

**Міністерство освіти і науки України**

**Луцький національний технічний університет**

(повне найменування вищого навчального закладу)

**Факультет транспорту та механічної інженерії**

(повне найменування факультету)

**Кафедра прикладної механіки та мехатроніки**

(повна найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»**

**МОДЕРНІЗАЦІЯ ПРИВОДУ ОБЕРТАЛЬНОГО ЗАХВАТУ ДЛЯ  
ПОКРАЩЕННЯ РОБОТИ МАНІПУЛЯТОРА**

спеціальність 131 Прикладна механіка

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Прикладна механіка»

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти

групи ІМмз-21

Палій Назар Миколайович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник:

к.т.н., доцент

Гулієва Наталія Михайлівна

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., доцент

Четвержук Тарас Іванович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Луцьк – 2023 року

## ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет транспорту та механічної інженеріїКафедра прикладної механіки та мехатронікиСтупінь вищої освіти: магістрГалузь знань: 13 Механічна інженеріяСпеціальність: 131 Прикладна механікаОсвітня програма: Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

«    »    202    р.

## ЗАВДАННЯ

## НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

*Палій Назар Миколайович*

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи Модернізація приводу обертального захвату для покращення роботи маніпулятораКерівник роботи: Гулієва Наталія Михайлівназатверджені наказом закладу вищої освіти від « 14 » січня 2023 р. № 42/01-022. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи « 21 » листопада 2023 р.3. Вихідні дані до роботи Привод для обертання стріли та переміщення несучого пристрою маніпулятора, технологічний процес, конструкція обертального захвату маніпулятора, розрахунки навантажень та потужності приводу

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що потрібно розробити):

*Вступ. Розділ 1. Загальна частина. Розділ 2. Технологічна частина. Розділ 3.**Конструкторська частина. Розділ 4 Науково-дослідницька частина.**Загальні висновки. Список використаної літератури. Додатки.*

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

*Креслення модернізації деталей приводу – 4 листа (ф. А3), креслення штурвалу – 1 лист**(ф. А2) та 2 листа (ф. А3), креслення маніпулятора – 1 лист (ф. А1), креслення**модернізованого приводу переміщення – 1 лист (ф. А1), креслення лінії розливу – 1 лист (ф.**А1)*

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання « 14 » січня 2023 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Обґрунтування теми</i>	<i>02.02.2023</i>	
2.	<i>Огляд літератури із досліджуваної проблеми</i>	<i>22.03.2023</i>	
3.	<i>Розділ 1. Загальна частина</i>	<i>25.04.2023</i>	
4.	<i>Розділ 2. Технологічна частина</i>	<i>05.09.2023</i>	
5.	<i>Розділ 3. Конструкторська частина</i>	<i>10.10.2023</i>	
6.	<i>Розділ 4. Науково-дослідницька частина</i>	<i>07.11.2023</i>	
7.	<i>Загальні висновки</i>	<i>14.11.2023</i>	
8.	<i>Список використаної літератури</i>	<i>14.11.2023</i>	
9.	<i>Додатки</i>	<i>14.11.2023</i>	
10.	<i>Оформлення ілюстративного матеріалу</i>	<i>21.11.2023</i>	
11.	<i>Нормоконтроль</i>	<i>21.11.2023</i>	
12.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	<i>21.11.2023</i>	
13.	<i>Представлення кваліфікаційної роботи магістра до захисту</i>	<i>21.11.2023</i>	

Здобувач вищої освіти \_\_\_\_\_

(підпис)

( Палій Н.М. )

(прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_

(підпис)

( Гулієва Н.М. )

(прізвище, ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Палій Н. М. Модернізація приводу обертального захвату для покращення роботи маніпулятора. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Прикладна механіка» спеціальності 131 Прикладна механіка. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2023.

Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, додатків.

У роботі досліджено нові технології та обладнання для оптимізації процесу механічної обробки корпусу. Цей процес є важливим етапом в виробничому процесі при виготовленні різної продукції із металу, пластику, скла тощо.

У дослідженні розглядаються різні методи та підходи для забезпечення якісного та ефективного процесу механічної обробки корпусу, такі як: використання новітньої техніки, розробка нових інструментів і матеріалів для обробки, вдосконалення методів контролю за процесом обробки та інші.

Результатом даного дослідження буде розробка новітніх технологій та обладнання, що дозволять значно поліпшити якість та продуктивність процесу механічної обробки корпусу.

Ключові слова: маніпулятор, технологічний процес, машина безперервного лиття заготовок, лінія розливу, привод обертання та переміщення.

## ABSTRACT

Palii N. M. Modernization of the rotary gripper drive to improve the operation of the manipulator. Manuscript.

Master's qualification work of OP «Applied Mechanics» specialty 131 Applied Mechanics. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2023.

The bachelor's qualification work consists of an introduction, 5 chapters, general conclusions, a list of used sources, and appendices.

The work examines new technologies and equipment for optimizing the process of mechanical processing of the case. This process is an important stage in the production process in the manufacture of various products from metal, plastic, glass, etc.

The research considers various methods and approaches to ensure a high-quality and efficient process of mechanical processing of the hull, such as: use of the latest technology, development of new tools and materials for processing, improvement of methods of control over the processing process, and others.

The result of this research will be the development of the latest technologies and equipment, which will allow to significantly improve the quality and productivity of the process of mechanical processing of the hull.

Keywords: manipulator, technological process, continuous casting machine, bottling line, rotation and mixing drive.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** На сучасному ринку індустріальних роботів і маніпуляторів, де конкуренція постійно зростає, модернізація приводу обертального захвату стала необхідною для того, щоб відповідати вимогам швидкозмінюваних виробництв і задовольняти потреби різних галузей промисловості.

Застосування передових технологій, таких як сенсорні системи, штучний інтелект, машинне навчання та механізми автоматизації, дозволяє роботам не лише взаємодіяти з навколишнім середовищем більш ефективно, але і адаптуватися до змінних умов роботи, що є ключовим для досягнення оптимальних результатів. Отже, сучасні технології можуть покращити ефективність та продуктивність виробничих процесів у різних сферах промисловості підтверджує актуальність теми.

**Метою** магістерської кваліфікаційної роботи є модернізація приводу обертального захвату маніпулятора для покращення його функціональності та продуктивності в промислових умовах.

Для досягнення поставленої мети, необхідно реалізувати такі завдання:

1. Огляд та аналіз літератури.
2. Модернізація ручного приводу для обертання стріли маніпулятора.
3. Провести реконструкцію приводу переміщення несучого пристрою маніпулятора.

**Об'єктом дослідження** є привід обертального захвату маніпулятора, який використовується в промислових умовах на виробництві.

**Предметом дослідження** є технічний компонент системи маніпулятора – привід для обертального захвату.

**Методи дослідження:** Для вивчення та реалізації модернізації приводу обертального захвату маніпулятора були використані різні методи дослідження:

аналіз літератури; експериментальне тестування; моделювання та симуляція; статистичний аналіз отриманих даних.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Модернізація переміщення несучого пристрою та ручного приводу обертання стріли маніпулятора на розливному майданчику МБЛЗ №2 киснево-конвертерного цеху ТОВ «Механічно-ливарного заводу».

**Практичне значення одержаних результатів.** Модернізована модель приводу обертання стріли маніпулятора задовольняє вимоги державних стандартів у галузі машинобудування та механотроніки. Запропонована та випробувана модель на підприємстві ТОВ «Механічно-ливарний завод» м. Нововолинськ (Україна).

**Особистий внесок магістранта.** У роботі, опублікованій у співавторстві, автору належать модернізація ручного приводу для обертання стріли маніпулятора, що дозволяє покращити технічні характеристики, зокрема пропонується змінити ручний привід на електромеханічний привід, що забезпечить маневреність управління маніпулятором і раціональнішу ергономіку, а також позбавить оператора від виконання ручної праці.

**Апробація результатів роботи** виконана на VI Міжнародній науково-теоретичній конференції The Current State of Development of World Science: Characteristics and Features. Лісабон, Португалія, 2023.

**Публікації.** За результатами роботи на VI Міжнародній науково-теоретичній конференції The Current State of Development of World Science: Characteristics and Features опублікована 1 теза.

## РОЗДІЛ 1

### ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

#### 1.1 Загальні характеристики маніпуляторів

Маніпулятор (механічна система), представляє собою автоматичний механізм, який імітує рухи верхніх та нижніх кінцівок людини при виконанні виробничих операцій, переміщуючи об'єкт у просторі [1]. Ця система включає в себе програмне керування через електронно-обчислювальну машину (ЕОМ) та інформаційну систему.

Промислові роботи, залежно від рівня технологічної досконалості та методів керування, класифікуються на три покоління. Перше покоління включає програмні роботи, що працюють за жорсткими програмами та знаходять застосування, зокрема, у сфері машинобудування. Друге покоління представлене адаптивними роботами, які використовують гнучкі програми та можуть змінювати характер виконуваних робіт в залежності від змін параметрів зовнішнього середовища.

Аналіз конструкцій маніпуляторів на виробництві включає в себе оцінку різних аспектів, таких як ефективність, надійність, безпека та ергономіка. Враховуючи, що технології швидко розвиваються, а вимоги до виробництва змінюються, конструкції маніпуляторів також повинні адаптуватися до сучасного розвитку технологій.

Основні критерії для аналізу конструкцій маніпуляторів:

##### 1) Функціональність:

Робоче навантаження (оцінка максимального навантаження, яке маніпулятор може піднімати та переміщати для забезпечення ефективності виробничих процесів);

Радіус дії (визначення області, в якій маніпулятор може працювати для покриття всіх потрібних зон на виробництві).

##### 2) Ефективність та продуктивність:

Швидкість і точність (оцінка швидкості руху та точності роботи маніпулятора, особливо якщо він використовується для завдань зі збільшеним рівнем складності).

3) Надійність та технічне обслуговування:

Міжремонтний ресурс (визначення терміну служби маніпулятора та можливості технічного обслуговування);

Наявність запасних частин (перевірка запасних частин, які легко доступні, щоб уникнути простою виробництва через потенційні поломки).

4) Безпека:

Системи безпеки (перевірка маніпулятора на вбудовані системи безпеки для уникнення аварій та захисту персоналу);

Ергономіка (врахування ергономічних властивостей конструкції для забезпечення роботи операторів).

5) Енергоефективність:

Енергоспоживання (оцінка маніпулятора відносно енергоефективності, для забезпечення економії електроенергії).

6) Адаптабельність та модульність:

Можливість модифікації (перевірка відносно модифікації конструкції маніпулятора для відповіді на змінні вимоги виробництва).

7) Вартість власності:

Вартість придбання та утримання (оцінка вартості маніпулятора, включаючи витрати на його утримання та експлуатацію).

## 1.2 Класифікація маніпуляторів

За такими ознаками класифікуються маніпулятори й роботи (рис. 1.1) [2].

