

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет КОНСТРУЮВАННЯ ТА ДИЗАЙНУ

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
Конструювання машин і обладнання
(назва кафедри)

(підпис) Вячеслав ЛОВЕЙКІН
(ПІБ)
“ ____ ” _____ 2026 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
(ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ БАКАЛАВРА)
на тему РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ СОРТУВАЛЬНОГО РОБОТА

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування
(код і назва)

Гарант освітньої програми

д.т.н., професор
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Володимир БУЛГАКОВ
(ПІБ)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

Ph.D
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Олександр СПОДОБА
(ПІБ)

Виконала

(підпис)

Олександр ЛІСІМЕНКО
(ПІБ студента)

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет КОНСТРУЮВАННЯ ТА ДИЗАЙНУ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Конструювання машин і обладнання

Д.Т.Н., професор _____ Вячеслав ЛОВЕЙКІН
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ПІБ)
“ _____ ” _____ 2026 р.

З А В Д А Н Н Я

**на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту
(на виконання дипломного проєкту бакалавра студенту)**

Лісіменко Олександр Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування

(код і назва)

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи (дипломного проєкту бакалавра) **РОЗРОБКА
КОНСТРУКЦІЇ СОРТУВАЛЬНОГО РОБОТА**

затверджена наказом ректора НУБіП України від “15” квітня 2026 р. №1044 «С»

Термін подання завершеної роботи (проєкту) на кафедру 2026 червня 01

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи (дипломного проєкту бакалавра)

Перелік питань, які потрібно розробити:

1. Провести аналіз існуючих конструкцій сортувальних роботів.
2. Розглянути перспективи створення нових конструкцій сортувальних роботів
3. Провести розрахунки для розробки конструкції сортувального робота
4. Розглянути питання охорони праці
5. Виконати розрахунок економічної ефективності.

Перелік графічних документів (за потреби)

1. Загальний вид
2. Складальне креслення
3. Деталі

Дата видачі завдання “16” квітня 2026 р.

**Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи
(Керівник дипломного проєкту бакалавра)**

(підпис)

Олександр СПОДОБА
(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Олександр ЛІСІМЕНКО
(прізвище та ініціали студента)

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СОРТУВАЛЬНИХ СИСТЕМ І РОБОТІВ	7
1.1. Організація процесу сортування.....	7
1.2 Види сортувальних роботів.....	10
Перевари і недоліки.....	16
1.4. Електронні компоненти сортувальних роботів.....	20
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК КОНСТРУКЦІЇ РОБОТА.....	25
2.1. Кінематичний та енергетичний розрахунок планетарної передачі	25
2.2. Визначення допустимих контактних напружень $[\sigma_H]$ для планетарної передачі 2К-Н типу А.....	27
2.3. Визначення допустимих к напружень згину $[\sigma_F]$ для планетарної передачі 2К-Н типу А.....	30
2.4. Проектний розрахунок планетарної передачі 2К-Н типу А.....	32
2.5. Підбір кількості зубів та уточнення передаточних чисел планетарної передачі 2К-Н типу А.....	33
2.6. Визначення геометричних параметрів зачеплення планетарної передачі 2К-Н типу А.....	34
2.7. Визначення ширини вінця центрального колеса b планетарної передачі 2К-Н типу А.....	36
2.8. Перевірочний розрахунок планетарної передачі 2К-Н типу А...	37
РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	41
3.1. Безпека елементів робота-маніпулятора.....	41
3.2. Безпека вихідних матеріалів.....	43
3.3. Безпека органів управління.....	44

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.031 ПЗ			
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис.	Дата				
Розроб.	Лісіменко О. С.				Зміст			
Перевір.	Сподоба О.О							
Н. контр.								
Затверд.					НУБіП України			

3.4. Безпека захисного обладнання, що входить в конструкцію.....	45
3.5. Безпека під час монтажу та ремонту.....	46
3.6. Безпека під час транспортування та зберігання.....	46
3.7. Безпека при розміщенні.....	47
3.8. Пожежна безпека.....	48
РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ.....	50
4.1. Розрахунок витрат на виготовлення дослідного зразка.....	50
4.2. Витрати на сировину та матеріали.....	50
4.3. Витрати на закупні вироби	50
4.4. Розрахунок заробітної плати розробник.....	51
4.5. Визначення загальної вартості.....	52
4.6. Розрахунок економічної ефективності.....	52
4.7. Розрахунок економії.....	52
ВИСНОВКИ.....	54
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	55
ДОДАТКИ.....	57

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра, тема якої: “ **РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ СОРТУВАЛЬНОГО РОБОТА** ” складається з чотирьох (4) розділів, що розміщені на п'ятдесяти семи (57) сторінках друкованого тексту, дванадцяти (12) рисунків, дев'яти (9) таблиць, висновків, двадцяти (20) літературних джерел і додатків до графічної частини.

В першому розділі бакалаврської кваліфікаційної роботи розглянуто організацію процесу сортування, конструкції існуючих прототипів сортувальних роботів. Наведено їх характеристики.

В другому розділі роботи проведено розрахунок планетарного механізму для приводу основних елементів маніпуляційної системи сортувального робота.

В розділі охорона праці розглянуто вимоги до безпечної роботи із маніпуляторами, а саме вимоги до безпеки використання різних матеріалів в конструкції маніпулятора, вимоги під час монтажу та ремонту, вимоги безпеки під час транспортування та зберігання та вимоги щодо пожежної безпеки.

Також в бакалаврській кваліфікаційній роботі виконано розрахунок економічної ефективності розробки нової конструкції сортувального робота.

Ключові слова: сортування, маніпулятор, дельтаробот, сортувальний процес, сортувальний робот, роботизація.

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.031 ПЗ							
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис.	Дата								
Розроб.	Лісіменко О.С.				Реферат				Лім.	Лист	Листів	
Перевір.	Сподоба О.О										5	55
									НУБіП України			
Н. контр.												
Затверд.												

ВСТУП

Сучасний розвиток промисловості вимагає швидкого впровадження автоматизованих систем, що здатні змінити людську працю на складних та монотонних ділянках виробництва. Одним із таких критично важливих процесів є сортування продукції, де точність та швидкість безпосередньо впливає на загальну ефективність підприємства. Використання інтелектуальних роботів-маніпуляторів дозволяє автоматизувати розподіл об'єктів, забезпечуючи високу продуктивність праці та мінімізувати помилки.

Актуальність цієї роботи полягає у розробці надійної конструкції сортувального робота для потреб підприємств середньої ланки. Об'єктом дослідження виступає процес автоматизованого розподілу вантажів, а предметом – механічні вузли та цифрова система керування. Метою роботи є повне проектування маніпулятора, включаючи детальний розрахунок планетарного редуктора типу 2К-Н та розробку програмного забезпечення для контролера Arduino. В ході виконання роботи передбачається аналіз сучасних технологій машинного зору, проведення кінематичних розрахунків, обґрунтування вибору конструкційних матеріалів, таких як сталь 40Х та 45, а також розробка комплексних заходів з безпеки та екологічності експлуатації.

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.031 ПЗ			
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис.	Дата				
Розроб.	Лісіменко О. С				Вступ			
Перевір.	Сподоба О.О							
Н. контр.								
Затверд.								
					Лім.	Лист	Листів	
						6	55	
					НУБіП України			

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СОРТУВАЛЬНИХ СИСТЕМ І РОБОТІВ

1.1. Організація процесу сортування.

Процес сортування, автоматизований за допомогою системи керування, не тільки робить цей процес простим і точним, але й надійним вразі використання машинного зору. Це пов'язано з тим, що автоматична сортувальна машина замінює людський зір та мислення на алгоритми та програмне забезпечення.

Існують різні методи керування системою сортувальної машини [6 – 9]. Найпоширенішим базовим контролером для цієї мети може бути контролер Arduino, мікроконтролер периферійного інтерфейсу (PIC), міні ПК Raspberry Pi або навіть програмований логічний контролер (PLC).

Arduino використовувався для багатьох різноманітних цілей, таких як роботизована система керування промисловими пристроями з реалізацією широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), а також для керування різними типами датчиків моніторингу та модулю технічного зору. Для автоматизації процесу сортування можна використовувати контролер Arduino для керування трьома компонентами конвеєрної лінії: двигун постійного струму для руху конвеєрної стрічки, крокового двигуна та серводвигуна [10].

Крім того, інше дослідження показало, що система сортування на основі кольору за допомогою мікроконтролера Arduino показала високу ефективність при низькій вартості [11].

Оскільки цифрове зображення може бути представлене в матричній формі, Matlab має бути ідеальним інструментом для обробки зображень, оскільки він має обчислювальну здатність матрично-орієнтованих операцій. Є чотири

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.031 ПЗ							
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис.	Дата	Розділ I. Аналіз сучасних сортувальних систем і роботів				Лім.	Лист	Листів	
Розроб.		Лісіменко О.										
Перевір.		Сподоба О.О									7	55
									НУБіП України			
Н. контр.												
Затверд.												

основні типи зображень, які підтримує Matlab: – індексне зображення; – сіре зображення; 13 – зображення RGB; – бінарне зображення [12, 13].

Найпоширеніші операції з цифровими зображеннями, які можна виконувати за допомогою Matlab, включають: – морфологічну операцію; – вирівнювання гістограми; – дискретне перетворення Фур'є та косинуса (DFT і DST); – фільтри знешумлених зображень; – операцію визначення країв, яка включає оператор Собеля та оператор Превітта. Метою процесу обробки зображень є підготовка цифрового зображення до подальшої обробки або вилучення цінних ознак із вихідного зображення. На рис. 1.1 показана блок-схема системи обробки цифрових зображень.

