





## РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота на тему: «Оптимізація режиму руху робота-маніпулятора з важільним захватним пристроєм».

У роботі проведено аналітичне дослідження конструкції, кінематики та динаміки робота-маніпулятора, а також проведено оптимізацію режиму його роботи з урахуванням енергетичних і навантажувальних параметрів.

Розглянуто класифікацію та технічні характеристики сучасних роботів-маніпуляторів, проаналізовано існуючі конструкції важільних захватних пристроїв та їх вплив на точність і стабільність робочих процесів. Виконано динамічне моделювання ланки маніпулятора, визначено основні параметри руху та проведено розрахунок зусиль, що діють у вузлах конструкції.

Запропоновано режим оптимізації руху з метою зниження динамічних навантажень і підвищення ефективності роботи маніпулятора. Отримані результати дозволяють покращити плавність пуску і гальмування системи, зменшити енергоспоживання та підвищити надійність привідного механізму.

Окремо розглянуто питання охорони праці та економічної доцільності впровадження оптимізованого механізму в промислових умовах.

Ключові слова: робот-маніпулятор, важільний захватний пристрій, динамічний аналіз, оптимізація, привід, режим руху, енергоефективність.

## ЗМІСТ

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Реферат.....</b>  | <b>3</b>  |
| <b>Зміст.....</b>  | <b>4</b>  |
| <b>Вступ.....</b>  | <b>5</b>  |
| <b>Розділ 1. Огляд параметрів та досліджень робота маніпулятора з важільним захватним пристроєм.....</b>       | <b>7</b>  |
| 1.1 Класифікація, будова та технічні характеристики роботів маніпуляторів з важільним захватним пристроєм..... | 7         |
| 1.2 Динамічний аналіз при роботі роботів маніпуляторів.....  | 19        |
| 1.3 Оптимізаційні дослідження роботи робота маніпулятора.....  | 25        |
| <b>Розділ 2. Оптимізація режиму пуску приводної ланки захвату маніпулятора.....</b>                            | <b>28</b> |
| 2.1 Силовий розрахунок захватного пристрою.....  | 28        |
| 2.2 Визначення оптимального режиму руху приводного елемента захвату...34                                       | 34        |
| 2.3 Результати оптимізації режиму руху приводної ланки захвату.....  | 39        |
| <b>Розділ 3. Охорона праці.....</b>  | <b>42</b> |
| <b>Розділ 4. Економічна ефективність.....</b>  | <b>47</b> |
| 4.1 Загальні положення.....  | 47        |
| 4.2 Критерії для оцінки економічної ефективності нової техніки.....  | 48        |
| 4.3 Оцінка економічної ефективності та висновки.....   | 52        |
| <b>Висновок .....</b>  | <b>54</b> |
| <b>Перелік літератури.....</b>   | <b>55</b> |
| <b>Додатки.....</b>  | <b>61</b> |

## ВСТУП

Розвиток сучасної промисловості та виробничої автоматизації вимагає впровадження високоефективних робототехнічних систем, здатних виконувати складні технологічні операції з високою точністю, швидкістю та надійністю. Одним із ключових елементів таких систем є роботи-маніпулятори, які активно застосовуються в машинобудуванні, аграрному виробництві, логістиці та інших галузях.

Одним із головних факторів, що визначає ефективність роботи робота-маніпулятора, є режим руху його механізмів. Від нього залежать плавність роботи, енергоспоживання, довговічність вузлів і точність виконання операцій. Особливе значення має робота важільного захватного пристрою, який безпосередньо взаємодіє з об'єктом маніпулювання та визначає стабільність технологічного процесу.

Актуальність теми полягає у необхідності оптимізації руху маніпулятора з важільним захватним пристроєм з метою зниження динамічних навантажень і підвищення енергоефективності приводу.

Зменшення коливань і ударних навантажень під час пуску, зупинки та зміни напрямку руху сприяє не лише покращенню точності, але й підвищенню ресурсу роботи механічних елементів.

Метою магістерської кваліфікаційної роботи та обґрунтування оптимальних режимів роботи робота-маніпулятора з важільним захватним пристроєм, що дозволять підвищити ефективність переміщення вантажів. Це має на увазі зменшення енергетичних затрат, зменшення часу на виконання роботи...

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз існуючих конструкцій роботів-маніпуляторів, вчасності з важільним захватним пристроєм

2. Розглянути перспективи створення нових конструкцій, провести аналіз динамічних досліджень та досліджень присвячених оптимізації роботів-маніпуляторів з важільним захватним пристроєм
3. Виконати розрахунок робота-маніпулятора з важільним захватним пристроєм
4. Оптимізувати режим роботи робота-маніпулятора з важільним захватним пристроєм
5. Розглянути питання охорони праці при роботі робота-маніпулятора з важільним захватним пристроєм
6. Виконати розрахунок економічної ефективності використання робота-маніпулятора з важільним захватним пристроєм

Об'єкт дослідження — процес руху робота-маніпулятора з важільним захватним пристроєм.

Предмет дослідження — динамічні характеристики механізму та параметри, що впливають на ефективність і плавність руху.

Методи дослідження — аналітичне та математичне моделювання, динамічний аналіз, методи оптимізації.

Практична значущість роботи полягає у можливості застосування отриманих результатів для проектування нових та вдосконалення існуючих робототехнічних систем із підвищеними показниками надійності, енергоефективності та безпеки експлуатації.

## РОЗДІЛ 1.

### ОГЛЯД ПАРАМЕТРІВ ТА ДОСЛІДЖЕНЬ РОБОТА МАНІПУЛЯТОРА З ВАЖІЛЬНИМ ЗАХВАТНИМ ПРИСТРОЄМ

#### 1.1 Класифікація, будова та технічні характеристики роботів маніпуляторів з важільним захватним пристроєм.

Даний розділ формується на дослідженні та огляді роботи маніпулятора з важільним захватним пристроєм. Пед тим як прейти до теми даної магістерської роботи більш детально оглянемо такі терміни: «Робот», «Маніпулятор», «Захват».

**Робот** – автоматична машина, яка включає в себе прилад управління, який потрібно програмувати, та багато інших засобів, які забезпечують виконання тих чи інших задач і дій, що повина виконувати людина в своїй трудовій діяльності. Після трьох (3) етапів розвитку робототехніки найбільш досконалий робот являє собою машину яка самостійно так і в комплексі здатна здійснювати задачі самоуправління, повноцінї адаптації з навколишнім середовищем та виконання трудової діяльності. Загальною на даний час рисою роботів є можливість переналадки для автоматичного виконання різних дій, передбачених програмою. [5]

**Маніпулятор** – прилад для виконання рухомих функцій аналогічним функціям руки людини при переміщені об'єктів у доступному просторі. Кінцеві ефектори, які використовуються для захоплення заготовок, називається захватами. [5, 6]

**Захват** – це пристрій, який утримує обекти для маніпулювання і дати переносити їх і відпускати під час виконання певних запрограмованих дій. Захват є важливою частиною промислових роботів що взаємодіє з середовищем

і об'єктами що потрібно захопити для виконання маніпулятивних завдань. Зазвичай захват – це спеціально спроектований елемент, який утримає один або декілька об'єктів однакової форми, розміру та маси під час повторюваних чи специфічних операцій. Серед найзначніших внесків дослідженні захватних пристроїв варто відзначити дослідження таких науковців Raval S., Patel B. [6]. Головне розуміти також процес захвату адже правильно спроектований захват може полегшити в подальшому збірку всієї роботизованої системи. Він також підвищує загальну надійність системи та знижує вартість впровадження системи.

### **Процес захвата**

Складність процесу захоплення часто не дооцінюють, адже створення перших захватів відбувались по типу руки людини. Проте автоматизація цього процесу створює чимало проблем. Проектування захвату залежить від характеристик деталі, яку потрібно захопити, і також таких етапів як подача, транспортування, позиціювання і відпускання. Іншими словами правильно подані деталі потребують менш універсальних захватів, тоді як по суті потреби у високому прискоренні, позиціюванні та високоточному відпусканні накладає обмеження на вибір захвату.

Процес захвату можна розділити на такі етапи (Рис. 1.1):

1. Наближення до об'єкта: Позиціювання поблизу об'єкта.
2. Встановлення контакту: На цьому етапі відбувається контакт захвату з деталлю.
3. Збільшення сили: Сила зтиску має бути в межах доступного, щоб деталь не пошкодилася і не випала з губок.
4. Фіксація об'єкта: Після застосування відповідної кількості сили об'єкт повністю позбавляється ступенів свободи та перестає рухатись.
5. Переміщення об'єкта: На цьому етапі об'єкт переміщується до бажаного місця.
6. Відпускання об'єкта: В основному на макрорівні відпускання здійснюється за рахунок сили тяжіння.

## Процес відпускання

Загалом відпускання об'єкта відбувається за рахунок сили тяжіння, коли подання сили на захоплення приривається. Однак у деяких випадках сили тяжіння не достатньо, адже залишкові сили зберігаються і після їх деактивації, наприклад у магнітних захватних пристроях або адгезивних захоплювачів на мікрорівні. Тому потрібні як активні (за рахунок додаткових сил), так і пасивні стратегії відпускання та контролю процесу. [6]

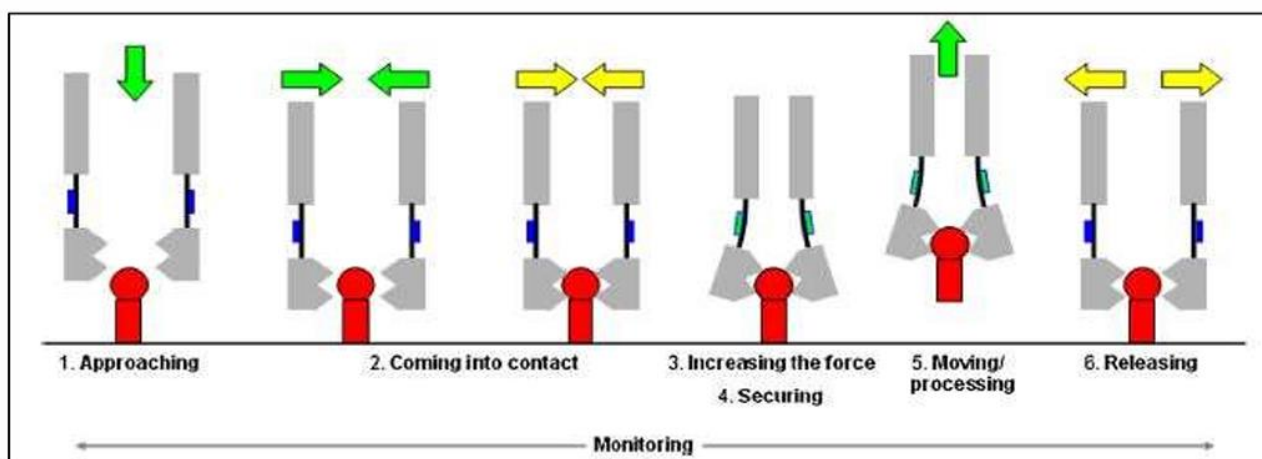


Рис. 1.1. Етап процесу захоплення.

## Вступ до класифікації

Важільний захватні пристрої маніпуляторів в основному різноманітні і створені під певні моделі дій, тому відрізняються за конструкцією, провідними механізмами та сферами застосування. Класифікація таких пристроїв дозволяє цілеспрямовано розробляти системи для конкретних технічних задач, забезпечуючи оптимальний баланс між силою захвата, точністю та швидкістю.[2]

### Типи захватних пристроїв

Кінцівка захватного пристрою що між роботизованою рукою та кистю в основному називають зап'ястком робота. Залежно від застосування може мати один або декілька ступенів свободи. Плече і зап'ясток робота використовується для позиціювання кінцевого ефектора. Саме цей кінцевий ефектор виконує роботу. Захватний пристрій має стати в позицію і захопити, підняти і



секторі для завдань, що включає захоплення та маніпулювання в незалежності від форми деталі.

Трьохважельні грипери - це механізм що має три важелля. Зазвичай не такі популярні як двохпальцеві, але часто використовуються у випадках, коли потрібно підвищена точність маніпулювання об'єктами або делікатне поводження з крихкими предметами, в основному робота з склом і часто використовують в медицині. В основному трипальцеві грипери створюють з м'якими захватами, адже коли використовують жорсткі захвати у більшості сценаріях може ускладнити керування системою і збільшує витрати.

Гібридний важільний пристрій – складніші конструкції, де рух кількох важелів комбінується для точної адаптації форми захвата під дією різних об'єктів. В даному випадку приведення в дію зазвичай вимагає кілька шарнірів та додаткових механічних з'єднань, кожне з яких часто вимагає незалежного керування. Через велику кількість з'єднань система керування стає складнішою через необхідність точної координації окремих виконавчих механізмів та безперервного зворотнього зв'язку. На противагу складності налаштування даний захват працює з простою логікою вмикання/вимиканням що зменшує складність керування. Зазвичай в основному використовуються м'які захвати. Вони характеризуються здатністю деформуватися, тим самим забезпечується більша площа контакту для захоплення та більший діапазон руху порівняно з жорсткими аналогами. Свою назву «Гібридні» отримали свою назву через те що містять жорсткі матеріали у м'яких захватах, що підвищує їхню структурну цілісність та вантажопідйомність. Данний тип механізму позитивно себе продемонстрував в тиску на кінчиках захватів перевищуючи тиски стандартних м'яких зажимів в 1,5-2 рази, тому його використання збільшилось у сферах де потрібна вища точність і обробка більших вантажів.[1]



Рис.1.3. Класифікація типом захватного пристрою. [6]

### Класифікація по типу привода

В основному для важильних захватних пристроїв використовують три типи привода – електричний, пневматичний та гідравлічний. Загалом ще є вакуумний та магнітні приводи.

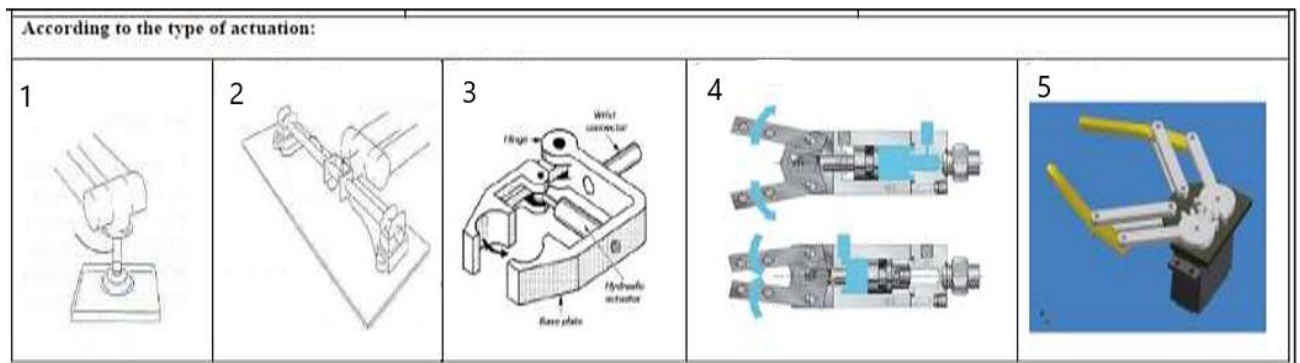


Рис.1.4. Класифікація за типом привода,

- 1) Магнітний; 2) Вакуумний; 3) Гідравлічний; 4) Пневматичний; 5) Електричний.