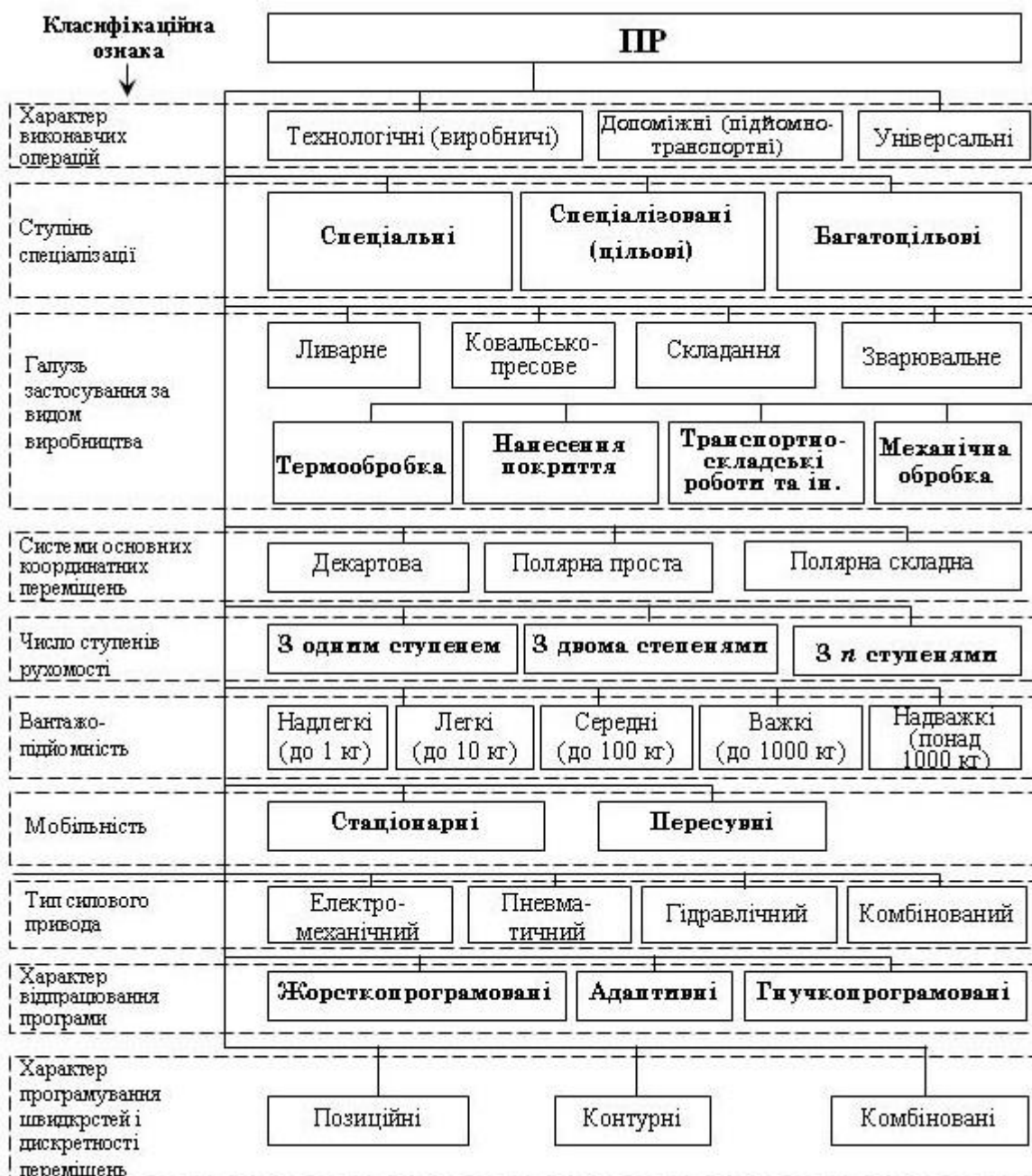


Рисунок 1.1 Класифікація маніпуляторів і роботів

За конфігурацією:

Координатний маніпулятор (Cartesian Robot): Рухається у трьох просторових напрямках (X, Y, Z).

Циліндричний маніпулятор (Cylindrical Robot): Має висувний механізм, який дозволяє роботі виконувати рухи у вказаному радіусі.

Круговий маніпулятор (Spherical Robot): Рухається по круговій поверхні і

може мати різні ступені вільності.

Вузловий (Jointed Robot): Складається з з'єднаних вузлів, що дозволяє робити складні рухи.

За ступенями вільності:

Маніпулятори з шістьма ступенями вільності (6-DOF Robots): Забезпечують рух у шести незалежних напрямках (три трансляції та три обертання).

Маніпулятори з меншою кількістю ступенів вільності: Це може бути, наприклад, маніпулятор з трьома ступенями вільності, який забезпечує тільки три основних види руху.

За призначенням:

1) Маніпулятори для монтажу і вантаження (Assembly and Loading Robots): Використовуються для складання та завантаження виробів.

2) Маніпулятори для зварювання (Welding Robots): Призначені для автоматизації процесу зварювання.

3) Маніпулятори для обробки матеріалів (Material Handling Robots): Використовуються для переміщення та обробки матеріалів.

За типом приводу:

1) Електричні маніпулятори (Electric Robots): Використовують електродвигуни для приводу.

2) Пневматичні маніпулятори (Pneumatic Robots): Рухаються за рахунок стисненого повітря.

За рівнем автоматизації:

1) Автоматизовані маніпулятори (Automated Robots): Здатні виконувати завдання без значної людської втручання.

2) Півавтоматизовані маніпулятори (Semi-Automated Robots): Вимагають певного ступеня керування або втручання оператора.

### 1.3 Область застосування маніпуляторів

Маніпулятори мають широкий спектр застосувань на виробництві, сприяючи автоматизації і підвищенню ефективності виробничих процесів [3]. Деякі основні області застосування маніпуляторів на виробництві:

1) для автоматичного монтажу та збирання виробів (можуть розміщувати компоненти, складати вироби та виконувати інші завдання з монтажу);

2) для автоматизації процесів зварювання, різання та обробки матеріалів (забезпечують високу точність та швидкість у виконанні завдань);

3) для автоматичного пакування виробів у коробки та формування палет (можуть взаємодіяти з конвеєрами та іншими системами для оптимізації логістики);

4) для виконання рутинних завдань обслуговування машин та устаткування (дозволяють зменшити час простою та підвищити надійність обладнання);

5) для переміщення товарів на складах, викладання їх на полиці та забирання для виконання замовлень (можуть автоматизувати процеси розкладання та вивантаження товарів з транспортних засобів);

6) для розміщення виробів на лінії інспекції та тестування (дозволяють автоматизовано проводити якісні та кількісні оцінки виробів);

7) у медичній сфері маніпулятори можуть використовуватися для автоматизованої хірургії та роботизованих систем допомоги;

8) у виробництві електроніки маніпулятори застосовуються для розміщення та збирання елементів, монтажу плат та інших завдань.

Маніпулятори можуть бути налаштовані під конкретні вимоги виробництва та гнучко впроваджуватися для оптимізації процесів в різних галузях промисловості.

#### 1.4 Висновок та постановка завдань на дослідження

У даному розділі було визначено, що модернізація приводу обертального захвату є важливим напрямом у вдосконаленні функціональності та продуктивності робототехнічних маніпуляторів, а застосування новітніх технологій, матеріалів та алгоритмів управління може призвести до значних поліпшень у точності захвату об'єктів, ефективності використання енергії, адаптивності до змінних умов роботи та безпеки в навколишньому середовищі та людьми.

Постановка завдань на дослідження:

1. Здійснити огляд та аналіз літератури.
2. Модернізувати ручний привод для обертання стріли маніпулятора.
3. Провести реконструкцію приводу переміщення несучого пристрою маніпулятора.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

#### 2.1 Технологічний процес цеху

Розглянемо процес безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) на лінії з технологічної точки зору (рис. 2.1). Починаємо процес з підготовки до лиття, піднімаючи роликівий конвеєр *13* з горизонтального положення [4] у верхнє положення. Потім за допомогою ланцюгового механізму затравку *15* подаємо в лінію для вводу в заправки *14*.

Маніпулятор переміщуємо до кристалізатора, вводимо затравку і одночасно обертаємо ролики приводної проводки *8*. Головку затравки встановлюємо так, щоб вона тимчасово утворювала дно кристалізатора. Після продування аргоном сталевий ківш *2* розміщуємо на сталерозливний стенд *1*. Нагрітий на газових пальниках проміжний ківш *3* переміщуємо в робоче положення над кристалізаторами, рухаючись по дорозі, перпендикулярній осі МБЛЗ.

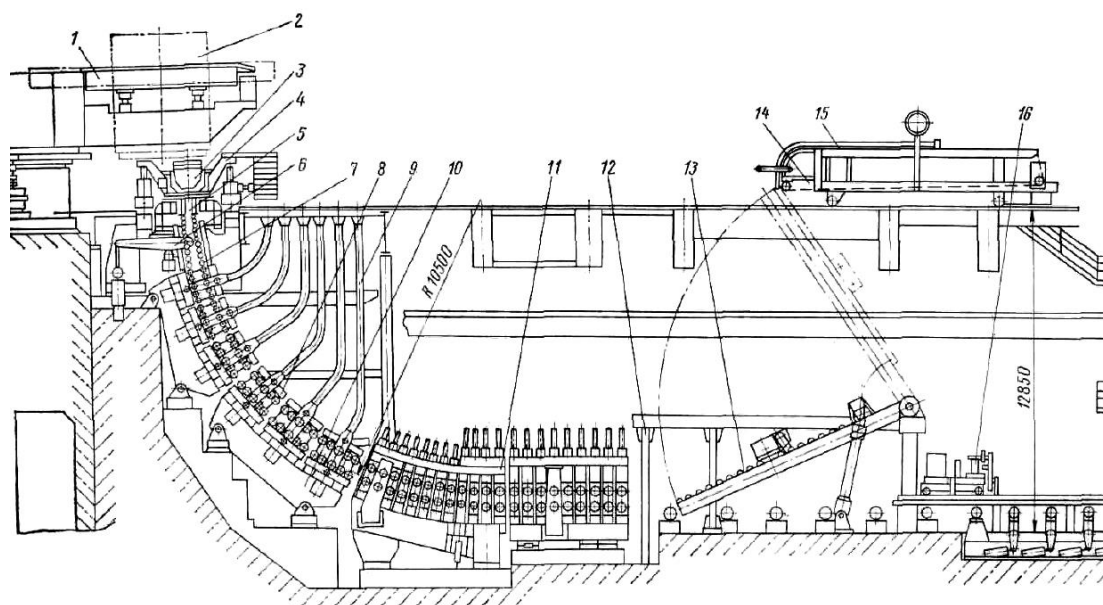


Рисунок 2.1 Радіальна двоструменева лінія МБЛЗ: 1 – розливний стенд; 2 – розливний ківш; 3 – проміжний ківш; 4 – самохідний візок; 5 – кристалізатор; 6 – механізм гойдання кристалізатора; 7 – непривідна роликівий проводка; 8 – привідна секція, 9 – система напрямних криволінійних, 10 – радіальна ділянка, 11 – тягнучий механізм; 12 – лоток для підйому; 13 – роликівий конвеєр; 14 – маніпулятор для вводу; 15 – затравка; 16 – машина різання газового

Обертаючи несучу балку на сталерозливному стенді, ми переміщуємо ківш із металом з резервного положення в робоче положення над проміжним ківшем. На цьому етапі, між сталевим ківшем та проміжним ківшем, застосовуємо спеціальний маніпулятор для встановлення обертального захвату, який взаємодіє з колектором шибєрного затвору сталєвого ківша. Установка приводу обертального захвату призначена для захисту сталі від вторинного окиснення в цій області руху та для запобігання потраплянню шлаків з поверхні промислового ківша до його рідкої ванни.

Далі відкриваємо шибєрну заслінку сталерозливного ківша, з'єднавши перед цим обертальний захват і наповнюємо проміжний ківш металом на визначену висоту. У випадку відсутності або закінчення сталі із сталерозливного ківша, проводимо пропалювання каналу шибєрної заслінки киснем. Після цього відчиняємо заслінку проміжного ківша і наповнюємо кристалізатори металом до робочого рівня.

Під час переміщення по роликівій лінії виріб інтенсивно охолоджується за допомогою води, яка подається форсунками. Коригування форми виробу відбувається на горизонтальній частині роликєвих секцій. Зливки безперервно витягуються і доходять до машини газового різання 16, яка розрізає їх на відповідні довжини, рухаючись паралельно з ними. Готові заготовки знімаються з роликєвого конвеєра за допомогою збирального крану і укладаються у стопчик.

Для забезпечення стабільної ефективної роботи МБЛЗ та отримання високоякісних безперервних литих заготовок особлива увага приділяється підготовці кристалізатора до експлуатації. Спочатку виконується візуальний огляд внутрішньої частини кристалізатора і у разі виявлення залишків шлаку, шлакової суміші або металу на його стінках, вони піддаються очищенню. При цьому важливо уникати потрапляння таких залишків на деталі роликєвих

підшипників та в зону вторинного охолодження (ЗВО). Якщо на робочій поверхні є задири або подряпини, то їх слід видаляти.

До роботи не допускаються кристалізатори з пошкодженими стінками, зазорами, які перевищують допустимі межі між плитами, наявністю витоків води у робочій порожнині, забрудненнями каналів для охолоджувальної води та порушенням конусності робочого простору.

Після подачі води в кристалізатор та перевірки відсутності його тікання в робочу порожнину, вводиться затравка, яка перед цим була очищена від залишків попередньої плавки. Затравку, зазвичай, розміщують трохи вище середини висоти кристалізатора, дотримуючись при цьому стандартного відступу між нею і робочими стінками. Після цього зазор ущільнюється, зазвичай, за допомогою азбестових шнурів. Для прискорення твердіння перших порцій металу на затравці додається певна кількість твердого металу з хімічним складом, близьким до металу, що ллється, у формі сітки, пластин, прутків і т.д. Зазвичай, для полегшення запуску струменя на затравці, додається певна кількість шлакової суміші.

