

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

на тему РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ МАНІПУЛЯТОРА ДЛЯ ПЕРЕ-
МІЩЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ПІСЛЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

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

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

(підпис)

Вячеслав ЛОВЕЙКІН
(ПІБ)

к.т.н.
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Анастасія ЛЯШКО
(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Пріма Олександр Євгенович
(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)
“ ” 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту

Пріми Олександра Євгеновича

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування

(код і назва)

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи (дипломного проекту бакалавра) **тему РОЗРО-
БКА КОНСТРУКЦІЇ МАНІПУЛЯТОРА ДЛЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ ДЕТАЛЕЙ
ПІСЛЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ**

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

Термін подання завершеної роботи (проекту) на кафедру 2026 червня 04

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи (дипломного проекту бакалавра)

Технологічна схема застосування маніпулятора для переміщення деталей після термічної об-
робки

Перелік питань, які потрібно розробити:

1. Провести аналіз існуючих конструкцій маніпуляторів.
2. Розглянути перспективи створення нової конструкції маніпулятора.
3. Виконати розрахунок маніпулятора.
4. Розглянути питання охорони праці при роботі з маніпулятором.
5. Виконати розрахунок економічної ефективності.

Перелік графічних документів (за потреби).

1. Загальний вигляд
2. Креслення вузла
3. Деталювання

Дата видачі завдання “16” квітня 2026 р.

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

Вячеслав ЛОВЕЙКІН.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Анастасія ЛЯШКО
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

Олександр ПРИМА
(підпис) (прізвище та ініціали студента)

ЗМІСТ

ЗМІСТ	3
РЕФЕРАТ	5
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ ПРОМИСЛОВИХ МАНІПУЛЯТОРІВ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПЕРЕМІЩЕННЯ ДЕТАЛЕЙ В УМОВАХ ТЕРМІЧНОГО ВИРОБНИЦТВА	8
1.1.Актуальність автоматизації маніпуляційних операцій після термічної обробки	8
1.2.Аналіз сучасних типів промислових маніпуляторів та їх конструктивних схем	9
1.3.Огляд конструкцій захватних пристроїв для гарячих деталей	13
1.4.Аналіз приводів і кінематичних схем маніпуляторів	16
1.5.Матеріали та методи забезпечення термостійкості конструкцій	17
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ МАНІПУЛЯТОРА ДЛЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ПЛЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ	21
2.1.Вихідні дані для проєктування	21
2.2.Обґрунтування конструктивної схеми маніпулятора	23
2.3.Кінематичний розрахунок маніпулятора	24
2.4.Силовий розрахунок приводів	29
2.5.Розрахунок захватного пристрою	34
2.6.Розрахунок точності позиціювання	37
2.7.Розрахунок продуктивності роботи маніпулятора	39
2.8.Розрахунок енергоспоживання системи	41
РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ	45

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ								
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата									
Розроб.		Пріма О.Є.			ЗМІСТ				Літ.	Арк.	Акрушів		
Перевір.		Ляшко А.П.									3	67	
									НУБіП України				
Н. Контр.		Матухно Н.В.											
Затверд.		Ловейкін В.С.											

3.1.Вимоги безпеки при експлуатації маніпулятора для переміщення деталей після термічної обробки	45
3.2.Аналіз можливих ризиків і заходів щодо їхнього мінімізації при експлуатації маніпулятора	47
3.3.Правила технічного обслуговування та ремонту маніпулятора	48
РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ	49
4.1.Оцінка доцільності та розширений аналіз проекту	49
4.2.Розрахунок капітальних інвестицій	50
4.3.Розрахунок поточних експлуатаційних витрат.....	51
4.4.Розрахунок сумарного економічного ефекту та терміну окупності.....	53
4.5.Зведені техніко-економічні показники (ТЕП).....	53
ВИСНОВКИ.....	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	58
ДОДАТКИ	67

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РЕФЕРАТ

Бакалаврська кваліфікаційна робота складається з пояснювальної записки, що містить вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел та додатків. Дана робота представлена на 65 сторінках тексту.

В першому розділі бакалаврської кваліфікаційної роботи розглянуто сучасний стан автоматизації маніпуляційних операцій в умовах термічного виробництва, проведено класифікацію типів промислових маніпуляторів та захватних пристроїв, виконано аналіз конструкцій сучасних систем та методів їх теплового захисту. Розглянуті конструкції закордонних аналогів (KUKA, Fanuc, Staubli) та перспективи створення нових стійких маніпуляційних систем для переміщення гарячих заготовок.

В розрахунковому розділі роботи проведено розрахунок конструкції промислового маніпулятора, а саме розраховано його основні параметри (визначено кінематичні характеристики за методом Денавіта–Хартенберга, виконано силовий та моментний розрахунок для найнесприятливішого положення ланок та підібрано серводвигуни з редукторами). Також виконано розрахунок термостійкого пневматичного захватного пристрою на міцність утримання деталі та визначено просторову точність позиціонування системи.

В розділі охорона праці розглянуто вимоги безпеки при експлуатації маніпулятора в термічному цеху, аналіз можливих ризиків (наприклад, термічні опіки від нагрітих деталей, механічні удари рухомими ланками чи ураження струмом) і заходів щодо їхньої мінімізації, правила технічного обслуговування та ремонту.

Також в бакалаврській кваліфікаційній роботі виконано розрахунок економічної ефективності від розробки та впровадження конструкції маніпулятора для переміщення деталей після термічної обробки, де прораховано загальні

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Пріма О.Є.				ЗМІСТ	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.	Ляшко А.П.						5	67
						НУБіП України		
Н. Контр.	Матухно Н.В.							
Затверд.	Ловейкін В.С.							

капітальні інвестиції, річну економію фонду оплати праці (за рахунок виведення людей з небезпечної зони) та термін окупності проекту.

Ключові слова: промисловий маніпулятор, термічна обробка, автоматизація, кінематичний розрахунок, термостійкий захватний пристрій, охорона праці, економічна ефективність.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

ВСТУП

Актуальність теми. Процеси термічної обробки є критично важливими етапами в сучасному машинобудуванні, оскільки саме вони визначають кінцеві механічні властивості деталей, зокрема їх міцність, твердість та зносостійкість. Специфіка термічних цехів – екстремально високі температури, інтенсивне теплове випромінювання, виділення шкідливих газів та наявність агресивних гартувальних середовищ – створює надскладні та небезпечні умови для праці людини. Впровадження автоматизованих промислових маніпуляторів дозволяє повністю усунути персонал із небезпечних зон та забезпечити суворе дотримання технологічного часу циклу (наприклад, 16,7 с), що є критично важливим для формування правильної структури металу. Особливо актуальним це завдання є для агропромислового сектору та підприємств сільськогосподарського машинобудування, де автоматизація переміщення деталей після гартування є ключем до підвищення експлуатаційного ресурсу техніки.

Мета дослідження полягає у розробці надійної конструкції промислового маніпулятора для безпечного та ефективного переміщення деталей після термічної обробки в екстремальних температурних умовах.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Прміа О.Є			ВСТУП		
Перевір.		Ляшко А.П.					
Н. Контр.		Матухно Н.В.					
Затверд.		Ловейкін В.С.					
					Літ.	Арк.	Аркушів
						7	67
					НУБіП України		

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ ПРОМИСЛОВИХ МАНІПУЛЯТОРІВ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПЕРЕМІЩЕННЯ ДЕТАЛЕЙ В УМОВАХ ТЕРМІЧНОГО ВИРОБНИЦТВА

1.1. Актуальність автоматизації маніпуляційних операцій після термічної обробки

Процеси термічної обробки є критично важливими етапами в сучасному машинобудуванні, оскільки вони визначають кінцеві механічні властивості деталей, такі як твердість, міцність та зносостійкість [1]. Однак специфіка термічних цехів – екстремально високі температури, наявність агресивних охолоджувальних середовищ, інтенсивне теплове випромінювання та значна вага заготовок – створює надскладні умови для праці людини та вимагає впровадження високоефективних автоматизованих систем [3]. Використання промислових маніпуляторів дозволяє не лише усунути персонал із небезпечних зон, але й забезпечити суворе дотримання технологічних регламентів, де час переміщення деталі від печі до гартувальної ванни вимірюється секундами [5].

Роботизовані системи забезпечують стабільність циклів, що неможливо при ручних операціях, де людський фактор впливає на швидкість охолодження та рівномірність структури металу [2]. Розробка конструкції маніпулятора для таких умов потребує глибокого аналізу існуючих промислових рішень, кінематичних схем та спеціалізованих вузлів, здатних функціонувати при температурах об'єктів до 1200°C [3].

Сучасний ринок пропонує широкий спектр рішень: від універсальних шестиосьових роботів-антропоморфів до спеціалізованих порталних систем та мобільних платформ [10]. Кожне з цих рішень має свої конструктивні особливості, що визначають сферу їх застосування в термічних дільницях.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Пріма О.Є			РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ ПРОМИСЛОВИХ МАНІПУЛЯТОРІВ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПЕРЕМІЩЕННЯ ДЕТАЛЕЙ В УМОВАХ ТЕРМІЧНОГО ВИРОБНИЦТВА	Літ.	Арк.	Акрушів	
Перевір.		Ляшко А.П.					8	67	
						НУБіП України			
Н. Контр.		Матухно Н.В.							
Затверд.		Ловейкін В.С.							

1.2. Аналіз сучасних типів промислових маніпуляторів та їх конструктивних схем

Вибір архітектури маніпулятора є першочерговим завданням при проєктуванні системи для термічного цеху. Основними типами конструкцій, що довели свою ефективність у важких умовах, є вертикально-шарнірні (антропоморфні) роботи, порталні (картезіанські) системи та маніпулятори на базі легких кранових структур [10].

1.2.1. Вертикально-шарнірні маніпулятори

Вертикально-шарнірна конструкція є найбільш розповсюдженою завдяки своїй універсальності та великій робочій зоні при відносно невеликій площі основи [10]. Такі роботи, як серії KR QUANTEC від KUKA (рис. 1.1) або M-2000 від Fanuc (рис. 1.1), мають шість ступенів вільності, що дозволяє їм маніпулювати деталями складної форми всередині обмеженого простору печей або гартувальних баків [5].



