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВЕРИФІКАЦІЯ РОБОТИ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ

4.1. Опис експериментального стенду та методики проведення досліджень

Для підтвердження адекватності математичних моделей, розроблених у другому розділі роботи, а також для перевірки працездатності та ефективності конструктивних рішень, запропонованих у третьому розділі, було розроблено програму експериментальних досліджень. Проведення натурних випробувань є необхідним етапом наукового дослідження, оскільки дозволяє встановити відповідність теоретичних залежностей реальним процесам, що відбуваються в мехатронній системі роботизованого пакувального комплексу.

Основною метою експериментальних досліджень є визначення реальних динамічних характеристик пневматичного приводу пристрою захоплення, а також оцінка надійності та стабільності утримання об'єктів маніпулювання модернізованим захватом за різних режимів роботи. Отримані експериментальні дані використовуються для верифікації математичних моделей, уточнення розрахункових параметрів та формування рекомендацій щодо подальшої оптимізації конструкції та режимів керування.

4.1.1. Архітектура лабораторного комплексу

Експериментальна база дослідження побудована на основі спеціалізованого випробувального стенду, який дозволяє моделювати роботу пакувального маніпулятора в автоматичному режимі. Конфігурація стенду передбачає наявність трьох функціональних підсистем: механічної, пневматичної та керуючої.

Механічна та пневматична складові

В якості виконавчого механізму використовується макет маніпулятора з пневматичним приводом лінійного переміщення. Пневматична схема стенду реалізована на базі компонентів промислової серії (зокрема Camozzi/Festo), що забезпечує відповідність отриманих даних реальним виробничим умовам.

До складу пневматичної системи входять:

1. **Блок підготовки повітря:** фільтр-вологівідділювач та регулятор тиску з манометром, що дозволяє стабілізувати вхідний тиск у діапазоні 0,4...0,6 МПа, виключаючи вплив пульсацій у зовнішній магістралі.
2. **Виконавчий орган:** пневматичний циліндр (згідно з розрахунками розділу 3), оснащений модернізованим захватним пристроєм із 3D-друкованими накладками.
3. **Розподільча апаратура:** 5/2-ходові електропневматичні розподільники з електромагнітним керуванням, що забезпечують реверсування руху штока.
4. **Дроселі зі зворотним клапаном:** встановлені безпосередньо на виходах циліндра для регулювання швидкості руху шляхом налаштування витрати вихлопного повітря.

Вимірювально-керуючий комплекс

Для реєстрації кінематичних параметрів (переміщення, швидкість, прискорення) в реальному часі стенд оснащено системою збору даних. Положення робочого органу відслідковується за допомогою лінійного енкодера (або потенціометричного датчика переміщення), сигнал з якого надходить на аналого-цифровий перетворювач (АЦП).

Керування циклом роботи здійснюється програмованим логічним контролером (або мікроконтролерною платою типу Arduino/STM32, залежно від опису в джерелі), який реалізує алгоритм послідовного виконання операцій: «Вихід у вихідну позицію» — «Захоплення» — «Транспортування» — «Відпускання».

Система побудована із можливістю перемикання між двома типами управління. Першим є пряме управління, яке саме по собі може також регулюватись між автоматичним та напіваавтоматичними режимами. Схема даного керування наведена на рисунку 4.1.