Після наповнення проміжного ківша металом до необхідної висоти, розпочинається подача металу в кристалізатор. Якщо на проміжному ківші є кілька струменів, їх запускають послідовно, починаючи з крайніх. Це пов'язано з тим, що в далеких торцях проміжного ківша метал є холоднішим, ніж в зоні подачі струменя. Різниця в температурі може досягати 30–40 °С. Тому, якщо відкривати спочатку центральні струмені, у проміжному ківші можуть виникнути застійні зони, де температура металу ще більше знизиться, і ймовірність заморожування отворів сталевого випуску значно зросте. У такому випадку проводять пропалювання замороженого металу в отворах за допомогою кисню, який постачається через кисневі трубки.

Під час наповнення кристалізатора для прискорення затвердіння металу на його поверхню додають інокулятори у вигляді металевих порошків. Після

досягнення рівня металу в кристалізаторі на відстані 100-200 мм від його верхнього краю, вмикається механізм руху затравки, і струменевий процес вважається запущеним.

Затравка відокремлюється від заготовки після виходу з тягучого стану і переміщується в резервне положення, а передня частина заготовки відкусується і видаляється в якість металевих відходів. Подальша швидкість розливання визначається температурою металу в ківші та умовами охолодження заготовки в зоні вторинного охолодження (ЗВО).

Згідно з літературними джерелами [5, 6], ключові параметри необхідного температурного режиму охолодження заготовки можна сформулювати наступним чином:

- 1) температура поверхні заготовки має зменшуватися в зоні вторинного охолодження неперервно до моменту завершення затвердіння, щоб мінімізувати внутрішні напруги (розігрів заготовки допускається, але не більше 50 градусів вище);
- 2) температура поверхні в кінці ЗВО повинна знаходитися між 1073 К і 1223 К (для МБЛЗ криволінійного типу рекомендується підтримувати температуру поверхні заготовок наприкінці ЗВО не нижче 1170 К [6]);
- 3) розподіл температури по периметру заготовки повинен бути рівномірним;
- 4) не припускаються різкі зміни інтенсивності теплообміну при виході злитка з кристалізатора в ЗВО.

Для забезпечення виконання вищезазначених умов безперервного розливання необхідно вирішити завдання оптимального розподілу щільності зрошення вздовж периметра заготовки, враховуючи її довжину, витрати охолоджувальних агентів та конструктивні особливості пристроїв для їх постачання. При цьому параметри ефективного режиму вторинного охолодження повинні бути взаємозалежні з іншими показниками процесу

розливання, такими як швидкість витягування заготовки, температура рідкої сталі під час розливання, хімічний склад сталі та конструктивні особливості МБЛЗ.

Основними джерелами додаткового забруднення металу неметалевими домішками можуть бути повторне окислення сталі під час її пересування від сталеворозливного ківша до кристалізатора, а також взаємодія з вогнетривкими та допоміжними матеріалами під час руху сталі.

Джерела забруднення сталі неметалевими включеннями поділяють на такі групи:

- 1) неметалеві включення, які не плавляться у шлаку та утворюються внаслідок реакцій розкислення сталі;
- 2) дрібні частинки шлаку, що потрапляють до металу через турбулентне перемішування струменя з рідкою ванною металу;
- 3) продукти руйнування вогнетривких матеріалів при контакті зі сталлю та шлаком;
- 4) продукти пропалювання каналу шиберної заслінки киснем;
- 5) вторинне окислення сталі під час технологічних переливів.

Особливу важливість мають такі процеси:

- 1) вторинне окислення сталі на початковому етапі безперервного розливання сталі;
- 2) реакції з футеруванням проміжного ківша та покривним шлаком;
- 3) потоки в проміжному ківші та розподіл включень;
- 4) перетікання емульгованого шлаку з ківша в проміжний ківш разом із залишками металу;
- 5) методи раннього виявлення потрапляння шлаку в ківш;
- 6) відкладення на занурювальних склянках;
- 7) розподіл неметалевих включень у заготовках у радіальних та криволінійних МБЛЗ.

На етапі початкового розливу проміжний ківш заповнюється при відкритому дзеркалі металу до моменту завантаження теплоізолюючої суміші. Протягом цього періоду відбувається інтенсивний контакт металу з оточуючим середовищем. За деякими даними, протягом перших 5-6 хвилин розливу вміст кисню в сталі перевищує встановлені значення в 3-4 рази.

Особливу увагу слід приділити забрудненню сталі під час технологічних переливів. Шлакові включення можуть потрапити в сталь при впровадженні струменя зі сталерозливного ківша у рідку ванну проміжного ківша. Оцінка результатів розливання металу з великовантажних ківшах показала, що у проміжний ківш може потрапити від 50 до 100 кг шлаку. У випадку тривалих серій розливу ця кількість може досягти кількох сотень кілограмів.

Для уникнення емульгування шлаку з металом на практиці використовується розлив за допомогою захисної труби, яка постачає сталь на рівень шлаку. В цьому випадку рекомендується використовувати автоматичну систему раннього виявлення шлаку, яка дозволяє вчасно припинити закінчення металу від сталерозливного ківша. У відсутність такої системи деякі етапи циклу розливу (заміна одного ківша іншим) можуть відбуватися без захисної труби через необхідність візуальної індикації появи шлаку в струмені металу.

Під час проведення експериментів на кількох металургійних заводах встановлено, що захисна труба не лише подає сталь на рівень металу в проміжний ківш, але також сприяє:

- 1) підвищенню якості сталі за рахунок зменшення вторинного окислення між сталерозливним і проміжним ківшами;
- 2) зниженню турбулентності металу біля його поверхні та запобіганню введенню в рідку ванну частинок покривного шлаку;
- 3) зменшенню ймовірності утворення настилів у проміжному ківші, а також швидкості зношування футерування в зоні падіння струменя;

4) підвищенню безпеки роботи, оскільки усувається розбрикування металу в процесі розливання;

5) зниженню втрат тепла під час розливання.

Ефективність захисту сталі від вторинного окислення в значній мірі залежить від того, наскільки щільно взаємодіє колектор сталерозливного ківша із захисною трубою. Для зменшення підсмоктування кисню з повітря в області стику між колектором і занурювальною трубою рекомендується постійно проводити обдування цього місця аргоном.

## 2.2 Технологічні розрахунки ТОВ «Механічно-ливарного заводу»

Розрахунок виконаний відповідно до методики [7]. Продуктивність МБЛЗ визначаємо за формулою:

$$P_{\text{розрах}} = \frac{A}{B}, \quad (2.1)$$

де  $A$  – продуктивність цеху,  $B$  – кількість загальна МБЛЗ.

Киснево-конвертерний цех за системою такою працює: у роботі два конвертери, один у резерві знаходиться. Ритм подачі ківшів у відділення безперервного розливу сталі складе  $\tau_p = 36/2 = 18$  хв. Тоді продуктивність цеху конвертерного по рідкій сталі дорівнює:

$$A = \left( \frac{1440 \cdot M}{\tau_p} \right) \cdot 365 = 7,3 \times 10^6 \text{ т.}$$

Необхідно провести підготовку МБЛЗ перед кожним плавленням або серією плавлень без зміни розміру заготовки. Процес підготовки включає в себе декілька етапів: виведення металу з проміжного ківша, переміщення його в резервне положення для обробки та ремонту, видалення зливка з кожного струмка, очищення та огляд стінок кристалізатора, огляд основних вузлів та їх очищення від бруду та окалини, перевірка, чищення та заміна форсунок системи вторинного охолодження (ЗВО), введення затравки в кожен струмок

МБЛЗ та ущільнення головок затравок вздовж стінок кристалізаторів, установка проміжного ківша, перевірка штопорів та розливних склянок, встановлення сталерозливного ківша в робоче положення, налаштування захисних труб і склянок для розливання металу під рівень, відкриття склянки сталерозливного ківша та наповнення металом проміжного ківша.

Деякі операції підготовки установок проводяться одночасно, тому часовий інтервал між серіями зазвичай становить приблизно 60 хвилин. Тривалість розливання одного ківша визначається розміром заготовки, маркою сталі, типом машини і може бути розрахована за допомогою відповідної формули:

$$\tau = \frac{M}{N \cdot v \cdot q \cdot \varphi_2}, \quad (2.2)$$

де  $M$  – маса металу в ківші, кг;

$N$  – кількість струменів,  $N = 4$ ;

$v$  – швидкість розливання, м/хв;

$q = a \cdot b \cdot \rho$  – маса 1 м заготовки, кг;

$a$  та  $b$  – товщина та ширина заготовки;

$\rho$  – густина сталі, кг/м<sup>2</sup>;

$\varphi_2 = 0,9$  – коефіцієнт, який враховує втрати часу при розливанні. Він залежить від числа струменів та вираховується за формулою:

$$\varphi_2 = 0,95 - 0,025 \cdot n_c = 0,95 - 0,025 \times 4 = 0,85.$$

$$q = 250 \cdot 1200 \cdot 7810 = 2343 \text{ кг}.$$

Тривалість розливу не повинна перевищувати максимально допустимий час розливання зі сталерозливного ківша. Максимально допустимий час розливу, обумовлений тепловими втратами для ківшів різної місткості та визначається за табл. 2.1. Це зумовлено тепловими втратами ківшів.

Швидкість розливу залежить від деяких факторів: перетин, тип УНРС, марка та впливає на якість, продуктивність, вартість МБЛЗ, масу обладнання.

Таблиця 2.1 – Максимально допустимий час розливання

Місткість ківша, т	50	100	160	200	300	400
Допустимий час розливання, хв	60	75	85	90	110	120

Оцінку швидкості можна визначити за формулою:

$$v = k (1 + b / a) / b, \quad (2.3)$$

де  $k$  – коефіцієнт від марки сталі залежить та призначення продукції; при литті прямокутної форми заготовки з відхиленням сторін до  $k = 0,18 \div 0,30$ ; при литті квадратного типу заготовок до  $k = 0,11 \div 0,14$ .

Швидкості розливання для квадратних та прямокутних заготовок наведені у таблицях 2.3 та 2.4.

Таблиця 2.3 – Швидкість розливання квадратних заготовок

$a \times b, \text{ мм}^2$	80×80	100×100	125×125	150×150	200×200
$v, \text{ хв}$	2,75-3,5	2,2-2,8	1,8-2,3	1,5-1,9	1,1 - 1,4

$a \times b, \text{ мм}^2$	250×250	250×320	250×360	300×400	300×450
$v, \text{ хв}$	0,9-1,12	0,8-1,1	0,75-0,95	0,65-0,8	0,6-0,78

Таблиця 2.4 – Швидкість розливання заготовок прямокутної форми

$a \times b, \text{ мм}^2$	150×(700-1500)	200×(700-2000)	250×(1000-2800)	300×(700-1600)
$v, \text{ хв}$	1,6-1,8	1,5-1,8	1,3-1,6	1,1-1,4

Тоді

$$\tau_1 = \frac{400000}{4 \cdot 1,6 \cdot 2343 \cdot 0,85} = 31,38 \text{ хв.}$$

Значення отримане не перевищує допустимий час розливу. Приймаємо тривалість розливання  $\tau_l = 36$  хв. Кратність розливання  $\tau_l/\tau_p$  становитиме  $36/18 = 2$ ; швидкість  $v = 1,6$  м/хв.

Пропускна здатність МБЛЗ при серійному розливанні сталі по чотири плавки складе:

$$P = \frac{1440 \cdot n \cdot M \cdot \Phi \cdot \varphi_1}{n \cdot \tau_1 + \tau_2}, \quad (2.4)$$

$$P = \frac{1440 \cdot 4 \cdot 400 \cdot 290 \cdot 0,9}{4 \cdot 36 + 60} = 2,95 \times 10^6 \text{ т.}$$

Розрахуємо працюючих МБЛЗ:

$$B_1 = \frac{\tau_l}{\tau_p} + 1, \quad (2.5)$$

$$B_1 = \frac{36}{18} + 1 = 3.$$

МБЛЗ, які знаходяться в резерві:

$$B_2 = \frac{T \cdot B_1}{365}, \quad (2.6)$$

де  $T$  – Тривалість ремонтів на добу:  $T = 70-75$  діб.

$$B_2 = \frac{70 \cdot 3}{365} = 0,58.$$

Округлюємо  $B_2 = 1$ .