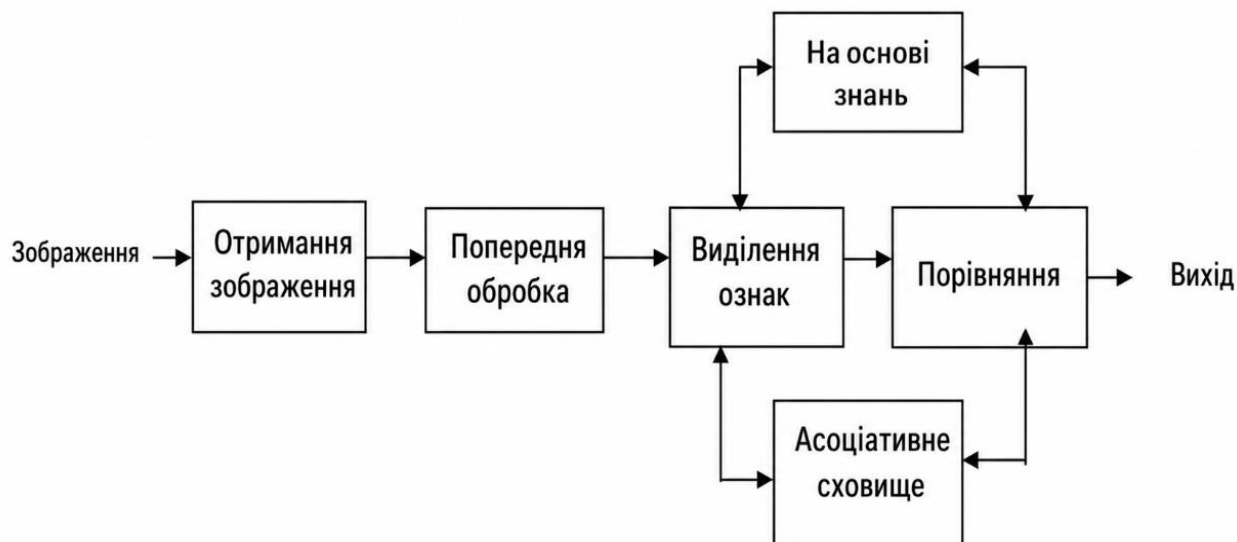
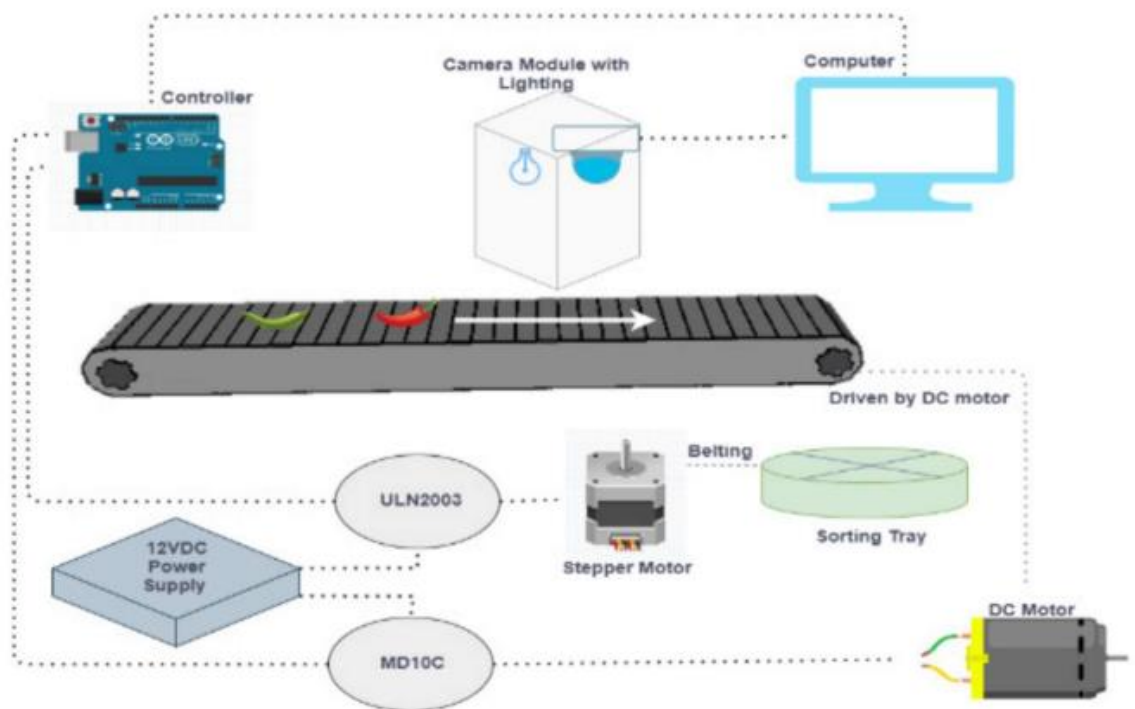


Рис. 1.1. Блок-схеми системи обробки цифрових зображень

Процес позначення вихідного вектора у повинен виконуватися вручну для кожного навчального прикладу, наявного в навчальних даних. Реалізація напівконтрольованого навчання зазвичай використовується, коли кількість позначених точок даних обмежена, а в наборах даних є багато не позначених точок даних. Позначені і не позначені точки даних використовуватимуться системою для створення кращої моделі навчання.

Існують різні типи механізмів сортування. Наприклад, є механізм сортування, який використовує пневматичний або гідравлічний механізм для розділення деталей за допомогою робота з кінематикою Delta та лотка для 16 сортування, що приводиться в дію кроковим двигуном або серводвигуном (рис. 1.2) [16].



Для цієї обрано кроковий двигун, оскільки його можна точно й точно рухати відповідно до вимог конструкції. Кроковий двигун на 12 В керується

драйвером двигуна ULN 2003, який зазвичай використовується як схема драйвера для реле, світлодіодного освітлення та крокового двигуна. Мікроконтролер Arduino Uno отримуватиме живлення від портативного ноутбука, налаштованого на програму Matlab для обробки зображень. Модуль камери OV7670 VGA, який сполучається з Arduino, використовується для захоплення зображення деталей. Програма Matlab обробляє зображення, що збережено у відповідній папці, зробленого за допомогою камери OV7670.

1.2 Види сортувальних роботів

Дельта-робот ABB IRB 360 FlexPicker (рис.1.3.) — це галузевий стандарт для надшвидкісного сортування та пакування, здатний виконувати понад 100 циклів на хвилину. Завдяки паралельній кінематиці він забезпечує високу точність у 0.1 мм при роботі з вантажами від 1 до 8 кг.



Рис.1.3. BB IRB 360 FlexPicker

Модель має різні модифікації, зокрема версії Washdown та Stainless із захистом IP69K для стерильних умов харчової промисловості. Велика робоча зона до 1600 мм дозволяє ефективно обслуговувати широкі конвеєрні лінії.

Система легко інтегрується з машинним зором для ідентифікації об'єктів у реальному часі. Це надійне рішення для автоматизації процесів «pick-and-place» будь-якої складності.

Маніпулятор Fanuc M-11a (рис.1.4.) є високоточним дельта-роботом, який спеціально розроблений для швидкісних операцій із надлегкими об'єктами вагою до 0.5 кг. Завдяки своїй унікальній паралельній кінематиці та невеликій масі всього 23 кг, цей пристрій забезпечує феноменальну точність повторюваності на рівні 0.03 мм, що робить його ідеальним рішенням для мікроскладання або сортування дрібних деталей.



Рис.1.4. Fanuc M-11a

Чотири керовані осі дозволяють маніпулятору не лише переміщувати

вантаж у межах робочої зони діаметром 420 мм, а й точно позиціонувати його за допомогою обертання. Компактність конструкції дає змогу інтегрувати робота в обмежені простори виробничих ліній, де використання стандартних промислових маніпуляторів є неможливим.

Технічні характеристики дельта-роботів наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1.

Технічні характеристики дельта-роботів

№ з/п	Модель робота	Кількість осей	Навантаження (кг)	Досяжність (мм)	Точність (мм)

Плоский портал **YXCF** від компанії Festo (рис.1.5.) — це високотехнологічна промислова система, побудована на основі електричних модулів переміщення для точного позиціонування об'єктів у горизонтальній площині. Конструкція вирізняється винятковою надійністю, забезпечуючи безперервний 100% робочий цикл та вражаючий міжсервісний інтервал у 2500 кілометрів пробігу.

Для виготовлення вузлів використано зносостійкі матеріали: анодований алюміній, нержавіючу сталь та армований поліамід, що гарантує довговічність системи.

Висока точність монтажу з допуском лінійності та паралельності всього 0,1 мм/м дозволяє інтегрувати портал у найвідповідальніші автоматизовані лінії. Система адаптована до стандартних виробничих умов і здатна стабільно працювати при температурі навколишнього середовища до +45 °С.



Рис.1.5. Плоский портал YXCF

Для виготовлення вузлів використано зносостійкі матеріали: анодований алюміній, нержавіючу сталь та армований поліамід, що гарантує довговічність системи. Висока точність монтажу з допуском лінійності та паралельності всього 0,1 мм/м дозволяє інтегрувати портал у найвідповідальніші автоматизовані лінії. Система адаптована до стандартних виробничих умов і здатна стабільно працювати при температурі навколишнього середовища до +45 °С.

Таблиця 1.2.

Технічні робота YXCF

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.031 ПЗ	Лис м
Змн.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		13

Зварювальний робот від **ElectroTorg** має шість осей і вантажопідйомність 6 кг для виконання точних маніпуляцій. Пристрій забезпечує точність позиціонування 0.1 мм та захищений за стандартом IP65 від пилу й вологи.



Рис.1.6. Антропоморфний 6-осьовий робот-манипулятор

Таблиця 1.3.

Технічні робота **ElectroTorg**

№	Параметр (Категорія)	Значення 1	Значення 2	Значення 3	Одиниця / Тип
	Загальні дані	Бренд:	Модель: Зварювальний	Тип: Промисловий	Виробник
	Кінематика	Осі: 6	Ступені свободи:	Рухливість: Висока	Кількість

Продовження таблиці 1.3.

№	Параметр (Категорія)	Значення 1	Значення 2	Значення 3	Одиниця / Тип
	Навантаження	Корисне: 6	Максимальне: 6	Вага об'єкта: до 6	кг
	Точність	Повторна:	Позиціонування	Похибка: Мінімальна	мм
	Діапазон руху	Кут: 180°	Амплітуда: Широка	Обертання: Доступне	Градуси
	Захист	Клас: ip65	Пил: Захищено	Волога: Захищено	Стандарт
	Призначення	Основне: Зварювання	Сфера: Сварка	Технологія: Автомат	Тип робіт
	Масові дані	Вага робота: 75	Маса нетто: 75	Конструкція: Стационарна	кг
	Експлуатація	Умови: Промислові	Надійність: Висока	Режим: Безперервний	Характеристика
	Специфікація	Модельний ряд: ET	Колір: Синій/Білий	Документація: Наявна	Стандарт

Перевари і недоліки

Аналізуючи сучасні автоматизовані системи, варто почати з дельта-роботів, таких як **ABB IRB 360** та **Fanuc M-11A**. Головною перевагою цих маніпуляторів є їхня неперевершена швидкість переміщення. Завдяки паралельній кінематиці, де всі приводи розташовані на нерухомій основі, рухомі частини мають

мінімальну інерцію. Це дозволяє досягати продуктивності понад 100 циклів на хвилину, що є критично важливим для конвеєрного сортування. Ще одним плюсом є їхня здатність працювати в стерильних умовах завдяки спеціальним модифікаціям, таким як нержавіюча сталь у серії **ABB**, що робить їх ідеальними для харчової промисловості. Модель від **Fanuc** додатково виділяється надзвичайною точністю в 0.03 мм, що є недсяжним показником для більшості інших типів роботів. Однак дельта-роботи мають суттєвий недолік — обмежену вантажопідйомність. Більшість моделей працює з вагою до 1–3 кг, і лише окремі версії витримують до 8 кг. Також вони мають специфічну форму робочої зони (циліндричну), яка не завжди дозволяє ефективно використовувати простір над кутами прямокутних конвеєрів. Складність програмування та обслуговування паралельних механізмів також є вагомим мінусом у порівнянні з простішими системами.