Електричний привід – використовує електродвигуни, серводвигуни або крокові двигуни, які перетворюють електричну енергію в механічний рух важелів або губок грипера. Помітними перевагами даного типу є легкість керування, зниження витрат на обслуговування та висока робоча швидкість. Регулювання швидкості та сили захоплення в захватах, які використовують даний привід, здійснюється за допомогою мікропроцесорів що, у поєднанні з їхньою значною адаптивністю, дозволяє їм обробляти більший список об'єктів.

З недоліків менша сила захоплення порівняно з гідравлічним приводом, через це не використовується у сферах з важкими об'єктами. Використовується в електроніці, точному машинобудуванні та в основному в лабораторіях і медицині.

Пневматичний привід – це привід який працює в основному за рахунок стисненого повітря, що подається від компресора через пневмосистему. Пневматичне керування є критично важливим компонентом у галузі роботизованого захоплення, де маніпулювання процесами та об'єктами досягається контрольованим тиском за допомогою пневматичних засобів. Цей привід і його конструкція спрямована на забезпечення надійних захоплень при мінімальному використанні тиску, тим самим підвищує ефективність захоплення коли об'єкт закріплений. Обмеження в основному складає потенційна проблема з витоком повітря та точністю керування при цьому. Також в силі поступається гідравлічному приводу. Широко використовується там де потрібна гнучкість та адаптивність. Встановлюють у використанні на виробничих лініях, автоматизованих пакувальних системах та у роботах для транспортування деталей.

Гідравлічний привід – це привід що працює на основі рідиного тиску, з використанням мастильних або спеціальних гідравлічних рідин. Даний тип приводу вимагає регулярного технічного обслуговування для забезпечення оптимальної функціональності. Гідравлічний привід і пневматичний по будові дуже подібні, ці пристрої теж містять камери, які змушені бути під тиском для створення руху. Вибір гідравлічної системи зазвичай обумовлений її керованістю, ефективністю та мінімальним витками, але рідко використовують в умовах де чистота є першочерговою у роботі з об'єктами. Недоліки в постійному технічному обслуговуванні та більш складне налаштування, обробка рідини. Натомість підходить для застосування, що вимагають високої сили або потужного захоплення. Гідравлічні грипері застосовуються у важких маніпуляторах, вантажопідйомних роботах, будівельних, військових і промислових системах.[1]

Вакуумний привід – відомий своєю універсальністю та ефективністю при можливості захоплення, в основному виготовлені з таких матеріалів, як поліуритан, гума або піна. Даний тип за допомогою змінного тиску або розрідження повітря в замкнутій порожнині робочого елемента – присосок. Розрізняють активні вакуумні хватні пристрої, в яких розріджене повітря створюється примусово за допомогою вакуумних насосів або ежекційних пристроїв, і пасивні, в яких розріджене повітря створюється за допомогою його витіснення при деформації робочих елементів. Недолік в принципі застосування, підходять тільки для рівних поверхонь і не пристосовані для роботи з малими об'єктами. Використовують в основному при роботі при підйомі листових, гладких або крехких матеріалів та роботи з продукцією яка не передбачає пошкоджених поверхонь.

Магнітний привід – це привід який утримує об'єкт при дії магнітних сил, що створені постійним магнітом або електромагнітом. Застосовують металургії, машинобудуванні, автоматизованих цехах. Легкі в обслуговуванні і не потребують фізичного контакту, можуть швидко вмикатись і вимикатись. [5]

### **Будова робота маніпулятора**

Робот-маніпулятор з важільни заїватним пристроєм як і звичайні роботи складається з основних ключових елементів, які пов'язані конструктивно та функціонально, що забезпечує ефективне виконання завдань маніпулювання. Отже коротко розглянемо що може входити в будову:

- Конструктивні елементи – це одна із основних це опора, яка забезпечує стійкість системи, каретка для лінійного руху, також важливий елементом буде колона для обертального руху, також в будові використовують багатоланкову руку з кінематичними парами – саме до неї кріпиться захват. І в кінечному результаті безпосереднь важільний грипел з приводом і хватними пальцями.[7]
- Основний механізм руки маніпулятора – це багатоланковий важільний механізм що забезпечує рухомість і маневреність робочого органу. Має 2-3 рухомі ланки як з обертальними так і поступальними кінематичними парами.

Дані пари уже і формують систему координат в якій рухається маніпулятор, тобто його робочу зону. Рух даного механізму може здійснюватись приводами що можуть бути електричні, пневматичні чи гідравлічні, які ми раніше згадували, но тут вибір привода на пряму буде залежити від потреб. Також у себе включає систему датчиків і управління для точного позиціювання.[1,7]

- Важільний захватний пристрій – робочий орган, який виконує основні функції це захоплення і утримання об'єкта. Може включати в себе пальці чи інші поширені захватні елементи, що рухаються за допомогою важільних механізмів, що активується приводами. Цей механізм створює механічну перевагу для забезпечення необхідної сили захвату при заданій точності, відповідно мінімізуючи будь які ризики пошкодження об'єкта з яким працюють.[1-2]
- Приводи і передавальні механізми – використовуються щоб приводити в рух усього робота, зрозуміло що різні приводи які вже обераються по тим чи іншим потребам забезпечать рух захвату: електричні двигуни з редукторами, пневматичні і гідравлічні приводи.[1]
- Система управління – програмована складова робота маніпулятора яка здійснює контроль рухів, регулює позицію, швидкість і силу захвату, прискорення до об'єкта. Також отримує зворотній зв'язок датчиків ( на рахунок положення, сили та ін.). Сучасні системи керування у більшості випадків впроваджують адаптивні алгоритми і штучний інтелект для поліпшення ефективності, збільшення продуктивності та безпеки. [3]
- Кінематична структура – це частина будови що відповідає за степені рухливості маніпулятора. У більшості з них 5-6 ступенів рухливості ( 3 лінійних і 3 кутових), що необхідні для повного позиціювання та адаптації об'єкта. Рухи в системі координат забезпечуються за допомогою поступальних та обертальних пар, які суміщені для забезпечення точності руху і гнучкості системи. [7].

Вище перелічені це основні пункти що включає в себе будова робота маніпулятора, але не потрібно думати що вони не зміні. Під кожен роботу, буде використовуватись свій тип приводу, своєрідний тип захватного пристрою і встановлюватиметься своя нова чи оновлена система керування. Також і специфічними є вибір важільного захватного пристрою, але більш цікавою в будові і використанні. Наприклад система приводів важелів створює механічну перевагу, дозволяючи використовувати менш потужні приводи на вході головне при цьому досягаючи великої сили захвату з контрольованою точністю і гнучкістю.

Власну будову має і захватний пристрій в даному випадку розглянемо будову захватного пристрою промислового робота, який складається з пневмоциліндра – 1, поршня – 2, з штука – 3, затискних важелів – 4 і як вони приєднані до штока(3), затискні елементи – 5, ексцентрика – 8, а ще суміщеними з затискними важілями(4) рухомих затискних елементів – 7.[8]

Приклад захватного пристрою на рис. 1.5

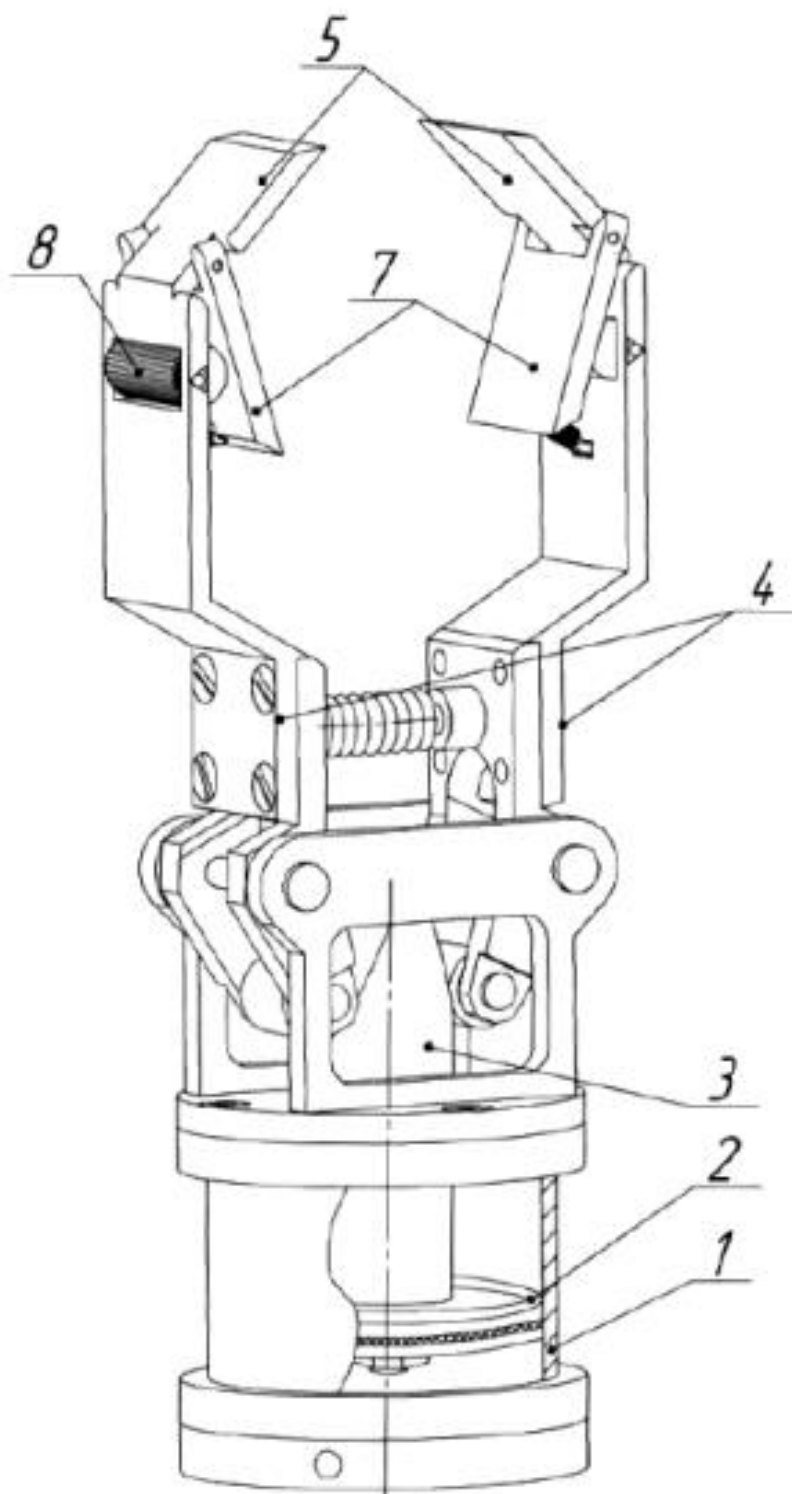


Рис. 1.5. Захватний пристрій промислового робота.

### **Технічні характеристики робота маніпулятора.**

Основні технічні показники визначаються передбачуваною областю застосування й умовами виробництва, для яких призначений робот. Основні параметри включають:

- **Вантажопідйомність** робота визначається як сумарна вантажопідйомність його його захватного пристрою.
- **Вантажопідйомність захвату** – це найбільша маса об’єктів маніпулювання, які можуть переміщатись захватним пристроєм при заданих умовах, тобто при максимальній або мінімальній швидкості та при максимальному вильоту захвата.

Для деяких типів робіт важливим показником є зусилля що застосовується виконавчим механізмом при заданих умовах. До таких показників можна віднести зусилля які покладаються на захват об’єкта маніпулювання, тобто робоче зусилля захвата уздовж її поздовжньої осі; крутний момент при ротації захватного пристрою.

- **Число ступенів рухомості** – це сума рухомості маніпулятора щодо кількості простору і координат відносно опорної системи.
- **Погрішність позиціонування** – це відхилення заданої позиції виконавчого механізму (захвату) маніпулятора від потрібної при багаторазовому позиціонуванні. Погрішність позиціонування частіше оцінюється в лінійних або кутових одиницях. Загалом що стосується робота маніпулятора важливим показником є сумарна погрішність позиціонування всіх виконавчих механізмів, що відрізняється від заданого по програмі роботи. Таким показником називають погрішність позиціонування робочого органа. Даний показник також визначається як величина відхилення робочого органа від запрограмованого першопочаткового завдання.
- **Погрішність відпрацювання траєкторії** – це відхилення робочого органу від першопочаткової (фактичної) траєкторії від заданої програмою.
- **Робоча зона** маніпулятора – це простір, у якому перебуває робочий орган при повному функціонуванні маніпулятора.
- **Зона обслуговування** – це відповідна частина робочої зони, де повністю зберігаються задані значення технічних характеристик робота.
- **Мобільність** маніпулятора – це його можливість робити рухи. По мобільності роботи підрозділяють на дві групи: стаціонарні і пересувні.[7]

Технічні характеристики існують також індивідуального типу. До таких відносять: габарити і вага; тип приводу і енергоспоживання; швидкість захвату; сила захвату.

Ознайомившись з даною інформацією дійшов до висновка що загальний вигляд можна продемонструвати, як структурну схему робота маніпулятора, основні елементи та робочі органи на рис. 1.6.