Кількість МБЛЗ загальна складе:  $B = B_1 + B_2 = 3 + 1 = 4$ .

Продуктивність розрахункова МБЛЗ складе:

$$P_{\text{розрах}} = \frac{7,3 \times 10^6}{4} = 1,825 \times 10^6 \text{ т/год.}$$

Висновок до Розділу 2. Досліджено технологічний процес цеху ТОВ «Механічно-ливарного заводу», що дозволяє зрозуміти, як організоване виробництво та які фактори впливають на його результативність. Це послужило для подальшої модернізації та реконструкції механізму маніпулятора з метою підвищення конкурентоспроможності та виробничої якості підприємства.

## РОЗДІЛ 3

## Конструкторська частина

## 3.1 Обертальний захват маніпулятора

Принцип дії приводу обертального захвату маніпулятора призначений для встановлення, заміни, утримання та транспортування корундографітової обертального захвату розливаючи сталь на МБЛЗ [8]. Маніпулятор притискає обертальний захват до склянки колектора шиберної заслінки сталевого ківша і супроводжує рухаючи його у вертикальній і горизонтальній площині.

Маніпулятор розміщується на плитному знімному настилі розливу по осі, перед проміжним ківшом.

Маніпулятор приводу для обертального захвату (рис. 3.1) складається із чотирьох частин: майданчик 1; пристрій для встановлення труби захисної 2; привід 3; поворотний кронштейн 4.

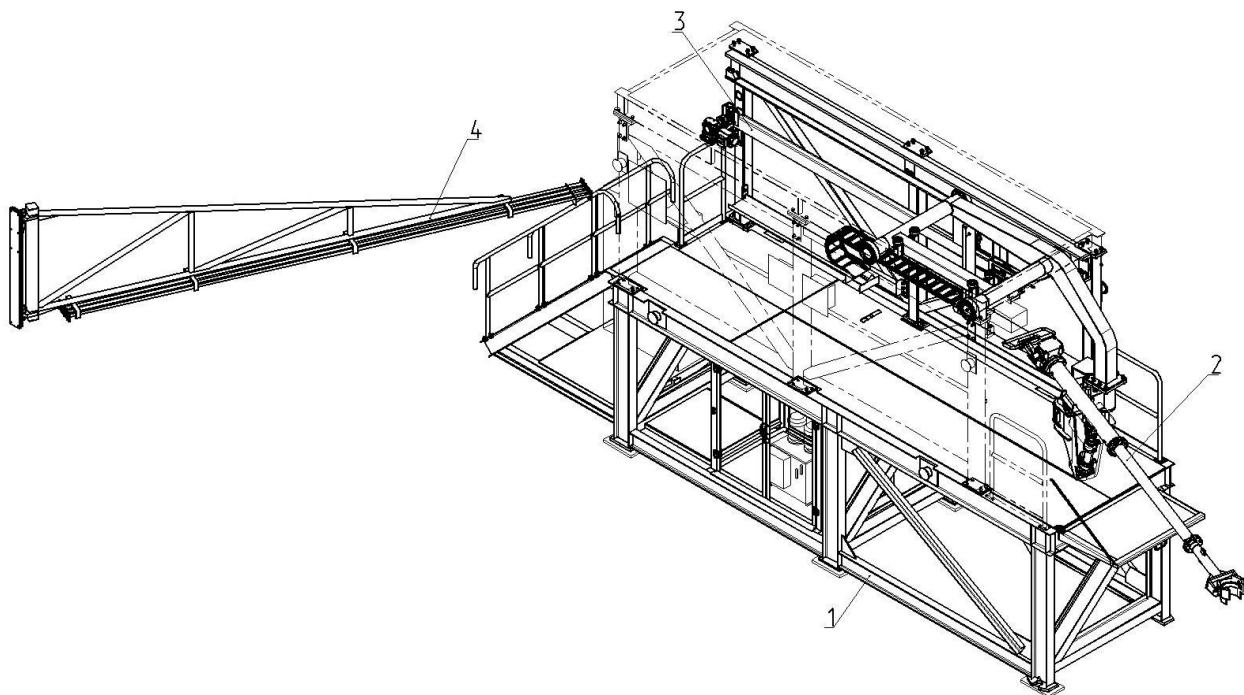


Рисунок 3.1 Маніпулятор приводу обертального захвату: 1 – майданчик; 2 – пристрій для встановлення обертального захвату; 3 – привід; 4 – поворотний кронштейн

Майданчик (рис. 3.2) складається з дворівневої збірної металоконструкції, встановленої на платформі плитного настилу та мають штирі для фіксації майданчика.

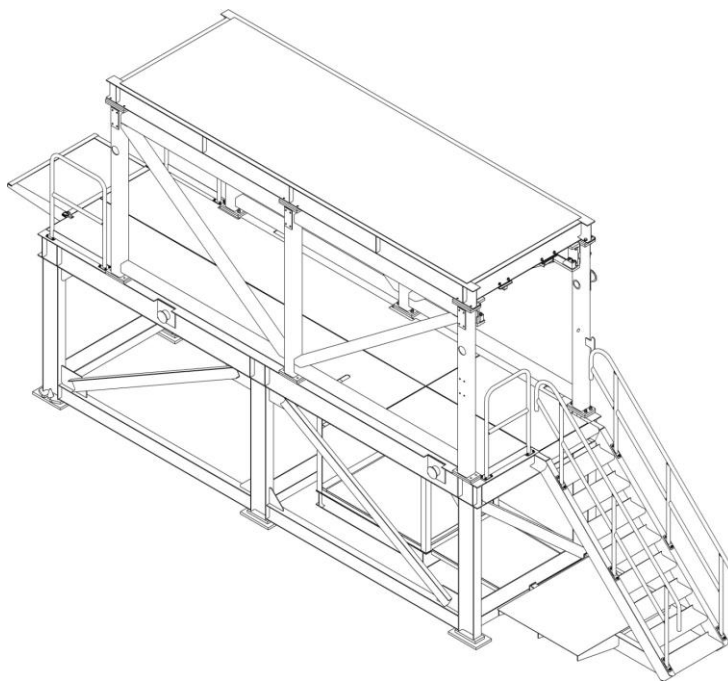


Рисунок 3.2 Майданчик

Базовий рівень представляє собою зварну конструкцію з верхнім настилом і шістьма опорами, дві з яких мають пази для закріплення майданчика на плитному настилі штирями. Сходи з'єднані з нижньою частиною майданчика, під яким передбачено місце для розміщення шафи керування. Додатково передбачений відкидний майданчик для виконання допоміжних робіт. У центральній частині конструкції розташований майданчик із огорожею та дверима для розміщення насосної станції маніпулятора.

Робочий рівень для оператора, який керує сталевим ківшем, розташований вище. На ньому розміщене основне обладнання та витратні матеріали, необхідні для виконання робіт. Цей рівень виготовлений у формі збірної металоконструкції типу «П», складаючись з двох бічних стінок у верхній частині, які з'єднані рамою болтовим з'єднанням.

Стінки представляють собою зварні конструкції, у верхніх їх частинах розташовані оброблені фланці з зубцями для закріплення горизонтальних напрямних несучих пристроїв маніпулятора. Крім того, на стінах передбачені місця для монтажу таких елементів, як системи керування, клемні коробки, кронштейни приводу маніпулятора та кабель-канал (енергопідведення). Фланці варіюються у верхній та нижній частині стін для з'єднання з іншими частинами майданчика.

Рама представляє собою зварну металоконструкцію, яка виступає як сполучний елемент і служить роллю даху, захищаючи оператора від падіння частин футерування та розпилення металу зі сталевого ківша. Також до рами прикріплена вертикальна направляюча несучого пристрою маніпулятора.

Напрявні на бічних стінках виглядають як зварний швелер з обробленими доріжками для кочення. Зовнішня сторона направляючої має пази, за допомогою яких вона з'єднується зі зубцями на стінках. Напрявна прикріплена до стінки болтовим з'єднанням.

Верхній та нижній рівень з'єднані між собою болтами.

Механізм для встановлення обертального захвату – це система з великою кількістю ступенів вільності, розташована на несучому пристрої, яка рухається в напрямних майданчиках (рис. 3.3).

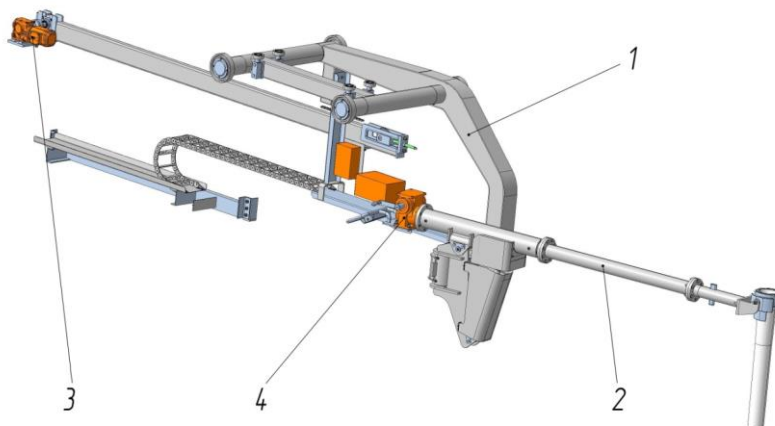


Рисунок 3.3 Пристрій для встановлення обертального захвату: 1 – несучий пристрій; 2 – стріла; 3 – механізм переміщення несучого пристрою; 4 – механізм для обертання стріли

Несучий пристрій 1 представляє собою зварну металоконструкцію з консоллю, чий кінець має фланець і захоплення для з'єднання з приводом маніпулятора. Крім того, до несучого пристрою прикріплений кронштейн, що служить майданчиком для установки гідроблоку та електрообладнання, а також до нього приєднаний ланцюг для подачі енергії (кабель-канал). У розтоці несучого пристрою знаходяться осі, на яких розташовані ходові колеса. Напрямні ролики, прикріплені гвинтами до несучого пристрою й забезпечують прямолінійний рух маніпулятора по горизонтальних напрямних майданчиках [10].

На півосі консолі несучого пристрою, прикріпленої до фланця, встановлений керуючий пристрій на підшипниках кочення. Він включає жорсткі упори, які обмежують поворот навколо півосі в горизонтальній площині в діапазоні  $80^\circ$ , а також має отвори для фіксації штирем для утримання в певному положенні.

Кронштейн, обладнаний шарніром і підшипниками кочення, з'єднаний з керуючим пристроєм, виконує функцію опори для стріли та гідроциліндра механізму підйому (притискання) оберտального захвату. Сама стріла, що має шарнірне з'єднання з гідроциліндром, пов'язана з штоком гідроциліндра. Виступи на штоку та корпусі гідроциліндра обладнані шарнірними підшипниками ковзання.

Стріла (див. рис. 3.4) складається з нерухомої частини, яка включає гільзу 1, з'єднану шарнірно з гідроциліндром 2 та кронштейном 6. Кронштейн обертається всередині гільзи на підшипниках ковзання 3, а також має збірну консоль 4. Збірна консоль складається з трьох частин, з'єднаних між собою болтами: консолі, труби та кронштейна. На кронштейні розміщений кутник 5, який з'єднаний шарнірами з кошиком 8 оберտального захвату 7. Кутник фіксується відносно кронштейна за допомогою клинового з'єднання. На гільзі встановлений черв'ячний редуктор 9, призначений для обертання консолі

(обертального захвату) навколо осі стріли. Обмеження обертання консолі стріли відсутнє. До основи редуктора прикріплений керуючий пристрій 10, який дозволяє оператору управляти рухом маніпулятора під час стикування обертального захвату з колектором сталевого ківша шиберної заслінки. Також на керуючому пристрої розташований кнопочний пульт керування механізмами маніпулятора (привід пересування несучого пристрою, гідропривід притискання обертального захвату, привід обертання стріли).