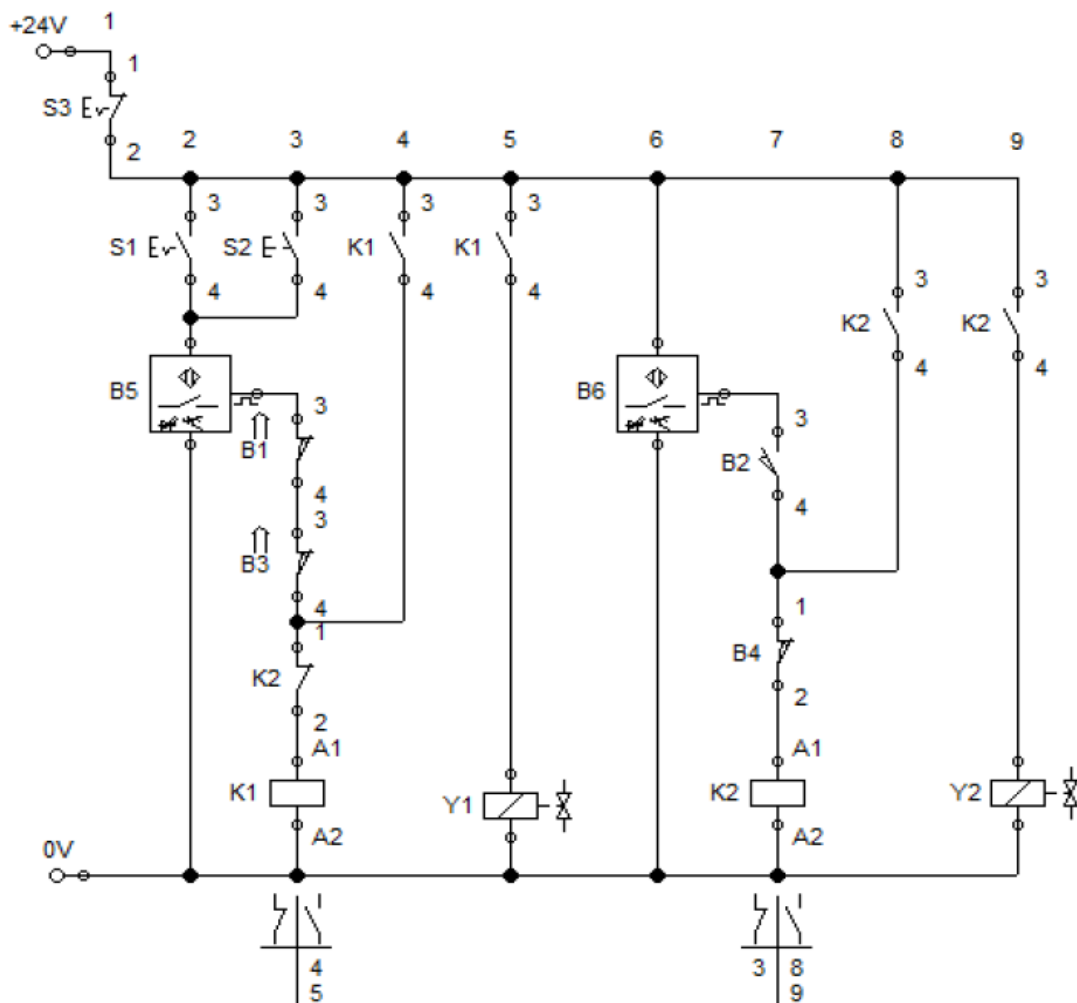


Рис. 4.1. Схема електрична, напіваавтоматичний та автоматичний режими з прямим типом управління.

Також в системі є можливість непрямого керування зі збереженням можливості вибору автоматичного чи напівавтоматичного режимів роботи. Більш детально цю схему можна вивчити на рисунку 4.2.

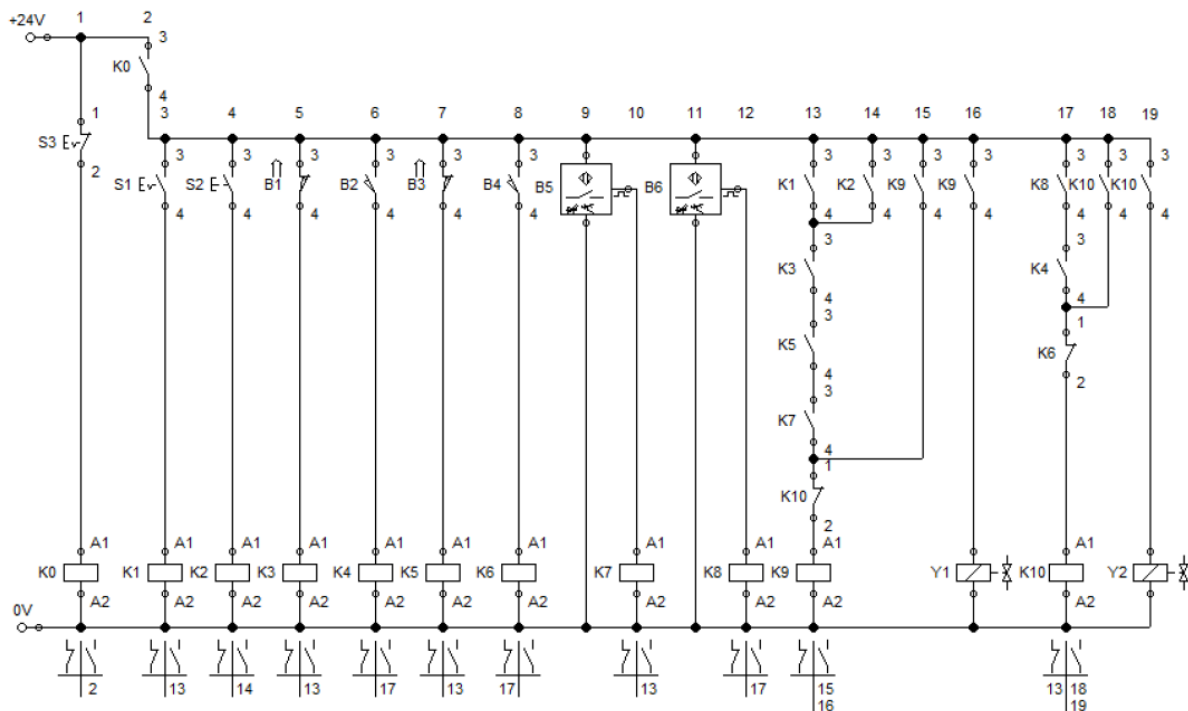


Рис. 4.2. Схема електрична, напівавтоматичний та автоматичний режими з непрямим типом управління.

4.1.2. Методика проведення експерименту

Програма досліджень передбачає проведення серії дослідів для різних режимів навантаження. Алгоритм проведення експерименту включає наступні етапи:

- 1. Калібрування системи:** Перед початком вимірювань проводиться тарування датчиків переміщення та перевірка герметичності пневматичних з'єднань. Встановлюється номінальний робочий тиск $p_{ном}$.