На противагу дельта-роботам, плоский портал **Festo YXCF** пропонує зовсім інший підхід до автоматизації. Його основна перевага полягає в масштабованості та простоті конструкції. Оскільки це декартова система, її робочу зону можна легко налаштувати під конкретний розмір конвеєра або робочого столу, просто обравши довші модулі переміщення. Портал забезпечує 100% робочий цикл і має дуже великий міжсервісний інтервал у 2500 км, що значно знижує витрати на експлуатацію в довгостроковій перспективі. Матеріали конструкції, такі як анодований алюміній та нержавіюча сталь, забезпечують високу жорсткість і довговічність. Головним недоліком порталних систем є їхня відносно низька динаміка. Вони не можуть конкурувати з дельта-роботами у швидкості «pick-and-place» операцій, оскільки масивні осі порталу мають велику інерцію при розгоні та гальмуванні. Крім того, портали займають значно більше місця безпосередньо над робочою зоною, що може ускладнювати доступ персоналу до обладнання. Також портална система зазвичай має менше ступенів свободи, що обмежує її здатність маніпулювати об'єктами під складними кутами.

Окреме місце посідає шестиосьовий маніпулятор від **ElectroTorg**, який демонструє переваги класичної промислової кінематики. Його ключовою перевагою є максимальна гнучкість: шість ступенів свободи дозволяють інструменту (наприклад, зварювальному пальнику) підходити до деталі з будь-якої сторони та під будь-яким кутом. Діапазон руху в 180 градусів та високий клас захисту **IP65** роблять його універсальним солдатом для важких умов цеху, де пил і вогні зварювання вивели б з ладу менш захищену техніку. Незважаючи на власну масу в 75 кг, він забезпечує стабільну точність у 0.1 мм, що цілком достатньо для якісних зварювальних швів. Основним недоліком такого маніпулятора є його «важкість» у рухах порівняно з сортувальними роботами. Він не придатний для швидкісного перекладання дрібних деталей, оскільки кожна зміна позиції потребує переміщення масивних ланок маніпулятора. Також вантажопідйомність у 6 кг є компромісною — її достатньо для зварювального пальника, але мало для переміщення великих агрегатів. Крім того, шестиосьові роботи вимагають складнішої системи безпеки, оскільки їхня зона досяжності охоплює великий об'єм навколо робота, що створює потенційну небезпеку для людей поруч.

У підсумку, вибір конкретної системи для дипломного проєкту має ґрунтуватися на балансі між швидкістю, точністю та складністю маніпуляцій. Дельта-роботи найкраще підходять для легкого та швидкого сортування, плоскі портали — для великих площ та надійної роботи в горизонтальній площині, а шестиосьові маніпулятори — для складних технологічних операцій на кшталт зварювання. Кожен з недоліків можна компенсувати правильним проектуванням робочої зони та вибором відповідного навісного обладнання (захоплювачів, вакуумних присосок або пальників).

Важливою перевагою дельта-роботів, таких як **Fanuc M-1iA** та **ABB IRB** корисну площу цеху. Це дозволяє створювати багатороботні осередки, де кілька маніпуляторів працюють у каскаді, значно підвищуючи загальну продуктивність

лінії. Проте значним недоліком залишається складність кінематичних розрахунків — через паралельну структуру управління осями потребує потужних контролерів і спеціалізованого програмного забезпечення, що збільшує початкову вартість проекту. Крім того, незважаючи на високу швидкість, механічні з'єднання важелів дельта-роботів з часом можуть люфтити, що вимагає регулярної калібрування для підтримки заявленої точності у 0.03 мм або 0.1 мм.

Якщо розглядати плоский портал **Festo YXCF**, то його незаперечною перевагою є модульність. Це дозволяє замінювати окремі електричні модулі переміщення без необхідності демонтажу всієї системи, що є критичним для мінімізації простоїв. Використання анодованого алюмінію та нержавіючої сталі в конструкції робить систему стійкою до агресивних середовищ і полегшує процес очищення. Однак портална схема має суттєве обмеження у вертикальному переміщенні — зазвичай хід осі Z значно менший, ніж у дельта-роботів або шестиосьових машин, що обмежує роботу лише з плоскими деталями або невисокими заготовками. Також портал вимагає ідеально рівної поверхні для монтажу, оскільки будь-яке відхилення лінійності понад 0,1 мм/м призводить до передчасного зносу модулів.

Шестиосьовий маніпулятор **ElectroTorg** вирізняється своєю адаптивністю до різних типів інструментів. Крім зварювання, його можна оснастити фрезерною головою або лазерним різак, що робить його універсальним інструментом у дрібносерійному виробництві. Високий клас захисту IP65 дозволяє використовувати маніпулятор у зонах з високою концентрацією дрібнодисперсного пилу, де порталні системи Festo могли б мати проблеми з відкритими напрямними. Головним мінусом тут виступає енергоспоживання: через необхідність постійно утримувати власну масу в 75 кг у різних просторових положеннях, такі роботи споживають більше електроенергії на одиницю корисного навантаження порівняно з енергоефективними дельта-роботами. Крім того, велика кількість рухомих з'єднань збільшує ймовірність виходу з ладу окремих вузлів, що потребує наявності кваліфікованого штату

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.031 ПЗ	Лис т
Змн.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		19

сервісних інженерів.

Таким чином, для систем швидкісного пакування дрібних деталей ідеально підходять дельта-роботи, для складських операцій на великих площах — плоскі портали, а для складних технологічних завдань у важких умовах — шестиосьові маніпулятори.

Електронні компоненти сортувальних роботів

Корпус ABB Flexpicker, 4 осі, використовувався для виділення та розміщення невеликих частин з конвеєрного живильника в лотки. Система інтегрованого зору дозволяє цьому швидкому роботі вибирати і розміщувати невеликі деталі або мішки, які виходять випадковим чином на конвеєр. Робототехнічна система включає в себе замкнуту комірку з роботом і конвеєрами.

Налаштування програми стає простим за допомогою програмного забезпечення PickMaster. Заснований на досвіді від 10 років, PickMaster перетворився на безцінну допомогу інтеграторам та користувачам IRB 360. Це спрощує конфігурацію бачення та пропонує інструменти програми, необхідні для ефективного застосування високошвидкісного збору.

Надійний, провідний на ринку контролер IRC5 також є невід'ємною частиною робочого рішення FlexPicker™. IRC5 з True-Move™ і QuickMove™ забезпечує найвищу швидкість разом із шляхами, що дають можливість робота відстежувати швидкі рухомі конвеєрні стрічки з високою точністю. IRC5 також доступний на панельній версії, що забезпечує значну економію місця та легку інтеграцію в машини та виробничі лінії.

З іншого боку, рік випуску (2010) може нести певні ризики, оскільки компоненти електроніки мають свій ресурс, і через 16 років експлуатації може виникнути потреба в оновленні апаратної частини контролера IRC5. Хоча система PickMaster є потужним інструментом, її використання вимагає наявності спеціально підготовленого персоналу, що може збільшити витрати на

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.031 ПЗ	Лис
						т
Змн.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		20

обслуговування. Основним обмеженням даної моделі з 4 осями є неможливість виконання складних просторових маніпуляцій, таких як нахил деталі під великим кутом, що робить її вузькоспеціалізованою виключно для операцій типу «взяв-поклав». Також, незважаючи на високу точність відстеження конвеєра, продуктивність системи сильно залежить від якості освітлення та контрастності об'єктів для роботи системи зору, що може призводити до помилок у разі забруднення камер або зміни умов навколишнього середовища.

У підсумку, ця конфігурація є перевіреним часом рішенням для швидкісного пакування, де поєднання надійного контролера та гнучкого софту PickMaster нівелює складність налаштування. Проте потенційний покупець або розробник проекту повинен враховувати вік системи та обмеження чотирьох осей у порівнянні з сучаснішими багатофункціональними маніпуляторами.

В якості датчика контролю відстані по осі Z будемо використовувати лазерний ToF датчик VL53L0X-V2 (рис. 1.7.), зовнішній вигляд якого показано на рисунку 5.8. Він використовує імпульсну технологію для точного вимірювання відстані до об'єкта, що забезпечує високу точність, до 1мм, у діапазоні до 2м.



Рис. 1.7. Датчик відстані VL53L0X-V2.

Основні технічні характеристики:

- Протокол зв'язку: I²C (до 400 кГц);
- Діапазон вимірювань відстані: 1 – 200 см;

- Напруга живлення: 2.6 – 3.5 В;
- Точність вимірювань відстані: ± 1 мм;

В якості камери для зорового позиціювання та розпізнавання об'єктів у полі зору робота будемо використовувати Logitech C270, яка зображена на рис. 1.8.

Вона підключатиметься до комп'ютера з метою обробки зображень у реальному часі.



Рис. 1.8 Камера Logitech C270

Основні технічні характеристики:

- Роздільна здатність: HD 720p;
- Підключення: USB 2.0;

Компоненти системи захвату

Система захвату в цьому проекті реалізована на основі вакуумної технології, що дозволяє швидко, надійно та обережно взаємодіяти з об'єктами різної форми та розміру. В склад системи входять наступні електричні компоненти: повітряний насос (рис. 1.9.) та електромагнітний клапан (рис. 1.10).

Функцією електронасосу є забезпечення зниження тиску у вакуумній системі, забезпечуючи силу притягання. Електромагнітний клапан дозволяє керувати герметичність вакуумної системи.



Рис. 1.9. Насос Airpump-370C.

Основні технічні характеристики:

- Напруга живлення: 12 В;
- Продуктивність: 2.8-3 л/хв;



Рис. 1.10. Електромагнітний клапан.

Основні технічні характеристики:

					01.09 – КР. 1044 "С" 2026.04.15.031 ПЗ	Лис
Змн.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		23

- Номінальна напруга: 12В;
- Максимальний тиск: 0.4 бар;

Для живлення усіх електричних компонентів використовується блок живлення на 12 В та струмом 10 А, зовнішній вигляд якого показано на рисунку

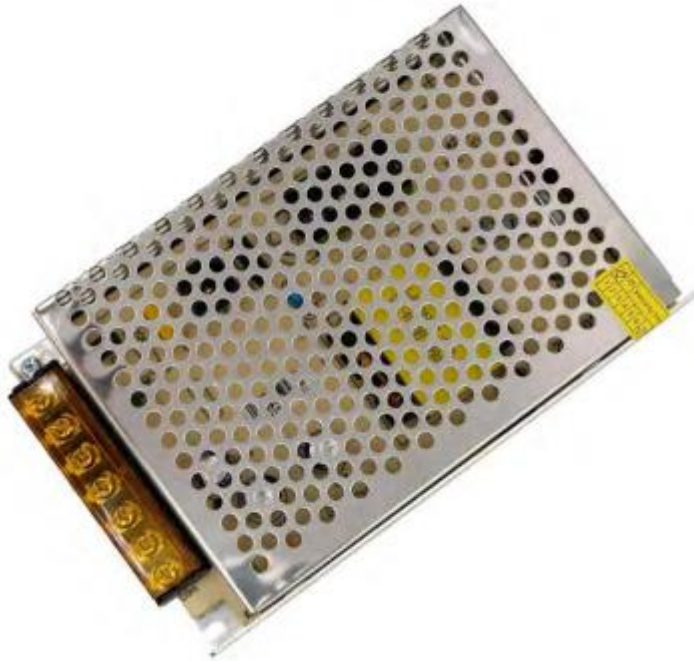


Рис. 1.11. Блок живлення.