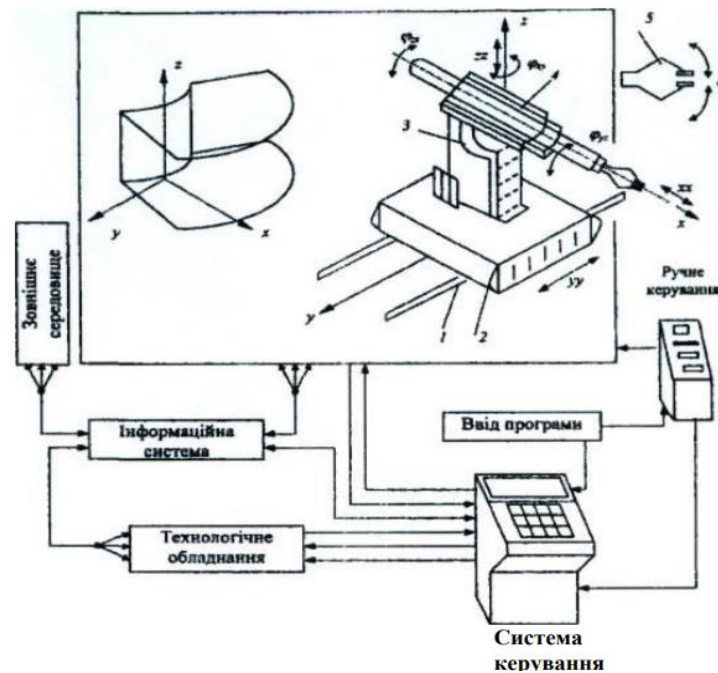


Рис. 1.6. Структурна схема автоматичного маніпулятора.[4]

Провівши аналіз характеристик під час обробки матеріалу дійшов висновку, що важельні грипери надають оптимальне співвідношення між вантажопідйомністю і точністю, оскільки механічна перевага важелля дозволяє підсилити силу захвату без суттєвого збільшення розмірів приводу. Для делікатних операцій досягається висока точність позиціювання, при тому що швидкість захвату може бути достатньою промислових циклів.[3]

## 1.2. Динамічний аналіз при роботі роботів маніпуляторів.

**Актуальність та Фундаментальні проблеми Динамічного аналізу.**

Стрімке зростання вимог до точності, швидкості та надійності промислових роботизованих маніпуляторів у високотехнологічному виробництві зробило динамічний аналіз невіддільною частиною інженерної та наукової практики. Підчас дослідження зрозуміло, що інформацію, яку надають виробники роботів щодо динамічних параметрів роботизованих систем (інерційних властивостей, тертя, та загальних параметрів кінематичних з'єднань), обмежена і навіть відсутня [9]. У даний час промисловий ландшафт переходить до нового етапу у розвитку, тепер роботизовані системи залучені до критично важливих операцій, це що стосується складання мікроелектронних компонентів, високошвидкісних маніпуляцій в аерокосмічній галузі та в основному в місцях де небезпечно для людини. В даних умовах, мінімальні динамічні помилки, спричинені різними зовнішніми і внутрішніми факторами по типу: інерцією, вібрацією або нелінійностями, можуть призвести до великих економічних затрат, браку або пошкодження продукції, а в гірших випадках призводить до небезпечних ситуацій.

Як зазначають Lida Zhu та її колеги [16], роботизовані маніпулятори довели свою важливість у заміщенні людини в повторювальних і небезпечних завданнях, але це якщо враховувати на рахунок габаритних робіт – як перекладання паків з водою, або збирання машин. Проте для виконання більш точних, важливих та критичних завдань необхідне на постійній основі глибоке дослідження їх динамічних характеристик та керування рухом [16]. Claudius Birk, Martin Kipfmüller, JanKotschenreuther [11] підкреслюють, що в сучасних галузях, таких як аерокосмічна промисловість та мікромеханіка, саме динамічна поведінка часто обмежує кінцеву продуктивність та якість, що вимагає впровадження високоточних динамічних моделей. Небажані динамічні ефекти, що періодично з'являлись, включаючи пружні деформації ланок, вібрацій, спричинені гнучкістю суглобів, та не лінійні ефекти тертя, повинні бути точно змодельовані та компенсовані в контурі керування, це важливо щоб досягти дуже високої точності [11].

Проте, розробка та впровадження вище перелічених моделей нашою хується на фундаментально проблему: нехватка першоначальної інформації та не можливість більшості із роботизованих систем до програмування, налагодження в повноцінній мірі та адаптаційних можливостей деяких приладів [ 9, 15]. Також існують і такі критичні параметри, що включають інерційні властивості ланок. Vicente Mata та його співатори [9], схильники тиорії що традиційні методи та підходи до визначення цих параметрів є мягко кажучи неадекватними: пряме вимірювання є не практичним адже конструктивно б приходилось розбирати робота, а використання моделей із САПР – систем (CAD) не може повністю продемонструвати і визначити параметри, що залежать від умов експлуатації, що включає в себе тертя та фактичний розподіл мас при роботі. Таким чином, ідентифікація динамічних параметрів є критично важливою, оскільки точність моделі безпосередньо визначає якість алгоритмів керування маніпуляцій [15]. Тому і існує нагальна потреба в розробці ефективних, надійних та економічно вигідних процедур ідентифікації для створення точних динамічних моделей, які є основою для передових алгоритмів керування [ 9, 15].

### **Фундаментальна теорія динамічного моделювання та Лінеаризацію.**

Аналітичне описання динаміки багатоланкових роботизованих систем є основною точкою для ідентифікації і керування. Хоча в основному можна скористатися методом Лагранжа або методом Ньютона – Ейлера [12], в основному другий метод вибирають через його обчислювальні ефективності для динамічних обчислень в реальному часі.

Розглянемо загальну форму динамічних рівнянь для  $n$  – ланкового маніпулятора що описує необхідні крутні моменти ( $\tau$ ), є універсальною та нелінійною:  $\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + \tau_f(\dot{q})$ .

Тут  $M(q)$  – матриця інерції  $C(q, \dot{q})\dot{q}$  – члени Коріолісових та відцентрових сил,

$G(q)$  – вектор гравітаційних сил,  $\tau_f(q \dot{\cdot})$  – вектор крутного моменту тертя [12,16].

Emmanuel S. Agbaraji та його колеги [12] розглядали у своїй роботі спрощену Схему Незалежних З'єднань (IJS) для 3-DOF маніпулятора, дана система просто ігнорує динамічні взаємодії між ланками. Хоча такий підхід спрощує керування, але його обґрунтування відбувалось лише при низьких швидкостях, а для високої точності необхідно враховувати усі члени динаміки [12].

Ключовим кроком для ідентифікації є перетворення цих нелінійних рівнянь у лінійну форму відносно вектора динамічних параметрів ( $\theta$ ):  $\tau = Y(q, q \dot{\cdot}, q \ddot{\cdot}) \cdot \theta$ . Wenhui Huang та його співавтори [15] підкреслюють, що ідентифікація динамічних параметрів є критично важливою, і її точність безпосередньо впливає на продуктивність керування. Mata V та інші [9] деталізують, що  $Y$  являється матрицею регресора ( ідентифікаційною матрицею), що складається з вимірювальних кінематичних змінних. При дослідженні вони наголошують, надмірність параметрів та через дефіцит рангу необхідне зведення її до множника – Базових параметрів ( $\theta_B$ ), які є незалежними та можуть бути однозначно ідентифіковані з вимірювань [9].

### **Порівняльний аналіз удосконаленого моделювання: Гнучкість та Нелінійне тертя**

Вимоги для дуже високої точності змушували дослідників виходити за рамки класичних моделей жорсткого тіла, враховуючи гнучкість кінематичних з'єднань та ланок як домінуюче джерело динамічної похибки. Також приходячи до висновку що в більшості випадків комбінована процедура методу є гнучкою у застосуванні ідентифікацій динамічних параметрів [10].

Вигляд гнучкості з'єднань та залежність динаміки від пози.

Claudius Birk та ін. [11] зосередили увагу на промислових роботах з гармонійними приводами (HD), які вносять складні нелінійності, такі як нелінійна жорсткість на кручення та гістерезисні ефекти. Вони провели порівняння, показавши, що розширена 24-параметрична модель, яка вперше включає ефективну поперечну податливість суглобів, значно перевершує

простішу 12-параметричну модель. Ця складна модель дозволяє точно відображати динаміку роботи аж до частот приблизно 200 Гц, що є критичним для високоточних завдань [11]. Крім того, вони підкреслюють, що динамічна реакція серійного маніпулятора є залежною від пози, оскільки його резонансні частоти змінюються в робочому просторі. Це вимагає розробки моделей, дійсних глобально в усьому робочому просторі [11].

Нелінійне тертя та роль адаптивного керування.

Тертя в суглобах є однією з найбільш складних для моделювання нелінійних складових, що впливає на точність керування. Jose A. G. Luz Junior та його колеги [13] аналізують цей компонент для 1-DOF маніпулятора, описуючи його як суму статичного тертя (Stiction), Кулонівського тертя та в'язкого тертя. Вони довели необхідність використання адаптивних контролерів для компенсації тертя, що є життєво важливим для забезпечення стабільності та точності позиціонування за наявності параметричної невизначеності [13]. Mu'taz A. Momani та Mehdi Hosseinzadeh [17] також визнають важливість точного моделювання. Вони зосереджуються на малих маніпуляторах і підкреслюють, що фізична доцільність ідентифікованих параметрів є обов'язковою для розробки схем керування з обмеженнями [17].

Таким чином, порівняння підходів демонструє єдиний вектор розвитку: відхід від спрощених моделей жорсткого тіла до комплексних динамічних моделей, що враховують як пружні ефекти (гнучкість суглобів [11]), так і складні нелінійності (тертя [13]).

### **Комплексний аналіз методології ідентифікації: Порівняння підходів**

Для визначення параметрів необхідні надійні процедури ідентифікації, які можуть бути класифіковані як непрямі та прямі [9].

Проблеми класичних методів та оптимізація з обмеженнями

Традиційний метод найменших квадратів (LSM) є найпоширенішим, але він схильний генерувати нефізично здійсненні параметри (наприклад, від'ємні маси) і ефективно працює лише з лінійними моделями тертя [9]. Для вирішення цих проблем Mata V. та ін. [9] пропонують формулювати ідентифікацію як

нелінійну задачу оптимізації з обмеженнями. Цей підхід дозволяє використовувати нелінійні моделі тертя та забезпечує фізичну здійсненність параметрів через інтеграцію рівнянь обмежень [9]. Mu'taz A. Momani та Mehdi Hosseinzadeh [17] погоджуються з цим, підкреслюючи, що фізично можлива ідентифікація є обов'язковою умовою для керування з обмеженнями (constrained control) [17]. Wenhui Huang та співавтори [15] підтверджують, що одним із оптимальних методів є метод інструментальних змінних (IV) у поєднанні з повними фізичними обмеженнями, оскільки він є більш робустишим до шуму та зміщення вимірювань [15].

### **Алгебраїчні, Евристичні та Data-Driven Підходи**

На противагу традиційним підходам, Guozhi Li та його колеги [10] запропонували ефективний алгебраїчний метод для серійних роботів на основі алгебри подвійних кватерніонів (Dual Quaternion, DQ). Цей метод дозволяє ідентифікувати параметри навантаження та ланок, маючи перевагу нижчої вартості [10]. Zhongkai Qin, Luc Baron and Lionel Birglen [14] запропонували процедуру послідовної ідентифікації та використання повністю акселерометричного Інерційного Вимірювального Блоку (IMU) для отримання більш надійних оцінок швидкостей та прискорень суглобів, оскільки диференціювання положення значно посилює шум [14].

Danping Yan та його колеги [18] запропонували евристичний підхід, заснований на оптимізації рою частинок (Particle Swarm Optimization, PSO). PSO є глобальним оптимізатором, що має перевагу уникнення локальних мінімумів у складних, нелінійних функціях помилок, типових для динамічних моделей. Це робить PSO ефективним інструментом для ідентифікації параметрів, які важко визначити за допомогою традиційних градієнтних методів [18].

Сучасні дослідження активно переходять до методів, керованих даними (Data-Driven). Dingxu Guo та його співавтори [19] запропонували покрокову реконструкцію моделі динаміки, використовуючи кластеризацію K-середніх для сегментації даних та Розріджену Ідентифікацію Нелінійної Динаміки

(SINDY). SINDY – це метод, який автоматично знаходить розріджені (найпростіші) нелінійні рівняння руху шляхом пошуку лінійної комбінації функцій із великої бібліотеки, що є альтернативою традиційному виведенню рівнянь [19].

### **Експериментальний дизайн, вимірювання та керування.**

Якість кінцевої динамічної моделі нерозривно пов'язана з якістю вхідних даних, що вимагає ретельного проектування експерименту.

Mata V. та ін. [9] підкреслюють, що необхідно розробляти оптимізовані збуджуючі траєкторії для маніпулятора, які повинні максимізувати інформативність системи (критерій Постійного Збудження, PE) та мінімізувати вплив шуму. Lida Zhu та її співавтори [16] також вивчають важливість планування шляху для запобігання перешкодам та досягнення точних завдань. Для верифікації моделей, які враховують гнучкість, Birk C. et al. [11] використовують Експериментальний Модальний Аналіз (ЕМА) (за допомогою імпульсного молотка та акселерометрів) та метрику Критерій Забезпечення Частотної Характеристики (FRAC) для кількісної оцінки збіжності між ідентифікованою моделлю та експериментальними даними [11].

У контексті керування, Mu'taz A. Momani та Mehdi Hosseinzadeh [17] демонструють важливість ідентифікації замкнутого циклу та впровадження явного регулятора посилення (Explicit Reference Governor, ERG). ERG ефективний для забезпечення керування з обмеженнями, динамічно змінюючи траєкторію, щоб фізичні обмеження системи ніколи не були порушені, що є необхідним для безпечної та точної роботи [17]. З іншого боку, Luz Junior J. H. et al. [13] довели, що для подолання нелінійного тертя необхідні адаптивні контролери, які можуть функціонувати навіть за наявності параметричної невизначеності [13].

### **Висновки та перспективи подальшого розвитку**

Динамічний аналіз роботизованих маніпуляторів є інтегрованою дисципліною, яка поєднує вдосконалене теоретичне моделювання (гнучкість

[11], нелінійне тертя [13]), новітні алгебраїчні та оптимізаційні методи ідентифікації (DQ [10], IV з обмеженнями [15], IMU-сенсори [14], PSO [18], SINDY [19]) та розробку інтелектуальних систем керування з обмеженнями [17]. Подальший розвиток вимагає інтеграції фізично обґрунтованого моделювання та методів, керованих даними, для забезпечення фізичної здійсненності параметрів та робустності до шуму, що є ключем до досягнення наступного рівня ультра-точності та надійності в умовах сучасного виробництва.

### **1.3. Оптимізаційні дослідження роботи робота маніпулятора.**

#### **Актуальність та фундаментальні проблеми оптимізації руху**

Оптимізація роботизованого маніпулятора є багатовимірною проблемою, яка охоплює як оптимізацію руху самого робота, так і оптимізацію шляху його кінцевого результату [20]. Кінцевою метою є підвищення ефективності, швидкості та надійності систем шляхом мінімізації цільової функції. Як підкреслюють Sichao Liu, Yuquan Wang, Xi Vincent Wang і Lihui Wang [21], ця функція міцно пов'язана не лише з часом виконання або зусиллям виконавчого механізму, але й з абсолютним значенням ривка (jerk) – похідної прискорення за часом. Мінімізація ривка є надто важливою, оскільки вона прямо впливає на плавність руху, знижує вібраційні навантаження та механічний знос деталей всієї конструкції, тим самим збільшує загальний термін роботи маніпулятора.

Експлуатаційна значущість підтверджується економічними та екологічними міркуваннями: Mohsen Soori, Behrooz Arezoo та Roza Dastres [27] у своєму ґрунтовному огляді наголошують, що промислова робототехніка є надзвичайно енергоємною і може споживати до 10% усієї електроенергії у виробничих процесах. Таким чином оптимізація руху і траєкторії для зменшення споживання енергії є не лише технічним покращенням маніпулятора, а й економічною та екологічною перспективою. Abolfazl Akbari та його колеги [20] доводять, що оптимізація траєкторії шляхом мінімізації енергії прямо збільшує довговічність роботизованих маніпуляторів, оскільки

зниження навантажень на плече і на весь руховий механізм зменшує тепловіддачу та механічну втому.