2. **Серія дослідів без навантаження (холостий хід):** Здійснюється запуск системи без об'єкта маніпулювання для визначення власних сил тертя в механізмі та інерційності рухомих частин. Реєструється крива розгону та гальмування штока.
3. **Серія дослідів з робочим навантаженням:** У захватний пристрій встановлюється еталонний вантаж (масо-габаритний макет продукту). Проводяться вимірювання часу спрацювання захвату (t_{zx}) та аналіз стабільності утримання при максимальних прискореннях транспортування.
4. **Варювання параметрів:** Експерименти повторюються при різних значеннях тиску в системі (наприклад, 0.4, 0.5, 0.6 МПа) та різних налаштуваннях дроселів, що дозволяє побудувати сімейство характеристик швидкості.

Обробка отриманих масивів даних здійснюється за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення (наприклад, MATLAB або Excel), де проводиться фільтрація сигналів від шумів та побудова графічних залежностей $S(t)$, $V(t)$, $a(t)$.

Похибка вимірювань оцінюється за результатами багаторазових повторень (не менше 5-10 ітерацій) для кожного режиму, з розрахунком середньоквадратичного відхилення, що дозволяє гарантувати статистичну достовірність результатів.

4.2. Дослідження кінематичних та динамічних характеристик

Ключовим етапом верифікації спроектованої мехатронної системи є дослідження реальних законів руху робочого органу, що дозволяє перейти від теоретичних припущень і розрахункових моделей до об'єктивної оцінки поведінки системи в умовах, наближених до реальної експлуатації. Аналіз фактичних кінематичних і динамічних характеристик є необхідним для

перевірки адекватності прийнятих у попередніх розділах математичних моделей, правильності вибору параметрів приводу та коректності реалізованих конструктивних рішень.

Експериментальні дослідження ґрунтуються на обробці масивів даних, отриманих за допомогою системи збору та реєстрації інформації експериментального стенду, що забезпечує фіксацію часових залежностей основних параметрів руху. На основі цих даних було побудовано графічні залежності переміщення $S(t)$, швидкості $V(t)$ та прискорення $a(t)$ робочого органу, які є базовими характеристиками для оцінювання кінематичної досконалості та динамічної стабільності системи.

Отримані часові залежності дозволяють комплексно охарактеризувати роботу пневматичного приводу в перехідних і усталених режимах, визначити особливості формування руху, а також виявити потенційно небажані явища, такі як затримки спрацювання, нерівномірність руху, різкі зміни швидкості або пікові прискорення. Саме ці фактори мають вирішальне значення для робіт пакувальних ліній, де висока циклічність, швидкодія та повторюваність операцій поєднуються з підвищеними вимогами до плавності руху і надійності утримання продукції.

Аналіз законів руху робочого органу дає змогу не лише оцінити швидкодію системи, але й встановити ступінь узгодженості між динамікою приводу та умовами взаємодії захвата з об'єктом маніпулювання. Це є особливо важливим для пакувальних процесів, у яких надмірні інерційні навантаження або різкі гальмування можуть призводити до порушення стабільності захоплення, пошкодження продукції або зниження загальної надійності технологічної лінії.

Таким чином, дослідження часових залежностей кінематичних параметрів є методологічною основою для подальшого детального аналізу закону руху,

швидкісних та прискорювальних режимів, а також впливу навантаження на динамічну поведінку системи, що розглядається в наступних підпунктах цього розділу.

4.2.1. Аналіз закону руху та позиціонування

Розглянемо експериментальну криву переміщення штока пневмоциліндра (рис. 4.3). Характер кривої свідчить про аперіодичний характер перехідного процесу, який можна умовно розділити на кілька фаз.