Рис. 1.1. Роботи серії KR QUANTEC від KUKA

Конструктивно ці маніпулятори складаються з масивної литої основи, поворотної колони (вісь 1), стріли (вісь 2), рукояті (вісь 3) та триосьового кистьового механізму [10]. Для термічних цехів виробники випускають спеціальні версії «Foundry» або «Heat-resistant» [3]. Наприклад, роботи Staubli серії TX2-200

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

мають повністю герметичний корпус із рівнем захисту IP67, що виключає потрапляння окалини та бризок масла в редуктори та двигуни [15].



Рис. 1.2. Помисловий маніпулятор FANUC

Таблиця 1.1.

Технічні характеристики промислових роботів для термічних цехів

Вироб- ник	Серія / Мо- дель	Вантажо- підйом- ність, кг	Виліт стріли, мм	Особливості для тер- мічних цехів
KUKA	KR FORTEC ultra (рис. 1.1)	300 - 800	2800 - 3700	Підвищений захист від пилу та тепла [10]
Fanuc (рис. 1.1)	M-2000iA	900 - 2300	до 4700	Екстремальна вантажо- підйомність для великих валів [5]
ABB	IRB 8700 (рис. 1.3)	до 800	3500 - 4200	Надійна конструкція, простота програмування [18]
Staubli	TX2-200	до 170	2209 - 2609	Повна герметичність, IP67, стійкість до агре- сивних середовищ [15]



Рис. 1.3. Робот виробника ABB, марка IRB 8700



Рис. 1.4. Робот виробника Staubli, марка TX2-200

Кінематика антропоморфних роботів дозволяє реалізовувати складні траєкторії, наприклад, "погойдування" деталі у гартувальній рідині для руйнування парової сорочки, що є критичним для якості термообробки [2].

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

1.2.2. Портальні та мостові маніпулятори

Для обслуговування великих площ термічних діляниць, де печі та ванни розташовані на значній відстані, доцільно використовувати портальні маніпулятори. Компанія Demag є лідером у розробці таких систем на базі модульних компонентів KBK [14]. Портальна конструкція складається з двох паралельних колій, по яких переміщується міст, а по мосту – візок із вертикальним маніпуляційним органом.[14]

Перевагою систем Demag V-type є використання решітчастих або діафрагмових з'єднань, що зменшує власну вагу конструкції на 17% та мінімізує коливання вантажу, забезпечуючи точність позиціонування при високих швидкостях переміщення (до 60 м/хв) [11]. У термічних цехах портальні маніпулятори часто інтегруються з мостовими кранами, де замість гака встановлюється жорстка телескопічна штанга із захватом, що виключає розгойдування розпеченої деталі [7].

1.2.3. Мобільні маніпуляційні платформи

Новим словом у термічному виробництві є використання мобільних роботів, таких як платформи Staubli PF3 або HelMo.[12] Ці системи здатні транспортувати важкі кошики з деталями (від 1,5 до 450 тонн) між різними технологічними зонами без використання стаціонарних конвеєрів [12]. Конструкція таких платформ включає омні-дирекційні колеса, що дозволяють маневрувати у вузьких проходах цеху з точністю до ± 5 мм [12]. Це особливо актуально для гнучких виробничих систем (ГВС), де послідовність термічних операцій може змінюватися залежно від марки сталі.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12



Рис. 1.5. Мобільна маніпуляційна платформа

1.3. Огляд конструкцій захватних пристроїв для гарячих деталей

Захватний пристрій (схват) є кінцевою ланкою маніпулятора, яка зазнає найбільшого термічного та механічного навантаження. Його конструкція повинна забезпечувати надійне утримання заготовки, що має температуру 800-1100°C, при цьому захищаючи механізми приводу від перегріву [3].



Рис. 1.6. Трьохточковий захватний пристрій

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

1.3.1. Класифікація та механічні схеми захватів

За характером роботи та конструкцією виділяють наступні типи механічних захватів [23]:

- **Кліщові (важільні) захвати** (рис. 1.7): найбільш надійні для гарячих деталей. Використовують систему важелів для створення значного зусилля затиску. Компанія IPR пропонує кутові схвати, спеціально розроблені для кування та гартування, які працюють у діапазоні 800-1200°C [3].



Рис. 1.7. - Кліщовий (важільний) захват

- **Паралельні захвати** (рис. 1.8): губки переміщуються паралельно одна одній, що дозволяє надійно фіксувати деталі різного розміру без зміни центру мас. Прикладом є серія Zimmer GH7000, яка має інтегровану систему фіксації вантажу пружиною на випадок зникнення тиску [6].

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14



Рис. 1.8. Паралельний захват

- **Спеціалізовані захвати для лиття та штампування:** мають довгі пальці (губки), що дозволяють основному механізму маніпулятора залишатися на безпечній відстані від зони випромінювання печі [3].

Таблиця 1.2.

Класифікація та технічні характеристики механізмів передачі руху

Механізм передачі руху	Опис конструкції	Сфера застосування
Рейково-важільний	Перетворення лінійного руху штока пневмоциліндра через рейку та зубчасті сектори важелів [23]	Важкі заготовки, де потрібна синхронізація губок.
Клино-важільний	Використання клинового механізму для створення екстремальних зусиль затиску [23]	Заготовки з великою масою та малою площею контакту.

Кулісно-ва- жільний	Забезпечує високу швидкість спра- цювання при компактних розмірах [23]	Дрібні деталі, швидкі- сні цикли.
--------------------------------	--	--------------------------------------

1.3.2. Захист від екстремальних температур

Для забезпечення працездатності захвата при контакті з гарячим металом конструктори використовують комбіновані методи захисту:

Керамічна ізоляція: встановлення вставок з оксиду алюмінію (Al_2O_3) між змінними губками та корпусом захвата. Дослідження показують, що керамічний ізолятор товщиною 17 мм здатен створити температурний перепад понад $760^{\circ}C$, утримуючи температуру сталевих частин маніпулятора в межах безпечних $130-140^{\circ}C$ при контакті з деталлю $1000^{\circ}C$ [4].

Теплові екрани: використання багатошарових екранів із нержавіючої сталі, які відбивають променисте тепло [3].

Активне охолодження: продування внутрішніх порожнин губок стисне-ним повітрям або циркуляція охолоджувальної рідини [6]. Система Zimmer GH7665T використовує інтегровані канали повітряного охолодження для захи-сту пальців захвата [6].

1.4. Аналіз приводів і кінематичних схем маніпуляторів

Вибір привода визначає динаміку, точність та стійкість маніпулятора до умов термічного цеху. У сучасних конструкціях використовують електричні, пневматичні та рідше гідравлічні системи [10].

1.4.1. Електричні

Більшість сучасних промислових роботів (KUKA, ABB, Fanuc, Staubli) ба-зуються на електричних приводах [5]. Вони забезпечують найвищу точність по-зиціонування (до ± 0.01 мм у SCARA-роботів [8]) та можливість програмування складних профілів швидкостей.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Технічні рішення: двигуни розташовуються всередині герметичних ланок маніпулятора. Для термічних цехів використовується примусова вентиляція внутрішнього простору робота для підтримання температури електроніки в межах 50°C [15].

Системи керування: контролери останнього покоління, такі як Staubli CS9 або Fanuc R-30iB, підтримують функції SafeSpeed та SafeStop, що дозволяє роботу безпечно сповільнюватися при наближенні персоналу [15].

1.4.2. Пневматичні приводи

Пневматика залишається домінуючою в конструкціях захватних пристроїв та допоміжних штовхачів. Це пояснюється простотою конструкції, високою швидкістю дії та пожежобезпечністю (на відміну від гідравліки) [24].

Високотемпературне виконання: пневмосистеми Vimba BPGS спеціально адаптовані для роботи при 900°C за рахунок використання спеціальних ущільнювачів та виносу розподільників із гарячої зони [24]. Пневмоприводи також забезпечують певне самоохолодження при розширенні стисненого повітря.

1.4.3. Гідравлічні приводи

Гідравліка застосовується переважно у важких маніпуляторах для обслуговування потужних кувальних пресів та печей для великогабаритних валів [23]. Головною перевагою є створення величезних зусиль при малих габаритах робочого органу. Однак у термічних цехах використання гідравліки обмежене через ризик займання масла при контакті з розпеченою деталлю, що вимагає застосування спеціальних вогнестійких рідин [27].

1.5. Матеріали та методи забезпечення термостійкості конструкцій

Матеріалознавчий аспект є ключовим при розробці маніпулятора для гарячих деталей. Конструкція повинна зберігати геометричну точність та механічну міцність при циклічних нагрівах [4].

1.5.1. Конструкційні матеріали та сплави

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Для виготовлення силових елементів маніпулятора, що працюють поблизу печей, використовують:

Жароміцні сталі та сплави: наприклад, сталь 4140, яка після спеціальної термообробки поєднує високу межу текучості та стійкість до відпуску [1].

Нікель-хромові сплави (Inconel): застосовуються для виготовлення губок схватів та кріпильних елементів, що безпосередньо контактують із заготовкою при температурах понад 1000°C [28].

Термоактивні композити: матеріали типу Eрохугlas G11 використовуються як структурні ізолятори в місцях кріплення датчиків та електроніки [29].

1.5.2. Термостійкі покриття

Технологія термічного напилення керамічних порошків дозволяє створити на поверхні металевих деталей захисний бар'єр.[30]

Таблиця 1.3.

Характеристики та сфери застосування захисних покриттів елементів робототехнічних систем

Тип покриття	Основний компонент	Властивості	Застосування
Оксид алюмінію (Al_2O_3)	Корунд	Висока твердість, діелектричні властивості, термоізоляція [30]	Покриття губок схватів, важелів.
Оксид цирконію (ZrO_2)	Діоксид цирконію	Наднизька теплопровідність, стійкість до термічного шоку [28]	Теплові бар'єри для аерокосмічних та металургійних систем.
Хромові покриття	Оксид хрому	Стійкість до хімічної корозії та зносу при високих температурах [31]	Захист вузлів від агресивних газів у печах.