До складу електричної принципової схеми входять:

- Мікроконтролер Arduino Uno;
- Драйвера моторів постійного струму A4988;
- Двигуни постійного струму Nema17 HS4401;
- Кінцеві вимикачі;

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК КОНСТРУКЦІЇ РОБОТА

2.1. Кінематичний та енергетичний розрахунок планетарної передачі.

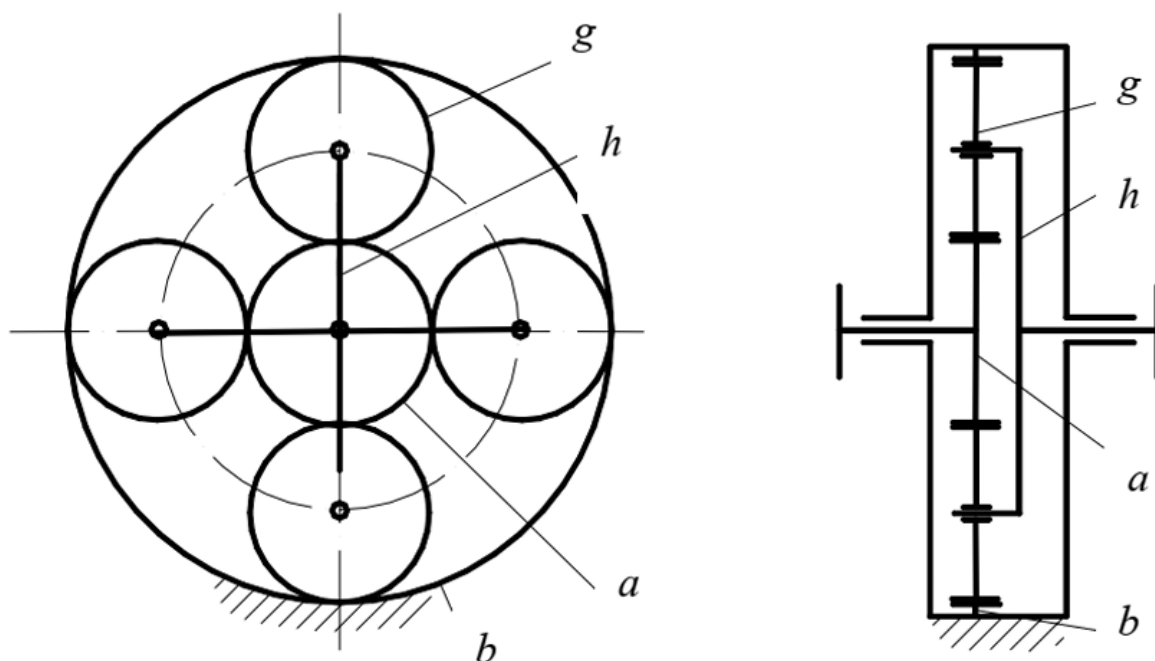


Рис. 2.1. Кінематична схема планетарної передачі 2К-Н

а – центральне колесо (вхідний вал); g – сателіт; b – центральне колесо;
h – водило (вихідний вал)

Вихідні дані:

Час напрацювання передачі $t_h = 20000$ год;

Оберти вхідного валу $n_a = 3000$ об/хв;

Оберти вихідного валу $n_h = 500$ об/хв;

Крутний момент на вхідному валу $T_a = 1.27 \cdot 10^3$ Н * мм;

Ступінь точності СТ = 6.

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.031 ПЗ		
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис.	Дата			
Розроб.	Лісіменко О.				Розділ 2. Розрахунок конструкції робота		Літ.
Перевір.	Сподоба О.О						Лист
							25
							55
Н. контр.					НУБіП України		
Затверд.							

Режим роботи: $T_1=1$; $T_2=0,9$; $T_3=0,83$; $n_1=1$; $n_2=1,12$; $n_3=1,2$; $t_1=0,65$; $t_2=0,2$; $t_3=0,15$.

Визначення загального передаточного числа планетарної передачі:

$$U_{(I)пл} = \frac{n_a}{n_h}, \quad (1)$$

$$U_{(I)пл} = \frac{3000}{500} = 6.$$

Визначимо передаточне відношення ступені a-g:

$$U_{(Ih)ag} = \frac{U_{(I)пл}}{2} - 1, \quad (2)$$

$$U_{(Ih)ag} = \frac{6}{2} - 1 = 2.$$

Визначимо передаточне відношення ступені g-b:

$$U_{(Ih)gb} = \frac{U_{(I)пл} - 1}{U_{(Ih)ag}}, \quad (3)$$

$$U_{(Ih)gb} = \frac{6 - 1}{2} = 2.5.$$

Визначимо частоту обертання колеса a:

$$n_{(h)a} = n_a - n_h, \quad (4)$$

$$n_{(h)a} = 3000 - 500 = 2500 \frac{\text{об}}{\text{хв}}.$$

Визначимо частоту обертання колеса g:

$$n_{(h)g} = \frac{n_{(h)a}}{U_{(Ih)ag}}, \quad (5)$$

$$n_{(h)g} = \frac{2500}{2} = 1250 \frac{\text{об}}{\text{хв}}.$$

Визначимо частоту обертання колеса b:

$$n_{(h)b} = n_h, \quad (6)$$

$$n_{(h)b} = 500 \frac{\text{об}}{\text{хв}}.$$

Визначимо кількість сателітів із умови сусідства:

$$a_{(I)c} = \frac{0.9 \cdot \pi}{\text{ArcSin}[\frac{U_{(I)пл} - 2}{U_{(I)пл}}]}, \quad (7)$$

$$a_{(I)c} = \frac{0.9 * \pi}{\text{ArcSin}[\frac{6-2}{6}]} = 3.87.$$

Приймаємо кількість сателітів $a_c = 3$.

Визначимо ККД передачі. $\eta_{\text{цил}} = 0.99$, ККД циліндричної передачі.

$$\eta_{\text{пл}} = 1 - \left(1 - \frac{1}{U_{(I)\text{пл}}}\right) * (1 - \eta_{\text{цил}}^2), \quad (8)$$

$$\eta_{\text{пл}} = 1 - \left(1 - \frac{1}{6}\right) * (1 - 0.99^2) = 0.98.$$

Коефіцієнт нерівномірності $k_{\text{нер}} = 1.15$ без використання плаваючих коліс для кількості сателітів $a_c = 3$.

Визначимо крутні моменти.

Крутний момент для ступені a-g:

$$T_{\text{ag}} = \frac{T_a * k_{\text{нер}}}{a_c}, \quad (9)$$

$$T_{\text{ag}} = \frac{1.27 * 10^3 * 1.15}{3} = 486.83 \text{ Н} * \text{мм}.$$

Крутний момент для ступені g-b:

$$T_{\text{gb}} = \frac{T_a * U_{(Ih)\text{ag}} * k_{\text{нер}}}{a_c}, \quad (10)$$

$$T_{\text{gb}} = \frac{1.27 * 10^3 * 2 * 1.15}{3} = 973.67 \text{ Н} * \text{мм}.$$

Визначення потужності на вхідному валу:

$$P_a = \frac{n_a * T_a}{9.55 * 10^6}, \quad (11)$$

$$P_a = \frac{3000 * 1.27 * 10^3}{9.55 * 10^6} = 0.39 \text{ кВт}$$

2.2. Визначення допустимих контактних напружень $[\sigma_H]$ для планетарної передачі 2К-Н типу А.

Для центрального колеса а, та сателітів g виберемо сталь 40Х.

Вид термообробки: поліпшення.

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.031 ПЗ	Лис
						м
Змн.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		27

Твердість $HB_a = HB_g = 245$.

Для центрального колеса b виберемо сталь 45.

Вид термообробки: нормалізація.

Твердість $HB_b = 194$.

Відповідно базові контактні напруження будуть дорівнювати:

- для центрального колеса a:

$$\sigma_{(Hlimba)} = 2 * HB_a + 70, \quad (11)$$

$$\sigma_{(Hlimba)} = 2 * 245 + 70 = 560 \text{ МПа.}$$

- для сателіту g:

$$\sigma_{(Hlimbg)} = 2 * HB_a + 70, \quad (12)$$

$$\sigma_{(Hlimbg)} = 2 * 245 + 70 = 560 \text{ МПа.}$$

- для центрального колеса b:

$$\sigma_{(Hlimbb)} = 2 * HB_b + 70, \quad (13)$$

$$\sigma_{(Hlimbb)} = 2 * 194 + 70 = 458 \text{ МПа.}$$

Визначимо базове число циклів переміни контактних напружень:

- для центрального колеса a:

$$\sigma_{(Hlimba)} = 2 * HB_a + 70, \quad (14)$$

$$\sigma_{(Hlimba)} = 2 * 245 + 70 = 560 \text{ МПа.}$$

- для сателіту g:

$$\sigma_{(Hlimbg)} = 2 * HB_a + 70, \quad (15)$$

$$\sigma_{(Hlimbg)} = 2 * 245 + 70 = 560 \text{ МПа.}$$

- для центрального колеса b:

$$\sigma_{(Hlimbb)} = 2 * HB_b + 70, \quad (16)$$

$$\sigma_{(Hlimbb)} = 2 * 194 + 70 = 458 \text{ МПа.}$$

Визначимо базове число циклів переміни контактних напружень:

- для центрального колеса a:

$$N_{HOa} = 30 * HB_a^{2.4}, \quad (17)$$

$$N_{HOa} = 30 * 245^{2,4} = 1.63 \times 10^7.$$

- для сателіту g:

$$N_{HOg} = 30 * HB_g^{2,4}, \quad (18)$$

$$N_{HOg} = 30 * 245^{2,4} = 1.63 \times 10^7.$$

- для центрального колеса b:

$$N_{HOb} = 30 * HB_b^{2,4}, \quad (19)$$

$$N_{HOb} = 30 * HB_b^{2,4} = 9.29 \times 10^6.$$

Коефіцієнт еквівалентності за контактними напруженнями при перемінному режимі навантаження:

$$K_{HE} = T_1^3 * n_1 * t_1 + T_2^3 * n_2 * t_2 + T_3^3 * n_3 * t_3, \quad (20)$$

$$K_{HE} = 1^3 * 1 * 0.65 + 0.9^3 * 1.12 * 0.2 + 0.83^3 * 1.2 * 0.15 = 0.92.$$

Число контактів за один оберт $c_a = c_b = a_c = 3$ для колеса а і b. $c_g = 1$ для сателіту.