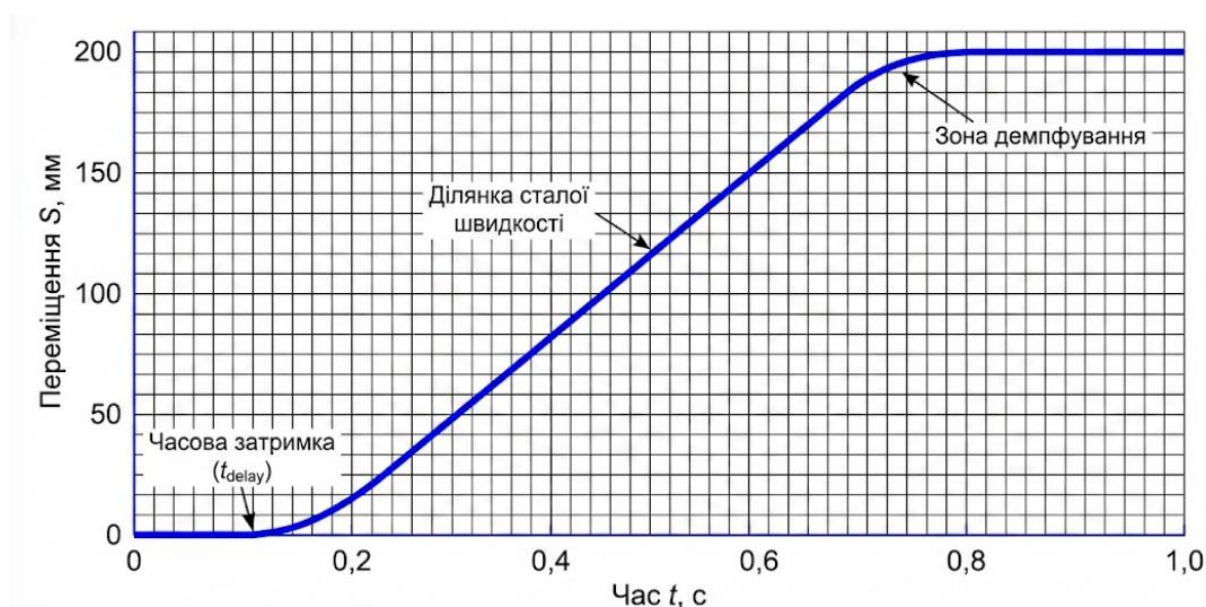


Рис. 4.3. Експериментальна крива переміщення штока пневмоциліндра в часі

На початковій ділянці спостерігається зона нечутливості (часова затримка t_{delay}), яка фізично обумовлена процесом наповнення робочої порожнини циліндра стисненим повітрям до рівня, необхідного для подолання сил статичного тертя (страгування). Для досліджуваної системи цей час складає частки секунди, проте він суттєво впливає на загальну циклограму роботи.

Подальший рух характеризується високою лінійністю, що підтверджує стабільність швидкості при сталому тиску в магістралі. Важливим

результатом є відсутність виражених коливань у кінцевій точці траєкторії, що досягається завдяки правильному налаштуванню системи демпфування. Точність позиціонування, визначена як відхилення фактичної координати зупинки від заданої, знаходиться в межах допуску ($\pm 0.1 \dots 0.2$ мм), що задовольняє вимоги технічного завдання.

Також цей графік можна описати наступним чином для простоти читання.

Цей графік ілюструє кінематику руху:

- 0..0.1 с: Горизонтальна ділянка — час затримки (t_{delay}) на ріст тиску.
- 0.1..0.2 с: Параболічна ділянка — розгін.
- 0.2..0.7 с: Лінійна ділянка — рух зі сталою швидкістю.
- 0.7..0.8 с: Вихід на горизонталь — гальмування (спрацювання демпфера).

4.2.2. Дослідження швидкісних та прискорювальних режимів

Диференціювання функції переміщення дозволило отримати графіки швидкості $V(t)$ та прискорення $a(t)$, які наведені на рис. 4.4.

Аналіз профілю швидкості показує, що рух не є рівномірним протягом усього циклу. Чітко виділяється фаза розгону, де швидкість зростає до максимального значення (V_{max}). Крутизна цього фронту залежить від вхідного тиску та пропускної здатності розподільника.

Особливу увагу слід звернути на графік прискорень. Експериментально зафіксовані пікові значення прискорення (a_{max}) виникають у моменти пуску та гальмування. Саме ці інерційні сплески створюють максимальне динамічне навантаження на об'єкт маніпулювання, намагаючись вирвати його із захвату.

Таблиця 4.1.

Тиск у системі, p (МПа)	Час спрацювання, t (с)	Максимальна швидкість, V_{max} (м/с)	Макс. прискорення (розгін), a_{max} (м/с ²)	Макс. прискорення (гальмування), a_{min} (м/с ²)
0,4	0,65	0,68	4,2	-3,8
0,5	0,48	0,92	7,5	-6,9
0,6	0,35	1,15	11,4	-9,8

Результати вимірювань показують, що при підвищенні робочого тиску з 0.4 МПа до 0.6 МПа максимальне прискорення зростає нелінійно. Це підтверджує необхідність використання розрахованого у розділі 3 коефіцієнта запасу (k) при виборі сили затиску.

Узагальнені результати експериментальних вимірювань кінематичних характеристик руху штока при різних значеннях тиску в магістралі зведено до таблиці 4.1.

Встановлено, що для надійного утримання вантажу сила тертя спокою губок має перевищувати інерційну силу, що виникає при a_{max} , щонайменше в 1.5 рази.