Для розробки оптимальної схеми керування необхідна точна динамічна модель. І як вище вказано у більшості досліджень все зводилось до рівняння руху, виведені за методом Лагранжа-Ейлера. Отримані складні не лінійні рівняння потім лінеаризуються для реалізації оптимального лінійного квадратичного регулятора(LQR). LQR є ефективним для забезпечення оптимального контролера стійкості та відстеження траєкторії типу моделі «точка – точка» (PTP)[25]. Основний принцип LQR полягає в мінімізації квадратичної функції витрат.

### **Методи енергоефективності та багатоцільової оптимізації траєкторії**

Оптимізація енергозбереження є основною для сталої промислової автоматизації. Огляд Abolfazl Akbari та його співавтори [20] використовують еволюційні алгоритми, зокрема метод Оптимізації Рою Частинок (PSO), для пошуку оптимальних параметрів руху, досягаючи 49% ефективності у завданнях мінімізації енергії. Це дозволяє швидко знайти оптимальні параметри, що визначають рух типу PTP. [20, 25]

Ключовим для забезпечення кінематичної плавності та задоволення обмежень на швидкість, прискорення і ривок є представлення траєкторії. Sichao Liu та його співавтори [21] застосовують семикутний B-сплайн для планування в просторі суглобів, даний метод гарантує що швидкість, прискорення та ривки будуть обмежені та неперервні [21]. Цуйж метод використовує James Bjorken [26] у задачах оптимального керування часом, поєднуючи B-сплайни з послідовним квадратичним програмуванням. B-сплайни є кращими для енергетичної оптимізації [21,26].

### **Сучасні методи: Інтеграція завдань та обробка гібридної динаміки**

Сучасні методи оптимізації долають обмеження роз'єданого планування через інтеграцію. Lirui Wang, Yu Xiang, Dieter Fox [22] представили інтегрований планувальник, який поєднує оптимізацію траєкторії маніпуляції з онлайн – синтезом та вибором захоплення. Їхній метод на базі CHOMP

мінімізує функцію витрат, що включає гладкість траєкторії, уникнення зіткнення та якість захоплення [22]. Я вважаю даний процес забезпечує оптимальність всього процесу маніпуляції.

У мобільній робототехніці Max Spahn, Bruno Brito and Javier Alonso-Mora [23] запропонували метод зв'язаної оптимізації траєкторії руху всього тіла для системи з великою кількістю ступенів свободи. Їхній підхід об'єднує керування рукою та основою, що забезпечує пов'язане планування траєкторії, значно підвищуючи гнучкість руху та дозволяючи скоротити загальний час виконання на 48% [23].

Як я зрозумів найбільшою проблемою в сучасній оптимізації являє собою гібридна динаміка – перехід від вільного руху до контакту. Вирішення даної проблеми запропонували Theodoros Stouraitis, Lei Yan та їх співавтори [24] за допомогою методу багатомодової оптимізації траєкторії (ТО) з урахуванням удару. Вони включають в собі явної моделі передачі контактної сили в метод ТО, що дозволяє планувати і створювати плавну контактну силу без небажаних коливань. Цей метод забезпечує одночасну оптимізацію контактних сил, часу контакту, траєкторій безперервного руху та піддатливості в одному оптимізаційному циклі[24].

Оптимізаційні дослідження роботизованих маніпуляторів демонструють стійку еволюцію від спрощеного динамічного аналізу [25] до інтегрованого та багатомодового планування. Сучасні підходи успішно прагнуть мінімізувати ключові критерії – енергію [20] та час[26] – використовуючи ефективні евристичні та чисельні методи, як PSO [20] та багатоцільові підходи [21].

Ключовим досягненням є інтеграція планування руху та захоплення [22], ефективне вирішення проблеми гібридної динаміки контакту [24] та реалізація зв'язаного руху всього тіла [23] для мобільних систем. Ці комплексні методи, що базуються на B-сплайнах [21, 26], для гарантування неперервності ривка та точних динамічних моделях – метод ЛAGRANЖА-ЕЙЛЕРА [25], забезпечують високу продуктивність, енергоефективність та довговічність роботизованих систем.

## РОЗДІЛ 2

### ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ ПУСКУ ПРИВІДНОЇ ЛАНКИ ЗАХВАТУ МАНІПУЛЯТОРА

#### 2.1. Силевий розрахунок захватного пристрою.

Під час розрахунку як варіант розглянемо наступний захватний пристрій який складається з пневмоциліндра 1, поршня 2, з штука 3, затискних важелів – 4 і як вони приєднані до штока 3, затискні елементи – 5, ексцентрика – 8, а ще суміщеними з затискними важілями – 4 рухомих затискних елементів – 7. [5]

Приклад захватного пристрою на рис. 2.1.

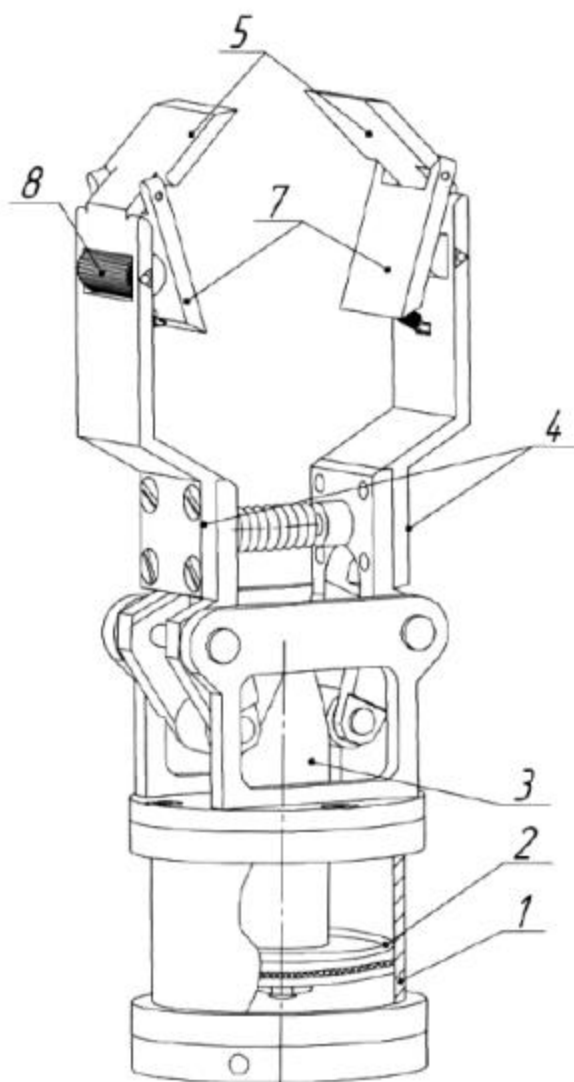


Рис. 2.1. Захватний пристрій промислового робота.

Робоча деталь утримується в захватному пристрої завдяки силам тертя.

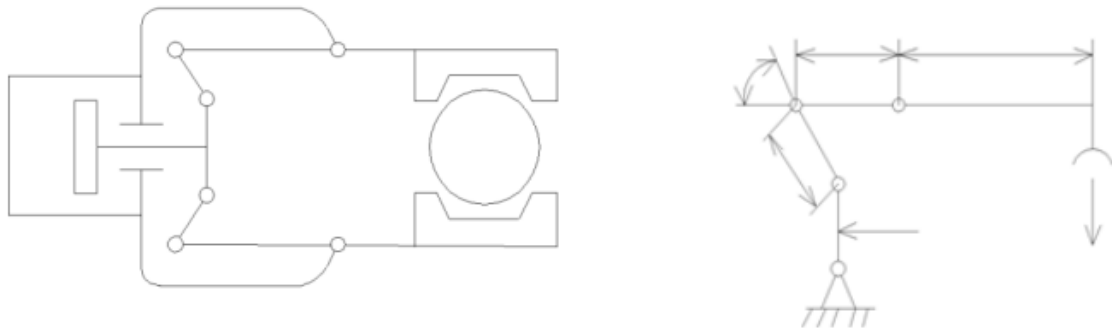


Рис. 2.2. Конструктивна(а) і розрахункова(б) схеми важільного механізму.

Основні характеристики захватного пристрою:

Відповідно маємо дві дистанції: дистанція від точки підвісу губок і до вісі деталі  $b = 60$  мм, а до осі симетрії –  $a = 25$  мм. ККД важільного механізму  $\eta = 0.9$ . Також візьмемо діаметр заготовки:  $d = 90$  мм, відповідно знайдемо довжину заготовки:

$$l = \frac{\pi * d^2}{4 * G} * g * 10^4 = \frac{\pi * 0.09^2}{4 * 100} 9.8 * 10^4 = 4.9 \quad (2.1)$$

Розрахунок зусиль захвату промислового роботаю

Зусилля знайдемо за формулою:

$$S = \frac{T}{K} + P_{np} \quad (2.2)$$

$P_s$  – робочий тиск,

$P_s = 0,4$  Мпа,

$R$  – корисна площа поршня,

$P_{np}$  – зусилля пружини,

$T$  – зусилля, які діють на заготовку(затиск),

$k = 0,85$  – коефіцієнт передачі зусиль на губки захвату.

$$S = 4524H$$

$c_{np} = 78H/мм$  – жорсткість пружини,

$x_{np} = 15мм$  – хід поршня,

$$P_{np} = 1560H$$

Тепер можемо розрахувати щусилля затиску:

$$T = 2285H$$

Зусилля затиску однієї губки:

$$T_{зуб} = \frac{T}{2} = \frac{2285,3}{2} = 1142,65H \quad (2.3)$$

Звертаючи увагу на те, щоб не вислизнула з захвату про обертанні з одного положення в іншу, відповідно потрібно, щоб сила тертя на губках захвату та заготовки, була більшою за вагу самої заготовки.

$$F_{тр} = 156.65H$$

$$M_{тр} = 0.62Hм \quad (2.4)$$

Знайдемо коефіцієнт підсилення з урахуванням сили тертя в осі.

Запишемо умову заготовки:

$$M_{ос} = M_c + M_{тр}, \quad (2.5)$$

$f = 0,1$  – коефіцієнт тертя,  $r = 4,5$  мм.

$$\text{Тоді: } P(a - fr) = T(b + fr)$$

Коефіцієнт підсилення можем знайти за формулою:

$$K_Y = \frac{T}{P}, \quad (2.6)$$

а підставляючи сюди попередню формулу визначемо:

$$K_Y = \frac{T}{P} = \frac{a - fr}{b + fr} = 0,73 \quad (2.7)$$

Знайдемо момент щоб утримати заготовку в губках захватного пристрою в горизонтальному положенні при переміщенні перпендикулярному до осі.

Прискорення,  $a = 6 \text{ м/с}^2$ . Граничне прискорення знайдемо за формулою:

$$a_p = \frac{g \cdot \cos(\alpha + j)}{\sin \alpha} = 9,81 \text{ м/с}^2 \quad (2.8)$$

Виходячи з розрахунків сумарний утримуючий момент:

$$M_e = 7,52 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.9)$$

Зусилля приводу щоб зробити утримуючий момент, визначимо:

$$P_1 = \frac{M_e}{a \cdot h} = 334,22 \text{ Н} \quad (2.10)$$

Вибране зусилля приводу  $P = 1070 \text{ Н}$  із запасом забезпечує необхідне для утримання заготовки в горизонтальному положенні.

Коли виконується поворот заготовки у горизонтальну площину в хід вступає дія ваги  $G$ , що спрявована перпендикулярно до площини переміщення,  $G = m\omega^2 R$  створюється через поворот заготовки зі швидкістю  $\omega$  відцентрова сила, а сила інерції  $G_i = m\epsilon R$ .

Коли виконується поворот руки із прискоренням заготовка рухається із прискоренням:

$$a^{oc} = e \cdot R = 17,16 \text{ м/с}^2 \quad (2.11)$$

Звідси знайдемо осьове граничне прискорення:

$$a_{zp}^{oc} = \frac{\mu \cdot g \cdot \cos \varphi}{\sin \alpha} = \frac{0,15 \cdot 9,81 \cdot 1}{\sin 45} = 2,1 \text{ м/с}^2 \quad (2.12)$$

$$\text{Маємо, що } a^{oc} > a_{zp}^{oc} \quad (2.13)$$

Тоді

$$M_e = 85,4 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.14)$$

Виникає момент сил інерції при повороті заготовки в горизонтальній площині:  $M_i = 0,84 \text{ Н/м}$

$M_i$  не буде враховано через те що він не значний при розрахунку  $M_{\Sigma}$ .  
Знайдемо зусилля приводу для створення сумарного утримуючого моменту:

$$P_2 = \frac{M_e}{a * h} = 375,5 \text{ Н} \quad (2.15)$$

Задане зусилля приводу  $P = 1070 \text{ Н}$  доволі перевищує потрібне зусилля. При цьому коефіцієнт запасу по силі приводу складе: [33]

$$k = P / P_2 = \frac{1070}{375} = 2,85. \quad (2.16)$$

Вибір приводу захватного пристрою

Потрібний привід захватного пристрою був розрахований у пункті 2.1. По ГОСТ 21307-75 виберемо пневмоцилінд з робочим тиском  $P$  до  $0,6 \text{ Мпа}$  із зусиллям на штоці  $1070 \text{ Н}$ .

Розрахунок точності позиціювання робочого органа ПР поступової дії

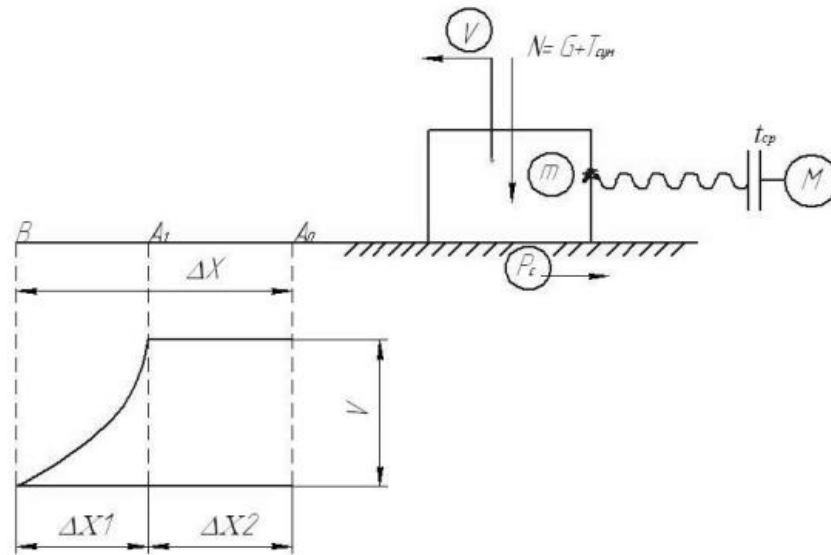


Рис. 2.3. Схема розрахунку точності позиціювання робочого органа поступової дії.