Еквівалентні числа циклів переміни контактних напружень:

- для центрального колеса а:

$$N_{HEa} = 60 * n_{(h)a} * c_a * t_h * K_{HE}, \quad (21)$$

$$N_{HEa} = 60 * 2500 * 3 * 20000 * 0.92 = 8.25 \times 10^9.$$

- для сателіту g:

$$N_{HEg} = 60 * n_{(h)g} * c_g * t_h * K_{HE}, \quad (22)$$

$$N_{HEg} = 60 * 1250 * 1 * 20000 * 0.92 = 1.37 \times 10^9.$$

- для центрального колеса b:

$$N_{HEb} = 60 * n_{(h)b} * c_b * t_h * K_{HE}, \quad (23)$$

$$N_{HEb} = 60 * 500 * 3 * 20000 * 0.92 = 1.65 \times 10^9.$$

Коефіцієнти довговічності за контактними напруженнями

$$N_{HEa} > N_{HOa}, K_{HLa} = 1; \quad (24)$$

$$N_{HEg} > N_{HOg}, K_{HLg} = 1; \quad (25)$$

$$N_{HEb} > N_{HOb}, K_{HLb} = 1. \quad (26)$$

Приймаючи запас міцності за контактними напруженнями $S_H = 1.2$ визначимо допустимі контактні напруження.

- для центрального колеса а:

$$\sigma_{(H)a} = \frac{\sigma_{(Hlimba)}}{S_H} * K_{HLa}, \quad (27)$$

$$\sigma_{(H)a} = \frac{560}{1.2} * 1 = 466.67 \text{ МПа.}$$

- для сателіту g:

$$\sigma_{(H)g} = \frac{\sigma_{(Hlimbg)}}{S_H} * K_{HLg}, \quad (28)$$

$$\sigma_{(H)g} = \frac{560}{1.2} * 1 = 466.67 \text{ МПа.}$$

- для центрального колеса b:

$$\sigma_{(H)b} = \frac{\sigma_{(Hlimbb)}}{S_H} * K_{HLb}, \quad (29)$$

$$\sigma_{(H)b} = \frac{458}{1.2} * 1 = 381.67 \text{ МПа.}$$

Розрахункове допустиме напруження:

- для ступені a-g $\sigma_{(H)ag} = \sigma_{(H)a} = 466.67 \text{ МПа.}$

- для ступені g-b $\sigma_{(H)gb} = \sigma_{(H)b} = 381.67 \text{ МПа.}$

2.3. Визначення допустимих к напружень згину $[\sigma_F]$ для планетарної передачі 2К-Н типу А.

Базові напруження згину будуть дорівнювати:

- для центрального колеса а:

$$\sigma_{(Flimba)} = 1.8 * HB_a, \quad (30)$$

$$\sigma_{(Flimba)} = 1.8 * 245 = 441 \text{ МПа.}$$

- для сателіту g:

$$\sigma_{(Flimb g)} = 1.8 * HB_g, \quad (31)$$

$$\sigma_{(Flimb g)} = 1.8 * 245 = 441 \text{ МПа.}$$

- для центрального колеса b:

$$\sigma_{(Flimb g)} = 1.8 * HB_b, \quad (32)$$

$$\sigma_{(Flimb b)} = 1.8 * 194 = 349.2 \text{ МПа.}$$

Базове число циклів переміни напружень згину $N_{FO} = 4 * 10^6$.

Коефіцієнт еквівалентності за напруженнями згину при перемінному режимі навантаження. Так, як $HB \leq 350$, тоді $mf = 6$.

$$K_{FE} = T_1^{mf} * n_1 * t_1 + T_2^{mf} * n_2 * t_2 + T_3^{mf} * n_3 * t_3, \quad (33)$$

$$K_{FE} = 1^6 * 1 * 0.65 + 0.9^6 * 1.12 * 0.2 + 0.83^6 * 1.2 * 0.15 = 0.83.$$

Еквівалентні числа циклів переміни контактних напружень:

- для центрального колеса a:

$$N_{FEa} = 60 * n_{(h)a} * c_a * t_h * K_{FE}, \quad (34)$$

$$N_{FEa} = 60 * 2500 * 3 * 20000 * 0.83 = 7.45 \times 10^9.$$

- для сателіту g:

$$N_{FEg} = 60 * n_{(h)g} * c_g * t_h * K_{FE}, \quad (35)$$

$$N_{FEg} = 60 * 1250 * 1 * 20000 * 0.83 = 1.24 \times 10^9.$$

- для центрального колеса b:

$$N_{FEb} = 60 * n_{(h)b} * c_b * t_h * K_{FE}, \quad (36)$$

$$N_{FEb} = 60 * 500 * 3 * 20000 * 0.83 = 1.49 \times 10^9.$$

Коефіцієнти довговічності за напруженнями згину:

$$N_{FEa} > N_{FO}, K_{FLa} = 1, \quad (37)$$

$$N_{FEg} > N_{FO}, K_{FLg} = 1, \quad (38)$$

$$N_{FEb} > N_{FO}, K_{FLb} = 1. \quad (39)$$

Запас міцності за напруженнями згину приймаємо $S_F = 2$.

Коефіцієнти, які враховують вплив реверсивного навантаження передачі

$K_{FCa} = 1, K_{FCb} = 1$ для центральних колес a і b, $K_{FCg} = 0.8$ для сателіту.

Визначимо допустимі напруження згину:

- для центрального колеса a:

$$\sigma_{(F)a} = \frac{\sigma_{(Flimba)}}{S_F} * K_{FLa} * K_{FCa}, \quad (40)$$

$$\sigma_{(F)a} = \frac{441}{2} * 1 * 1 = 220.5 \text{ МПа.}$$

- для сателіту g:

$$\sigma_{(F)g} = \frac{\sigma_{(Flimbg)}}{S_F} * K_{FLg} * K_{FCg}, \quad (41)$$

$$\sigma_{(F)g} = \frac{441}{2} * 1 * 0.8 = 176.4 \text{ МПа.}$$

- для центрального колеса b:

$$\sigma_{(F)b} = \frac{\sigma_{(Flimbb)}}{S_F} * K_{FLb} * K_{FCb}, \quad (42)$$

$$\sigma_{(F)b} = \frac{349.2}{2} * 1 * 1 = 174.6 \text{ МПа.}$$

2.4. Проектний розрахунок планетарної передачі 2К-Н типу А.

Проектний розрахунок почнемо із ступені а-g.

Коефіцієнт навантаження приймаємо $K_H = 1.3$, коефіцієнт ширини зуба $\psi_{(I)bd} = 0.6$.

Діаметр центрального колеса із умови контактної міцності:

$$d_{(I)a} = 77^3 \sqrt{\frac{T_{ag} * K_H * (U_{(Ih)ag} + 1)}{\sigma_{(H)ag}^2 * \psi_{(I)bd} * U_{(Ih)ag}}}, \quad (43)$$

$$d_{(I)a} = 77^3 \sqrt{\frac{486.83 * 1.3 * (2 + 1)}{466.67^2 * 0.6 * 2}} = 14.91 \text{ мм.}$$

Ширина зуба центрального колеса а та сателіту g:

$$b_{(I)w1} = \psi_{(I)bd} * d_{(I)a}, \quad (44)$$

$$b_{(I)w1} = 0.6 * 14.91 = 8.95 \text{ мм.}$$

Приймаємо $b_{w1} = 9.0 \text{ мм.}$

Коефіцієнт навантаження приймаємо $K_F = 1.2$, коефіцієнт форми зуба $Y_F = 4.1$.

Модуль передачі із умови згинальної міцності:

$$m_{(I)} = \frac{2 \cdot T_{ag} \cdot K_F \cdot Y_F}{d_{(I)a} \cdot b_{w1} \cdot \sigma_{(F)g}}, \quad (45)$$

$$m_{(I)} = \frac{2 \cdot 486.83 \cdot 1.2 \cdot 4.1}{14.91 \cdot 9 \cdot 176.4} = 0.2.$$

Згідно ДСТУ ISO 54-2001 $m = 1$.

2.5. Підбір кількості зубів та уточнення передаточних чисел планетарної передачі 2К-Н типу А.

Знайдемо кількість зубів центрального колеса а:

$$z_a = \frac{d_{(I)a}}{m}, \quad (46)$$

$$z_a = \frac{14.91}{1} = 14.91.$$

Приймаємо $z_a = 17$.

Допоміжний коефіцієнт кількості зубів колеса b:

$$\lambda_{(I)} = \frac{U_{(I)пл}}{a_c} \cdot z_a, \quad (47)$$

$$\lambda_{(I)} = \frac{6}{3} \cdot 17 = 34.$$

Знайдемо кількість зубів центрального колеса b:

$$z_b = \lambda \cdot a_c - z_a, \quad (48)$$

$$z_b = 34 \cdot 3 - 17 = 85.$$

Знайдемо кількість зубів сателіта g:

$$z_g = \frac{z_b - z_a}{2}, \quad (49)$$

$$z_g = \frac{85 - 17}{2} = 34.$$

Проведемо уточнення передаточних чисел:

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.031 ПЗ	Лис м
Змн.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		33

$$U_{(h)ag} = \frac{z_g}{z_a}, \quad (50)$$

$$U_{(h)ag} = \frac{34}{17} = 2.$$

$$U_{(h)gb} = 1 * \frac{z_b}{z_g}, \quad (51)$$

$$U_{(h)gb} = 1 * \frac{85}{34} = 2.5.$$

$$U_{пл} = \frac{z_b}{z_a} + 1, \quad (52)$$

$$U_{пл} = \frac{85}{17} + 1 = 6.$$

Визначимо розбіжність між заданим та отриманим передаточним числом

$$\Delta = \left(\frac{U_{пл} - U_{(I)пл}}{U_{(I)пл}} \right), \quad (53)$$

$$\Delta = \left(\frac{6 - 6}{6} \right) = 0.$$

2.6. Визначення геометричних параметрів зачеплення планетарної передачі 2К-Н типу А.