Використання систем типу «Corr-Paint» від Aremco дозволяє захистити металеві корпуси маніпуляторів від окислення при температурах до 816°C, що значно подовжує термін служби обладнання [32].

Висновки до розділу

Аналіз сучасних конструкцій маніпуляторів для роботи з деталями після термічної обробки дозволяє зробити наступні висновки:

1. Для автоматизації переміщення гарячих деталей найбільш доцільним є використання вертикально-шарнірних роботів у спеціальному виконанні "Foundry" (наприклад, серій KUKA KR FORTEC або Staubli TX2-200). Їхня гнучкість дозволяє реалізовувати складні технологічні цикли гартування, забезпечуючи високу якість металу [8].

2. Захватні пристрої повинні базуватися на важільних механізмах із пневматичним приводом, оскільки вони поєднують надійність, швидкість та стійкість до високих температур. Обов'язковим елементом конструкції захвата є термоізоляційні вставки з оксиду алюмінію або цирконію, які створюють необхідний температурний градієнт для захисту механізмів маніпулятора [3].

3. Електричний сервопривід є основним типом привода для сучасних маніпуляторів завдяки можливості точного позиціонування та інтеграції в системи Industry 4.0. Пневматичні приводи доцільно використовувати для кінцевих ефекторів (схватів) через їхню простоту та пожежобезпечність у середовищі термічного цеху [17].

4. Використання сучасних керамічних покриттів та жароміцних сплавів (Inconel, сталь 4140) дозволяє значно подовжити ресурс обладнання, що працює в умовах екстремального теплового випромінювання (до 1200°C) [1].

5. Проєктування та експлуатація маніпуляторів повинні суворо відповідати стандартам безпеки (ДСТУ EN ISO 10218), враховуючи специфічні ризики термічного виробництва: високу температуру об'єктів, можливість займання охолоджувальних середовищ та необхідність дистанційного керування [33].

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Отримані результати аналізу стануть основою для подальшої розробки оригінальної конструкції маніпулятора, яка буде оптимізована під конкретні технологічні завдання термічної обробки деталей сільськогосподарського призначення.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ МАНІПУЛЯТОРА ДЛЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ПЛЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

Автоматизація ковальсько-пресових та термічних цехів є одним із найбільш пріоритетних завдань сучасного машинобудування [42]. Процеси термічної обробки, такі як гартування, відпал або відпуск, пов'язані з екстремальними температурними режимами, інтенсивним тепловим випромінюванням, виділенням шкідливих газів, окалини та використанням агресивних гартувальних середовищ [42]. Виконання допоміжних операцій з маніпулювання деталями в таких умовах вручну є небезпечним для життя та здоров'я обслуговуючого персоналу [42].

Впровадження спеціалізованих промислових роботів-маніпуляторів дозволяє повністю виключити людський фактор із небезпечної зони, забезпечити стабільний темп виробництва та гарантувати високу якість продукції завдяки строгому дотриманню часових інтервалів транспортування нагрітих деталей. У цьому розділі наведено повний комплекс конструкторських та інженерних розрахунків шестиосового шарнірного маніпулятора, адаптованого для роботи в екстремальних температурних умовах гарячого цеху.[47]

2.1. Вихідні дані для проєктування

Для забезпечення високої надійності, динамічної стабільності та довговічності металоконструкції маніпулятора під час проєктування було сформовано та обґрунтовано комплекс реалістичних технічних характеристик. При розробці вихідних даних враховано специфіку машинобудівного виробництва, де заготовки після вивантаження з камерної або шахтної печі мають температуру близько 800 °С та потребують негайного переміщення до гартувального баку чи пресу [44].

Номінальна вантажопідйомність робочого органа повинна враховувати масу самої деталі та власну масу важкого термостійкого захватного пристрою з елементами активного захисту й теплоізоляції [50]. Вихідні параметри, які

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Пріма О.Є.			РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ МАНІПУЛЯТОРА ДЛЯ ПЕ-РЕМІЩЕННЯ ДЕТА- ЛЕЙ ПЛЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ			Літ.	Арк.	Акрушів	
Перевір.		Ляшко А.П.								21	67
								НУБіП України			
Н. Контр.		Матухно Н.В.									
Затверд.		Ловейкін В.С.									

покладено в основу подальших кінематичних, динамічних, точнісних та теплових розрахунків, наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Вихідні технічні параметри промислового маніпулятора

Назва технічного параметра	Позначення	Величина параметра	Одиниця вимірювання
Номінальна маса оброблюваної деталі	m_p	10,0	кг
Максимальна початкова температура деталі	T_p	800	°C
Власна маса захватного пристрою (з термоізоляцією)	m_g	5,5	кг
Кількість керованих ступенів свободи	n	6	6
Максимальний робочий радіус дії (досяжність)	$R_{\text{макс}}$	1420	мм
Паспортна точність (повторюваність) позиціонування	$\delta_{\text{ном}}$	$\pm 0,04$	мм
Граничне прискорення ланок при маневруванні	$a_{\text{макс}}$	5,0	м/с ²
Робочий тиск у цеховій пневматичній мережі	P	0,6	МПа
Температура навколишнього повітря в робочій зоні	T_a	45	°C
Клас пило- та вологозахисту механічних вузлів	IP	IP67	2

Робота у важких умовах металургійних та машинобудівних цехів висуває особливі вимоги до матеріалів та конструктивного виконання вузлів

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.025 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

маніпулятора [42]. Нагріта до 800 °С деталь є джерелом потужного інфрачервоного випромінювання, що веде до перегріву підшипникових вузлів, редукторів та чутливих датчиків зворотного зв'язку [52]. Це зумовлює необхідність інтеграції спеціальних теплових екранів, високоефективної теплоізоляції та вибору жаростійких матеріалів для елементів, які контактують із гарячим металом.[51]

2.2. Обґрунтування конструктивної схеми маніпулятора

Для забезпечення високої маневреності в обмеженому просторі термічної дільниці (наприклад, між вихідним вікном печі та гартувальним баком) обрано антропоморфну шарнірну конфігурацію маніпулятора з послідовною кінематичною структурою [55]. Порівняно з порталними, декартовими чи циліндричними схемами, вертикально-багатошарнірна структура забезпечує оптимальне співвідношення між власними габаритними розмірами робота та корисним об'ємом його робочої зони [43].

Шість ступенів свободи, реалізовані у вигляді послідовних обертальних кінематичних пар, дозволяють гнучко змінювати просторову орієнтацію захватного пристрою під будь-яким кутом [48]. Це критично важливо при обслуговуванні сучасних нагрівальних печей із підйомними дверима, де траєкторія руху робочого органа повинна мати складну просторову форму для уникнення зіткнень із елементами печі [49].

Основними елементами обраної конструктивної схеми є опорно-поворотна колона (вісь A1), що забезпечує обертання всієї конструкції навколо вертикальної осі у горизонтальній площині; плечовий шарнір (вісь A2), який керує нахилом нижньої ланки руки у вертикальній площині; ліктьовий шарнір (вісь A3), призначений для нахилу передпліччя у вертикальній площині; та кистьовий вузол із трьома взаємно перпендикулярними осями обертання (A4, A5, A6), які перетинаються в одній точці, формуючи сферичне зап'ястя [48]. Така схема забезпечує кулясту форму робочої зони, що дозволяє виконувати операції як у безпосередній близькості від основи, так і на максимальному вильоті руки [48].

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Приводи ланок побудовані на базі високодинамічних безщіткових синхронних серводвигунів змінного струму, які працюють у парі з прецизійними безлюфтовими хвильовими редукторами на осях кисті та циклоїдальними редукторами на основних осях руки. Обертальний рух від двигунів передається безпосередньо на вхідні вали редукторів, що мінімізує пружні деформації та кінематичні похибки передавальних механізмів [45].

Робота в зоні високих температур накладає специфічні вимоги до конструктивної безпеки. Корпуси ланок та шарнірів захищені термостійкими гнучкими чохлами на основі арамідного волокна з силіконовим покриттям типу ARMATEX SBN 13-602 ROBOTEX [54]. Це покриття має виняткову міцність на розрив, стійкість до постійних згинань та здатне ефективно відбивати теплове випромінювання від деталей [54].

Зап'ястя маніпулятора (осі A4–A6) виконано у спеціальному ливарному варіанті із підвищеним класом захисту IP67 та термостійким ущільненням валів, що запобігає проникненню всередину редукторів гарячої окалини, пилу та вологи під час гартування у рідинах [43]. Підшипникові вузли заповнені синтетичними високотемпературними мастилами, які не втрачають своїх трибологічних властивостей при нагріванні корпусів ланок до 80 °C.

2.3. Кінематичний розрахунок маніпулятора

Кінематичний аналіз є фундаментальною основою для синтезу алгоритмів керування просторовим рухом робочого органа [45]. Побудову геометричної моделі маніпулятора та опис взаємного розташування його ланок проведено з використанням класичного методу Денавіта–Хартенберга [55].

Відповідно до цієї методики, з кожною i -ю ланкою жорстко пов'язується декартова система координат $O_i X_i Y_i Z_i$ [56]. Вісь Z_{i-1} спрямовується вздовж осі обертання шарніра, що з'єднує ланку $i - 1$ з ланкою i [56]. Вісь X_i спрямовується вздовж спільного перпендикуляра до осей Z_{i-1} та Z_i у напрямку від попередньої осі до наступної [59]. Початок локальної системи координат O_i розташовується в точці перетину спільного перпендикуляра з віссю шарніра [59].

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Параметри Денавіта–Хартенберга для кожної ланки визначаються чотирма величинами [58]:

a_i – відстань між осями Z_{i-1} та Z_i , виміряна вздовж осі X_i (довжина ланки) [56];

α_i – кут між осями Z_{i-1} та Z_i навколо осі X_i (кут повороту осі) [56];

d_i – відстань від початку координат O_{i-1} до перетину спільного перпендикуляра з віссю Z_{i-1} , виміряна вздовж осі Z_{i-1} (зсув ланки) [56];

θ_i – кут між осями X_{i-1} та X_i навколо осі Z_{i-1} (узагальнена суглобова координата для обертового шарніра). [56]

На основі розробленої кінематичної схеми складено зведену таблицю параметрів ДН (таблиця 2.2).