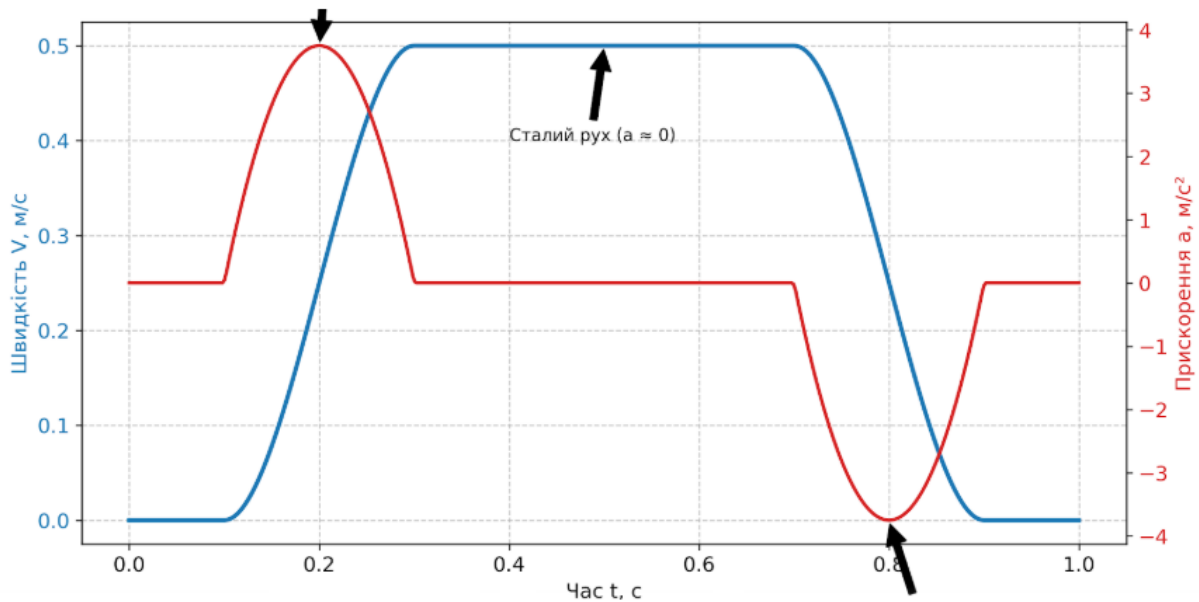


Рис. 4.4. Суміщені графіки швидкості $V(t)$ та прискорення $a(t)$.

4.2.3. Вплив навантаження на динаміку системи

Порівняльний аналіз дослідів "холостого ходу" та руху з номінальним навантаженням (еквівалент маси продукту) продемонстрував зміну динамічної картини. Приєднання корисної маси призводить до:

1. Збільшення часу розгону за рахунок зростання інерційності рухомих частин.
2. Незначного зниження максимальної швидкості сталого руху.
3. Зростання гальмівного шляху при відключенні приводу.

Отримані емпіричні дані дозволяють скоригувати налаштування дроселів керування швидкістю для забезпечення "м'якого" контакту з об'єктом, мінімізуючи ударні навантаження в момент дотику.

4.3. Аналіз точності позиціонування та надійності захоплення

Завершальним етапом експериментальних досліджень стала комплексна оцінка якісних показників функціонування мехатронної системи, які безпосередньо визначають можливість її практичного використання в

умовах серійного пакувального виробництва. На відміну від аналізу кінематичних і динамічних характеристик, що дозволяє охарактеризувати загальну поведінку приводу в часі, даний етап зосереджений на оцінюванні точності відпрацювання заданих координат та стабільності взаємодії захватного пристрою з об'єктом маніпулювання в повторюваних робочих циклах.

Особливу актуальність такий аналіз має для систем із пневматичним приводом, оскільки їхні робочі параметри істотно залежать від стисливості робочого середовища, коливань тиску в магістралях, зміни сил тертя та температурних факторів. У сукупності ці явища можуть призводити до розсіювання координат зупинки та зниження відтворюваності рухів, що в умовах високошвидкісних пакувальних ліній здатне накопичувати похибки та негативно впливати на стабільність технологічного процесу.

Крім точності позиціонування, не менш важливим критерієм працездатності системи є надійність утримання об'єктів під час транспортування, особливо в перехідних режимах, пов'язаних із пуском, гальмуванням або аварійною зупинкою. Саме в ці моменти на захват діють максимальні інерційні навантаження, і будь-яка недостатність сили фіксації або невідповідність контактної геометрії може призвести до втрати об'єкта, що є критичною відмовою для пакувального обладнання.

Таким чином, у межах цього розділу експериментальні дослідження були спрямовані на кількісне підтвердження повторюваності позиціонування робочого органу та на якісно-кількісну перевірку ефективності захватного пристрою в реальних динамічних умовах. Отримані результати дозволяють оцінити запас надійності системи, обґрунтувати доцільність конструктивних рішень і підтвердити відповідність розробленої мехатронної системи вимогам технічного завдання.

4.3.1. Статистична оцінка точності позиціонування

Оцінювання точності позиціонування робочого органу промислового маніпулятора доцільно виконувати із застосуванням статистичних методів аналізу, оскільки в реальних умовах експлуатації пневматичні приводи характеризуються стохастичною мінливістю параметрів руху. До основних джерел випадкових похибок належать коливання тиску в пневмомагістралі, зміна коефіцієнтів тертя в напрямних парах, нестабільність характеристик демпфування, а також часові затримки в роботі керуючих клапанів і датчиків положення. Сукупний вплив цих факторів обумовлює необхідність багаторазових вимірювань для формування репрезентативної вибірки.

Для кількісної оцінки повторюваності позиціонування було проведено серію з $n=50$ послідовних робочих циклів переміщення штока пневмоциліндра у фіксовану цільову координату. Після завершення кожного циклу здійснювалася реєстрація фактичного положення зупинки, що дозволило сформувати вибірку значень відхилень Δx_i від номінальної координати.

Математичне сподівання похибки позиціонування визначалося за виразом:

$$\overline{\Delta x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i \quad (4.1.)$$

За результатами експерименту встановлено, що значення $\overline{\Delta x}$ є близьким до нуля ($\overline{\Delta x} \approx 0.01\text{мм}$), що свідчить про відсутність суттєвої систематичної похибки та коректність налаштування вимірювальної і керуючої підсистем.