Точність позиціювання робочого органа поступової дії :

$$\overline{DC} = \overline{DC}_1 + \overline{DC}_2 = V * t_{cp} + \frac{m * V^2}{2 * P_c} = 0.005 \text{ м.} \quad (2.17)$$

де –  $V$  лінійна швидкість руху висувної руки;

$t_{cp}$  – час спрацювання електромагнітної муфти;

$P_c$  – сила опору, яку створює демферний механізм.

Розрахунок точності позиціювання робочого органа ПР поворотної дії

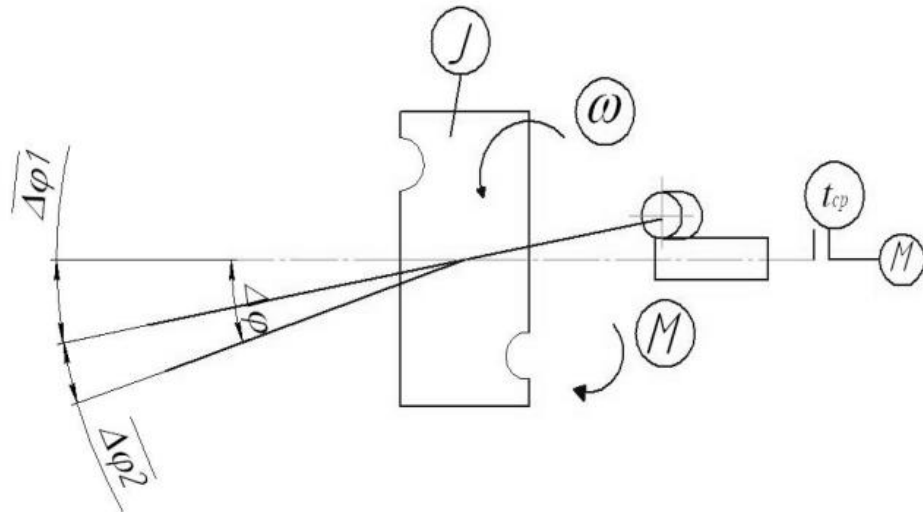


Рис. 2.4. Схема розрахунку точності позиціювання робочого органа поворотної дії

$$\overline{Dj} = \overline{Dj} 1 + \overline{Dj} 2 = w * t_{cp} + \frac{J * w^2}{2 * M} = 0.0036 \text{ м.} \quad (2.18)$$

де  $\omega$  – кутова швидкість обертання;

$t_{cp}$  – час спрацювання муфти;

$J$  – момент інерції робочого органа;

$M$  – момент опору, що створює гальмівний пристрій. [34]

## 2.2. Визначення оптимального режиму руху приводного елемента захвату

Приводну ланку захвату маніпулятора представимо динамічною моделлю у вигляді матеріальної точки масою  $m$ , що здійснює поступальний рух. Її математична модель описується наступним диференціальним рівнянням

$$m\ddot{s} + n_2\dot{s} = F, \quad (2.19)$$

де  $m$  – маса приводної ланки захвату маніпулятора;  $n_2$  – коефіцієнт опору переміщенню приводної ланки;  $F$  – рушійне зусилля приводу приводної ланки приводу;  $s$  – лінійна координата приводної ланки захвату.

За критерій оптимізації візьмемо середньоквадратичне значення рушійної сили приводу, яка виражається рівнянням (2.1). Тоді критерій оптимізації буде мати такий вигляд:

$$F_{ck} = \left[ \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} F^2 dt \right]^{1/2} \rightarrow \min \quad (2.20)$$

Зробимо таке позначення для приводної ланки захватного пристрою

$$f = F^2 = (m\ddot{s} + n_2\dot{s})^2. \quad (2.21)$$

Тут  $t$  – час,  $t_1$  – тривалість руху приводної ланки захвату;  $m$  – маса приводної ланки;  $n$  – коефіцієнти опору руху при поступальному русі приводної ланки.

Умова мінімуму критерію (2.2) з урахуванням виразу (2.3) є рівняння Ейлера-Пуассона. Для поступального руху приводної ланки це рівняння має такий вигляд

$$\frac{\partial f}{\partial s} - \frac{d}{dt} \frac{\partial f}{\partial \dot{s}} + \frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial f}{\partial \ddot{s}} = 0. \quad (2.22)$$

Візьмемо похідні від функції (2.21) згідно з рівнянням (2.22):

$$\frac{\partial f}{\partial s} = 0; \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \dot{s}} = 2n(m_p\dot{s} + n\dot{s}); \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \ddot{s}} = 2m_p(m_p\ddot{s} + n\ddot{s}); \quad (2.25)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial f}{\partial \dot{s}} = 2n(m_p\ddot{s} + n\ddot{s}); \quad (2.26)$$

$$\frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial f}{\partial \ddot{s}} = 2m_p(m_p s^{IV} + n\ddot{s}). \quad (2.27)$$

Після підстановки отриманих виразів (2.23), (2.26) і (2.27) в рівняння (2.22) будемо мати:

$$2m_p(m_p s^{IV} + n\ddot{s}) - 2n(m_p\ddot{s} + n\ddot{s}) = 0; \quad (2.28)$$

$$m_p^2 s^{IV} + m_p n \ddot{s} - m_p n \ddot{s} - n^2 \dot{s} = 0; \quad (2.29)$$

$$m_p^2 s^{IV} - n^2 \dot{s} = 0. \quad (2.30)$$

Розділимо праву і ліву частини рівняння (2.30) на коефіцієнт біля найстаршої похідної, в результаті чого отримаємо

$$s^{IV} - k^2 \dot{s} = 0, \text{ де } k = n/m. \quad (2.31)$$

Для розв'язування рівняння (2.13) складемо характеристичне рівняння:

$$r^4 - k^2 r^2 = 0. \quad (2.32)$$

Визначимо корені алгебраїчного рівняння четвертого порядку (2.32). Для цього представимо рівняння (2.32) в наступному вигляді

$$r^2(r^2 - k^2) = 0. \quad (2.33)$$

В результаті розв'язування рівняння (2.33) отримуємо такі значення коренів

$$r_1 = r_2 = 0; r_3 = k; r_4 = -k. \quad (2.34)$$

У відповідності з отриманими коренями характеристичного рівняння (2.32) розв'язок диференціального рівняння (2.31) представляється в наступному вигляді:

$$s = D_1 + D_2 t + D_3 e^{kt} + D_4 e^{-kt}; \quad (2.35)$$

$$\dot{s} = D_2 + k D_3 e^{kt} - k D_4 e^{-kt}; \quad (2.36)$$

$$\ddot{s} = k^2 (D_3 e^{kt} + D_4 e^{-kt}). \quad (2.37)$$

Тут  $D_1 - D_4$  - постійні інтегрування, які визначаються з крайових умов руху приводного елемента захватного органу.

Для пуску приводного елемента захватного пристрою маніпулятора крайові умови мають наступний вигляд:

$$t = 0, s = 0, \dot{s} = 0; t = t_1, \dot{s} = v, \ddot{s} = 0. \quad (2.38)$$

Тут  $v$  – усталена швидкість руху приводного елемента захватного пристрою маніпулятора

В результаті підстановки крайових умов руху (2.38) в залежності (2.35) – (2.37) отримаємо наступну систему рівнянь:

$$0 = D_1 + D_3 + D_4; \quad (2.39)$$

$$0 = D_2 + kD_3 - kD_4; \quad (2.40)$$

$$v = D_2 + kD_3 e^{kt_1} - kD_4 e^{-kt_1}; \quad (2.41)$$

$$0 = k^2 D_3 e^{kt_1} + k^2 D_4 e^{-kt_1}; \quad (2.42)$$

Знайдемо з системи рівнянь (2.39) – (2.42) постійні  $D_1 - D_4$ . Для цього проведемо деякі перетворення

$$D_2 = kD_4 - kD_3 = k(D_4 - D_3); \quad (2.43)$$

$$k^2 D_3 e^{kt_1} = -k^2 D_4 e^{-kt_1}; \quad (2.44)$$

$$D_3 e^{kt_1} = -D_4 e^{-kt_1}; \quad (2.45)$$

$$D_4 = -D_3 e^{2kt_1}; \quad (2.46)$$

$$v = k(-D_3 - D_3 e^{2kt_1}) + kD_3 e^{2kt_1} e^{-kt_1} + kD_3 e^{kt_1}; \quad (2.47)$$

$$v = kD_3(-1 - e^{2kt_1} + 2e^{kt_1}); \quad (2.48)$$

В результаті перетворень виразів (2.43) – (2.48) отримуємо вирази постійних  $D_1 - D_4$ :

$$0 = D_1 + D_3 + D_4; \quad (2.39)$$

$$0 = D_2 + kD_3 - kD_4; \quad (2.40)$$

$$v = D_2 + kD_3 e^{kt_1} - kD_4 e^{-kt_1}; \quad (2.41)$$

$$0 = k^2 D_3 e^{kt_1} + k^2 D_4 e^{-kt_1}; \quad (2.42)$$

Знайдемо з системи рівнянь (2.39) – (2.42) постійні  $D_1 - D_4$ . Для цього проведемо деякі перетворення

$$D_2 = kD_4 - kD_3 = k(D_4 - D_3); \quad (2.43)$$

$$k^2 D_3 e^{kt_1} = -k^2 D_4 e^{-kt_1}; \quad (2.44)$$

$$D_3 e^{kt_1} = -D_4 e^{-kt_1}; \quad (2.45)$$

$$D_4 = -D_3 e^{2kt_1}; \quad (2.46)$$

$$v = k(-D_3 - D_3 e^{2kt_1}) + kD_3 e^{2kt_1} e^{-kt_1} + kD_3 e^{kt_1}; \quad (2.47)$$

$$v = kD_3(-1 - e^{2kt_1} + 2e^{kt_1}); \quad (2.48)$$

В результаті перетворень виразів (2.43) – (2.48) отримуємо вирази постійних  $D_1 - D_4$ :

$$D_3 = \frac{v}{k(2e^{kt_1} - e^{2kt_1} - 1)}; \quad (2.49)$$

$$D_4 = -\frac{v}{k(2e^{kt_1} - e^{2kt_1} - 1)} e^{2kt_1}; \quad (2.50)$$

$$D_2 = -\frac{v}{2e^{kt_1} - e^{2kt_1} - 1} (e^{2kt_1} + 1); \quad (2.51)$$

$$D_1 = -D_3 - D_4 = -\frac{v}{k(2e^{kt_1} - e^{2kt_1} - 1)} (e^{2kt_1} - 1). \quad (2.52)$$

Після підстановки постійних (2.49) – (2.52) в залежності (2.35) – (2.37)

Отримаємо кінематичні характеристики (переміщення, швидкість та прискорення) приводного елемента захватного пристрою маніпулятора:

$$s = \frac{v}{k(2e^{kt_1} - e^{2kt_1} - 1)} [e^{kt} + e^{2kt_1}(1 - e^{-kt}) + (e^{2kt_1} + 1)kt - 1]; \quad \#(2.53)$$

$$\dot{s} = \frac{v}{(2e^{kt_1} - e^{2kt_1} - 1)} [e^{kt} + e^{2kt_1}(1 + e^{-kt}) + 1]; \quad \#(2.54)$$

$$\ddot{s} = \frac{vk}{(2e^{kt_1} - e^{2kt_1} - 1)} [e^{kt} - e^{k(2t_1-t)}]. \quad \#(2.55)$$

Для керування швидкістю приводного механізму захватного пристрою буде використана залежність (2.54). [4]

### 2.3. Результати оптимізації режиму руху приводної ланки захвату.

За результатами проведеної оптимізації побудовано графічні залежності оптимальних законів поступального руху приводного елемента захвату маніпулятора в програмі Mathematica. На рис.2.5 – 2.9 представлені графічні залежності кінематичних, динамічних та енергетичних характеристик оптимального режиму пуску приводного елемента захвату маніпулятора

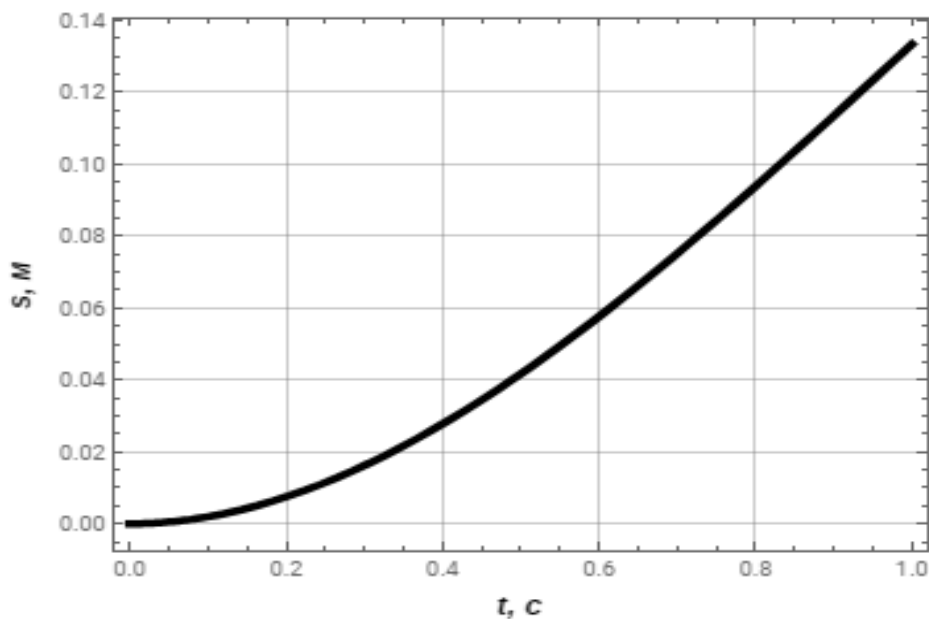


Рис. 2.5. Графік переміщення приводного елемента захвату

З рис.2.5 бачимо, що переміщення приводного елемента захвату здійснюється плавно без коливань. За одну секунду приводна ланка зміщується (підніметься) на 0.13 метра.