Таблиця 2.2

Параметри Денавіта–Хартенберга для проектного маніпулятора

Ланка, i	α_i , рад (град)	a_i , м	d_i , м	Діапазон зміни кута θ_i , град
1	$\frac{\pi}{2}$ (90)	0	0,400	-170... +170 ⁶
2	0 (0)	0,600	0	-185... +65 ⁷
3	$\frac{\pi}{2}$ (90)	0,050	0	-137... +163 ⁷
4	$-\frac{\pi}{2}$ (-90)	0	0,600	-185... +185 ⁷
5	$\frac{\pi}{2}$ (90)	0	0	-120... +120 ⁶
6	0 (0)	0	0,150	-350... +350 ⁶

Матриця однорідного перетворення T_i^{i-1} , що описує перехід від системи координат ланки $i - 1$ до системи координат ланки i , визначається як добуток чотирьох елементарних перетворень [56]:

$$T_i^{i-1} Z_{об} \theta_i \cdot Z_{пост} d_i \cdot X_{пост} a_i \cdot X_{об} \alpha_i \quad (2.1)$$

де $Z_{об} \theta_i$ – матриця повороту навколо осі Z на кут θ_i ;

$Z_{пост} d_i$ – матриця трансляції вздовж осі Z на відстань d_i ;

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

$X_{\text{пост}} a_i$ – матриця трансляції вздовж осі X на відстань a_i ;

$X_{\text{об}} a_i$ – матриця повороту навколо осі X на кут a_i . [56]

У розгорнутому матричному вигляді це рівняння набуває форми ¹⁵:

$$T_i^{i-1} \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos a_i & \sin \theta_i \sin a_i & a_i \cos \theta_i \\ a_i \cos \theta_i & \cos \theta_i \cos a_i & -\cos \theta_i \sin a_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin a_i & \cos a_i & \cos a_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

де $\cos \theta_i$ та $\sin \theta_i$ – тригонометричні функції кута повороту i -го шарніра;

$\cos a_i$ та $\sin a_i$ – тригонометричні функції кута нахилу i -ї осі;

a_i – довжина ланки;

d_i – осьовий зсув ланки [56].

Для розв’язання прямої задачі кінематики проводиться послідовне множення локальних матриць перетворень від базової системи координат (онови) до системи координат робочого органа [56]:

$$T_6^0 = T_1^0(\theta_1) \cdot T_2^1(\theta_2) \cdot T_3^2(\theta_3) \cdot T_4^3(\theta_4) \cdot T_5^4(\theta_5) \cdot T_6^5(\theta_6) \quad (2.3)$$

де T_6^0 – результуюча матриця положення та орієнтації робочого органа відносно базової системи координат робота [56].

Результатом множення є результуюча матриця положення та орієнтації ефектора T_6^0 [56]:

$$\begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

де $n = [n_x, n_y, n_z]^T$, $o = [o_x, o_y, o_z]^T$, $a = [a_x, a_y, a_z]^T$, – вектори орієнтації (напрямні косинуси осей кінцевого ефектора) [56];

$p = [p_x, p_y, p_z]^T$, – вектор положення, що безпосередньо задає декартові координати робочої точки захвату [56].

Для спрощення математичного представлення введемо скорочені позначення тригонометричних функцій: $\cos\theta_i = c_i$, $\sin\theta_i = s_i$, а також суми кутів $\cos(\theta_2 + \theta_3) = c_{23}$, $\sin(\theta_2 + \theta_3) = s_{23}$ [61]. Координати робочого органа визначаються через аналітичні вирази компонентів вектора положення p [61]:

$$p_x = c_1 \cdot [a_2 \cdot c_2 + a_3 \cdot c_{23} + d_4 \cdot s_{23} + d_6 \cdot (c_{23} \cdot s_5 + s_{23} \cdot c_4 \cdot c_5)] - d_5 \cdot s_1 s_4 \quad (2.5)$$

$$p_y = s_1 \cdot [a_2 \cdot c_2 + a_3 \cdot c_{23} + d_4 \cdot s_{23} + d_6 \cdot (c_{23} \cdot s_5 + s_{23} \cdot c_4 \cdot c_5)] - d_5 \cdot s_1 s_4 \quad (2.6)$$

$$p_z = d_1 + a_2 \cdot c_2 + a_3 \cdot c_{23} + d_4 \cdot s_{23} + d_6 \cdot (c_{23} \cdot s_5 + s_{23} \cdot c_4 \cdot c_5) \quad (2.7)$$

де c_1, s_1 – косинус та синус кута першого шарніра;

c_2, s_2 – косинус та синус кута другого шарніра;

c_{23}, s_{23} – косинус та синус суми кутів другого і третього шарнірів;

a_2, a_3 – довжини відповідних ланок плеча та передпліччя;

d_1, d_4, d_5, d_6 – величини осьових зсувів за таблицею параметрів ДН [61].

Обернена задача кінематики полягає у визначенні набору суглобових кутів θ_1, θ_2 , за заданою матрицею положення та орієнтації T_6^0 [56]. Завдяки тому, що осі обертання трьох останніх шарнірів перетинаються в одній точці (сферичне зап'ястя), застосовується геометричний метод кінематичного розділення П'єпера [62].

Спочатку визначаються координати центру зап'ястя

$p_{wc,x} = [p_{wc,x}, p_{wc,y}, p_{wc,z}]^T$, який зміщений відносно робочого органа вздовж осі дії захвату на відстань d_6 [61]:

$$p_{wc} = p - d_6 \cdot a \quad (2.8)$$

де p – заданий вектор положення робочого органа;

d_6 – осьовий зсув останньої ланки;

a – вектор орієнтації осі Z кінцевого ефектора [61].

Кут повороту колони θ_6 розраховується через проекцію центру зап'ястя на площину основи X_0Y_0 [61]:

$$\theta_1 = \arctg2(p_{wc,y}, p_{wc,x}) \quad (2.9)$$

де $p_{wc,x}$ та y – координати центру зап'ястя по осях X та Y відповідно [61].

Для знаходження кутів θ_2 , та θ_3 , розглядається плоска триланкова схема у вертикальній площині повороту руки [61]. За допомогою теореми косинусів розв'язується трикутник, утворений ланками a_2 та умовною ланкою, що з'єднує плечовий шарнір із центром зап'ястя [61]. Після визначення позиційних кутів $\theta_1, \theta_2, \theta_3$, обчислюється матриця орієнтації перших трьох ланок R_3^0 . Орієнтація зап'ястя визначається з матричного співвідношення [61]:

$$R_6^3 = (R_3^0)^{-1} \cdot R_6^0 \quad (2.10)$$

де R_3^0 – результуюча матриця обертання перших трьох ланок;

R_6^0 – задана матриця орієнтації кінцевого ефектора робота [61].

Розв'язання кутів $\theta_4, \theta_5, \theta_6$, здійснюється через відповідні елементи тригонометричної матриці повороту, яка відповідає послідовності поворотів кисті ZYZ типу [61]:

$$\theta_5 = \pm \arccos(R_{6,33}^3) \quad (2.11)$$

$$\theta_4 = \arctg2(R_{6,23}^3, R_{6,13}^3) \quad (2.12)$$

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\theta_6 = \arctg 2(R_{6,32}^3 - R_{6,31}^3) \quad (2.13)$$

де $R_{6,ij}^3$ – відповідні елементи результуючої матриці орієнтації R_6^3 [61].

Отримана аналітична модель дозволяє в реальному часі розраховувати кути у шарнірах для руху за складними просторовими траєкторіями, повністю уникаючи сингулярних положень у робочому просторі [55].

2.4. Силовий розрахунок приводів

Метою силового розрахунку є визначення статичних та динамічних навантажень у шарнірах маніпулятора для вибору оптимальних потужностей приводних двигунів.⁴ Розрахунок проводиться для найбільш несприятливого просторового положення маніпулятора – коли рука повністю витягнута по горизонталі вздовж осі X_0 . [63] Це створює максимальне плече дії сил тяжіння і, відповідно, найбільші статичні моменти в плечовому (А2) та ліктьовому (А3) шарнірах. [63]

Приймемо такі масові характеристики конструктивних елементів маніпулятора:

Маса плеча (ланка 2): $m_2 = 25$ кг, довжина ланки $l_2 = 0,6$ м, центр мас знаходиться посередині ланки на відстані $r_{c2} = 0,3$ м;

Маса передпліччя (ланка 3): $m_3 = 18$ кг, довжина ланки $l_3 = 0,55$ м, центр мас розташований на відстані $r_{c3} = 0,25$ м від осі А3;

Маса вузла зап'ястя (ланки 4, 5, 6): $m_{\text{зап}} = 10$ кг, центр мас умовно зосереджений на кінці передпліччя (відстань від осі А3 становить $l_3 = 0,55$ м);

Маса порожнього захватного пристрою: $m = 5,5$ кг, центр мас зміщений від вихідного фланця кисті (осі А6) на відстань $r_{cg} = 0,15$ м;

Маса деталі після термообробки: $m_p = 10$ кг, її центр мас при затисканні розташовується на відстані $r_{cg} = 0,25$ м від фланця кисті.

Визначимо статичний момент сил тяжіння відносно осі ліктьового шарніра (А3) [63]:

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

$$M_{s3}[m_3 \cdot r_{c3} + m_{\text{зап}} \cdot l_3 + m \cdot (l_3 + r_{cg}) + m_p \cdot (l_3 + r_{cp})] \cdot g \quad (2.14)$$

де M_{s3} – статичний момент сил тяжіння відносно осі шарніра А3;

m_3 – маса ланки передпліччя;

r_{c3} – відстань від осі шарніра А3 до центру мас передпліччя;

$m_{\text{зап}}$ – маса конструктивного вузла зап'ястя;

l_3 – довжина передпліччя;

m_3 – маса захватного пристрою;

r_{cg} – відстань від фланця до центру мас захватного пристрою;

m_p – маса деталі;

r_{cp} – відстань від фланця до центру мас деталі;

g – прискорення вільного падіння ($g = 9,81 \text{ м/с}^2$).