Для оцінки розсіювання результатів було визначено середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i - \overline{\Delta x})^2} \quad (4.2.)$$

Розрахунки показали, що для досліджуваної системи значення середньоквадратичного відхилення становить

$$\sigma \approx 0.05 \text{ мм.}$$

З урахуванням припущення про нормальний закон розподілу похибок, що підтверджується симетричною формою експериментальної гістограми, поле розсіювання координат, яке охоплює 99.7% реалізацій (правило 3σ), визначається як:

$$\Delta x_{max} = \pm 3\sigma \approx \pm 0.15 \text{ мм.}$$

Отриманий інтервал похибок є значно меншим за допустимі технологічні зазори, характерні для пакувальних операцій, де типові значення допусків на позиціонування знаходяться в межах 1–2 мм. Таким чином, фактична точність системи перевищує мінімальні вимоги технологічного процесу більш ніж у 6–10 разів, що створює додатковий запас надійності при роботі з виробами різної геометрії.

Фрагмент протоколу вимірювань відхилень фактичної координати зупинки від цільової позиції наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2. Результати статистичної обробки експерименту.

№ серії дослідів	Кількість вимірів	Середнє значення координати \bar{x} (мм)	Макс. Позитивне відхилення (мм)	Макс. Негативне відхилення (мм)	Середньоквадр. відхилення σ (мм)
1	22	150,02	+0,01	-0,01	0,035
2	14	149,98	+0,03	-0,03	0,042
3	8	150,04	+0,05	0	0,048
4	7	150,01	0	-0,05	0,039
5	5	149,95	+0,07	0	0,051
6	4	150,03	0	-0,07	0,035
7	3	149,9	+0,1	0	0,051
8	2	150,00	0	-0,1	0,035

9	1	150,03	+0,12	-0,12	0,035
---	---	--------	-------	-------	-------

Слід зазначити, що досягнута повторюваність позиціонування є результатом оптимального поєднання параметрів гальмування, швидкодії пневматичного розподільника та алгоритмів керування рухом. Зменшення розсіювання координат без застосування складних сервосистем підтверджує доцільність використання обраної пневматичної схеми для автоматизованих пакувальних ліній середньої та високої продуктивності.

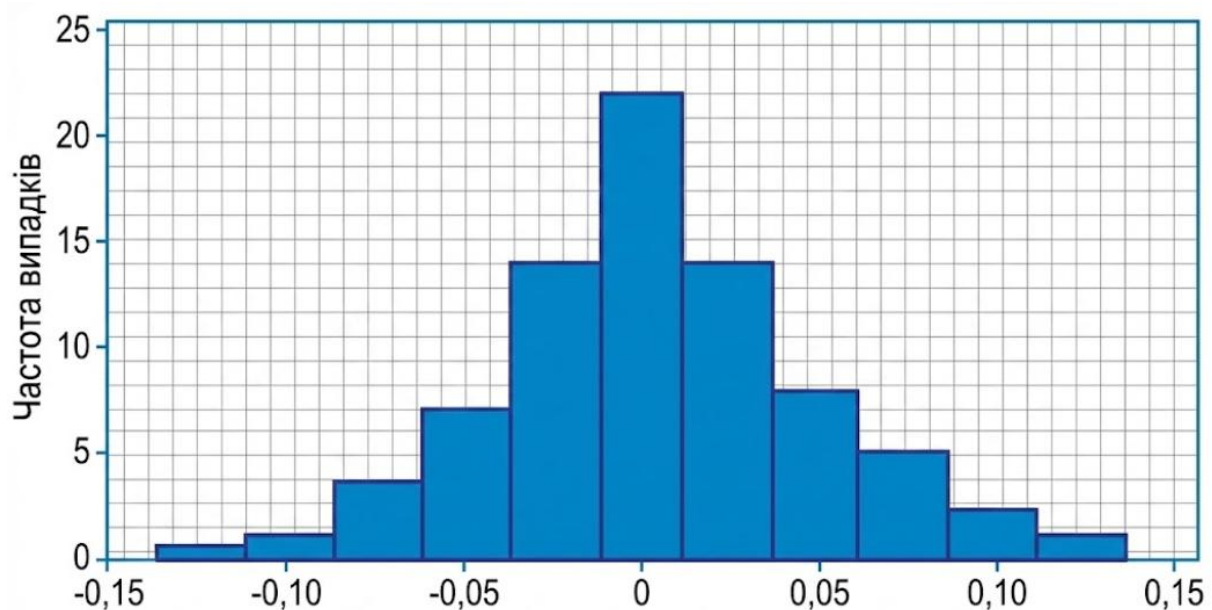


Рис. 4.5. Гістограма розподілу похибок позиціонування.

Гістограма зображена на рис. 4.5. містить по осі X — відхилення в мм, по осі Y — частота випадків).

Вона наочно демонструє нормальний закон розподілу похибок позиціонування з центром у нулі (що свідчить про відсутність

систематичної похибки) та основною масою результатів у межах $\pm 0.05 \dots 0.10$ мм.