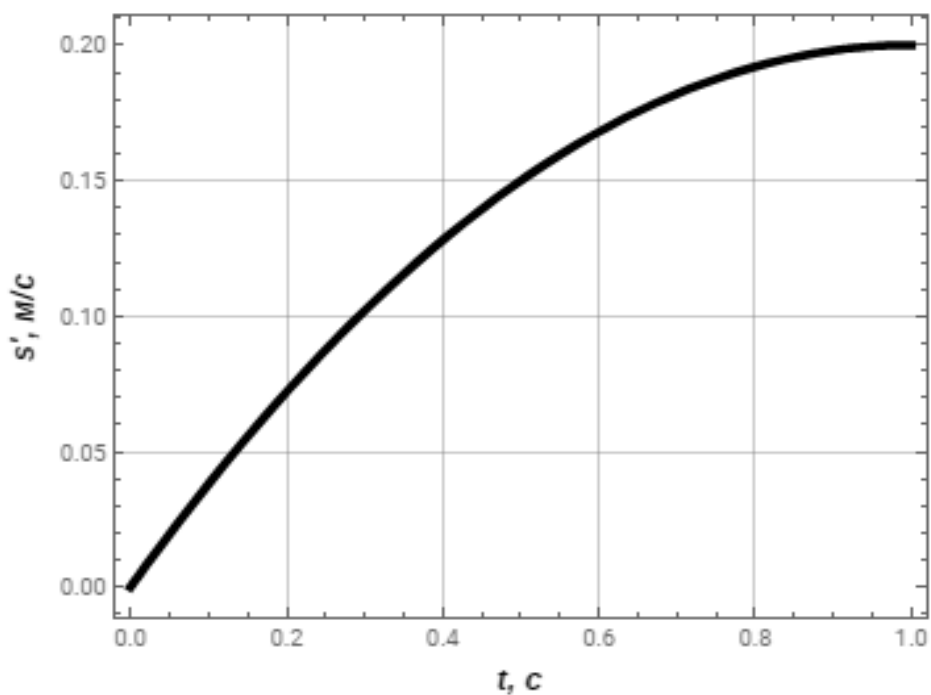


Рис. 2.6. Графік швидкості приводного елемента захвату

З рис. 2.6 видно плавну зміну швидкості протягом секунди і вихід на задану усталену швидкість 0,2 м/с в кінцевій точці.

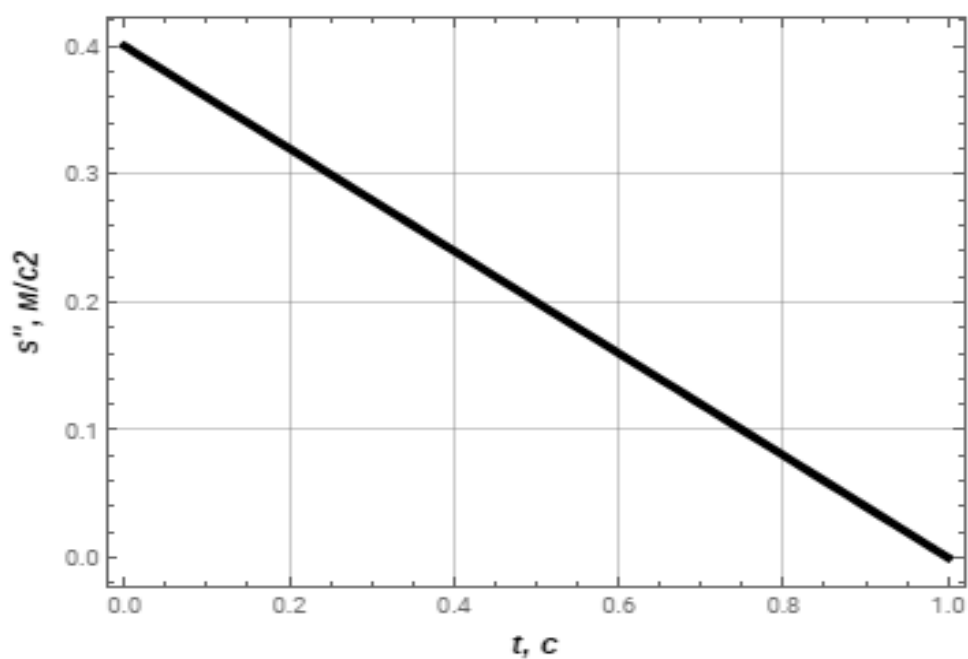


Рис. 2.7. Графік зміни прискорення приводної ланки прискорення

З графіку на рис. 2.7 можна бачити, що спочатку прискорення приймає максимальне значення  $0,4 \text{ м/с}^2$  та лінійно спадає до нуля у кінцевій точці пуску.

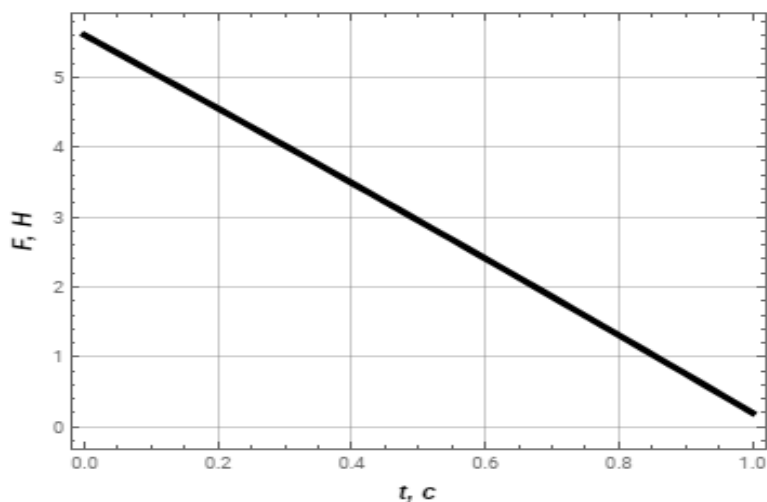


Рис. 2.8. Графік рушійного зусилля приводної ланки захвату

З графіку на рис.2.8 можна бачити, що спочатку рушійне зусилля приводної ланки захвату приймає максимальне значення  $5,6 \text{ Н}$  та лінійно спадає до нуля у кінцевій точці.

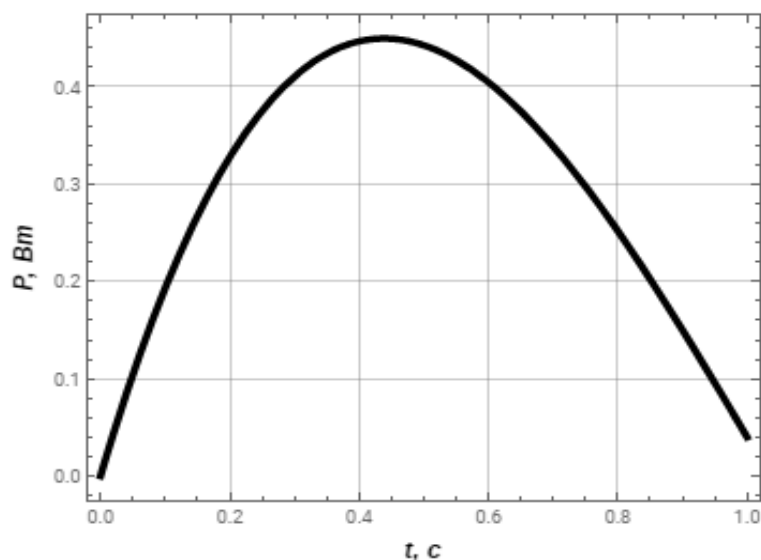


Рис. 2.9. Графік зміни потужності приводної ланки захвату

З графіку потужності (рис. 2.9) видно, що протягом часу виходу на задану швидкість, вона спочатку зростає до максимального значення  $0,46 \text{ Вт}$  в найвищій точці та наближається до усталеного значення у кінцевій точці руху.

## РОЗДІЛ 3

### ОХОРОНА ПРАЦІ

Сучасна промислова екосистема була сформована під час розвитку і нового етапу робототехніки як Інфустрія 4.0, і тепер дослідники і інженери зіштовхнулися з новими підходами для автоматизації, де ключову роль відіграє співпраця людини та робота (Humen-Robot Collaboration, HRC) [28]. Даний напрямок відомий як HIRC (Humen-Industrial Robot Collaboration), і переглянувши дослідження на цю тему стало зрозуміло, що це є критично важливим для забезпечення сталої промислової автоматизації[28,31], а також для реалізації концепта «Розумна фабрика»[28].

Однак, даний перехідний етап у виробництві, де HIRC все ще перебуває на початковій стадії розвитку, породжує значні виклики для охорони праці та безпеки. Промислові фахівці висловлюють багато побоювань та невизначеностей не щодо загальної продуктивності системи, але й, щодо безпеки операторів [31]. Системний огляд тенденцій HRC підкреслює, що безпека вже не обмежується фізичними бар'єрами. Вона має бути комплексною і включати як фізичні так і нефізичні аспекти, такі як, кібербезпека, безпека штучного інтелекту, питання комунікації/координації, людські фактори та організаційні аспекти[28]. На рис. 4.1 показані типи співпраці людини і робота. [28]

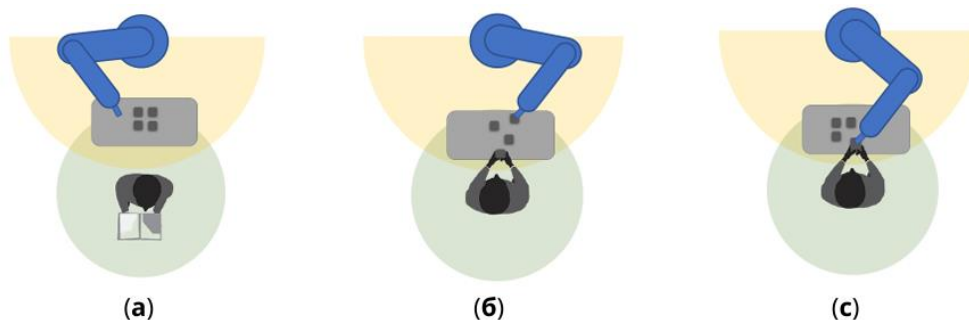


Рис 4.1. Рівні співпраці: **(а)** Співіснування; **(б)** Часткова співпраця; **(с)** Співпраця.

Традиційні підходи до безпеки промислових роботів часто базувалися на принципі жорсткого фізичного розділення за допомогою огорож [32]. Однак у сценаріях HRC цей підхід стає неможливим. Навіть у випадку колаборативних роботів (коботів), які можуть працювати у безпосередній близькості, забезпечення безпеки зазвичай досягається шляхом контролю їхньої відстані від працівників [30]. Коли порушуються встановлені пороги безпеки (тобто людина заходить у небезпечну зону), роботи автоматично сповільнюються або повністю зупиняються [29, 30].

Такий механізм безпеки, незважаючи на свою простоту, створює суттєвий конфлікт між безпекою та ефективністю:

- Втрата операційної продуктивності: основний недолік полягає в тому, що стандартні заходи безпеки, які змушують робота знижувати швидкість, впливають на продуктивність співпраці [29]. Це призводить до зниження загальної продуктивності виконання завдань [30], що підриває економічну доцільність впровадження HRC [29, 31].
- Психологічні виклики та невизначеність: другий, не менш важливий, недолік стосується людських факторів. Працівники неналежним чином інформуються про поточний стан роботи [29]. Раптові та непередбачувані уповільнення або зупинки створюють невизначеність, пов'язану з безпекою [30], що може призводити до стресових ситуацій [29, 30]. У такій ситуації працівник відчуває брак контролю та не може ефективно координувати свої дії, що погіршує його продуктивність та емоційний стан [30].

Для розв'язання цих проблем із зниженням продуктивності та невизначеністю [30] запропоновано альтернативну стратегію безпеки [29, 30]. Ця нова парадигма ґрунтується на принципі, що працівник бере на себе відповідальність за власну безпеку, дозволяючи маніпулятору виконувати своє завдання, не змінюючи своєї швидкості [30].

Ключ до успіху цієї стратегії лежить у підвищенні ситуаційної обізнаності (Situational Awareness, SA) працівника [30]. Головна мета полягає в тому, щоб

надати користувачеві відчуття контролю над його власною безпекою [29]. Саме підвищення обізнаності є основою для створення безпечного середовища [29, 30], оскільки воно дозволяє людині завчасно реагувати на потенційні ризики без необхідності втручання в робочий цикл машини.

Для успішної реалізації моделі безпеки необхідне впровадження передових технологічних рішень, які забезпечують інтуїтивну та адаптивну взаємодію людини та робота (HRI) [32].

#### 1. Змішана реальність (MR) для візуалізації небезпечних зон

Одним із найбільш перспективних інструментів для підвищення SA є технологія змішаної реальності (Mixed Reality, MR) [29]. Дослідження демонструють, що використання аудіо, візуальних та аудіовізуальних дисплеїв змішаної реальності [29] може ефективно інформувати працівника.

Основна функція цих MR-дисплеїв полягає у відображенні меж зон з різними рівнями небезпеки [29]. Завдяки спеціально розробленому дизайну дисплеїв небезпеки для сценаріїв HRC [29], працівник отримує чіткі сигнали про небезпеку, що дозволяє йому оперативно реагувати, не змушуючи робота сповільнюватись [29]. Ця технологія дозволяє підтримувати високу швидкість роботи маніпулятора, оскільки безпека забезпечується через когнітивну реакцію працівника, а не через автоматичне втручання робота.

#### 2. Розпізнавання діяльності працівника на основі штучного інтелекту (AI)

Для безпечної співпраці людини та робота [32] у робочих місцях без огорож [32] застосовується обчислювальна модель, яка використовує інформацію про діяльність працівників-людей [32]. Нещодавні досягнення в машинному навчанні дозволяють роботам співпрацювати з людьми, зберігаючи при цьому безпеку, гнучкість та надійність [32].

Ця модель використовує модальність візуального сприйняття, яка може бути розбита на кілька шарів [32]. Ключовим технічним елементом є навчальна модель на основі людського скелета [32], яка застосовує мережі глибокого навчання (такі як LSTM, GCN або CNN) [32] для розпізнавання просторово-часової діяльності людини [32]. Інформація, отримана з цих шарів,

використовується інтелектуальним агентом для забезпечення інтуїтивної та адаптивної HRI [32]. Фактично, система постійно аналізує, що робить оператор, і на основі цього адаптує свою поведінку для запобігання зіткненням, не вдаючись до примусового уповільнення.

Впровадження HIRC вимагає не лише нових технологій взаємодії, але й перегляду підходів до проектування робочих станцій [31].

### 1. Методологія моделювання для оцінки дизайну

Оскільки HIRC у виробництві ще розвивається, існує нагальна потреба в дослідженнях процесів та методів проектування, щоб переконатися у правильній розробці робочих станцій [31]. Для подолання побоювань та невизначеностей промислових фахівців щодо продуктивності та безпеки операторів [31], критично необхідна методологія моделювання [31].

Ця методологія служить для оцінки продуктивності та безпеки проектування робочої станції [31] для співпраці людини та промислового робота. Використовуючи моделювання, фахівці з охорони праці та інженери можуть імітувати різні сценарії, щоб визначити оптимальні зони співпраці, час циклу та реакцію системи на дії людини, мінімізуючи ризики ще на етапі проектування.