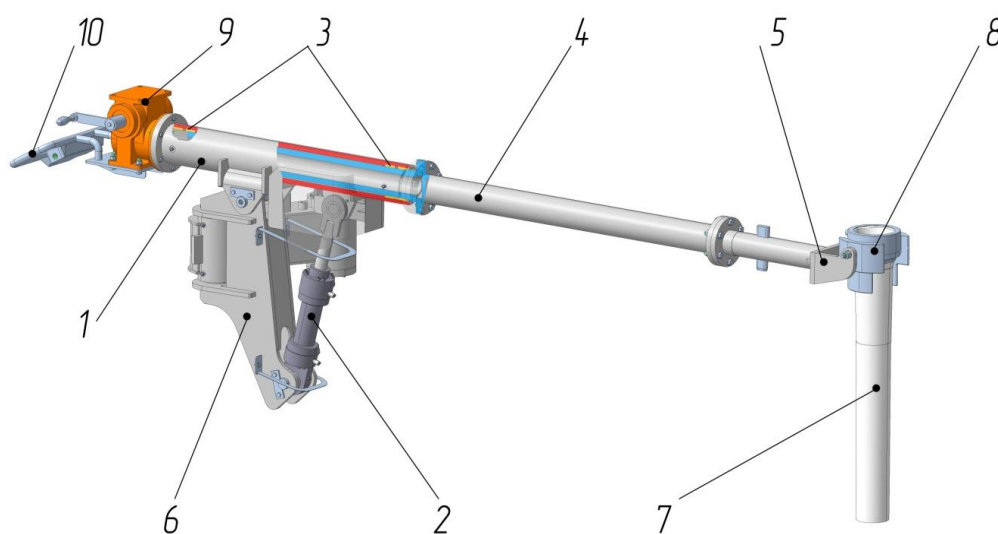


Рисунок 3.4 Стріла: 1 – гільза; 2 – гідроциліндр; 3 – підшипники ковзання; 4 – збірна консоль; 5 – кутник; 6 – кронштейн; 7 – обертальний захват; 8 – кошик; 9 – редуктор; 10 – керуючий пристрій

Привід маніпулятора, що відповідає за переміщення несучого пристрою, використовується для переміщення його від резервної позиції до робочої і назад. Цей привід монтують на кронштейнах, які прикріплені до стін верхнього рівня майданчика маніпулятора, і він працює як ланцюгова передача з передатним механізмом, що має передаткове число рівне одиниці. На ланцюзі закріплено захват, який складається з двох рейок, з'єднаних болтами і ланцюгів. Зуби рейок входять у взаємодію з елементами ланцюга, передаючи зусилля на захоплення. Одна з рейок має вухо, яке дозволяє вісь-фіксатор з'єднувати його з несучого пристрою маніпулятора. Рух ланцюга і захоплення, яке закріплено на

ньому, призводить до переміщення несучого пристрою маніпулятора. Ведуча шестерня, розташована на підшипниках кочення в розточках балки, пов'язана з черв'ячним мотор-редуктором за допомогою втулочно-пальцевої муфти. Тягова шестерня, обладнана підшипниками кочення, розташована на вилці, яка рухається в пазах балки за допомогою гвинтового механізму.

Керування приводом маніпулятора відбувається з панелі пуску, що розташована на керуючому пристрої маніпулятора, або з ящика керування переміщенням несучого пристрою, який знаходиться на верхньому рівні майданчика маніпулятора поруч із сходами [11]. Під час роботи з панелі пуску рух несучого пристрою відбувається при натисканні та утриманні кнопок «Вперед» та «Назад». У разі використання ящика керування необхідно перед тим зафіксувати штирями всі рухомі частини маніпулятора, які мають шарнірне з'єднання, для уникнення непередбаченого руху під час пуску та зупинки. При цьому керування рухом (підняттям, опусканням швидкості та зупинкою) несучого пристрою здійснюється за допомогою безконтактних вимикачів.

Для подачі електроживлення до майданчика маніпулятора використовується поворотний кронштейн (рис. 3.5), на кінцях якого закріплені металорукави з електричними роз'ємами. Цей пристрій є кронштейном, що з'єднаний шарнірами з опорою, прикріпленою гвинтами до плити, яка приварена до металоконструкцій пульта керування МБЛЗ. Кронштейн має конструкцію, до нижньої частини якої приварена труба для прокладання електричних кабелів. Труби на обох кінцях закінчуються фланцями, на які прикріплюються кришки з різьбовими отворами для кабельного введення металорукава. Електричні роз'єми поворотного кронштейна з'єднані з відповідними роз'ємами на ящику, який розташований поруч із сходами на верхньому рівні майданчика маніпулятора [12].

Робота маніпулятора захисної труби виконується в такій послідовності. Спочатку маніпулятор знаходиться в резервному положенні. Після натискання

кнопки «Опустити» на пульті та використання гідроциліндра, плече стріли з кошиком опускається вниз. Оператор вручну вводить трубу в кошик (захисні труби розташовані на вільному просторі верхнього рівня майданчика маніпулятора).

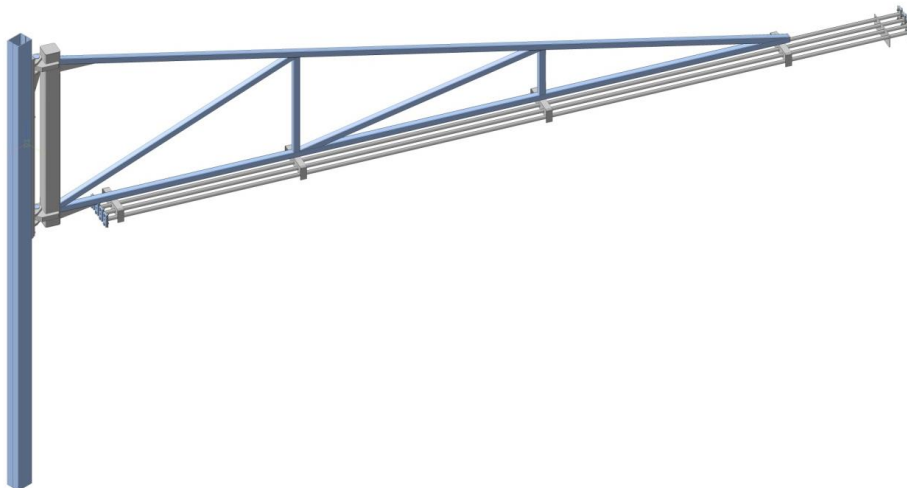


Рисунок 3.5 Кронштейн поворотний

Після цього натискаємо кнопку «Підняти» і труба зафіксується у кошику опорним поясом. Оператор, використовуючи швидкороз'ємне з'єднання, приєднує захисну трубу до трубопроводу аргону. Якщо потрібно, труба повертається в горизонтальне положення за допомогою приводу обертання стріли, якщо ківш знаходиться внизу або відстань між стальним і промисловим ківшем недостатня для вертикального розміщення труби. Сталевий відливальний ківш, розташований на стенді, піднімається вгору. З пульта управління робочими механізмами відкривається шиберна заслінка, промивається випускний отвір, а при необхідності знімається пробка. Після стабільного завершення процесу виплавлення шибера закривається. На пульті керування, розташованому на рульовому колесі або управлінській коробці, натискається кнопка «Вперед», і маніпулятор за допомогою ланцюгового електромеханічного приводу рухається в робоче положення по напрямних. За

допомогою кнопок «Підняти», «Опустити» та ручного кривошипного механізму подачі захисна труба центрується та вирівнюється зі склянкою колектора шиберної заслінки. Після натискання кнопки «Утримання» захисна труба притискається до ємності колектора з необхідною силою. Оператор регулює об'єм аргону за допомогою вентиля та витратоміра, щоб уникнути вторинного окислення металу. Сталевовідливальний ківш опускається в робоче положення, шиберна заслінка відкривається і розпочинається наповнення промислового ківша. Під час всіх нормальних рухів ківша, під час процесу розливання, кінематика маніпулятора автоматично відслідковує положення ємності-колектора, що запобігає роз'єднанню з'єднання. У випадку аварійних ситуацій можливе керування механізмом притискання захисної труби з ручних кранів, розташованих на гідроблоці керування (несучого пристрою маніпулятора).

При обертах стенду для розливу, маніпуляторний робот (захисна труба, яка прилягає до ємності колектора шиберної заслінки), може здійснювати рухи в межах поперечної частини промислового ківша. При великих кутах повороту стенду для розливу, захисна труба (стріла маніпулятора) автоматично опускається, якщо оператор цього раніше не здійснив. Граничні кути повороту стенду з притиснутою захисною трубою встановлюються під час монтажу. Механізм переміщення несучого пристрою маніпулятора активується тільки при знятому тиску гідроциліндра.

Для заміни відпрацьованої труби, спочатку закривають шиберну заслінку, після чого піднімають стальний ківш у верхнє положення та зупиняють подачу аргону. Натисканням кнопки «Опустити» трубу від'єднують від склянки колектора (якщо потрібно, трубу переводять у горизонтальне положення) та кнопкою «Назад» переміщують маніпулятор у резервне положення. Знімають підведення аргону. Стрілу розвертають до тих пір, поки труба не випаде з кошика на підлогу майданчика маніпулятора. Далі захисну трубу вивозять до

ємності для сміття. Під час видалення захисної труби важливо дотримуватися заходів безпеки, оскільки труба розжарена до температури близько 1500 °С.

Для контролю рівня металу у промисловому ківші, вимірювання температури та взяття проб металу використовується відкидний майданчик.

## 3.2 Модернізація вузлів маніпулятора

### 3.2.1 Механізм для обертання стріли

Для вчасної установки та заміни захисної труби необхідно, щоб маніпулятор був обладнаний механізмом для обертання стріли. У попередній конструкції для цього використовувався черв'ячний редуктор ЧФ-100М, привід якого здійснювався оператором вручну за допомогою рукоятки. Цей привід був зручний для точного позиціонування, але неефективний для швидкої заміни труби. Крім того, такий механізм ускладнював ергономіку маніпулятора, оскільки одночасне обертання стріли, повороти в горизонтальній площині та переміщення несучого пристрою ставали більш складними. Ручна робота (обертання рукоятки редуктора) погіршувала умови праці оператора, а обертання стріли від шухляди управління було виключено [13].

Для вирішення цих недоліків було запропоновано замінити ручний привід стріли на електромеханічний. З цією метою черв'ячний редуктор було замінено планетарним мотор-редуктором (рис. 3.6).

Переваги запропонованого приводу:

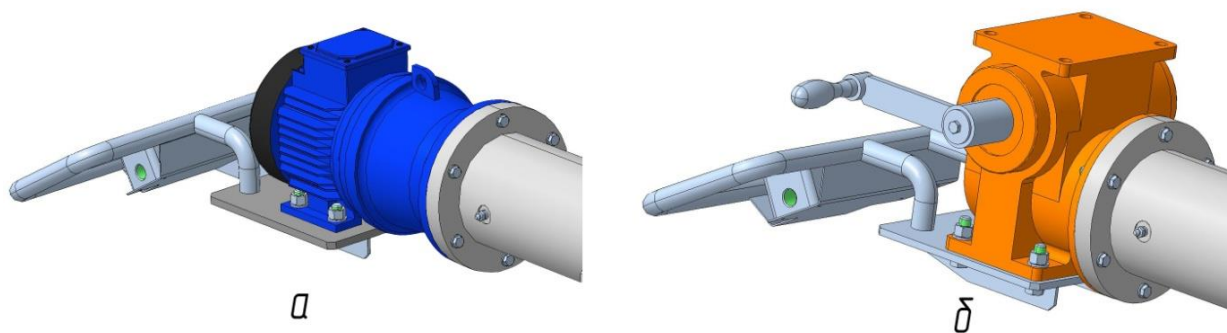


Рисунок 3.6 Модернізація приводу для обертання стріли: а – розроблений варіант; б – початковий варіант

- 1) виникає можливість керування маніпулятором (при зафіксованому положенні стріли) з пульта керування;
- 2) виключається ручна праця, що сприяє поліпшенню умов праці для оператора;
- 3) поліпшується ергономіка та маневреність маніпулятора (стає можливим одночасне обертання стріли, поворот, нахил та переміщення несучого пристрою).

### 3.2.2 Механізм переміщення несучого пристрою

Конструктивна схема маніпулятора з несучого пристрою визначається конфігурацією МНЛЗ №2, що використовує дворучну машину для безперервного лиття заготовок, обладнану двома кристалізаторами для введення затравки зверху. Установка стаціонарного маніпулятора стала неможливою через габаритні розміри машин для введення затравки. Таким чином, була обрана компоновальна схема маніпулятора, де заміна захисної труби, що відбувається за допомогою переміщення стріли та несучого пристрою [14].

У початковому варіанті переміщення несучого пристрою здійснювалася за допомогою ланцюгового приводу з роликівим однорядним ланцюгом. Недоліки цього приводу включають:

- 1) необхідність частого змащування ланцюга;
- 2) необхідність періодичного натягу та регулювання ланцюга;
- 3) швидке зношування компонентів ланцюгового приводу.