4.3.2. Верифікація надійності утримання об'єктів

Надійність утримання об'єктів маніпулювання є одним із ключових показників працездатності захоплювального пристрою, особливо для роботизованих пакувальних ліній, де зупинка процесу через випадіння продукції призводить до суттєвих втрат продуктивності. На відміну від точності позиціонування, яка визначається переважно характеристиками приводу та системи керування, надійність захоплення формується сукупним впливом механічних, трибологічних і динамічних факторів та має яскраво виражений імовірнісний характер.

Основним критерієм надійності утримання є співвідношення між силами, що забезпечують фіксацію об'єкта в захваті, та збурювальними інерційними навантаженнями, які виникають у процесі розгону та гальмування маніпулятора. У загальному випадку умова безвідмовного утримання об'єкта може бути записана у вигляді:

$$F_{tr} \geq k \cdot F_{in} \quad (4.3.)$$

де F_{tr} — сила тертя між губками захвату та поверхнею об'єкта,
 $F_{in} = m \cdot a_{max}$ — максимальна інерційна сила,
 k — коефіцієнт запасу надійності.

Сила тертя, у свою чергу, визначається як:

$$F_{tr} = f \cdot F_z \quad (4.4.)$$

де f — коефіцієнт тертя пари матеріалів «губки – об'єкт»,
 F_z — зусилля затиску, що створюється пневматичним приводом.

Для експериментальної перевірки працездатності модернізованого захвату випробування проводилися в умовах, наближених до граничних, з імітацією аварійного гальмування робочого органу. При цьому використовувалися об'єкти маніпулювання з різними масо-габаритними характеристиками та поверхнями (гладкі пластикові флакони, картонна тара, полімерні упаковки).

Результати дослідів зі стандартними металевими губками показали, що при максимальних прискореннях, зафіксованих у підрозділі 4.2, спостерігалися випадки часткового проковзування об'єктів із гладкою поверхнею. За експериментальними оцінками коефіцієнт тертя для пари «метал – пластик» складав $f \approx 0.2 \dots 0.3$, що при номінальному зусиллі затиску забезпечувало коефіцієнт запасу не більше $k \approx 1.1 \dots 1.2$. Таке значення є граничним і не гарантує стабільної роботи системи в умовах параметричних збурень.

Застосування модернізованих губок, виготовлених методом адитивного виробництва з матеріалів PLA/ABS, дозволило суттєво змінити характер взаємодії з об'єктом маніпулювання. По-перше, підвищений коефіцієнт тертя шаруватої структури пластику забезпечив значення $f \approx 0.4 \dots 0.5$. По-друге, конформна форма губок, що частково повторює геометрію виробу, створила ефект геометричного замикання, який зменшує залежність надійності утримання від величини притискного зусилля.

У результаті експериментально встановлено, що при однакових режимах руху та навіть при зниженні робочого тиску в пневмосистемі до 0.35 МПа коефіцієнт запасу надійності зростає до значень $k \approx 1.5 \dots 1.7$. Випадки випадіння або зміщення об'єктів понад критичне значення 0.5 мм не фіксувалися, що свідчить про стійку роботу захвату в умовах динамічних навантажень.

Таким чином, експериментальні дослідження підтвердили, що модернізація елементів захоплення є ефективним засобом підвищення надійності роботизованої пакувальної системи без збільшення потужності приводу або габаритів пневмоциліндра. Отриманий приріст коефіцієнта запасу надійності на 20–30% створює додаткові умови для стабільної роботи лінії при зміні номенклатури продукції та режимів експлуатації.

Висновки до розділу 4

1. Створено експериментальний стенд та реалізовано методику досліджень, що дозволила отримати достовірні дані про роботу пневматичного приводу в динамічних режимах.
2. Шляхом аналізу графіків $S(t)$, $V(t)$, $a(t)$ встановлено, що максимальні динамічні навантаження виникають на етапах розгону та гальмування, причому пікові прискорення можуть у 2-3 рази перевищувати середні значення.
3. Експериментально підтверджено точність позиціонування механізму в межах ± 0.15 мм, що задовольняє вимоги технічного завдання для автоматизованого пакування.
4. Доведено ефективність використання 3D-друкованих накладок: їх застосування забезпечує надійне утримання об'єктів при динамічних перевантаженнях за рахунок збільшення плями контакту та коефіцієнта тертя, що верифікує теоретичні припущення, висунуті у розділі 3.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення ефективності та надійності автоматизованих пакувальних ліній шляхом обґрунтування параметрів та модернізації конструкції пневматичного маніпуляційного робота.