### 2. Розширений контекст безпеки та стандартизація

Системний підхід до безпеки в розумній фабриці вимагає, щоб охорона праці в HRC розглядалася як спільні зусилля [28], які охоплюють широкий спектр проблем [28]. Крім фізичної безпеки, що запобігає травмам, необхідно звернути увагу на:

Нефізичні аспекти безпеки: це включає кібербезпеку для захисту систем керування від зовнішніх маніпуляцій [28] та безпеку штучного інтелекту, що гарантує надійну та передбачувану поведінку алгоритмів HRI [28].

Організаційні та людські фактори: безпека HRC також включає вирішення проблем, пов'язаних із комунікацією/координацією та організацією праці [28].

Дотримання стандартів: інтеграція роботизованих систем та інтелектуальних агентів повинна відповідати встановленим стандартам якості та безпеки [28]. Зокрема, згадується необхідність застосування заходів ISO/IEC 25023 [28], що є важливим для ресурсної експлуатації та оптимального проектування систем HRC [28].

Охорона праці з маніпуляторами у сучасних виробничих умовах являє собою складну, багат шарову дисципліну. Вона відходить від застарілого принципу фізичної ізоляції та примусового уповільнення, яке знижувало продуктивність та спричиняло стрес у працівників [29, 30]. Натомість, нова парадигма покладається на інтегрований, адаптивний підхід.

Цей підхід об'єднує підвищення ситуаційної обізнаності працівника [30] за допомогою таких інструментів, як дисплеї змішаної реальності [29], з передовими системами на основі ШІ, що використовують глибоке навчання та аналіз скелета людини для забезпечення адаптивної та інтуїтивної HRI [32]. Одночасно критично важливими є методології моделювання для оцінки та оптимізації проектування робочих станцій [31], а також неухильне дотримання міжнародних стандартів, як ISO/IEC 25023 [28]. Тільки завдяки цій комплексній інтеграції технологій, людських факторів та інженерних методологій можливе досягнення цілей Індустрії 4.0 — максимальної продуктивності при гарантованій безпеці та добробуті операторів [28, 31].

## РОЗДІЛ 4

### ЕКОНОМІНА ЕФЕКТИВНІСТЬ

#### 4.1 Загальні положення

Визначення економічної доцільності нової техніки є фундаментальним та стратегічно важливим кроком у процесі прийняття рішення щодо її розробки та подальшого впровадження. Комплексний економічний аналіз не лише формує обґрунтовану цінову політику на нові продукти, але й дозволяє об'єктивно оцінити загальний рівень техніко-економічного розвитку виробництва та його технологічний прогрес у динаміці. Таким чином, економічна оцінка є критично важливою складовою для прогнозування можливої економії ресурсів та рівня раціональності інвестицій.

Під час проведення техніко-економічних аналізів нова техніка розглядається не тільки як оригінальні моделі машин та обладнання, але й як суттєво вдосконалені версії раніше випущених аналогів, які отримали значні конструктивні зміни або новий принцип дії. Ключовою передумовою для такої техніки є демонстрація вищої економічної ефективності порівняно з існуючими базовими зразками.

Головний критерій оцінки економічної доцільності — це річний економічний результат (ефект) від експлуатації, який має бути позитивним. Стратегічна мета конструктора полягає у створенні машин, що повністю задовольняють потреби виробництва, забезпечують найбільшу економічну вигоду та підтримують високі показники технічної ефективності. Упродовж усього "життєвого циклу" машини необхідно досягти ряду ключових інженерно-економічних цілей:

- Висока продуктивність і стабільність технічних характеристик.
- Високий рівень надійності та довговічності.
- Оптимальне використання матеріалів та енергії.
- Забезпечення безпеки та ергономічності обслуговування.

Економічність техніки визначається комплексом взаємопов'язаних параметрів. Досвід експлуатації показує, що подовження терміну служби автомобіля чи обладнання може призвести до збільшення його загальної вартості, оскільки переваги, отримані від тривалішої експлуатації та меншої потреби в заміні, часто переважають негативний вплив амортизації.

Раціональне проектування також передбачає використання спеціалізованого обладнання та оптимізацію операцій для досягнення максимальної продуктивності обробки. Дослідження показують, що збільшення річної віддачі на 1,5 рази призводить до збільшення економічного ефекту в середньому в 2 рази, тоді як подвоєння віддачі здатне збільшити ефект у 3 рази. Ці залежності наголошують на значному потенціалі оптимізації та модернізації.

Використання цієї методики для економічного аналізу дозволяє детально визначити структуру експлуатаційних витрат та їхню роль у кожному конкретному випадку, що є основою для раціонального проектування машин з економічної точки зору. Особлива увага має бути приділена надійності, оскільки саме цей показник безпосередньо визначає розмір та вартість ремонтів, які будуть проведені протягом усього періоду експлуатації машини.

Розглядаються також соціальні та екологічні фактори (зокрема, рівень шуму, вібрації, викидів), оскільки вони можуть бути вирішальними при виборі, особливо у випадках, коли робота машини потенційно впливає на здоров'я працівників. Ці фактори прямо впливають на вимоги до кваліфікації робітників, рівень механізації праці та загальні умови праці.

#### **4.2 Критерії для оцінки економічної ефективності нової техніки**

Економічні аспекти мають першочергове значення у процесі інженерної розробки та конструювання обладнання. Проте, варто зазначити, що економічна оптимізація не зводиться виключно до мінімізації собівартості виробництва (наприклад, шляхом відмови від складних, але ефективних рішень, використання найдешевших матеріалів чи спрощення технологічних процесів обробки). Хоча ці чинники впливають на капітальні витрати, вони не є

вирішальними для кінцевої ефективності та загальної продуктивності обладнання.

Ключовим фактором для досягнення позитивного економічного результату є співвідношення між корисною продуктивністю машини та загальними експлуатаційними витратами протягом усього її життєвого циклу.

У процесі конструювання критично важливо забезпечити комплексний підхід, враховуючи всі аспекти, що впливають на економічність, та об'єктивно оцінюючи їхню значущість. Інженер-проектувальник, який надмірно орієнтований лише на один напрямок (наприклад, зниження витрат на сировину), ризикує пропустити більш ефективні можливості для загального підвищення економічності. Неправильне врахування взаємозалежних факторів у гонитві за первинною економією може призвести до зниження загальної експлуатаційної ефективності машини в довгостроковій перспективі.

**Коефіцієнт використання машини** визначається як співвідношення часу фактичної її роботи протягом певного періоду до загальної тривалості цього періоду.

Нехай  $T$  — період експлуатації машини,  $t_p$  — фактичний час роботи машини за цей період. Середній за період експлуатації коефіцієнт використання:

$$\eta_{\text{вик}} = \frac{t_p}{T} = \frac{12000}{288800} = 0,42 \quad (4.1)$$

При роботі в одну, дві й три зміни середні значення коефіцієнта використання становлять  $\eta_{\text{вик}} = 0,2; 0,4; 0,6$ ; при цілорічній безперервній роботі  $\eta = 0,95$  — 1. У машин використання знижується до 0,05—0,10.

Рентабельність машини  $q$  виражається відношенням корисної продуктивності машини  $O_t$  за певний період до загальних витрат  $P$  за той же період:

$$q = \frac{O_t}{P} = \frac{195000}{\frac{575480}{5}} = \frac{195000}{115096} = 1,69 \quad (4.2)$$

У загальному випадку сума витрат складається із вартості:  $E_n$  – витраченої енергії;  $M_t$  —заготовок, інструментів та матеріалів,  $T_r$  — оплати праці операторів,  $O_b$  —ремонт та технічне обслуговування,  $A_m$  — амортизаційних витрат:

$$P = E_n + M_t + T_r + O_b + A_m = \\ = 60480 + 15000 + 400000 + 20000 + 80000 = 575480 \text{ грн/5 років} \quad (4.3)$$

Величина  $q$  повинна бути більше одиниці, інакше машина буде працювати збитково і сенс її створення і існування втрачається.

Економічний ефект. Річний економічний ефект від роботи машини (річний прибуток):

$$Q = O_t - P = 195000 - 115096 = 79904 \text{ грн/рік} \quad (4.4)$$

де  $O_t$  — річна віддача, грн/рік;  $P$  — сума експлуатаційних витрат, грн/рік.

Строк окупності —  $T_{ок}$  визначається як той період, протягом якого загальний економічний прибуток від використання машини стає рівним її вартості, тобто

$$T_{ок} = \frac{C}{\eta_{внк} (O_t - P - \frac{C}{D})} = \frac{80000}{0,42 (195000 - 115096 - \frac{80000}{2400})} = 2,4 \text{ років} \quad (4.5)$$

Коефіцієнт експлуатаційних витрат визначається як співвідношення загальних витрат за весь період роботи машини до її вартості:

$$k_e = \frac{\sum P}{C} = \frac{575480}{80000} = 7,2 \quad (4.6)$$

Коефіцієнт вартості машини (процентне відношення вартості машини до суми витрат):

$$k_m = \frac{C}{\sum P} 100\% = \frac{1}{k_e} 100\% = \left( \frac{1}{7,2} \right) \times 100\% = 0,14\% \quad (4.7)$$

Коефіцієнт експлуатаційних витрат може досягати 50-100 і зростає зі

збільшенням терміну експлуатації та більшими значеннями  $\lambda$ ) відповідно до формули (4.6). Це приводить до зменшення частки вартості машини в загальних витратах.

З метою оцінки потенційної ефективності проектних рішень, проводиться моделювання сценарію оптимізації експлуатаційних витрат. Ми припускаємо, що за рахунок впровадження заходів, спрямованих на підвищення надійності, зниження енергоспоживання або зменшення витрат на обслуговування, вдалося досягти зниження сукупних експлуатаційних витрат на 10% порівняно з початковим варіантом.

Вартість обладнання ( $C = 80000$  грн) та річна віддача ( $O_t = 195000$  грн/рік) залишаються сталими.

### **Розрахунки після оптимізації (зменшення витрат на 10%)**

1. Річні витрати ( $P_{new}$ ):

$$P_{new} = 0,9 \cdot P = 103\,586,40 \text{ грн/рік.} \quad (4.8)$$

2. Рентабельність ( $q_{new}$ ):

$$q_{new} = \frac{O_t}{P_{new}} = \frac{195000}{103\,586,40} = 1,8825. \quad (4.9)$$

3. Річний економічний ефект ( $Q_{new}$ ):

$$Q_{new} = O_t - P_{new} = 195000 - 103\,586,40 = 91\,413,60 \text{ грн/рік.} \quad (4.10)$$

4. Строк окупності ( $T_{OK, new}$ ):

$$T_{OK, new} = \frac{C}{\eta_{\text{ВИК}} (O_T - P_{new} - \frac{C}{D})} = \frac{80000}{0,42 (195000 - 103586,40 - \frac{80000}{2400})} \approx 2,08 \text{ роки.} \quad (4.11)$$

5. Коефіцієнт експлуатаційних витрат ( $k_{e, new}$ ):

$$\text{Сума витрат за 5 років: } \sum P_{new} = 0,9 \times 575480 = 517932 \text{ грн.} \quad (4.12)$$

$$k_{e, new} = \frac{517932}{80\,000} = 6,4742. \quad (4.13)$$

6. Коефіцієнт вартості ( $k_{m, new}$ ):

$$k_{m,new} = \frac{80\,000}{517\,932} = 0,1545. \quad (4.14)$$

Таблиця 5.1. Представлена порівняльна таблиця всіх показників

| Показник                                | Символ               | Вихідний<br>варіант | Після<br>оптимізації | Одиниці<br>виміру | Зміна<br>(%) |
|---|----------------------|---------------------|----------------------|-------------------|--------------|
| Вартість обладнання                     | $C$                  | 80 000,00           | 80 000,00            | грн               | 0,00%        |
| Річні витрати                           | $P/P_{new}$          | 115 096,00          | 103 586,40           | грн/рік           | -10,00%      |
| Річний ефект                            | $Q/Q_{new}$          | 79 904,00           | 91 413,60            | грн/рік           | +14,40%      |
| Рентабельність                          | $q/q_{new}$          | 1,69                | 1,88                 | Коеф.             | +11,24%      |
| Строк окупності                         | $T_{ок}/T_{ок, new}$ | 2,4                 | 2,08                 | роки              | -13,33%      |
| Коефіцієнт<br>експлуатаційних<br>витрат | $ke/ke, new$         | 7,2                 | 6,5                  | Коеф.             | -10,00%      |
| Коефіцієнт вартості<br>машини           | $km/km, new$         | 0,14                | 0,15                 | Коеф.             | +11,23%      |

### 4.3 Оцінка економічної ефективності та висновки

Економічна ефективність впровадження нової техніки визначається співвідношенням отриманого економічного ефекту та витрат на її придбання й експлуатацію. Для підприємства критично важливо, щоб річний економічний ефект був достатнім для покриття експлуатаційних витрат та забезпечував повернення вкладених коштів у прийнятні строки.

Підвищення економічної ефективності досягається за рахунок зменшення експлуатаційних витрат, що відповідно підвищує рентабельність та скорочує строк окупності. Зменшення коефіцієнта експлуатаційних витрат  $ke$  (з 7,2 до 6,5) та зростання коефіцієнта вартості машини  $km$  (з 0,14 до 0,15) свідчить про

зростання частки інвестиційної вартості обладнання у загальному обсязі витрат, що є ознакою підвищення ефективності використання капіталу.

На основі проведених техніко-економічних розрахунків встановлено, що нова техніка є економічно доцільною до впровадження.

Оптимізація експлуатаційних витрат на 10% приводить до суттєвого покращення економічних параметрів:

- Рентабельність зростає до 1,88.
- Річний економічний ефект збільшується на 14,40% (з 79 904 грн до 91413,60 грн).
- Коефіцієнт експлуатаційних витрат  $ke$  зменшується (з 7,2 до 6,2), що підтверджує зниження відносного навантаження операційних витрат на вартість обладнання.

Таким чином, удосконалення техніки дозволяє підвищити економічну ефективність її використання, зменшити витрати підприємства та забезпечити швидше повернення інвестицій. Розрахунки підтверджують, що оптимізована модель є більш вигідною в експлуатації порівняно з вихідним варіантом. [35,36]

## ВИСНОВКИ

Виконуючи магістерську кваліфікаційну роботу на тему: «Оптимізація режиму роботи робота-маніпулятора з важільним захватним пристроєм», була поділена на чотири розділи для кращого розуміння та аналізу.

У кожному розділі відкривається повноцінний функціонал і аспект мого дослідження, усі розділи в зібрані підсумовують загальну характеристику, будову внутрішнього функціонального стану робота маніпулятора та його основних робочих частин, а саме важільного захватного пристрою.

У першому розділі було проведене огляд конструкції маніпулятора з важільним захватним пристроєм, було показано їх класифікацію принципи роботи та технічні характеристики. Проаналізовано будову, типи приводів та особливості процесу захоплення, що дозволяє встановити основні вимоги до точності роботи механізму, проведено огляд наукових джерел, що входять до наукометричних баз даних «Scopus» та «WoS», присвячених дослідженню динамічних процесів руху роботів-маніпуляторів, а також досліджень пов'язаних з оптимізацією режимів руху роботів-маніпуляторів.