Знайдемо міжосьову відстань між центральним колесом а та сателітом g:

$$a_w = m * \frac{z_a + z_g}{2}, \quad (54)$$

$$a_w = 1 * \frac{17 + 34}{2} = 25.5 \text{ мм.}$$

Знайдемо ділильні діаметри зубчастих коліс.

$$d_a = m * z_a, \quad (55)$$

$$d_a = 1 * 17 = 17 \text{ мм}$$

$$d_g = m * z_g, \quad (56)$$

$$d_g = 1 * 34 = 34 \text{ мм}$$

$$d_b = m * z_b, \quad (57)$$

$$d_b = 1 * 85 = 85 \text{ мм}$$

Знайдемо діаметри вершин зубчастих коліс.

$$d_{aa} = d_a + 2 * m, \quad (58)$$

$$d_{aa} = 17 + 2 * 1 = 19 \text{ мм}$$

$$d_{ag} = d_g + 2 * m, \quad (59)$$

$$d_{ag} = 34 + 2 * 1 = 36 \text{ мм}$$

$$d_{ab} = d_b - 2 * m, \quad (60)$$

$$d_{ab} = 85 - 2 * 1 = 83 \text{ мм}$$

Знайдемо діаметри впадин зубчастих коліс.

$$d_{f(a)} = d_a - 2 * m, \quad (61)$$

$$d_{f(a)} = 17 - 2 * 1 = 15 \text{ мм}$$

$$d_{f(g)} = d_g - 2 * m, \quad (62)$$

$$d_{f(g)} = 34 - 2 * 1 = 32 \text{ мм}$$

$$d_{f(b)} = d_b + 2 * m, \quad (63)$$

$$d_{f(b)} = 85 + 2 * 1 = 87 \text{ мм}$$

Знайдемо початкові діаметри:

$$d_{w(a)} = \frac{2 * a_w}{U_{(h)ag} + 1}, \quad (64)$$

$$d_{w(a)} = \frac{2 * 25.5}{2 + 1} = 17 \text{ мм}$$

$$d_{w(g)} = d_{w(a)} * U_{(h)ag}, \quad (65)$$

$$d_{w(g)} = 17 * 2 = 34 \text{ мм}$$

$$d_{w(b)} = d_{w(g)} * U_{(h)gb}, \quad (66)$$

$$d_{w(b)} = 34 * 2.5 = 85 \text{ мм}$$

Знайдемо діаметри основних кіл зубчастих коліс. Кут зачеплення $\alpha = 20$.

Знайдемо кути при вершині зубів.

$$d_{ba} = d_a * \text{Cos}[\alpha], \quad (67)$$

$$d_{ba} = 17 * \text{Cos}[20] = 15.97,$$

$$d_{bg} = d_g * \cos[\alpha], \quad (68)$$

$$d_{bg} = 34 * \cos[20] = 31.95$$

$$d_{bb} = d_b * \cos[\alpha], \quad (69)$$

$$d_{bb} = 85 * \cos[20] = 79.87$$

Знайдемо коефіцієнти торцевого перекриття:

$$\alpha_{aa} = \arccos\left[\frac{d_{ba}}{d_{aa}}\right], \quad (70)$$

$$\alpha_{aa} = \arccos\left[\frac{15.97}{19}\right] = 32.78$$

$$\alpha_{ag} = \arccos\left[\frac{d_{bg}}{d_{ag}}\right], \quad (71)$$

$$\alpha_{ag} = \arccos\left[\frac{31.95}{36}\right] = 27.44$$

$$\alpha_{ab} = \arccos\left[\frac{d_{bb}}{d_{ab}}\right], \quad (72)$$

$$\alpha_{ab} = \arccos\left[\frac{79.87}{83}\right] = 15.78$$

Знайдемо коефіцієнти торцевого перекриття:

$$\epsilon_{\alpha 1} = \frac{1}{2 * \pi} (z_a * \tan[\alpha_{aa}] + z_g * \tan[\alpha_{ag}] - (z_g + z_a) * \tan[\alpha]), \quad (73)$$

$$\epsilon_{\alpha 1} = \frac{1}{2 * \pi} (17 * \tan[32.78] + 34 * \tan[27.44] - (34 + 17) * \tan[20]) = 1.60$$

$$\epsilon_{\alpha 2} = \frac{1}{2 * 3.14} (z_g * \tan[\alpha_{ag}] + z_b * \tan[\alpha_{ab}] - (z_b - z_g) * \tan[\alpha]), \quad (74)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{\alpha 2} &= \frac{1}{2 * 3.14} (34 * \tan[27.44] + 85 * \tan[15.78] - (85 - 34) * \tan[20]) \\ &= 3.68 \end{aligned}$$

2.7. Визначення ширини вінця центрального колеса в планетарної передачі 2К-Н типу А.

Визначимо ширину зубчастого вінця центрального колеса b із розрахунку на контактну міцність:

$$b_{w2(H)} = 77^3 * \frac{T_{gb} * K_H * (U_{(h)gb} - 1)}{\sigma_{(H)gb}^2 * d_g^2 * U_{(h)gb}}, \quad (75)$$

$$b_{w2(H)} = 77^3 * \frac{973.67 * 1.3 * (2.5 - 1)}{381.67^2 * 34^2 * 2.5} = 2.06 \text{ мм.}$$

Визначимо ширину зубчастого вінця колеса b із розрахунку на згинальну міцність. Коефіцієнт форми зуба $Y_{F(b)} = 3.6$.

$$b_{w2(F)} = \frac{2 * T_{gb} * K_F * Y_{F(b)}}{d_b * m * \sigma_{(F)b}}, \quad (76)$$

$$b_{w2(F)} = \frac{2 * 973.67 * 1.2 * 3.6}{85 * 1 * 174.6} = 0.57 \text{ мм.}$$

Із конструктивних особливостей приймаємо $b_{w2} = 9.0 \text{ мм.}$

2.8. Перевірочний розрахунок планетарної передачі 2К-Н типу А.

Міцність ступені а-г. Для прямозубих передач коефіцієнт, який враховує розподіл навантаження між зубами при багато парному зачепленні $K_{H\alpha} = 1$.

Коефіцієнт $K_{F\alpha}$ розраховується за формулою:

$$K_{F\alpha} = \frac{9 - CT}{11\sqrt{\epsilon_{\alpha 1}}} + \frac{CT - 3}{6}, \quad (77)$$

$$K_{F\alpha} = \frac{9 - 6}{11\sqrt{1.6}} + \frac{CT - 3}{6} = 0.72$$

Відносна ширина колеса:

$$\psi_{bd1} = \frac{b_{w1}}{d_{w(a)}}, \quad (78)$$

$$\psi_{bd1} = \frac{9}{17} = 0.53$$

При $\psi_{bd1} = 0.6$ $K_{\beta} = 1.1$

Значення колової швидкості розраховується за наступною формулою:

$$V = \frac{3.14 * d_{w(a)} * n_{(h)a}}{6 * 10^4}, \quad (79)$$

$$V = \frac{3.14 * 17 * 2500}{6 * 10^4} = 2.22 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Коефіцієнт динамічності $K_V = 1.04$.

Тоді коефіцієнти навантаження будуть дорівнювати:

$$K_H = K_{H\alpha} * K_\beta * K_V, \quad (80)$$

$$K_H = 1 * 1.1 * 1.04 = 1.14.$$

$$K_F = K_{F\alpha} * K_\beta * K_V, \quad (81)$$

$$K_F = 0.72 * 1.1 * 1.04 = 0.82.$$

Коефіцієнт, який враховує перекриття:

$$Z_{\epsilon 1} = \sqrt{\frac{4 - \epsilon_{\alpha 1}}{3}}, \quad (82)$$

$$Z_{\epsilon 1} = \sqrt{\frac{4 - 1.6}{3}} = 0.89.$$

Контактні напруження будуть дорівнювати:

$$\sigma_{Hag} = \frac{688 * Z_{\epsilon 1}}{d_{w(a)}} * \sqrt{\frac{T_{ag} * K_H * (U_{(h)ag} + 1)}{b_{w1} * U_{(h)ag}}}, \quad (83)$$

$$\sigma_{Hag} = \frac{688 * 0.89}{17} * \sqrt{\frac{486.83 * 1.14 * (2 + 1)}{9 * 2}} = 348.92 \text{ МПа.}$$

Контактна міцність забезпечена оскільки $\sigma_{Hag} \leq [\sigma_{Hag}]$.

Визначимо недовантаження за контактними напруженнями.

$$\Delta H_{ag} = \frac{\sigma_{(H)ag} - \sigma_{Hag}}{\sigma_{(H)ag}}, \quad (84)$$

$$\Delta H_{ag} = \frac{466.67 - 348.92}{466.67} = 0.25$$

Перевіримо міцність при згині. Коефіцієнт форми зуба $Y_{F(a)} = 4.26$;

$$Y_{F(g)} = 3.76.$$

Напруження згину будуть дорівнювати:

$$\sigma_{Fa} = \frac{2 * T_{ag} * K_F * Y_{F(a)}}{d_{w(a)} * b_{w1} * m}, \quad (85)$$

$$\sigma_{Fa} = \frac{2 * 486.83 * 0.82 * 4.26}{17 * 9 * 1} = 22.2 \text{ МПа.}$$

$$\sigma_{Fg} = \sigma_{Fa} * \frac{Y_{F(g)}}{Y_{F(a)}}, \quad (86)$$

$$\sigma_{Fg} = 22.2 * \frac{3.76}{4.26} = 19.59 \text{ МПа.}$$

Визначимо недовантаження за напруженнями згину.

$$\Delta F_a = \frac{\sigma_{(F)a} - \sigma_{Fa}}{\sigma_{(F)a}}, \quad (87)$$

$$\Delta F_a = \frac{220.5 - 22.2}{220.5} = 0.9$$

$$\Delta F_g = \frac{\sigma_{(F)g} - \sigma_{Fg}}{\sigma_{(F)g}}, \quad (88)$$

$$\Delta F_g = \frac{176.4 - 19.59}{176.4} = 0.89 \text{ МПа.}$$

Міцність ступені g-b. Для прямозубих передач коефіцієнт, який враховує розподіл навантаження між зубами при багатопарному зачепленні $K_{H\alpha} = 1$.

Коефіцієнт $K_{F\alpha}$ розраховується за формулою:

$$K_{F\alpha} = \frac{9 - CT}{11\sqrt{\epsilon_{\alpha 2}}} + \frac{CT - 3}{6}, \quad (89)$$

$$K_{F\alpha} = \frac{9 - 6}{11\sqrt{3.68}} + \frac{6 - 3}{6} = 0.64.$$

Відносна ширина колеса:

$$\psi_{bd} = \frac{b_{w2}}{d_{w(g)}}, \quad (90)$$

$$\psi_{bd} = \frac{9}{34} = 0.26.$$

Приймаємо при даному значенні ψ_{bd} , $K_{\beta} = 1.02$.

Коефіцієнти навантаження будуть дорівнювати:

$$K_H = K_{H\alpha} * K_{\beta} * K_V, \quad (91)$$

$$K_H = 1 * 1.02 * 1.04 = 1.06$$

$$K_F = K_{F\alpha} * K_{\beta} * K_V, \quad (92)$$

$$K_F = 0.64 * 1.02 * 1.04 = 0.68$$

Коефіцієнт, який враховує перекриття:

$$Z_{\epsilon 2} = \sqrt{\left| \frac{4 - \epsilon_{\alpha 2}}{3} \right|}, \quad (93)$$

$$Z_{\epsilon 2} = \sqrt{\left| \frac{4 - 3.68}{3} \right|} = 0.33$$

Контактні напруження будуть дорівнювати:

$$\sigma_{Hgb} = \frac{688 * Z_{\epsilon 2}}{d_{w(g)}} * \sqrt{\frac{T_{gb} * K_H * (U_{(h)gb} - 1)}{b_{w2} * U_{(h)gb}}}, \quad (94)$$

$$\sigma_{Hgb} = \frac{688 * 3.68}{34} * \sqrt{\frac{973.67 * 1.06 * (2.5 - 1)}{9 * 2.5}} = 54.91 \text{ МПа.}$$

Контактна міцність забезпечена оскільки $\sigma_{Hgb} \leq [\sigma_{Hgb}]$.