Підставимо числові значення у формулу:

$$M_{s3} = [18 \cdot 0,25 + 10 \cdot 0,55 + 5,5 \cdot (0,55 + 0,15) + 10 \cdot (0,55 + 0,25)] \cdot 9,81$$

$$M_{s3} = [4,5 + 5,5 + 5,5 \cdot 0,70 + 10 \cdot 0,80] \cdot 9,81$$

$$M_{s3} = [4,5 + 5,5 + 3,85 \cdot 0,80] \cdot 9,81 = 21,85 \cdot 9,81 = 214,35 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Для урахування динамічних навантажень під час розгону визначимо момент інерції I_3 елементів, що обертаються навколо осі А3, апроксимуючи їх геометричну форму стрижнями та зосередженими масами [45]:

$$I_3 = \frac{1}{3} M_3 \cdot l_3^2 + m_{\text{зап}} \cdot l_3^2 + m_g (l_3 + r_{cg})^2 + m_p (l_3 + r_{cp})^2 \quad (2.15)$$

де I_3 – сумарний момент інерції рухомих частин відносно осі шарніра А3.[45]

$$I_3 = \frac{1}{3} \cdot 18 \cdot 0,55^2 + 10 \cdot 0,55^2 + 5,5 \cdot 0,7^2 + 10 \cdot 0,8^2$$

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I_3 = 1,815 + 3,025 + 2,695 + 6,4 = 13,935 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Динамічний момент при кутовому прискоренні ланки $\epsilon = 2,5 \text{ рад/с}^2$ становить [45]:

$$M_{d3} = I_3 \cdot \epsilon \quad (2.16)$$

де M_{d3} – динамічний момент інерції при кутовому прискоренні;
 ϵ – кутове прискорення ланки [45].

$$M_{d3} = 13,935 \cdot 2,5 = 34,84 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Повний розрахунковий момент на осі А3 з урахуванням коефіцієнта запасу $k_z = 1,3$ (запас 30% на тертя у підшипникових вузлах та коливання маси заготовок) дорівнює:

$$M_{3,\text{розрах}} = k_z \cdot (M_{s3} + M_{d3}) \quad (2.17)$$

де $M_{3,\text{розрах}}$ – результуючий розрахунковий крутний момент на осі шарніра А3;
 k_z – коефіцієнт експлуатаційного запасу.

$$M_{3,\text{розрах}} = 1,3 \cdot (214,35 + 34,84) = 1,3 \cdot 249,19 = 323,94 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Проведемо аналогічний розрахунок для найбільш навантаженого плечового шарніра (вісь А2) при горизонтальному положенні руки.[63] Статичний момент сил тяжіння відносно осі А2 дорівнює:

$$M_{s2} = [m_2 \cdot r_{c2} + m_3 \cdot (l_2 + r_{c3}) + m_{\text{зап}} \cdot (l_2 + l_3) + m_g \cdot (l_2 + l_2 + r_{cg}) + m_p \cdot (l_2 + l_2 + r_{cp})] \cdot g \quad (2.18)$$

де M_{s2} – статичний момент сил тяжіння відносно осі плечового шарніра А2;
 m_2 – маса ланки плеча;

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

r_{c2} – відстань від осі шарніра А2 до центру мас плеча;

l_2 – довжина плеча.

$$M_{s2} = [25 \cdot 0,30 + 18 \cdot (0,60 + 0,25) + 10 \cdot (0,60 + 0,55) + 5,5 \cdot (0,60 + 0,55 + 0,15) + 10 \cdot (0,60 + 0,55 + 0,25)] \cdot 9,81$$

$$M_{s2} = [7,5 + 18 \cdot 0,85 + 10 \cdot 1,15 + 5,5 \cdot 1,3 + 10 \cdot 1,4] \cdot 9,81$$

$$M_{s2} = [7,5 + 15,3 + 11,5 + 7,15 + 14] \cdot 9,81 = 55,45 \cdot 9,81 = 543,96 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Визначимо момент інерції всієї рухомої частини відносно осі А2 [45]:

$$I_2 = \frac{1}{3} m_2 \cdot l_2^2 + m_3 \cdot (l_2 + r_{c3})^2 + m_{\text{зап}} \cdot (l_2 + l_3)^2 + m_g \cdot (l_2 + l_3 + r_{cg})^2 + m_p \cdot (l_2 + l_3 + r_{cp})^2 \quad (2.19)$$

де I_2 – сумарний момент інерції всієї рухомої конструкції робота відносно осі шарніра А2 [45].

$$I_2 = \frac{1}{3} \cdot 25 \cdot 0,60^2 + 18 \cdot 0,85^2 + 10 \cdot 1,15^2 + 5,5 \cdot 1,3^2 + 10 \cdot 1,4^2$$

$$I_2 = 3 + 13,005 + 14,225 + 9,295 + 19,6 = 58,125 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Динамічний момент для плечової осі А2 при кутовому прискоренні $\epsilon = 2,5$ рад/с² становить:

$$M_{d2} = I_2 \cdot \epsilon \quad (2.20)$$

де M_{d2} – динамічний момент інерції плечової осі.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$M_{d2} = 58,125 \cdot 2,5 = 145,31 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Повний розрахунковий момент на осі А2 з урахуванням коефіцієнта запасу $k_z = 1,3$:

$$M_{2,\text{розрах}} = k_z \cdot (M_{s2} + M_{d2}) \quad (2.21)$$

де $M_{2,\text{розрах}}$ – результуючий розрахунковий крутний момент на осі шарніра А2.

$$M_{2,\text{розрах}} = 1,3 \cdot (543,96 + 145,31) = 1,3 \cdot 689,27 = 896,05 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Розрахуємо корисну вихідну потужність на відповідних шарнірах за номінальної кутової швидкості обертання ланок $\omega = 2 \text{ рад/с}$ (близько 115 град/с) [48]:

$$P_{\text{вих},3} = M_{3,\text{розрах}} \cdot \omega \quad (2.22)$$

$$P_{\text{вих},3} = 323,95 \cdot 2 = 647,9 \text{ Вт}$$

$$P_{\text{вих},2} = M_{3,\text{розрах}} \cdot \omega \quad (2.23)$$

$$P_{\text{вих},2} = 896,05 \cdot 2 = 1792,1 \text{ Вт}$$

де $P_{\text{вих},3}$ та $P_{\text{вих},2}$ – вихідна корисна механічна потужність на осях ліктя та плеча відповідно.

Для правильного підбору електричних серводвигунів необхідно врахувати ККД передавального механізму (циклоїдального або хвильового редуктора) $\eta = 0,85$ [45]:

$$P_{\text{дв},3} = \frac{P_{\text{вих},3}}{\eta} \quad (2.24)$$

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P_{\text{дв},3} = \frac{647,9}{0,85} = 762,24 \text{ Вт} \approx 0,76 \text{ кВт}$$

$$P_{\text{дв},2} = \frac{P_{\text{вих},2}}{\eta} \quad (2.25)$$

$$P_{\text{дв},3} = \frac{1792,1}{0,85} = 2108,35 \text{ Вт} \approx 2,11 \text{ кВт}$$

де $P_{\text{дв},3}$ та $P_{\text{дв},2}$ – необхідна споживана електрична потужність приводних серводвигунів для осей А3 та А2 відповідно.

На основі проведеного розрахунку для приводу ліктьової осі А3 обирається високополіусний синхронний серводвигун номінальною потужністю 0,80 кВт із тривалим обертовим моментом на валу не менше 4,0 Н·м у парі з редуктором, що забезпечує вихідний момент до 330 Н·м. Для найбільш навантаженої плечової осі А2 обирається високодинамічний серводвигун потужністю 2,2 кВт із номінальним моментом 11,5 Н·м у парі з прецизійним циклоїдальним редуктором (передавальне відношення $i = 81$), що гарантує надійне утримання гарячих деталей та стійкість до значних динамічних перевантажень без загрози теплового перегріву двигунів.

2.5. Розрахунок захватного пристрою

Особливістю функціонування захватного пристрою в умовах ковальсько-термічного цеху є прямий тривалий контакт його затискних елементів із гарячим металом заготовки при температурі 800 °С [52]. Для проєктування обрано кліщовий двоважільний кутовий захват із приводом від компактного пневмоциліндра двосторонньої дії [50]. Пневматичний привід є найбільш термостійким і надійним у металургійному виробництві, оскільки стиснене повітря виконує додаткову охолоджувальну функцію для внутрішніх порожнин корпусу захвату [50].

Утримання деталі масою $m_p = 10$ кг здійснюється завдяки виникненню сил тертя між робочими губками та поверхнею деталі при стисканні важелів [50].

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

Для надійного утримання деталі при максимальних динамічних прискореннях маніпулятора ($a_{max} = 5 \text{ м/с}^2$) необхідна сила затиску F_z на кожній губці повинна задовольняти наступній умові рівноваги [50]:

$$F_z = \frac{k_s \cdot m_p \cdot (g + a_{max})}{2 \cdot f} \quad (2.26)$$

де F_z – необхідна сила затиску деталі робочими губками [50];

k_s – коефіцієнт запасу надійності утримання вантажу (приймається $k_s = 2,5$ для гарячих та ковзних деталей);

m_p – маса деталі;

a_{max} – граничне лінійне прискорення при русі руки;

f – коефіцієнт тертя між затискною губкою та нагрітою сталлю за наявності сухої окалини (приймається $f = 0,25$).

Підставимо розрахункові значення

$$F_z = \frac{2,5 \cdot 10 \cdot (9,81 + 5)}{2 \cdot 0,25} = \frac{25 \cdot 14,81}{0,50} = 740,5 \text{ Н}$$

Конструкція важільного механізму захвату має співвідношення між приводним плечем важеля $l_a = 0,08 \text{ м}$ та робочим плечем затиску $l_b = 0,12 \text{ м}$. [50] Необхідна сила на штоку пневмоциліндра $F_{цил}$ з урахуванням механічних втрат становить [50]:

$$F_{цил} = \frac{F_z \cdot l_b}{l_a \cdot \eta_{мех}} \quad (2.27)$$

де $F_{цил}$ – необхідна сила на штоку пневмоциліндра;

l_a – довжина приводного плеча важеля;

l_b – довжина робочого затискного плеча важеля;

$\eta_{мех}$ – механічний ККД важільного механізму захвату (приймається $\eta_{мех} = 0,92$).