Один з головних недоліків ланцюгового приводу – знос ланцюга, що веде до його розтягування або витяжки. Виробники рекомендують замінювати роликівий ланцюг при розтягуванні близько 3 %. Більшість виробників роликівих ланцюгів також рекомендують замінювати зірочки разом із

ланцюгом, оскільки контакт метал-метал призводить до значного зносу зірочок. Крім того, ланцюговий привід виробляє багато шуму.

Пропонована модернізація приводу полягає у перебудові ланцюгового приводу на рейковий привід (рис. 3.7).

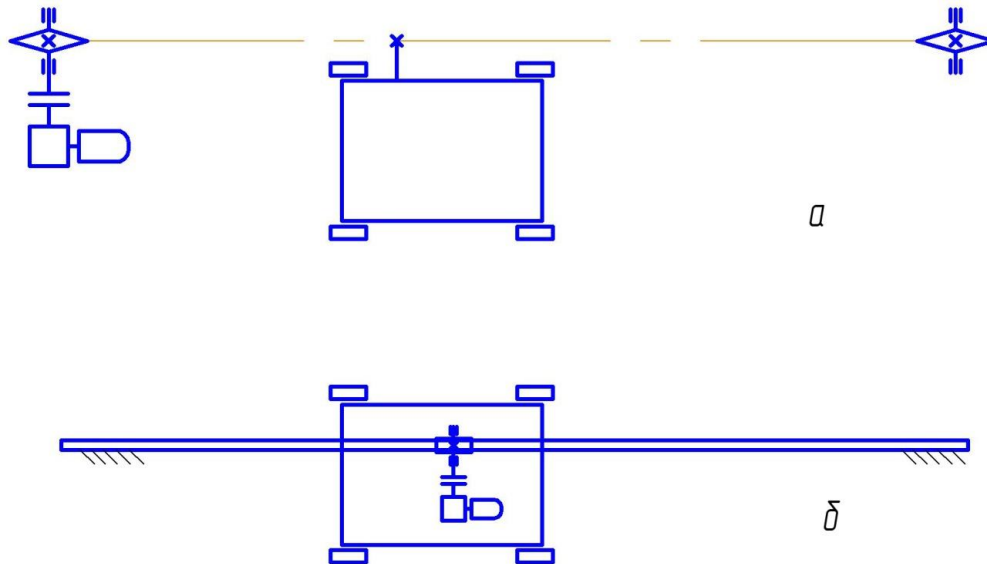


Рисунок 3.7 Привод переміщення несучого пристрою: а) початковий варіант; б) після модернізації

Висновок до Розділу 3. Досліджено та вдосконалено основні вузли маніпулятора, що сприяє поліпшенню його функціональних характеристик та ефективності. Розглянуті питання стосуються обертального захвату маніпулятора, модернізації механізмів для обертання стріли та реконструкція несучого пристрою.

## РОЗДІЛ 4

### НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА

#### 4.1 Розрахунок навантажень та потужності приводу для обертання стріли

Для забезпечення правильної й кращої роботи приводу виконуємо розрахунок навантажень та потужності приводу для обертання стріли [15] (додаток А).

Початкові дані:

Частота обертання, 3,5 об/хв;

Загальна вага стріли, 1686 Н;

Розрахунок потужності приводу:

$$P = \frac{T_{вих.} \cdot n_{вих.}}{9550 \cdot \eta_{заг.}} \text{ (KВт)}, \quad (4.1)$$

де  $T_{вих.}$  – крутний момент, Нм;

$n_{вих.}$  – частота обертання, об/хв;  $n_{вих.} = 3,5$  об/хв;

Загальний ККД приводу. Приймемо = 0,94.

Визначаємо крутний момент за формулою:

$$T_{вих.} = F_t \cdot R \text{ (Н} \times \text{м)}, \quad (4.2)$$

де  $F_t$  – зусилля, для подолання сил опору, Н;

$R$  – радіус від прикладеного навантаження;  $R = 0,65$  м.

$$F_t = f \cdot F_n \text{ (Н)}, \quad (4.3)$$

де  $f = 0,4$  – коефіцієнт тертя;

$F_n$  – зусилля від ваги.

$$F_n = mg \text{ (Н)}, \quad (4.4)$$

$$F_n = 172 \times 9,81 = 1687,6 \text{ Н};$$

$$F_t = 0,4 \times 1687,6 = 675,04 \text{ Н};$$

$$T_{вих.} = 675,04 \times 0,65 = 438,78 \text{ Н} \times \text{м}.$$

Знайдемо потужність електродвигуна:

$$P = \frac{438,78 \cdot 3,5}{9550 \cdot 0,94} = 171,1 \text{ Вт} = 0,171 \text{ кВт} .$$

Для забезпечення компактності та низького рівня шуму в роботі приводу, було вирішено скористатися планетарним мотор-редуктором, конструкція якого гарантує співвісність електродвигуна, редуктора та стріли. Згідно з каталогом мотор-редукторів НВО «Гідромаш-1» [16], вибір був зроблений на користь планетарного триступінчастого мотор-редуктора ЗМП-50 з фланцевим виконанням (рис. 4.1):

Потужність двигуна: 0,18 кВт;

Частота обертання вихідного валу: 3,55 об./хв.;

Крутний момент на вихідному валу: 459 Нм;

Коефіцієнт корисної дії (ККД) редукторної частини: 0,96.

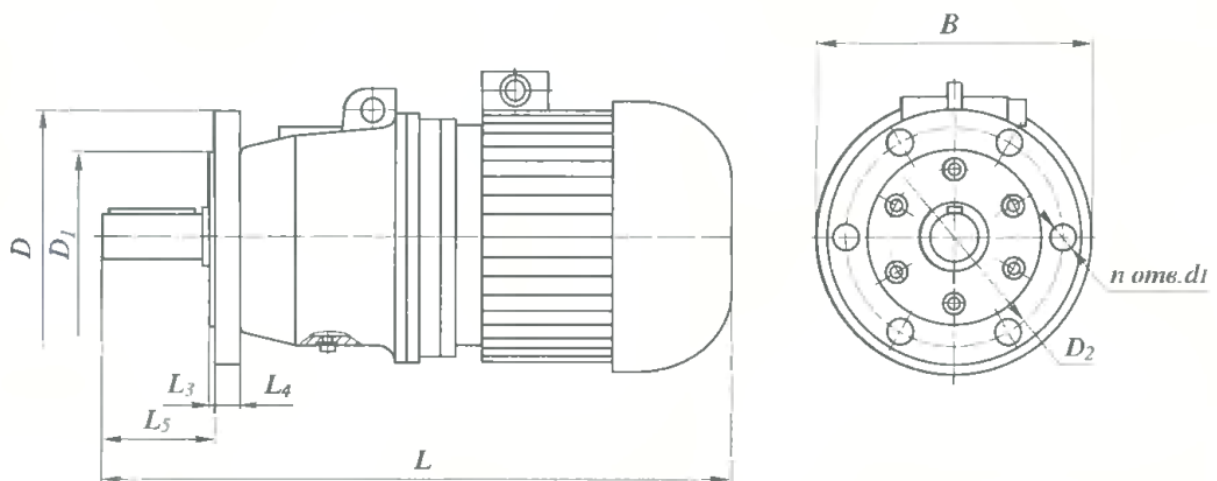


Рисунок 4.1 Мотор-редуктор марки ЗМП-50

#### 4.2 Розрахунок потужності приводу переміщення несучого пристрою

Початкові дані:

Швидкість пересування несучого пристрою, 0,5 м/с;

Маса компонентів, що переміщуються, 1700 кг;

Діаметр приводного колеса, 270 мм.

Потужність приводу максимальну визначимо за швидкістю пересування несучого пристрою та опору пересування несучого пристрою:

$$N_{\max} = \frac{V \cdot W}{1000\eta} \text{ (KBm)}, \quad (4.5)$$

де  $V$  – швидкість переміщення несучого пристрою,  $m/s$ ;

$W$  – опір пересування несучого пристрою,  $H$ ;

$\eta$  – коефіцієнт корисної дії (ККД) приводу. Прийmemo  $\eta = 0,85$ .

Опір пересування несучого пристрою виражається формулою:

$$W = W_{\text{тер.}} + W_{\text{інер.}}, \quad (4.6)$$

де  $W_{\text{тер.}}$  – опір, створюваний силами тертя,  $H$ ;

$W_{\text{інер.}}$  – опір створюваний силами інерції мас, що обертаються, і поступово рухаються мас несучого пристрою,  $H$ .

Опір тертя визначаємо:

$$W_{\text{тер.}} = G \frac{2\mu + fd_u}{D} k_{\text{он.}} \text{ (H)}, \quad (4.7)$$

де  $G$  – вага несучого пристрою та маніпулятора,  $H$ ;

$\mu$  – коефіцієнт тертя по рейці (для плоскої рейки  $\mu = 0,3$ );

$f$  – наведений коефіцієнт ( $f = 0,015$ );

$d_u$  – діаметр цапфи колеса,  $mm$ ;

$D$  – діаметр колеса,  $mm$ ;

$k_{\text{он.}}$  – коефіцієнт, що враховує опір тертя кочення опорних роликів;  $k_{\text{он.}} = 2,5$ .

Тоді опір, створюваний силами тертя, дорівнює:

$$W_{\text{тер.}} = 1700 \times 9,8 \frac{2 \cdot 0,3 + 0,015 \cdot 70}{270} 2,5 = 254,53 \text{ H.}$$

Опір, створюваний силами інерції мас, що обертаються, і поступово рухаються мас каретки визначаємо за формулою:

$$W_{\text{інер.}} = \delta \cdot m_{\text{носм.}} \cdot a \text{ (H)}, \quad (4.8)$$

де  $\delta$  – коефіцієнт інерції (менше 1 м/с  $\delta = 1,25$ ; більше 1м/с  $\delta = 1,15$ ).

$m_{пост.}$  – маса об'єкта (несучого пристрою) поступального руху, кг;

$a$  – при розгоні прискорення, м/с<sup>2</sup>.

Значення  $a$  приймаємо рівним  $a = (0,5...1,0)a$ , де  $a$  – допустиме прискорення, м/с<sup>2</sup>. Вантажопідйомність несучого пристрою становить 1,7...5 т,  $a = 0,5$  м/с<sup>2</sup>. Тоді  $a = (0,5 \dots 1,0) 0,5 = 0,5$  м/с<sup>2</sup>. Інерційний опір буде:

$$W_{инер.} = 1,25 \times 1700 \times 0,5 = 1062,5 \text{ Н.}$$

Повний опір пересування несучого пристрою:

$$W = 254,5 + 1062,5 = 1308 \text{ Н.}$$

Потужність максимальна двигуна:

$$N_{max} = \frac{V \cdot W}{1000\eta} (\text{кВт}), \quad (4.9)$$

$$N_{max} = \frac{0,5 \cdot 1308}{1000 \cdot 0,95} = 0,69 \text{ кВт}.$$

Враховуючи знайдену потужність, ми передбачаємо вибір серії мотор-редукторів від фірми SEW-EURODRIVE з номінальною потужністю  $N = 0,75$  кВт, що входять в серії K DR/DT/DV [17]. Для конкретного вибору мотор-редуктора необхідно також визначити частоту обертання вихідного валу редуктора та його крутний момент.

Для визначення частоти обертання вихідного валу мотор-редуктора ми скористаємося формулою, що визначає швидкість переміщення зубчастої рейки:

$$V_P = \frac{\pi \cdot m z \cdot n}{60 \times 1000}, \quad (4.10)$$

де  $m$  – модуль шестерні, мм;

$z$  – кількість зубів шестерні;

$n$  – частота обертання, об/хв.

Оскільки  $mz = d$  ( $d$  – діаметр шестірні),  $d = 140$  мм. За формулою (4.10) визначаємо частоту обертання валу вихідного мотор-редуктора:

$$n = \frac{V_p \cdot 60 \times 1000}{\pi \cdot d} (\text{об/хв}), \quad (4.11)$$

$$n = \frac{0,5 \times 60 \times 1000}{3,14 \times 140} = 68,24 \text{ об/хв}.$$

Необхідний крутний момент редуктора дорівнюватиме:

$$M_{кр} = P \times r \text{ (Н}\times\text{м)}, \quad (4.12)$$

$$M_{кр} = 1308 \times 0,07 = 91,56 \text{ Н}\times\text{м}.$$

Отримане значення задовольняє технічні характеристики мотор-редуктор SEW-EURODRIVE, K37DT80N4:

Потужність  $N = 0,75$  кВт;

Частота обертання  $n = 68$  хв<sup>-1</sup>;

Номінальний момент,  $M = 105$  Н×м;

Маса  $m = 21$  кг.