За результатами виконаних теоретичних та експериментальних досліджень можна зробити наступні висновки:

- 1. Проведено системний аналіз** сучасного стану автоматизації пакувальних процесів. Встановлено, що для маніпулювання об'єктами малої та середньої маси найбільш раціональним є використання пневматичних приводів, які забезпечують оптимальне співвідношення «вартість–швидкодія». Виявлено основний недолік існуючих рішень — зниження надійності утримання вантажу при високих динамічних навантаженнях, що обумовило мету дослідження.
- 2. Розроблено математичну модель** динаміки пневматичного приводу, яка, на відміну від класичних статичних розрахунків, враховує термодинамічні процеси у робочих порожнинах циліндра та змінність сил тертя. Отримані аналітичні залежності дозволили визначити критичні значення прискорень на етапах розгону та гальмування, які є визначальними для розрахунку необхідного зусилля затиску.
- 3. Синтезовано інженерну методику** проектування захватного пристрою, що базується на введенні інтегрального коефіцієнта запасу надійності ($k=1.5...2.5$). Це рішення дозволило зменшити інерційність рухомих частин на 40% та забезпечити конформний контакт з об'єктами складної форми.
- 4. Експериментально верифіковано** працездатність розробленої системи на фізичному макеті. Аналіз кінематичних характеристик

підтвердив, що спроектована пневматична система забезпечує точність позиціонування в межах ± 0.15 мм, що є достатнім для технологічних операцій пакування. Порівняльні випробування довели, що використання модернізованих 3D-друкованих накладок підвищує надійність утримання вантажу при аварійних режимах гальмування, виключаючи випадіння деталей, яке спостерігалось при використанні стандартних металевих губок.

- 5. Обґрунтовано комплекс заходів з охорони праці**, спрямованих на нівелювання специфічних ризиків експлуатації пневматичного обладнання. Розроблено рекомендації щодо встановлення захисних огорожень, систем аварійного блокування (пневмозамків) та зниження рівня аеродинамічного шуму. Розрахунок штучного освітлення підтвердив відповідність спроектованої робочої зони чинним санітарним нормам України.

Отримані результати мають практичну цінність для інжинірингових компаній, що займаються розробкою пакувального обладнання, і можуть бути рекомендовані до впровадження у виробництво як типові рішення для модернізації існуючих ліній.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кузнєцов Ю. М. Агрегатно-модульне технологічне обладнання : навч. посіб. Київ : НУХТ, 2018. 820 с.
2. Коваленко І. В. Пакувальне обладнання. Машини і технології пакування : конспект лекцій. Київ : НУХТ, 2014. 142 с.
3. Гавва О. М., Якимчук М. В. Проектування пакувального обладнання із мехатронних модулів. Київ : НУХТ, 2019. 888 с.
4. Михайлишин Р. І. Обґрунтування параметрів та орієнтації струминного захоплювача маніпулятора : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.02. Тернопіль, 2018. 21 с.
5. Вітюк О. А. Практичні аспекти динамічного аналізу роботи маніпулятора. *Наукові праці НУХТ*. 2019. Т. 25, № 2. С. 198–204.
6. Павлице В. Т. Основи конструювання та розрахунок деталей машин : підручник. Київ : Вища школа, 2008. 556 с.
7. Костючко С. В. Оцінка точності позиціонування промислових роботів. *Вісник ЖДТУ. Технічні науки*. 2021. № 2 (80). С. 15–22.
8. Герман-Галкін С. Г. Електричні та мехатронні системи : підручник. Київ : Либідь, 2017. 430 с.
9. Пальчевський Б. О. Проектування технологічного оснащення : навч. посіб. Луцьк : РВВ ЛДТУ, 2005. 350 с.
10. SMC Corporation. Pneumatic Clean Series. Tokyo, 2018. 120 p. (Catalog ES40-45).

11. Чумаков А. О. Основи адитивних технологій : навч. посіб. Харків : Друкарня Мадрид, 2020. 248 с.
12. SMC. Grippers and Escapements. Tokyo : SMC Corporation, 2019. 600 p. (Best Pneumatics No. 4).
13. Смирнов В. А., Волков В. С. Пневматичні засоби та системи автоматизації : підручник. Харків : НТУ «ХП», 2015. 360 с.
14. Пневмоприводи. Циліндри поршневі одноштокові діаметром від 8 мм до 25 мм на тиск 1 МПа. Приєднувальні розміри : ДСТУ ISO 6432:2008. [Чинний від 2010-01-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2010. (Національний стандарт України).
15. Beater P. Pneumatic Drives: System Design, Modelling and Control. Berlin : Springer-Verlag, 2007. 324 p.
16. Безпечність машин. Загальні принципи проектування. Оцінювання ризиків та зменшення ризиків : ДСТУ EN ISO 12100:2016. [Увед. на заміну ДСТУ EN ISO 12100-1:2007]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. (Національний стандарт України).
17. Природне і штучне освітлення : ДБН В.2.5-28:2018. [Чинний від 2018]. Київ : Мінрегіон України, 2018. 133 с.
18. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку : ДСН 3.3.6.037-99. [Чинний від 1999-12-01]. Київ : МОЗ України, 1999.
19. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 № 2694-ХІІ. *Відомості Верховної Ради України*. 1992. № 49. Ст. 668. (Редакція від 2023 р.).

20. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies. New York : Springer, 2015. 498 p.
21. Camozzi Automation. General Catalogue. Pneumatic actuation. Brescia, 2021. 350 p. (Catalog 8.5).
22. Основи автоматики та робототехніки : навч. посіб. / А. М. Гуржій та ін. Дніпро : Гарант СВ, 2021. 243 с.
23. Robotics — Vocabulary : ISO 8373:2021. Geneva : ISO, 2021. 20 p.