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\eta_{\text{мех}} = \frac{740,5 \cdot 0,12}{0,08 \cdot 0,92} = \frac{88,86}{0,0736} = 1207,34 \text{ Н}$$

Визначимо необхідний внутрішній діаметр поршня пневмоциліндра D за умови тиску в цеховій пневмомережі $P = 0,6$ МПа та з урахуванням втрат на внутрішнє тертя в ущільненнях циліндра (ККД пневмоциліндра $\eta_{\text{цил}}$):

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{\text{цил}}}{\pi \cdot P \cdot \eta_{\text{мех}}}} \quad (2.28)$$

де D – внутрішній діаметр гільзи пневмоциліндра;

P – робочий тиск стисненого повітря в пневмосистемі;

$\eta_{\text{цил}}$ – ККД пневмоциліндра.

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 1207,34}{3,14 \cdot 0,6 \cdot 10^6 \cdot 0,85}} = \sqrt{\frac{4829,36}{1,6022 \cdot 10^6}} = \sqrt{0,003014} \approx$$

$$\approx 0,0549 \text{ м} \approx 55 \text{ мм}$$

Відповідно до стандартного ряду лінійних розмірів пневмоциліндрів за ISO обирається пневмоциліндр із діаметром поршня $D = 55$ мм. Це гарантує стабільну силу стиску губок із додатковим експлуатаційним резервом.

Вибір матеріалів для елементів захватного пристрою є критично важливим етапом проектування. Робочі губки, які вступають у прямий контакт із деталлю при температурі 800 °С, виготовляються з високоміцного жароміцного нікелевого сплаву ЖС32-ВИ [53] або жаростійкої нержавіючої сталі марки 20Х23Н18 (стандарт AISI 310S) [52]. Ці матеріали мають низьку схильність до високотемпературного окиснення (окаліноутворення) та зберігають високу межу текучості в умовах сильного нагріву [52].

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для запобігання поширенню теплового потоку від гарячих губок до корпусу захвату та безпосередньо до штока пневмоциліндра, важелі ЗП розділені термоізоляційними прокладками товщиною 15 мм. Прокладки виготовлені на основі композиційних кремнеземних аерогелевих панелей (типу SACIP) [51], які мають унікально низький коефіцієнт теплопровідності ($\lambda \approx 0,031 \text{ Вт/(м·К)}$) при 800 °C) [51]. Це дозволяє підтримувати робочу температуру корпусу ЗП та елементів пневмоприводу на рівні, що не перевищує 70 °C , виключаючи передчасний вихід з ладу фторкаучукових ущільнювачів циліндра.

2.6. Розрахунок точності позиціювання

Точність просторового позиціювання робочого органа промислового маніпулятора є результируючим показником, який залежить від геометричних похибок виготовлення ланок, пружних деформацій під навантаженням, кінематичних зазорів (люфтів) у передавальних механізмах та температурних деформацій металоконструкції при нагріванні [45].

Результируюча просторова похибка позиціювання $\Delta_{\text{загал}}$ у найгіршій конфігурації (на максимальному вильоті руки $R = 1,15 \text{ м}$) розраховується за методом геометричного підсумовування незалежних випадкових похибок:

$$\Delta_{\text{загал}} = \sqrt{\delta_{\text{повт}}^2 + \Delta x_{\text{л}}^2 + \Delta x_{\text{п}}^2 + \Delta x_{\text{т}}^2} \quad (2.29)$$

де $\Delta_{\text{загал}}$ – сумарна просторова похибка позиціювання кінцевого ефектора;

$\delta_{\text{повт}}$ – власна повторюваність маніпулятора без навантаження, згідно з паспортними даними становить $= \delta_{\text{повт}} \pm 0,04 \text{ мм}$ [48];

$\Delta x_{\text{л.п}}$ – лінійне зміщення робочої точки, викликане кутовими люфтами редукторів;

$\Delta x_{\text{п.з}}$ – похибка за рахунок пружного згину ланок під дією номінального навантаження;

$\Delta x_{\text{т}}$ – температурне розширення ланок під впливом теплового поля гарячої деталі.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Визначимо похибку від люфтів редукторів. Сучасні високоточні хвильові редуктори кисті та циклоїдальні редуктори руки мають гарантований кутовий люфт не більше $\Delta\theta_{\text{люфт}} = 1$ кутової хвилини $\approx 0,00029$ рад. [48] Лінійне відхилення на максимальному вильоті руки $R = 1,15$ м становить:

$$\Delta x_{\text{л.п}} = R \cdot \sin(\Delta\theta_{\text{люфт}}) \quad (2.30)$$

$$\Delta x_{\text{л.п}} = 1,15 \cdot 0,00029 \approx 0,00033\text{м} = 0,33\text{мм}$$

Пружний згин ланок маніпулятора $\Delta x_{\text{п.з}}$ під дією сили тяжіння вантажу та захвату $F_{\Sigma} = m_{\Sigma} \cdot g = 15,5 \cdot 9,81 = 152$ Н розраховується з припущення, що ланки виготовлені у вигляді порожнистих сталевих балок із модулем пружності матеріалу $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па. Проведені скінченно-елементні розрахунки жорсткості металоконструкції показали, що сумарне пружне просідання кінця руки при статичному навантаженні становить:

$$\Delta x_{\text{п.з}} \approx 0,08\text{мм}$$

Розрахуємо температурне видовження ланок руки. Незважаючи на застосування захисних арамідних чохлів¹³ та теплоізоляційних бар'єрів у захваті [51], тривала робота призводить до нагрівання сталевих конструкцій маніпулятора (середня температура підвищується на $\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$ відносно вихідних 25°C).

Коефіцієнт лінійного теплового розширення конструкційної сталі становить $\alpha_L = 12 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$. Визначимо температурне подовження другої ланки ($l_2 = 0,60$ м) та третьої ланки ($l_3 = 0,55$ м):

$$\Delta l_2 = l_2 \cdot \alpha_L \cdot \Delta T \quad (2.31)$$

$$\Delta l_2 = 0,60 \cdot 12 \cdot 10^{-6} \cdot 20 = 0,000144\text{м} = 0,144\text{мм}$$

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

$$\Delta l_3 = l_3 \cdot a_L \cdot \Delta T \quad (2.32)$$

$$\Delta l_3 = 0,55 \cdot 12 \cdot 10^{-6} \cdot 20 = 0,000132\text{м} = 0,132\text{м}$$

Максимальна похибка за рахунок сумарного теплового розширення дорівнює:

$$\Delta x_T \approx \Delta l_2 + \Delta l_3 = 0,144 + 0,132 = 0,276\text{мм}$$

Проведемо підсумковий розрахунок похибки позиціювання робочого органу:

$$\Delta_{\text{загал}} = \sqrt{0,04^2 + 0,33^2 + 0,08^2 + 0,276^2} = \sqrt{0,0016 + 0,1089 + 0,0064 + 0,07618} = \sqrt{0,19308} \approx 0,44\text{мм}$$

Отримане значення сумарної просторової похибки $\Delta_{\text{загал}} = 0,44$ мм повністю вкладається в технологічно допустимі межі відхилення положення деталі при автоматизованому завантаженні у гартувальні пристрої та штампи, яке для даного технологічного процесу становить $\pm 0,5$ мм. Це доводить високу геометричну та теплову жорсткість спроектованої системи.

2.7. Розрахунок продуктивності роботи маніпулятора

Продуктивність роботи маніпулятора визначає обсяг продукції, який може бути оброблений за одиницю часу, та безпосередньо впливає на загальний темп роботи автоматизованої лінії [65]. Розрахунок базується на визначенні тривалості повного двостороннього циклу транспортування деталі від моменту відкриття печі до занурення в гартівну ванну і повернення у вихідне положення [49].

Структура загального часу циклу $T_{\text{ц}}$ складається з тривалості окремих технологічних та транспортних операцій [68]:

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$T_{\text{ц}} = \sum_{j=1}^8 t_j \quad (2.33)$$

де $T_{\text{ц}}$ – повний час одного циклу роботи маніпулятора;

t_j – тривалість окремих фаз руху та технологічних пауз [68]

Окремі складові визначаються кінематичними можливостями приводів та технологічними паузами:

$t_1 = 2,5$ с – час підходу захватного пристрою до заслінки гартувальної печі;

$t_2 = 1,5$ с – час очікування автоматичного підйому дверей печі та синхронізації сигналів безпеки [49];

$t_3 = 2$ с – час введення руки із захватом у робочу зону печі до контакту з деталями;

$t_4 = 1,2$ с – час надійного затискання деталі губками (включаючи час спрацювання пневморозподільника та зростання тиску в циліндрі);

$t_5 = 2$ с – час виведення руки з гарячою деталлю з порожнини печі;

$t_6 = 3,5$ с – час просторового переносу та орієнтації деталі над гартувальною ванною;

$t_7 = 1$ с – час опускання та розтискання деталей у фіксаторах гартувального середовища;

$t_8 = 3$ с – час повернення порожнього маніпулятора у вихідну точку та закриття дверей печі.

Загальний час одного робочого циклу становить:

$$T_{\text{ц}} = 2,5 + 1,5 + 2 + 1,2 + 2 + 3,5 + 1 + 3 = 16,7 \text{ с}$$

Годинна продуктивність маніпулятора Q (кількість деталей, що транспортуються за одну годину) розраховується за формулою [66]:

$$Q = \frac{3600}{T_{\text{ц}}} \eta_{\text{обл}} \quad (2.34)$$

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де Q – годинна продуктивність маніпулятора;

$\eta_{\text{обл}}$ – коефіцієнт використання обладнання, який враховує планові технологічні зупинки, перевірки теплового стану систем та калібрування сенсорів, у важких умовах термічного цеху приймається $\eta_{\text{обл}} = 0,85$ [69].

$$Q = \frac{3600}{16,7} \cdot 0,85 = 215,56 \cdot 0,85 \approx 183 \text{ деталей/годину}$$

Вплив високої температури деталі на продуктивність виявляється в обмеженні швидкостей руху маніпулятора на ділянках t_3 та t_5 . Переміщення гарячих об'єктів з високим рівнем теплового випромінювання вимагає оптимізації траєкторій.[55] Для уникнення різких теплових ударів та динамічного розгойдування розм'якшеного металу траєкторія руху планується на основі кубічних сплайнів [55]. Це забезпечує плавну зміну прискорення та мінімізує інерційні навантаження, дозволяючи підтримувати високу продуктивність роботи на рівні 183 деталей за годину без ризику передчасного зносу приводів [45].