#### 4.3 Розрахунок рейкової передачі

Оскільки ми повинні визначити обраний ділильний діаметр шестерні, насамперед, необхідно визначити модуль і кількість зубів у шестерні [18].

$$z = d/m, \quad (4.13)$$

$$z = 140/5 = 28.$$

Прийmemo модуль  $m = 5$  мм. Тоді кількість зубів у шестерні буде розрахована за формулою:

де  $d$  – діаметр колеса; для наших розрахунків,

Далі проведемо розрахунок міцності передачі. Перевірка зубів шестерні на напругу вигину проводиться за наступним рівнянням (для прямозубої передачі):

$$\sigma_{\epsilon} = \frac{P \cdot k \cdot \gamma}{y \cdot m \cdot b} \leq [\sigma_{\epsilon}] \text{ (МПа)}, \quad (4.14)$$

де  $P$  – кругове зусилля на рейковому колесі, кг;

$k$  – коефіцієнт навантаження;

$\gamma$  – коефіцієнт, що враховує вплив зносу зубів на згинальну міцність ( $\gamma = 2,0$  при 30% зносі);

$y$  – коефіцієнт форми зуба, залежний від еквівалентного числа зубів, у нашому випадку  $y = 0,395$ ;

$b$  – ширина шестерні (рейки), рекомендовано приймати  $b=(2\div 10)m$ , тоді  $b = 50$  мм.

Ширина зубчастого колеса розраховується за формулою:

$$b_w = b - 5 \text{ (мм)}, \quad (4.15)$$

$$b_w = 50 - 5 = 45 \text{ мм.}$$

Кругове зусилля  $P=526,81$  Н, а зубчаста рейка виготовлена з марки сталі 15, межа витривалості якої  $\sigma_{-1} = 176$  МПа.

При роботі зуба обома сторонами (реверсивна передача), напруги, що допускаються, визначаються за формулою:

$$[\sigma_{\epsilon.}] = \frac{\sigma_{-1}}{[n]k_0}, \text{ (МПа)} \quad (4.16)$$

де  $[n]$  – коефіцієнт безпеки (для кованих, нормалізованих або покращених коліс  $[n] \approx 1,8$ );

$k_0$  – ефективний коефіцієнт концентрації напруги у корені зуба (для сталевих, покращених та нормалізованих коліс  $k_0 \approx 1,8$  [21]).

Тоді 
$$[\sigma_{\epsilon.}] = \frac{176}{1,8 \times 1,8} = 54,32 \text{ МПа.}$$

При симетричному розташуванні зубчастого колеса щодо опор, значення  $k=1,5$ .

$$\sigma_{\epsilon.} = \frac{1308 \times 1,5 \times 2}{0,395 \times 5 \times 45} = 44,15 \text{ МПа} \leq 54,32 \text{ МПа}$$

Умова міцності виконується.

#### 4.4 Розрахунки міцності вузлів і деталей маніпулятора

##### 4.4.1. Розрахунок на міцність осі опорної

Максимальне зусилля притискання труби 5880 Н [22]. Для визначення сили  $F_u$ , із якою на вісь діє гідроциліндр, побудована схема навантажень на стрілу (рис. 4.2).

$$\sum M_1 = 0, F \cdot 0,47 - R_2 \cdot (l_1 + l_2) = 0. \quad (4.17)$$

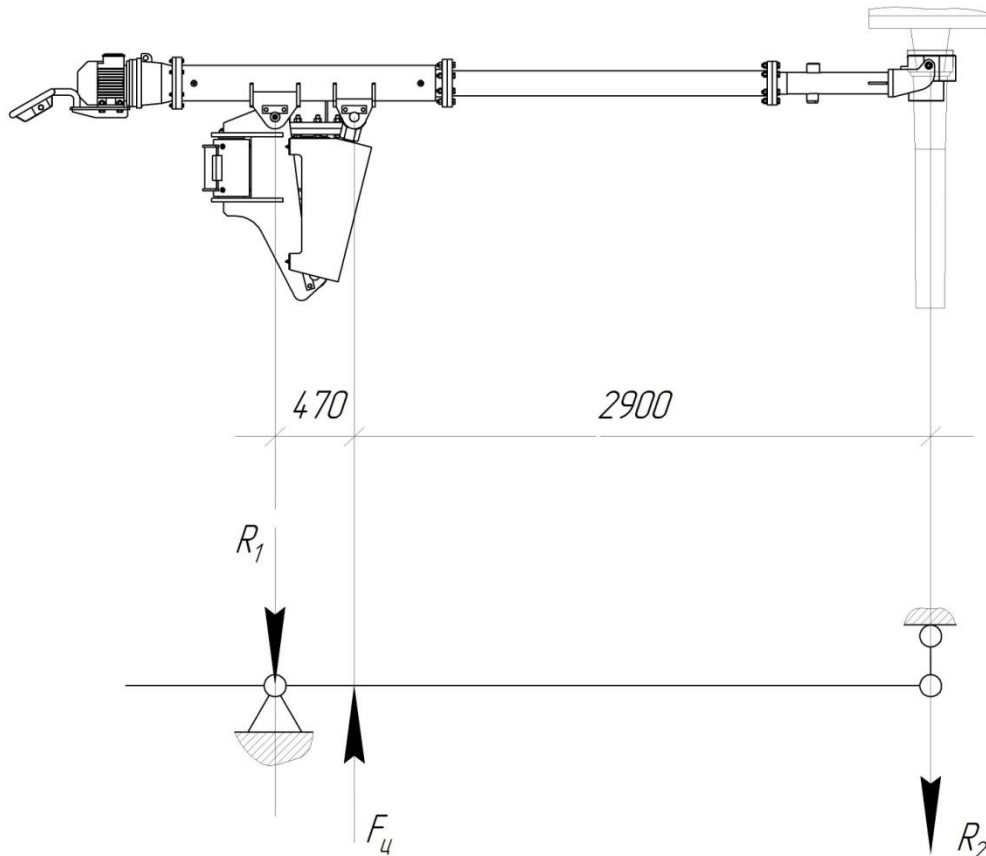


Рисунок 4.2 Схема навантажень, що діють на стрілу

Показник  $R_2$  визначаємо, як силу, що дорівнює силі притискання труби

$$R_2 = mg \quad (H), \quad (4.18)$$

$$R_2 = 600 \times 9,8 = 5880 \text{ H}.$$

Тоді сила  $F_u$  дорівнює:

$$F_u = \frac{R_2(0,47 + 2,9)}{0,47} = 42160 \text{ H} = 42,16 \text{ кН}.$$

Відстані від крайніх опор до точки застосування сили  $F_y$  рівні (рис. 4.3), реакції опор  $R_1$  та  $R_2$  є рівними:

$$R_1 = 1/2 F_y = (H), \quad (4.19)$$

$$R_1 = 0,5 \times 40100 = 20050H,$$

$$R_2 = 0,5 \cdot 40100 = 20050H.$$

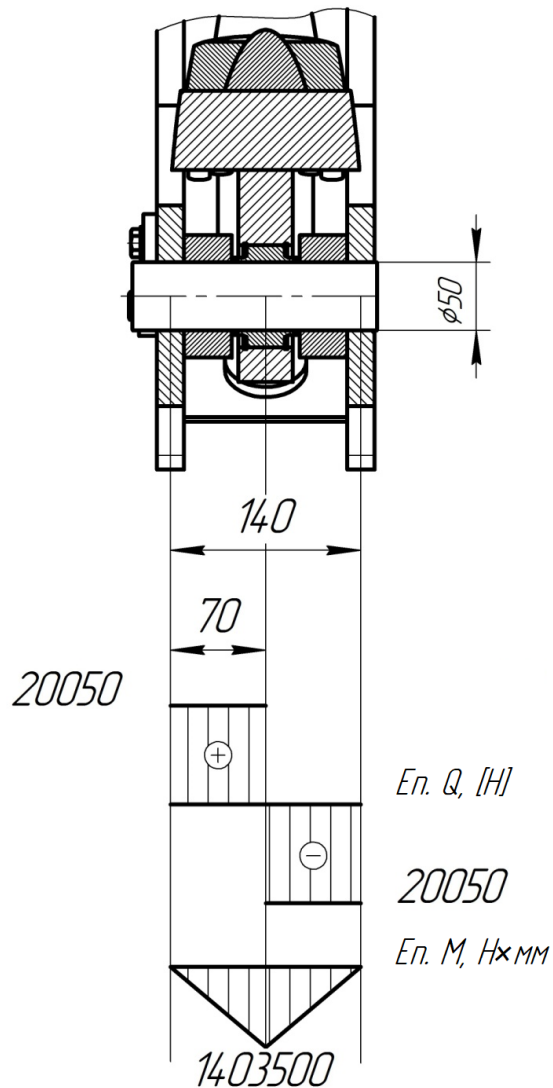


Рисунок 4.3 Епора згину

Момент згину  $M_3$  у перерізі 3 дорівнюватиме:

$$M_3 = 20050 \times 70 = 1403500 \text{ H} \times \text{м}.$$

Діаметр осі визначаємо:

$$d = \sqrt[3]{\frac{M_i}{0,1 \cdot [\sigma_i]}}, \quad (4.20)$$

де  $[\sigma_i]$  – напруга на згин, що допускається [23].

$M_i$  – момент згину в перерізі.

Оскільки вісь з'єднана з внутрішнім кільцем підшипника сферичного вуха гідроциліндра, то прийmemo  $[\sigma_i] = 120$  МПа [24].

Тоді діаметр осі дорівнюватиме:

$$d = \sqrt[3]{\frac{M_u}{0,1 \cdot [\sigma_u]}}, \quad (4.21)$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{1403500}{0,1 \cdot 120}} = 48,9.$$

Отримане значення заокруглимо до більшого найближчого стандартного значення  $d=50$  мм.

#### 4.4.2 Розрахунок на міцність осі несучого пристрою

1. Визначення реакцій опорних (рис. 4.4):

$$\sum M_1 = 0; \quad -F \cdot 2,68 + R_2 \cdot 2,96 = 0,$$

$$R_2 = \frac{F \times 2,68}{2,96} = \frac{14,7 \times 2,68}{2,96} = 13,31 \text{ кН},$$

Реакцію другої опори визначаємо за наявної умови:

$$R_1 - F + R_2 = 0,$$

$$\text{отже } R_1 = F - R_2, \quad (4.22)$$

$$R_1 = 14,7 - 13,31 = 1,39 \text{ кН}.$$

2. Побудова епюр моментів згину.

Моменти згину в перерізі З:

$$M_3 = L_1 \times R_1, \quad (4.23)$$

$$M_3 = 2,68 \times 1,39 = 3,725 \text{ кН} \times \text{м}.$$

Момент згину у перерізі А:

$$M_A = L_2 \times R_1, \quad (4.24)$$

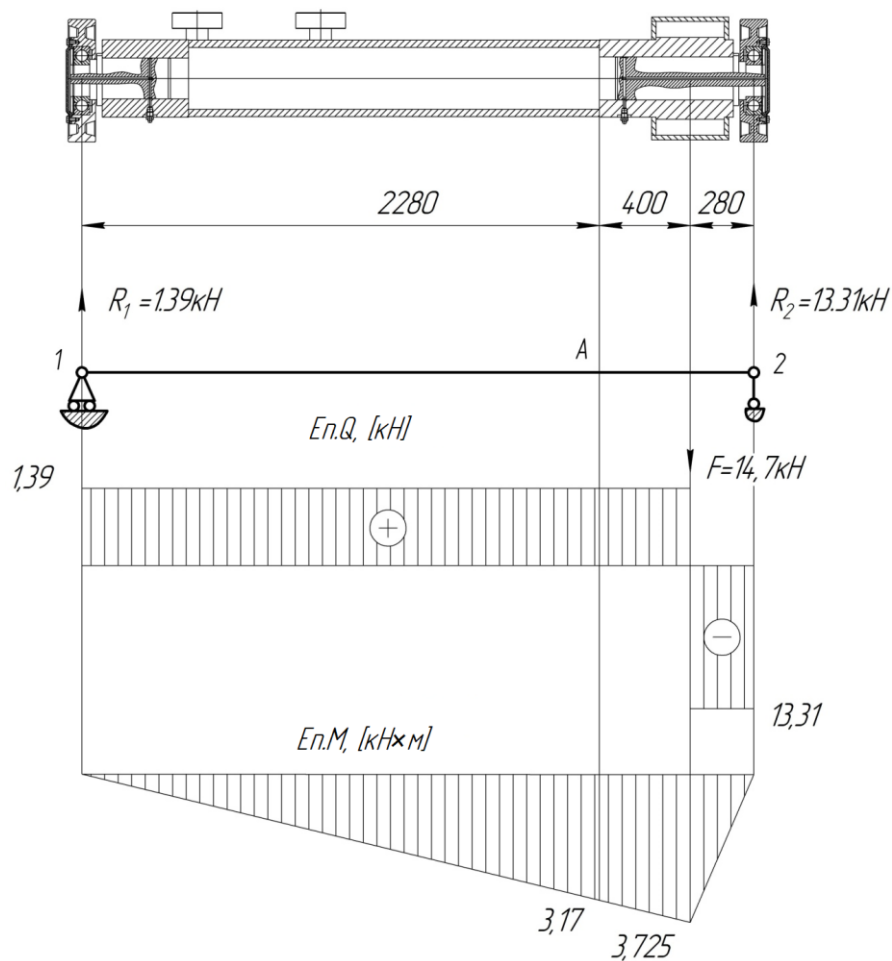


Рисунок 4.4 Епюри навантажень та моментів згину

$$M_A = 2,28 \times 1,39 = 3,17 \text{ кН} \times \text{м.}$$

### 3. Вибір небезпечного перерізу

Небезпечними перерізами є переріз 3, де діє в максимальний момент згину, і переріз А з концентратором напруження – ступінчастий перехід.