У другому розділі виконано оптимізацію режиму пуску приводної ланки захвату. На основі динамічних рівнянь руху сформовано математичну модель привода та визначено оптимальний закон зміни сили, швидкості та прискорення.

У третьому розділі розглянуто питання охорони праці при експлуатації роботизованих систем. Визначено потенційні небезпеки, що виникають під час роботи маніпулятора, було пояснено, як себе потрібно поводити і, які приймати рішення в тих чи інших ситуаціях.

У четвертому розділі наведено оцінку економічної ефективності застосування оптимізованого режиму роботи робота. Доведено, що зниження навантажень на механізм та зменшення енергоспоживання сприяє підвищенню ресурсів приводних елементів і підвищенню продуктивності.

Отримані результати демонструють доцільність проведених оптимізаційних і технічних рішень. Запропоновано підхід може бути

використаний для вдосконалення роботизованих систем підвищення точності, надійності та ефективності в промислових умовах.

## Перелік літератури

1. Tarhan B., Asif S., Webb P., Chacin M. A review of flexible robotic gripping systems. — *Frontiers in Manufacturing Technology*, Vol. 5, 2025. — 24 P. — Published by Frontiers Media S.A. (Switzerland). — DOI: 10.3389/fmtec.2025.1517727.
2. Xu M., Liu Y., Li J., Xu F., Huang X., Yue X. Review of Flexible Robotic Grippers, with a Focus on Grippers Based on Magnetorheological Materials. — *Materials*, Vol. 17, No. 4858, 2024. — 21 P. — Published by MDPI, Basel, Switzerland. — DOI: 10.3390/ma17194858.
3. Ivanov V., Andrusyshyn V., Pavlenko I., Pitel' J., Bulej V. New classification of industrial robotic gripping systems for sustainable production. — *Scientific Reports*, Vol. 14, Article No. 295, 2024. — 15 P. — Published by Nature Publishing Group (Springer Nature). — DOI: 10.1038/s41598-023-50673-5.
4. Проць Я. І. Захоплювальні пристрої промислових роботів / Я. І. Проць. — Тернопіль, 2008. — 232 с. — (Тернопільський державний технічний університет ім. І. Пулюя).
5. Бржозовський Т. Розробка та дослідження захватних пристроїв маніпуляторів для деталей легкої промисловості [Електронний ресурс] / Т. Бржозовський. — 2021. — Режим доступу до ресурсу: URL: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewjn4cju-ryGAxXIhAIHXL4JKQQFnoECBIQAQ&url=https%3A%2F%2Fer.knutd.edu.ua%2Fbitstream%2F123456789%2F19462%2F1%2FDyplom131\\_Brzoowski\\_Manoilenko.pdf&usg=AOvVaw2OjrZJRgU6oq6fa8nkDK2c&opi=89978449](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewjn4cju-ryGAxXIhAIHXL4JKQQFnoECBIQAQ&url=https%3A%2F%2Fer.knutd.edu.ua%2Fbitstream%2F123456789%2F19462%2F1%2FDyplom131_Brzoowski_Manoilenko.pdf&usg=AOvVaw2OjrZJRgU6oq6fa8nkDK2c&opi=89978449). (дата завершення 22.10.2025).
6. Raval S., Patel B. A Review on Grasping Principle and Robotic Grippers. — *International Journal of Engineering Development and Research (IJEDR)*, Vol. 4, Issue 1, 2016. — 8 P. ISSN: 2321-9939. DOI: <https://rjwave.org/ijedr/viewpaperforall.php?paper=IJEDR1601080>

7. Дорохов М.Ю. (кер.). КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ з дисципліни «Роботи та маніпулятори». Кафедра Підйомно-транспортних машин, Донбаська державна машинобудівна академія. Краматорськ, 2019. PDF – Режим доступу до ресурсу:  
URL:  
[http://www.dgma.donetsk.ua/docs/kafedry/ptm/metod/rm/Роботи%20та%20Маніп\\_Конспект.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/docs/kafedry/ptm/metod/rm/Роботи%20та%20Маніп_Конспект.pdf)
8. V. Rosenzveig, S. Briot, P. Martinet, E. Ozgur, and N. Bouton, “A method for simplifying the analysis of leg-based visual servoing of parallel robots,” in Proc. 2014 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA 2014), Hong Kong, China, 2014.
9. Mata V., Farhat N., Diaz-Rodriguez M., Valera A., Page A. Dynamic Parameters Identification for Parallel Manipulators // Parallel Manipulators: Towards New Applications. – Valencia: Polytechnic University of Valencia. – С. 21–45.
10. Li G., Li D., Yin X., Chen W., Feng H. Dynamic Parameters Identification of Serial Robot Based on Dual Quaternion // Applied Sciences. – 2025. – Т. 15, № 8. – Р. 16. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15158362>
11. Birk C., Kipfmüller M., Kotschenreuther J. Dynamic Modeling and Analysis of Industrial Robots for Enhanced Manufacturing Precision // Actuators. – 2025. – Т. 14, № 311. P. 23. DOI: <https://doi.org/10.3390/act14070311>
12. Agbaraji E., Inyama H., Okezie C. Dynamic modeling of a 3-DOF articulated robotic manipulator based on independent joint scheme. Physical science international journal. 2017. Vol. 15, no. 1. P. 1–10. URL: <https://doi.org/10.9734/psij/2017/33578> (дата звернення: 11.11.2025).
13. Dynamic model of a robotic manipulator with one degree of freedom with friction component / J. A. G. L. Junior et al. International journal of robotics and control systems. 2023. Vol. 3, no. 2. P. 315–329. URL: <https://doi.org/10.31763/ijrcs.v3i2.984> (дата звернення: 11.11.2025).
14. Qin Z., Baron L., Birglen L. A new approach to the dynamic parameter identification of robotic manipulators. Robotica. 2009. Vol. 28, no. 4. P. 539–547. URL: <https://doi.org/10.1017/s0263574709990233> (дата звернення: 11.11.2025).

15. A review of dynamic parameters identification for manipulator control / W. Huang et al. *Cobot*. 2022. Vol. 1. P. 20. URL: <https://doi.org/10.12688/cobot.17444.1> (дата звернення: 11.11.2025).
16. Zhu L., Gu Z., Shi J., Liu W. Research on dynamic performance and motion control of robot manipulator // *Journal of Vibroengineering*. — 2015. — Vol. 17, № 6. — P. 12. — ISSN 1392-8716. — Northeastern University, Shenyang, China. — URL: <https://www.jvejournals.com/article/15979> (дата звернення 11.11.2025)
17. Momani M. A., Hosseinzadeh M. Physically feasible dynamic model identification and constrained control of robotic arms: A case study on the ViperX-300 6-DoF robotic manipulator. *Mechatronics*. 2025. Vol. 112. P. 13. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2025.103419> (дата звернення 11.11.2025).
18. Yan D., Lu Y., Levy D. Parameter Identification of Robot Manipulators: A Heuristic Particle Swarm Search Approach. *PLOS ONE*. 2015. Vol. 10, no. 6. P.25 URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0129157> (date of access: 11.11.2025).
19. Guo, D., Xu, J., & Zhang, S. (2023). Stepwise Model Reconstruction of Robotic Manipulator Based on Data-Driven Method. Tongji University, Shanghai, China. 8 pages. arXiv preprint arXiv:2309.06843. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2309.06843>. <https://www.jvejournals.com/article/15979> (дата звернення 11.11.2025)
20. Movement Optimization of Robotic Arms for Energy and Time Reduction using Evolutionary Algorithms — Abolfazl Akbari, Saeed Mozaffari, Rajmeet Singh, Majid Ahmadi, Shahpour Alirezaee. 2023. ≈8 pp. PDF (arXiv): <https://arxiv.org/pdf/2306.05329.pdf>.
21. Energy-efficient trajectory planning for an industrial robot using a multi-objective optimisation approach — Sichao Liu, Yuquan Wang, Xi Vincent Wang, Lihui Wang. 2018. *Procedia Manufacturing* (SPS 2018). ≈9 pp. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978918306516>.

22. Synthesis and Selection — Lirui Wang, Yu Xiang, Dieter Fox. 2019/2020 (RSS paper). ≈12 pp. arXiv page + direct PDF: <https://arxiv.org/abs/1911.10280> → PDF: <https://arxiv.org/pdf/1911.10280.pdf>
23. Spahn, M., Brito, B., & Alonso-Mora, J. (2021). Coupled Mobile Manipulation via Trajectory Optimization with Free Space Decomposition. In Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 12759-12765. doi:10.1109/ICRA48506.2021.9561821. URL: <https://doi.org/10.1109/ICRA48506.2021.9561821>
24. Stouraitis, T., Yan, L., Moura, J., Gienger, M., & Vijayakumar, S. (2021). Multi-mode Trajectory Optimization for Impact-aware Manipulation. In 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 9425-9432. doi:10.1109/IROS45743.2020.9341246. URL: <https://doi.org/10.1109/IROS45743.2020.9341246>
25. Saraf, P., & Ponnalagu, R. N. (2020). Modeling and Simulation of a Point to Point Spherical Articulated Manipulator Using Optimal Control. arXiv preprint arXiv:2010.13574 — 10 s. URL: <https://arxiv.org/abs/2010.13574>
26. Bjorken, J. (2024). Optimal Time Control for Robotic Manipulators. TK Techforum Journal (ThyssenKrupp Techforum), 2024(1): 15–21. — 7 c. URL: <https://techforumjournal.com>
27. Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2023). Optimization of Energy Consumption in Industrial Robots, A Review. Cognitive Robotics, 3: 142–157. — 16 c. DOI: 10.1016/j.cogr.2023.05.003  
URL: [https://www.researchgate.net/publication/370980242\\_Optimization\\_of\\_Energy\\_Consumption\\_in\\_Industrial\\_Robots\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/370980242_Optimization_of_Energy_Consumption_in_Industrial_Robots_A_Review)
28. Arents J., Abolins V., Judvaitis J., Vismanis O., Oraby A., Ozols K. Human–Robot Collaboration Trends and Safety Aspects: A Systematic Review // Journal of Sensor and Actuator Networks. — Basel: MDPI, 2021. — 17 c. DOI: 10.3390/jsan10030048. URL: <https://www.mdpi.com/2224-2708/10/3/48>.
29. San Martin A., Kildal J., Lazkano E. Mixed Reality Representation of Hazard Zones While Collaborating with a Robot: Sense of Control Over Own Safety // Virtual

- Reality. — Springer Nature, 2025. — 20 с. DOI: 10.1007/s10055-025-01107-2.  
Режим доступу: <https://doi.org/10.1007/s10055-025-01107-2>.
30. San Martin A., Kildal J., Lazkano E. Taking Charge of One's Own Safety While Collaborating with Robots: Enhancing Situational Awareness for a Safe Environment. *Sustainability*, 2024, 16(4024). 18 с. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16104024>
31. Ore F., Vemula B., Hanson L., Wiktorsson M., Fagerström B. Simulation methodology for performance and safety evaluation of human–industrial robot collaboration workstation design. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, 2019, 3:269–282 с. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41315-019-00097-0>
32. Orsag L., Stipancic T., Koren L. Towards a Safe Human–Robot Collaboration Using Information on Human Worker Activity. *Sensors*, 2023, 23(1283). 16 с. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23031283>
33. База патентів України; URL: <https://uapatents.com>
34. Павленко І.І. Промислові роботи: основи розрахунку та проектування. — Кіровоград; КНТУ, 2007. — 420 с
35. Тарифи на електроенергію [Електронний ресурс] —Режим доступу: URL: [https://yasno.com.ua/news/yasno\\_news/Electricity\\_tariffs\\_for\\_the\\_population\\_remain\\_unchanged](https://yasno.com.ua/news/yasno_news/Electricity_tariffs_for_the_population_remain_unchanged) (дата звернення: 9.05.2023).
36. Принтер Bossdelta 300 [Електронний ресурс] —Режим доступу: URL: <https://www.seemecnc.com/products/bossdelta-300-3d-printer> (дата звернення 12.05.2023).
37. CEN (European Committee for Standardization). (2020). Cranes – Loader cranes (EN 12999:2020). Отримано з <https://knowledge.bsigroup.com/products/cranes-loader-cranes-2>
38. Григоров, О. В., & Ловейкін, В. С. (1997). Оптимальне керування рухом механізмів вантажопідійомних машин: Навч. посібник. ІЗМН.
39. Ловейкін, В. С., Ромасевич, Ю. О., & Матухно, Н. В. (2016). Динамічний розрахунок машин і механізмів, які використовуються у сільському та лісовому господарстві: Методичні вказівки.

40. Ловейкін, В. С., Ромасевич, Ю. О., & Кадикало, І. О. (2021). Оптимізація режиму повороту стрілового крана. ФОП Ямчинського О.В.
41. ElSahly, O. M., Ahmed, S., & Abdelfatah, A. (2023). Systematic Review of the Time-Cost Optimization Models in Construction Management. *Sustainability*, 15(6), 5578. <https://doi.org/10.3390/su15065578>
42. Ловейкін, В. С., Ромасевич, Ю. О., Човнюк, Ю. В., & Кадикало, І. О. (2019). Динаміка й оптимізація підйомно-транспортних машин. ФОП Ямчинський О.В.
43. Ловейкін, В. С., Човнюк, Ю. В., Діктерук, М. Г., & Пастушенко, С. І. (2004). Доделювання динаміки механізмів вантажопідйомних машин. РВВ МДАУ.
44. Ловейкін, В. С., & Ромасевич, Ю. О. (2013). Динаміка машин. ЦП „КОМПРИНТ”.
45. Pesch, H. J. (2017). *Optimal Control and Dynamics of Road Vehicles: Dynamics and Optimal Control of Road Vehicles*. Springer.
46. Sanz, Pedro. (2009). Robotics: Modeling, Planning, and Control (Siciliano, B. et al; 2009) [On the Shelf]. *Robotics & Automation Magazine, IEEE*. 16. 101-101. 10.1109/MRA.2009.934833.
47. Loveikin, V., Romasevich, Y., & Spodoba, O. (2019). Mathematical model of the dynamics varying the radius jib system loader crane with a load at adjustment movement. *Journal of Mechanical Engineering*, 22(3).
48. Loveikin, V. S., Romasevich, Yu. O., Spodoba, O. O., Loveikin, A. V., & Shvorov, S. A. (2020). Comprehensive optimization of mode of departure of boom system of loader crane. *Machinery & Energetics*, (2), 5–13. <https://doi.org/10.31548/machenergy2020.02.005>
49. Loveikin, V., Romasevich, Y., Kadykalo, I., & Liashko, A. (2019). Optimization of the swinging mode of the boom crane upon a complex integral criterion. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 49, 285–296. <https://doi.org/10.7546/JTAM.49.19.03.07>
50. Григоров, О. В. (2003). Гідравлічний привід підйомно-транспортних, будівельних та дорожніх машин: Навч. посібник. НТУ "ХПІ".