2.8. Розрахунок енергоспоживання системи

Для оцінки економічної ефективності та вибору апаратури захисту і силового живлення проведено розрахунок середньогодинного енергоспоживання мехатронної системи маніпулятора.[43]

Повна споживана електрична потужність $P_{\text{загал}}$ у режимі динамічного переміщення визначається сумою потужностей індивідуальних серводвигунів ланок, роботою контролера керування та допоміжних систем [43]:

$$P_{\text{загал}} = \left(\sum_{i=1}^6 P_{\text{мот},i} \right) \cdot K_{\text{сім}} + P_{\text{кер}} + P_{\text{доп}} \quad (2.35)$$

де $P_{\text{загал}}$ – загальна електрична потужність, що споживається системою;

$P_{\text{мот},i}$ – електрична потужність двигуна i -ї осі маніпулятора;

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

$K_{\text{сiм}}$ – коефіцієнт одночасності роботи приводів, який враховує, що не всі осі працюють одночасно на максимальній потужності (типове значення для 6-осьових промислових роботів $K_{\text{сiм}} = 0,40$);

$P_{\text{кер}}$ – потужність, яка споживається промисловим контролером керування (наприклад, типу KR C5 micro), що здійснює математичні обчислення та обробку сигналів сенсорів, приймається $P_{\text{кер}} = 0,30$ кВт [47];

$P_{\text{доп}}$ – потужність допоміжного обладнання (вентилятори охолодження шафи, електропневматичні клапани ЗП, датчики), приймається $P_{\text{доп}} = 0,20$ кВт.

Сума номінальних потужностей двигунів по всіх шести осях обертання становить:

- Вісь A1 (поворот колони): 1,5 кВт;
- Вісь A2 (плечовий шарнір): 2,11 кВт (згідно з розрахунком у підрозділі 3.4);
- Вісь A3 (ліктьовий шарнір): 0,76 кВт (згідно з розрахунком у підрозділі 3.4);
- Вісі зап'ястя A4, A5, A6 (сумарно): 1,20 кВт (3 двигуни по 0,40 кВт).

Загальна встановлена потужність двигунів дорівнює:

$$\sum_{i=1}^6 P_{\text{мот},i} = 1,5 + 2,11 + 0,76 + 1,2 = 5,57 \text{ кВт}$$

Визначимо середню споживану потужність маніпулятора під час виконання робочого циклу:

$$P_{\text{сер}} = 5,57 + 0,4 + 0,3 + 0,2 = 2,228 + 0,5 = 2,728 \text{ кВт}$$

Середньогодинна витрата електричної енергії маніпулятором з урахуванням безперервної циклічної роботи становить:

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$E_{\text{год}} = P_{\text{сер}} \cdot t \quad (2.36)$$

$$E_{\text{год}} = 2,73 \cdot 1 = 2,73 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

де $E_{\text{год}}$ – кількість споживаної електричної енергії за одну годину безперервної роботи роботизованого комплексу;

t – час роботи системи ($t = 1$ год).

Спроектована система демонструє високі показники енергетичної ефективності завдяки застосуванню серводвигунів із високим коефіцієнтом потужності та сучасних алгоритмів рекуперації енергії при гальмуванні ланок [43]. Це дозволяє суттєво знизити експлуатаційні витрати підприємства на споживання енергоресурсів [43].

Висновки до розділу

У розрахунковому розділі бакалаврської роботи виконано повний комплекс інженерних розрахунків промислового маніпулятора, адаптованого для роботи в екстремальних температурних умовах термічного цеху [42].

На основі детального аналізу умов експлуатації та вимог до робочого простору обґрунтовано вибір антропоморфної 6-осьової послідовної кінематичної схеми робота-маніпулятора з інтегрованими серводвигунами та високоточними безлюфтовими редукторами [48]. Для захисту елементів конструкції від екстремальних теплових потоків деталей (800 °C) впроваджено використання термостійких захисних чохлах ARMATEX SBN 13-602 ROBOTEX [54] та високоефективної силікат-аерогелевої ізоляції SACIP у вузлах захватного пристрою [51].

За допомогою математичного методу Денавіта–Хартенберга побудовано просторову кінематичну модель маніпулятора [56]. Отримано аналітичні розв'язки прямої та оберненої задач кінематики, що дозволяє реалізувати траєкторне керування рухом робочого органа у декартових координатах із виключенням кінематичних сингулярностей [57].

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

У ході динамічного та моментного аналізів визначено навантаження у шарнірах системи для найменш сприятливого положення ланок [45]. Розраховано граничні моменти для найбільш навантажених осей ($M_{2, \text{розрах}} = 896,05 \text{ Н}\cdot\text{м}$, $M_{3, \text{розрах}} = 323,95 \text{ Н}\cdot\text{м}$), що послужило базою для вибору промислових серводвигунів потужністю 2,2 кВт та 0,8 кВт відповідно з урахуванням 30%-го коефіцієнта запасу.

Для кліщового важільного захватного пристрою розраховано необхідну силу затиску деталей гарячого металу ($F_z = 740,5 \text{ Н}$) та підібрано стандартний пневмоциліндр діаметром поршня 63 мм, здатний стабільно працювати при мережевому тиску 0,6 МПа [50]. Проведений розрахунок точності показав, що сумарна просторова похибка позиціонування з урахуванням кутових люфтів та теплових деформацій конструкції становить $\Delta_{\text{загал}} = 0,44 \text{ мм}$ при допустимій похибці транспортування $\pm 0,5 \text{ мм}$, що підтверджує працездатність системи.

Годинна продуктивність маніпулятора визначена на рівні 183 деталі за годину за тривалості циклу 16,7 с [67]. Середня електрична потужність, що споживається всім комплексом обладнання, становить 2,73 кВт [43]. Результати розрахунків повністю підтверджують технічну доцільність та високу надійність розробленої конструкції маніпулятора [43].

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ

3.1. Вимоги безпеки при експлуатації маніпулятора для переміщення деталей після термічної обробки

Експлуатація промислових маніпуляторів, що працюють з нагрітими деталями (після печей, гартувальних ванн, установок ТВЧ), вимагає суворого дотримання вимог безпеки. До роботи з таким обладнанням допускаються лише кваліфіковані та інструктовані працівники.

1. Загальні вимоги та організація робочого місця

Допуск персоналу: до самостійної роботи допускаються особи не молодше 18 років, які пройшли медичний огляд, спеціальне навчання з будови робототехнічних комплексів, вступний та первинний інструктажі на робочому місці. Регулярне проведення інструктажів з техніки безпеки для всіх працівників є обов'язковим. Огородження зони: Зона досяжності маніпулятора (з урахуванням габаритів затиснутої деталі) повинна бути огорожена металевими сітчастими або суцільними бар'єрами. Світлозвукова сигналізація: Робоче місце повинно бути обладнане сигналізацією, яка попереджає про початок автоматичного циклу руху маніпулятора.

2. Вимоги до засобів індивідуального захисту (ЗІЗ). Персонал повинен використовувати відповідні ЗІЗ, такі як захисні окуляри, рукавички, каски та інші засоби, залежно від характеру роботи. Враховуючи наявність високотемпературних ризиків, для операторів та наладчиків маніпулятора передбачений розширений перелік ЗІЗ відповідно до чинних стандартів (ДСТУ/EN):

Захист голови та обличчя: Каска захисна термостійка: Виготовлена з полікарбонату, стійка до бризок розплавленого металу або гарячої окалини. Щиток захисний лицьовий (з кріпленням на каску): Повинен мати інфрачервоний фільтр для захисту очей та шкіри обличчя від інтенсивного теплового випромінювання

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Пріма О.Є.			РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ				Літ.	Арк.	Акрушів	
Перевір.		Ляшко А.П.									45	67
									НУБіП України			
Н. Контр.		Матухно Н.В.										
Затверд.		Ловейкін В.С.										

нагрітих деталей.

Захист органів зору: окуляри закритого типу зі світлофільтрами: Застосовуються під час робіт, де не потрібен повнолицьовий щиток, але є ризик відлітання гарячої окалини при переміщенні деталі.

Захист органів дихання: промислові респіратори (клас FFP2/FFP3): Необхідні для захисту дихальних шляхів від аерозолів мастил, що випаровуються при контакті з гарячою деталлю, або від дрібнодисперсного металевго пилу.

Захист рук: рукавиці термостійкі (краги спилкові або кевларові): Захищають від контактного тепла (до +300°C і вище) під час ручного коригування заготовок у неробочому стані маніпулятора або під час технічного обслуговування гарячих захоплювачів.

Захист тіла (спецодяг): костюм з вогнестійким просоченням (або сукняний костюм металурга): Захищає від іскор, бризок окалини та знижує вплив конвективного тепла від деталей, що проходять термічну обробку.

Захист ніг: черевики шкіряні на термостійкій пішві (з нитрильної гуми): пішва не повинна плавитися при контакті з гарячою підлогою або уламками окалини. Обов'язкова наявність металевго або композитного підноски (витримує удар до 200 Дж) для захисту стопи у разі аварійного падіння важкої деталі з гріпера маніпулятора.

Захист органів слуху: протишумові навушники або беруші: Використовуються, якщо маніпулятор працює в комплексі з шумним ковальсько-пресовим обладнанням.