Визначимо недовантаження за контактними напруженнями.

$$\Delta H_{gb} = \frac{\sigma_{(H)gb} - \sigma_{Hgb}}{\sigma_{(H)gb}}, \quad (95)$$

$$\Delta H_{gb} = \frac{381.67 - 54.91}{381.67} = 0.86.$$

Перевіримо міцність при згині. Коефіцієнт форми зуба $Y_{F(b)} = 3.6$.

Напруження згину будуть дорівнювати:

$$\sigma_{Fb} = \frac{2 * T_{gb} * K_F * Y_{F(b)}}{d_{w(g)} * b_{w2} * m}, \quad (96)$$

$$\sigma_{Fb} = \frac{2 * 973.67 * 0.68 * 3.6}{34 * 9 * 1} = 15.61 \text{ МПа.}$$

Визначимо недовантаження за напруженнями згину.

$$\Delta F_b = \frac{\sigma_{(F)b} - \sigma_{Fb}}{\sigma_{(F)b}}, \quad (97)$$

$$\Delta F_b = \frac{174.6 - 15.61}{174.6} = 0.91.$$

РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ

3.1. Безпека елементів робота-маніпулятора

Забезпечення безпеки при експлуатації робототехнічних систем є критично важливим аспектом проектування, що охоплює захист як обслуговуючого персоналу, так і самої конструкції маніпулятора від передчасного зносу чи аварійних поломок. Особливість робота-маніпулятора полягає у високій динаміці рухів та значних зусиллях, що виникають у вузлах передачі моменту (зокрема у планетарних редукторах, розглянутих у попередніх розділах). Тому комплекс заходів безпеки повинен включати механічні, апаратні та програмні рішення.

Механічні засоби захисту та конструктивна безпека Першим рівнем захисту є фізичне обмеження робочого простору маніпулятора. Для запобігання виходу ланок за межі допустимих кутів повороту використовуються жорсткі механічні упори. Вони розраховані на повне поглинання кінетичної енергії маніпулятора у разі відмови системи програмного керування. Окрім упорів, конструкція має передбачати захисні кожухи для всіх рухомих елементів та відкритих передач. Це запобігає потраплянню сторонніх предметів у зону зачеплення зубчастих коліс, що особливо важливо для збереження цілісності планетарних механізмів.

Важливим елементом є система гальмування. Для вертикальних осей обов'язковим є використання електромагнітних гальм нормально-закритого типу. У разі раптового зникнення електроживлення або активації сигналу аварійної зупинки, такі гальма автоматично фіксують вали двигунів, запобігаючи неконтрольованому падінню ланок під дією сили тяжіння. Це

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.031 ПЗ							
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис.	Дата								
Розроб.	Лісіменко О. С				Розділ 3. Охорона праці				Літ.	Лист	Листів	
Перевір.	Сподоба О.О										41	55
									НУБіП України			
Н. контр.												
Затверд.												

захищає не лише оператора, а й запобігає динамічним ударам, які можуть пошкодити прецизійні вузли маніпулятора.

Апаратний моніторинг та датчики зворотного зв'язку Другий рівень безпеки базується на інтелектуальному моніторингу стану елементів у реальному часі. Для цього використовується мережа датчиків, що дублюють функції один одного. Кінцеві вимикачі встановлюються безпосередньо на зчленуваннях для фіксації крайніх положень. Одночасно з цим, абсолютні енкодери на валах двигунів дозволяють контролеру постійно порівнювати задану траєкторію з фактичною. При виявленні розбіжності (наприклад, через заклинювання механізму або перешкоду) система негайно припиняє рух.

Сучасні маніпулятори також оснащуються датчиками моменту або системами контролю струму в приводах. Це дозволяє реалізувати функцію «чутливого дотику»: якщо маніпулятор торкається об'єкта, не передбаченого програмою, зростання опору миттєво фіксується як аварійна ситуація. Такий підхід мінімізує ризики при роботі в колаборативному середовищі або при сортуванні крихких вантажів.

Електробезпека та програмні алгоритми захисту Окрему увагу слід приділити електричній безпеці. Враховуючи велику кількість кабельних з'єднань, що проходять крізь рухомі зчленування, існує ризик перетирання ізоляції. Для запобігання цьому використовуються спеціальні гнучкі кабель-канали та внутрішня прокладка магістралей. Всі металеві частини маніпулятора повинні мати надійне заземлення, а система живлення — бути оснащеною захистом від перевантажень та коротких замикань.

На рівні програмного забезпечення безпека реалізується через розмежування прав доступу та встановлення «м'яких» лімітів. Програма керування містить алгоритми самодіагностики, які перед початком кожного циклу перевіряють працездатність усіх вузлів. Також передбачено режим обмеженої швидкості (Teach Mode), в якому робот рухається повільно, що дозволяє людині безпечно перебувати поруч під час налагодження чи

програмування. Кнопки екстреної зупинки (E-Stop) мають бути розташовані як на пульті керування, так і в доступних місцях по периметру робочої зони, забезпечуючи миттєве знеструмлення приводів у будь-який момент.

Таким чином, інтеграція механічних запобіжників, системи сенсорів та програмних обмежень створює надійний фундамент для безаварійної роботи маніпулятора, що є обов'язковою умовою для впровадження автоматизованих систем на виробництві.

3.2. Безпека вихідних матеріалів

Безпека вихідних матеріалів у процесі автоматизованого сортування є критичним фактором, що визначає безаварійність роботи маніпулятора та збереження цілісності продукції. Оскільки робот взаємодіє з об'єктами за допомогою захватного пристрою та передає зусилля через планетарний редуктор, будь-яка невідповідність характеристик матеріалу може призвести до механічних пошкоджень або зупинки лінії.

Основними аспектами безпеки при поводженні з вихідними матеріалами є контроль їх фізичних параметрів (маса, габарити) та запобігання агресивному впливу середовища (пил, статична електрика, хімічна активність). Для забезпечення стабільної роботи системи необхідно дотримуватися вимог до об'єктів маніпулювання, які наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1.

Вимоги до безпеки та контролю вихідних матеріалів

Характеристика матеріалу	Можливий ризик для системи	Заходи забезпечення безпеки
Маса та габарити	Перевантаження планетарної передачі, поломка валів.	Попередній контроль ваги, використання систем машинного зору.

Характеристика матеріалу	Можливий ризик для системи	Заходи забезпечення безпеки
Стан поверхні	Проковзування об'єкта, падіння, деформація виробу.	Використання адаптивних накладок на захват, контроль зусилля затискання.
Запиленість/Абразивність	Передчасний знос підшипників та зубчастих коліс редуктора.	Встановлення захисних ущільнень (IP65), примусове очищення робочої зони.

Комплексний підхід до аналізу вихідних матеріалів дозволяє не лише мінімізувати ризик виходу з ладу прецизійних вузлів маніпулятора, а й гарантувати екологічну та пожежну безпеку всього сортувального комплексу. Програмне забезпечення робота повинно включати алгоритми ідентифікації небезпечних об'єктів для їх своєчасного видалення з потоку без пошкодження обладнання.

3.3. Безпека органів управління

Конструкція управління роботом забезпечують оптимальні умови праці та були виконані відповідно до вимог ГОСТ 12.2.064, ГОСТ 12.2.061, ГОСТ 12.2.003:

- органи управління мають засоби екстреного відключення;

- відстань між органом управління виключає можливість змінити його при маніпуляції з сусіднім органом управління

3.4. Безпека захисного обладнання, що входить в конструкцію

Для гарантування безпеки процесу необхідно враховувати динамічні параметри, наведені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2.

Параметри безпеки та методи контролю об'єктів

Фактор ризику	Вплив на систему	Метод забезпечення безпеки
Кінетична енергія	Ризик деформації об'єкта при контакті з захватом.	Встановлення уповільнювачів на швидкісних ділянках.
Геометрія профілю	Непередбачувана траєкторія або перекидання.	Оптимізація кутів нахилу згідно з розрахунковою схемою.
Зовнішнє середовище	Зміна тертя через вологість або обледеніння.	Використання антифрикційних покриттів та очищення колій.
Статичний заряд	Пошкодження електроніки та датчиків зору.	Заземлення металевих конструкцій сортувального пристрою.

Безпека вихідних матеріалів також реалізується через «м'яке» захоплення. Система керування на базі Arduino або PLC повинна враховувати інерцію об'єкта, що спускається, та адаптувати зусилля приводу захвату. Це дозволяє уникнути динамічних ударів, зберігаючи геометричну форму та фізичні властивості матеріалів у межах встановлених норм. Таким чином, узгодження технічного

профілю гірки з алгоритмами роботи маніпулятора є основою безпечної експлуатації всього комплексу.

3.5. Безпека під час монтажу та ремонту

Безпека під час встановлення та ремонтних робіт забезпечується захисним обладнанням, інструментами та пристроями, які відповідають вимогам державних стандартів.

Захисні елементи, інструменти та пристрої піддаються огляду та тестуванню.

Особи, які пройшли спеціальний інструктаж та вивчали цей технічний опис та інструкції з експлуатації допускаються до обслуговування.

с монтажу та експлуатації потрібно виконувати:

- правил електричних установок;
- правил безпеки для експлуатації споживчих електричних установок.

3.6. Безпека під час транспортування та зберігання

Для забезпечення надійної роботи сортувального робота та збереження точності планетарної передачі необхідно дотримуватись таких вимог:

1).Транспортування:

Перевезення компонентів робота повинно здійснюватися у жорсткій тарі, що унеможливило б удари та вібрації, які можуть пошкодити зуби коліс редуктора або налаштування камери технічного зору.

Вхідний вал (а) та водило (h) мають бути зафіксовані для запобігання самовільному обертанню та виникненню динамічних навантажень на сателіти.

2).Зберігання:

Робот має зберігатися у закритих приміщеннях при температурі +5...+35°C та вологості до 70%.

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.031 ПЗ	Лис
						т
Змн.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		46

Усі металеві деталі (особливо планетарна передача, виготовлена зі сталі 40Х та 45) повинні бути покриті консерваційним мастилом для запобігання корозії.

Забороняється зберігання робота поруч із хімічно активними речовинами, що можуть пошкодити ізоляцію приводів або оптику системи сортування.

3.7. Безпека при розміщенні

Вимоги до розміщення сортувального робота спрямовані на стабільну роботу механізмів та захист персоналу.

Таблиця 3.3

Вимоги до розміщення сортувального робота

Категорія вимог	Основні заходи та норми
Монтажна основа	Робот встановлюється на жорстку станину, що гасить вібрації для збереження точності планетарної передачі та системи технічного зору.
Робоча зона	Навколо маніпулятора має бути вільний простір (не менше 0,8 м) для безпечного обслуговування та вільного руху механізмів.
Електробезпека	Контролер Arduino та блоки живлення розміщуються у вентильованому герметичному боксі, заземленому згідно з ДСТУ.
Освітлення	Рівномірне штучне освітлення без відблисків у зоні роботи камери для коректного розпізнавання об'єктів сортування.
Огородження	Встановлення захисних екранів або світлових бар'єрів, що блокують роботу привода при потраплянні людини в зону руху робота.