#### 4.4.3 Розрахунок на статичну міцність осі

Елементи осі виготовлені із сталі Ст.5.  $[\sigma]_i = 125 \text{ МПа}$ .

Розрахунок на статичну міцність осі виконуємо за формулою:

$$\sigma_3 = \frac{M_3}{0,1 \cdot d^3} \leq [\sigma]_i, \quad (4.25)$$

де  $M_3$  – момент згину в небезпечному перерізі;

$d$  – діаметр осі;

1) Розрахунок міцності в небезпечному перерізі  $A$ .

Оскільки вісь має переріз у вигляді труби, то для небезпечного перерізу  $A$  діаметр осі буде обчислений різницею зовнішнього й внутрішнього діаметра труби  $d = D - d_g$ . Межа міцності згину буде дорівнювати:

$$\sigma_3 = \frac{M_3}{0,1 \cdot (D - d_g)^3} \leq [\sigma]_3, \quad (4.27)$$

$$\sigma_3 = \frac{3725}{0,1 \cdot (0,27 - 0,22)^3} = 108,6 \text{ МПа} \leq 125.$$

2) Розрахунок міцності у небезпечному перерізі  $3$ .

$$\sigma_3 = \frac{M_3}{0,1 \cdot d^3}, \quad (4.25)$$

$$\sigma_3 = \frac{3725}{0,1 \cdot 0,15^3} = 110,37 \text{ МПа} \leq 125$$

Умови міцності виконуються в обох перерізах. Геометричні параметри осі вибрані правильно.

#### 4.5 Розрахунки уніфікованих деталей та вузлів маніпулятора

1) Розрахунок підшипників кочення.

Виконаємо розрахунок для найбільш навантажених підшипників машини. Максимальне вагове навантаження (14700 Н, коли маніпулятор знаходиться у крайньому лівому положенні) призводить до максимального навантаження на підшипникові опори коліс каретки маніпулятора [25]. Для проведення розрахунків використовується програма SolidWorks Toolbox. У вікні програми Solidworks переходимо на вкладку «продукти Office» в панелі «CommadManager». Потім обираємо додаток SolidWorks Toolbox [26] зі списку. У відкритому списку вибираємо «розрахунок підшипника», що викликає вікно вибору підшипника та його розрахунок (рис. 4.5).

Рисунок 4.5 Вікно програми Toolbox

Одиниці вимірювання обрані в системі SI (CI). Вид підшипника – радіальний. Зважаючи на те, що підшипник працює при невисоких температурах ( $<105\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), ми встановлюємо надійність  $L(1)$  на рівні 96%.

У розділі «працездатність підшипника» обираємо опцію «розрахунок». Еквівалентне навантаження на підшипник складає  $F=14700\text{ Н}$ . Швидкість обертання при русі, що встановилася, становить 200 об/хв. Після натискання на кнопку «термін служби» ми отримуємо довговічність підшипника в годинах.

У результаті розрахунків отримуємо еквівалентну довговічність підшипника LE, яка дорівнює 18359 год. З урахуванням того, що LE перевищує 12500 год, ми можемо визначити, що обраний підшипник відповідає встановленим умовам роботи.

Висновок до Розділу 4. Проведено комплексний і детальний розрахунок ключових параметрів маніпулятора для забезпечення його ефективної та надійної роботи. Вивчені різні аспекти, включаючи розрахунок навантажень та потужності для обертання стріли, приводу переміщення несучого пристрою, рейкової передачі, а також міцності осей, деталей і вузлів маніпулятора. Отримані результати дозволяють впевнено стверджувати, що розроблений маніпулятор відповідає вимогам стійкості, міцності та надійності у різних робочих умовах.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі магістра був проведений огляд літератури та виконані теоретико-експериментальні дослідження роботи маніпуляторів захисної труби МБЛЗ на ТОВ «Механічно-ливарному заводі».

Досягнута мета та реалізовані поставлені завдання:

1. Здійснений огляд та аналіз літератури.

2. Виконана модернізація ручного приводу для обертання стріли маніпулятора. Вона полягала в зміні ручного приводу для обертання стріли маніпулятора на електромеханічний і заміні ланцюгового приводу переміщення несучого пристрою на рейковий привід.

В результаті модернізації обладнання, обертання стріли можна здійснювати як від штурвала, так і від ящика керування, збільшуючи при цьому маневреність і ергономіку маніпулятора.

Маніпулятор у початковому стані мав ручний привід обертання стріли, що ускладнювало одночасний поворот труби і рух несучого пристрою, а також не дозволяло обертати стрілу від ящика керування.

3. Була проведена реконструкція приводу переміщення несучого пристрою маніпулятора, що позитивно позначилося на його обслуговуванні і знизило час простоїв, пов'язаних з натягом ланцюга.

Підбиваючи підсумки кваліфікаційної роботи магістра, можна сказати, що вдосконалення механічного вузла маніпулятора МБЛЗ полегшує обслуговування обладнання загалом та дозволяє досягти більшої точності, швидкості й надійності операцій маніпулювання різними об'єктами, що, в свою чергу, впливає на підвищення якості та ефективності виробництва.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Маніпулятори та промислові роботи : навч. посібник з дисципліни для студентів бакалаврів, спеціальності 131 Прикладна механіка, 133 Галузеве машинобудування / укладачі: Махайлов Є. П., Лінгур В. М. Одеса: ОНПУ, 2019. 233 с.
2. Цвіркун Л.І., Грулер Г. Робототехніка та мехатроніка: навч. посіб. Дніпро: НГУ, 2017. 224 с.
3. Промислові роботи. URL: <https://kaf-av.tntu.edu.ua/index.php/mn-abiturient/mn-articles/676-art-industrial-robots> (дата звернення: 16.10.2023).
4. Бочков В.М., Сілін Р.І. Обладнання автоматизованого виробництва. навч. посіб. Львів: ДУ «Львівська політехніка», 2000. 380 с.
5. Петраков Ю.В., Мельничук П.П. Автоматизація технологічних процесів у машинобудуванні засобами мікропроцесорної техніки : навч. посіб. Житомир: ЖДТУ. 2001. 194 с.
6. Кузнєцов Ю.М. Верстати з ЧПК та верстатні комплекси : навч. посіб. К.: ТОВ «Замок»; Тернопіль, 2001. Т.1 198 с., Т.2 – 298 с.
7. Проектування ливарних цехів : підручник / Г. Є. Федоров, М. М. Ямшинський, В. Г. Могилатенко та ін. К. : НТУУ «КПІ», 2011. Ч.1. 588 с.
8. Пуховський Є.С., Малафєєв Ю.М. Проектування гнучких виробничих систем машинобудування : навч. посібник. К.: НТУУ «КПІ», 2017. Ч. I. 286 с.
9. Біланенко В.Г., Приходько В.П., Мельник О.О. Проектування технологічних процесів. Частина 1. Оброблення деталей-тіл обертання : навчальний посібник для студентів спеціальності 131 Прикладна механіка, спеціалізацій Технології машинобудування та Технології виготовлення літальних апаратів. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 232 с.
10. Захоплювальні пристрої промислових роботів: навч. посіб. Тернопіль: ТДТУ ім. І. Пулюя, 2008. 232 с.

11. Субота Д. Ю. Схвати мобільних роботів для маніпулювання небезпечними об'єктами: магістр. дис. 15.03.2018. 2018. 84 с.
12. Huliieva, N.M., Marchuk, S.F. (2023). Types of Mechatronic Modules by the Method of used Energy. Modernization of science and its influence on global processes: collection of scientific papers «SCIENTIA» with Proceedings of the III International Scientific and Theoretical Conference, April 14, 2023. Bern, Swiss Confederation: European Scientific Platform. P. 57. DOI: <https://doi.org/10.36074/scientia-14.04.2023>
13. Гармаш Т. О. Система автоматичного керування приводом робота-маніпулятора : дипл. проект на здобуття освітнього ступеню «Бакалавр» зі спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології. 2019. 42 с.
14. Гулієва Н.М., Рускевич О.С., Гордій Т.В. Мобільний робототехнічний комплекс крокового типу. Міжнародна наукова інтернет-конференція на тему «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення» (Вип. 53), 16 листопада 2020 року. Ч. 2. С. 49–50.
15. Huliieva N.M., Paliy N.M. Peculiarities of Calculating Loads and Drive Power. The current state of development of world science: characteristics and features: collection of scientific papers «SCIENTIA» with Proceedings of the VI International Scientific and Theoretical Conference, December 15, 2023. Lisbon, Portuguese Republic: International Center of Scientific Research. P.102–103. DOI 10.36074/scientia-15.12.2023.
16. НВО ГІДРОМАШ-1. <https://npo-gidromash.com.ua/ua/>
17. SEW-EURODRIVE Україна. URL: <https://www.sew-eurodrive.ua/holovna-storinka.html> (дата звернення: 16.10.2023).
18. Попович М.Г. Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: підр. Київ: «Либідь», 2007. 656 с.

19. Гоголюк П.Ф., Гречин Т.М. Теорія автоматичного керування: навч. посіб. Львів: Львівська політехніка, 2009. 280 с.
20. Верьовкіна М.О. Оптимізація системи навігації мобільного робота на основі технології прийняття рішень : атест. робота на здобуття освітнього ступеню «Бакалавр» зі спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» 2019 р. 69 с.
21. Савків В. Б., Михайлишин Р.І., Козбур І.Р. Автоматизація виробничих процесів : конспект лекцій з курсу для студентів спеціальності 181 Харчові технології. Тернопіль: ТНТУ, 2018. 89 с.
22. Деталі машин і основи конструювання : конспект лекцій / укладач В.В. Стрелец. Суми : Сумський державний університет, 2022. 150 с.
23. Дудюк Д.Л., Мазепа С.С., Мисик М.М. Гнучке автоматизоване виробництво і роботизовані ком плекси : навч. посібник. Львів: Магнолія плюс, СГД ФО В.М. Піча, 2005. 278 с.
24. Кваліфікаційна робота магістра. Методичні вказівки до оформлення кваліфікаційної роботи магістра для здобувачів другого (магістерського) рівня освітньо-професійної програми «Прикладна механіка» галузь знань 13 Механічна інженерія спеціальності 131 Прикладна механіка денної та заочної форм навчання. / уклад. Т.Н. Гальчук Луцьк: Луцький НТУ, 2019. 32 с.
25. Розрахунок параметрів та характеристик електричних машин: Методичні вказівки до розрахункового завдання з курсу «Електричні машини» для студентів електротехнічних спеціальностей всіх форм навчання, уклад. В.І. Мілих, Н.В. Полякова; за ред. В.І. Мілих. Харків: НТУ «ХП», 2013. 51 с.
26. Solidworks Toolbox Standard Parts Library. <https://www.javelin-tech.com/3d/solidworks-toolbox/>

# ДОДАТКИ