3.8. Пожежна безпека

Пожежна безпека обладнання повинна забезпечуватися відповідно до вимог цих стандартів, ГОСТ 12.1.004, ГОСТ 12.1.018, ПУЭ, ПТЭ, и ПТБ, СНиП 3.05.06, СНиП 3.05.07. Враховуючи ці показники вибрали тип виконання, тип вибухозахисту електричного обладнання та ступінь його захисту від пилу та вологи. Щоб забезпечити пожежну безпеку об'єкта, в зоні експлуатації робота-маніпулятора, необхідно використовувати заходи щодо запобігання пожежам: - організаційні (інструктаж персоналу, розробка плану евакуації тощо);

- технічні (елементи з негорючих перепон);
- режимні (куріння та прийом їжі в спеціальних місцях);
- експлуатаційні (профілактичні обстеження) [25].

Контроль за виконанням вимог безпеки

Контроль за виконанням вимог безпеки під час роботи робота маніпулятора призначається відповідальними особами відповідно до юридичних та нормативних документів для створення безпеки та нормальних умов праці.

Безпека в надзвичайних ситуаціях

Якщо трапляється надзвичайна ситуація, то необхідно: 1) 2) 3) вимкнути електроенергію в лабораторії; дотримуватись порядку посадових інструкцій; вийти з будівлі і керуватись розпорядження головною цивільної оборони та надзвичайних ситуацій.

Екологічна безпека робота-маніпулятора

Експлуатація сортувального робота-маніпулятора має мінімальний техногенний вплив на навколишнє середовище, проте потребує дотримання норм утилізації та обслуговування.

Запобігання забрудненню: Основним джерелом потенційного забруднення є мастильні матеріали, що використовуються в планетарній передачі 2К-Н. Для мінімізації ризиків корпус редуктора повинен бути

герметичним, щоб запобігти витоку мастила в робочу зону та на сортовану продукцію.

Енергоефективність: Використання мікроконтролерного керування (Arduino) та оптимізованих режимів роботи двигунів дозволяє знизити споживання електроенергії, що відповідає сучасним вимогам екологічного проектування.

Утилізація компонентів: Після завершення розрахункового терміну експлуатації (20 000 годин) металеві деталі маніпулятора (сталі 40Х, 45) підлягають вторинній переробці як металобрухт. Електронні компоненти (плати, сенсори, камера) повинні утилізуватися спеціалізованими підприємствами згідно з нормами поводження з електронними відходами.

Шум та вібрація: Завдяки високій ступені точності виготовлення зубчастих коліс (СТ=6), робот працює з низьким рівнем шуму, що не перевищує допустимі санітарні норми для виробничих приміщень.

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.031 ПЗ	Лис
						т
Змн.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		49

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.031 ПЗ								
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис.	Дата					Лім.	Лист	Листів		
Розроб.		Лісіменко О.			Розділ 4. Розрахунок економічної ефективності								
Перевір.		Сподоба О.О									50	55	
									НУБіП України				
Н. контр.													
Затверд.													

Вартість стандартних виробів

Найменування виробу	Кількість	Ціна за од., грн	Сума, грн
Контролер Arduino Uno	1	450	450
Кроковий двигун (з драйвером)	3	850	2550
Модуль технічного зору (камера)	1	1200	1200
Підшипники (для планетарної передачі)	6	120	720
Блок живлення	1	600	600
Разом			5520

4.4. Розрахунок заробітної плати розробник

Витрати на оплату праці розраховуються виходячи з трудомісткості робіт (проектування, розрахунок редуктора, програмування Arduino).

1. Тривалість робіт: 2 місяці (40 робочих днів).
2. Умовна денна ставка: 500 грн.
3. ЗП = $40 * 500 = 20\ 000$ грн.
4. Нарахування на ЗП (ЄСВ 22%): 4 400 грн.

4.5. Визначення загальної вартості

Загальні витрати на розробку ($C_{\text{заг}}$):

(98)

$$C_{\text{заг}} = m + \Pi + 3\Pi_{\text{осн}} + \text{Нахахування} + \text{Інші}$$
$$C_{\text{заг}} = 1520 + 5520 + 20000 + 4400 + 1500(\text{накладні}) = 32940 \text{ грн.}$$

4.6. Розрахунок економічної ефективності

Економічний ефект від впровадження робота досягається за рахунок заміни ручної праці та підвищення швидкості сортування.

1. Продуктивність: Робот забезпечує безперервну роботу 24/7 (ресурс редуктора 20 000 год), що замінює роботу 2-х сортувальників на зміну.

2. Річна економія: При заробітній платі одного робітника 15 000 грн/міс, річні витрати на персонал складають 180 000 грн.

3. Термін окупності ($T_{\text{ок}}$):

$$T_{\text{ок}} = \frac{\text{Капітальні інвестиції}}{\text{Річна економія}} \quad (99)$$

$$T_{\text{ок}} = \frac{32940}{180000} = 0.18 \text{ року (близько 2.5 місяців).}$$

4.7. Розрахунок економії

Середня ціна на ринку за готовий автоматизований вузол сортування (дельта-робота) базової комплектації варіюється в межах від \$4000 до \$6000.

При середньому курсі 40 грн/\$, вартість аналогу становить: ~200 000 грн.

Економія при виборі власної конструкції замість закупівлі готового обладнання розраховується за формулою:

$$E_{\text{впров}} = B_{\text{анал}} - K \quad (100)$$

Де $V_{\text{анал}}$ – вартість аналогу; K – капітальні витрати на власну розробку.

$$E_{\text{впров}} = 200000 - 32940 = 167060.$$

Таблиця 4.3

Показник	Промисловий аналог	Власна розробка	Економія
Вартість обладнання, грн	200 000	32 940	167 060
Відносна вартість %	100%	16,5%	83,5%

Економія на етапі впровадження складає **167 060 грн** порівняно з закупівлею серійного робота.

Виготовлення власного маніпулятора обходиться підприємству в **6 разів дешевше**, ніж придбання готового аналога, при збереженні необхідної функціональності для процесів сортування.

ВИСНОВКИ

У ході виконання бакалаврської роботи було розроблено конструкцію сортувального робота-маніпулятора та обґрунтовано доцільність його впровадження.

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану автоматизації пакувально-сортувальних ліній. Вивчення конструкцій дельта-роботів та аналогів дозволило визначити необхідні технічні характеристики майбутнього маніпулятора та сформулювати вимоги до його кінематики.

У другому розділі виконав повний конструкторський розрахунок. Розроблено планетарну передачу типу 2К-Н із передаточним числом $u = 6$.

Розрахунки на міцність та контактну витривалість підтвердили, що використання сталей 40Х та 45 забезпечує надійну роботу механізму протягом заданого ресурсу у 20 000 годин.

У третьому розділі опрацьовано питання промислової безпеки та екологічності. Визначено основні небезпечні чинники при експлуатації роботизованого вузла та запропоновано заходи з охорони праці.

У четвертому розділі проведено економічна ефективність проекту.

Встановлено, що власна розробка у 6 разів дешевше за ринкові аналоги. За рахунок автоматизації та заміни ручної праці тепмін окупності проекту складає 2.5 місяця.

Таким чином, розроблений сортувальний робот є технічно досконалим та економічно ефективним рішенням, готовим до практичного впровадження на підприємство.

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.031 ПЗ			
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис.	Дата				
Розроб.		Лісіменко О. С			Висновки			
Перевір.		Сподоба О.О						
Н. контр.								
Затверд.								
						Літ.	Лист	Листів
							54	55
						НУБіП України		

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Іванов І. І. Основи робототехніки : навч. посіб. – Київ : Видавництво НУБіП України, 2021. – 256 с.
2. Петров П. П. Автоматизація виробничих процесів : підручник. – Харків : Фактор, 2020. – 312 с.
3. Сидоренко В. М. Промислові роботи та маніпулятори. – Львів : Новий Світ-2000, 2019. – 284 с.
4. Коваленко О. С. Мікроконтролери Arduino в системах керування : навч. посіб. – Одеса : Астропринт, 2022. – 198 с.
5. ABB Robotics. IRB 360 FlexPicker Product Specification. – Västerås : ABB Group, 2021. – 74 p.
6. FANUC Corporation. FANUC M-1iA Robot Series Manual. – Oshino : FANUC, 2020. – 65 p.
7. Festo AG. YXCF Handling System Technical Data. – Esslingen : Festo, 2022. – 58 p.
8. ДСТУ ISO 54:2001. Передачі зубчасті циліндричні. Модулі та діаметральні кроки. – Київ : Держстандарт України, 2002. – 14 с.
9. Бондаренко Л. А. Теорія механізмів і машин : підручник. – Київ : Каравела, 2018. – 344 с.
10. Мельник Р. В. Системи машинного зору в робототехніці. – Дніпро : Ліра, 2023. – 221 с.
11. Arduino Documentation. Arduino Uno Rev3 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.arduino.cc/> – дата звернення: 25.05.2026.
12. Мерхель І.І. Деталі машин: Навчальний посібник. –К.: Алерта, 2005. - 368с.: іл.

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.031 ПЗ								
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис.	Дата	Список літературних джерел				Лім.	Лист	Листів		
Розроб.	Лісіменко О. С												
Перевір.	Сподоба О.О										55	55	
									НУБіП України				
Н. контр.													
Затверд.													

13. Репозиторій Харківського національного університету радіоелектроніки – URL: <https://openarchive.nure.ua/entities/publication/1c8ae6d1-9298-414e-b573-49577eb7fb74> (дата звертання: 26.05.2026).
14. Промислові роботи ABB IRB 360 FlexPicker – URL: <https://www.eurobots.com.ua/abb-robots-abb-irb-360-flexpicker-cell--p229-uk.html> (дата звертання: 26.05.2026).
15. Охорона праці та промислова безпека. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://nov-rada.gov.ua/2021/05/18/okhorona-pratsi ta-promyslova-bezpeka/>
16. Урок: вимог безпеки до технологічних процесів і обладнання. [Електронний ресурс] – <https://vseosvita.ua/lesson/vymohy-bezpeky-do-tekhnologichnykh-protsesiv-i-obladnannia-376598.html>
17. Міжнародна організація праці (МОВ). [Електронний ресурс]:[Веб-сайт] – <http://dnop.com.ua/>
18. Проектування і конструювання робототехнічних систем. Навчальний посібник / Д.О.Міщук. – К.: 2020. – 185 с.
19. Михайло Є. П., Лінгур В. М. Навчальний посібник з дисципліни “Маніпулятори та промислові роботи”. Одеса, 2019. 233 с.
20. Robocode [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1367578806000058>