3. Вимоги до монтажу та пуску в експлуатацію

Перед пуском необхідно перевірити надійність всіх болтових і зварних з'єднань, а також правильність підключення електричних компонентів. Особливу увагу приділити кріпленню основи маніпулятора до фундаменту, оскільки динамічні навантаження при перенесенні важких деталей можуть викликати перекидальний момент. Перед введенням в експлуатацію необхідно провести

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

тестування роботи маніпулятора на холостому ході, щоб переконатися у відсутності дефектів і правильності функціонування.

4. Вимоги до зупинки та демонтажу

При плановій зупинці конвеєра або маніпулятора необхідно дотримуватися послідовності дій, визначених виробником, включаючи зниження навантаження і поступове вимкнення приводу. Деталь має бути звільнена із захоплювача і розміщена на стаціонарному стелажі. Після зупинки забезпечити захист від випадкового повторного пуску шляхом відключення живлення і вивішування попереджувальних знаків ("Не вмикати! Працюють люди").

3.2. Аналіз можливих ризиків і заходів щодо їхньої мінімізації при експлуатації маніпулятора

1. Механічні та кінематичні ризики

Можливі ризики: Удар рухомими ланками маніпулятора; затискання частин тіла між маніпулятором та колонами цеху; випадання гарячої деталі масою в десятки кілограмів через втрату тиску в пневмосистемі захоплювача. Заходи мінімізації: Застосування оптичних бар'єрів безпеки, які миттєво зупиняють рух при перетині променя людиною. Встановлення пневматичних/гідравлічних замків (зворотних клапанів), які утримують деталь у захоплювачі навіть при повній втраті тиску в магістралі.

2. Термічні та мікрокліматичні ризики

Можливі ризики: Термічні опіки 1-3 ступеня при випадковому торканні до заготовки або нагрітих губок маніпулятора; тепловий удар оператора через інтенсивне інфрачервоне випромінювання. Заходи мінімізації: Автоматизація процесу на 100% без необхідності ручного втручання; встановлення теплозахисних екранів між лінією термічної обробки та пультом оператора; організація ефективної припливно-витяжної вентиляції (аерації) цеху.

3. Електричні ризики

Можливі ризики: Ураження струмом при пошкодженні ізоляції силових кабелів маніпулятора (особливо в умовах високих температур, де кабелі можуть

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

пересохнути та потріскатися). Заходи мінімізації: Прокладання кабелів у закритих термостійких кабель-каналах (траках). Забезпечення належного заземлення всіх електричних компонентів.

3.3. Правила технічного обслуговування та ремонту маніпулятора

1. Підготовка до обслуговування

Проводити будь-які роботи дозволяється виключно після повного охолодження робочих органів маніпулятора до температури навколишнього середовища. Система керування має бути заблокована на програмному та фізичному рівні (ключ-марка забрана наладчиком).

2. Регулярне технічне обслуговування

Окрім перевірки стану підшипників та приводу, необхідно щоденно оглядати губки захоплювача. Через постійні цикли нагрівання/охолодження метал знає термічної втоми, що може призвести до утворення мікротріщин. Мастильні матеріали: Використовувати виключно високотемпературні мастила, рекомендовані виробником, які не коксуються і не спалахують поблизу термічних печей. Регулярно оглядати і очищувати обладнання від накопичення матеріалу (у даному випадку – від металевої окалини та нагару мастила на датчиках позиціонування).

3. Дії в аварійних ситуаціях

Система маніпулятора повинна мати апаратно-реалізований контур аварійної зупинки (E-stop), що має найвищий пріоритет. У разі знеструмлення цеху електромеханічні гальма серводвигунів повинні автоматично заблокувати осі маніпулятора в поточному положенні, запобігаючи "складанню" конструкції та падінню деталі.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

Впровадження автоматизованих та роботизованих систем у діючих ковальсько-пресових та термічних цехах вимагає значних початкових капіталовкладень. Тому прийняття рішення щодо модернізації виробництва має спиратися не лише на технічну доцільність, але й на всебічний економічний аналіз. Головними критеріями ефективності є зниження собівартості продукції за рахунок економії фонду оплати праці, зменшення браку, підвищення продуктивності обладнання та покращення умов праці персоналу.

4.1. Оцінка доцільності та розширений аналіз проекту

Для комплексного розуміння життєздатності проекту в умовах реального машинобудівного підприємства проведено стратегічний SWOT-аналіз, який дозволяє структурувати внутрішні та зовнішні фактори впливу на процес автоматизації.

Переваги:

- Повне виведення людини з небезпечної зони з екстремальними температурами (близько 800 °С) та шкідливими випарами.
- Суворе дотримання технологічного часу циклу (16,7 с), що критично важливо для структури металу при гартуванні.
- Висока точність позиціювання ($\Delta = 0,44$ мм), що унеможливорює пошкодження деталей або оснастки при завантаженні у штампи чи ванни.

Недоліки:

- Значні капітальні витрати на придбання промислового маніпулятора, контролера та розробку термостійкого захватного пристрою.
- Необхідність залучення інженерів високої кваліфікації для початкового програмування та налагодження кінематики робота.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕК- ТИВНОСТІ		
Розроб.		Пріма О.Є.					
Перевір.		Ляшко А.П.					
Н. Контр.		Матухно Н.В.					
Затверд.		Ловейкін В.С.			Лім. Арк. Акрушів		
						49	67
					НУБіП України		

Можливості:

- Можливість легкого перепрограмування 6-осьової системи під нову номенклатуру деталей.
- Організація безперервної роботи дільниці у 2 або 3 зміни без втрати темпу (стабільна продуктивність 183 деталі/годину).
- Залучення грантових програм або екологічних інвестицій, спрямованих на енергоефективність та сталий розвиток.

Загрози:

- Ризики простою обладнання у разі раптових перебоїв з електропостачанням (потребує встановлення систем безперебійного живлення).
- Валютні коливання, які можуть вплинути на вартість імпортованих комплектуючих (серводвигуни, редуктори) під час технічного обслуговування.

4.2. Розрахунок капітальних інвестицій

Сумарні капітальні вкладення у модернізацію дільниці включають не лише вартість самого "голового" маніпулятора, але й витрати на його інтеграцію у виробниче середовище. Розрахунок загальних капітальних інвестицій визначається за формулою:

$$K_{\Sigma} = K_{\text{обл}} + K_{\text{захв}} + K_{\text{пз}} + K_{\text{монт}} + K_{\text{навч}} + K_{\text{непередб}} \quad (4.1)$$

де $K_{\text{обл}}$ – ринкова вартість промислового 6-осьового маніпулятора з контролером керування (приймаємо орієнтовно 1200000 грн);

$K_{\text{захв}}$ – витрати на виготовлення термостійкого пневматичного захватного пристрою з аерогелевою ізоляцією (85000 грн);

$K_{\text{пз}}$ – вартість програмного забезпечення та послуг системного інтегратора (150000 грн);

$K_{\text{монт}}$ – витрати на монтаж робота на фундамент, прокладання кабель-трас та встановлення захисних огорожень (120000 грн);

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

$K_{\text{навч}}$ – витрати на навчання персоналу (операторів) для роботи з новою системою (45000 грн);

$K_{\text{непередб}}$ – резерв на непередбачувані витрати (приймається на рівні 5% від суми попередніх статей, що становить 110000 грн).

$$K_{\Sigma} = 1200000 + 85000 + 150000 + 120000 + 45000 + 110000 = 1710000 \text{ грн.}$$

4.3. Розрахунок поточних експлуатаційних витрат

Для визначення економічного ефекту необхідно порівняти річні експлуатаційні витрати до впровадження системи (Базовий варіант – ручна праця) та після (Проектний варіант – роботизована лінія).

Для розрахунків приймаємо двозмінний режим роботи (тривалість зміни 8 годин) та 250 робочих днів на рік. Ефективний річний фонд часу роботи обладнання з урахуванням коефіцієнта використання ($\eta = 0,90$):

$$F_d = D_{\text{роб}} \cdot t_{\text{зм}} \cdot n_{\text{зм}} \cdot \eta \quad (4.2)$$

$$F_d = 250 \cdot 8 \cdot 2 \cdot 0,90 = 3600 \text{ годин/рік.}$$

1. Амортизаційні відрахування (А)

Маніпулятор відноситься до 4-ї групи основних засобів (машини та обладнання). Приймаємо прямолінійний метод нарахування амортизації з нормативним строком служби 10 років (норма амортизації $N_a = 10\%$):

$$A = (K_{\Sigma} \cdot N_a) / 100 \quad (4.3)$$

$$A = 1\,710\,000 \cdot 0,10 = 171\,000 \text{ грн/рік.}$$

2. Витрати на силову електроенергію ($B_{\text{ел}}$)

Згідно з розрахунками в розділі 3, середньогодинна споживана потужність комплексу становить $P_{\text{сер}} = 2,73$ кВт. При промисловому тарифі на електроенергію $C_{\text{ел}} = 8,50$ грн/кВт·год:

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$B_{\text{ел}} = P_{\text{сер}} \cdot F_{\text{д}} \cdot C_{\text{ел}} \quad (4.4)$$

$$B_{\text{ел}} = 2,73 \cdot 3600 \cdot 8,50 = 83\,538 \text{ грн/рік.}$$

3. Витрати на технічне обслуговування та ремонт ($B_{\text{ТО}}$)

У зв'язку з роботою у важких умовах (високі температури, окалина), витрати на заміну термостійких мастил, ущільнювачів та фільтрів приймаємо на рівні 4% від вартості обладнання:

$$B_{\text{ТО}} = K_{\Sigma} \cdot 0,04 = 2\,310\,000 \cdot 0,04 = 92\,400 \text{ грн/рік.} \quad (4.5)$$

4. Економія фонду оплати праці (ФОП)

Це ключова стаття економії. У базовому варіанті для обслуговування печі та переміщення важких гарячих деталей вручну потрібно 6 робітників-термістів (по 3 робітники у зміну через важкі умови праці). У проектному варіанті лінію контролюють 2 оператори-налагоджувальники (по 1 у зміну).

ФОП базового варіанту: Середня місячна заробітна плата терміста – 25 000 грн. З урахуванням нарахування ЄСВ (22%):

$$\text{ФОП}_{\text{баз}} = 6 \cdot 25\,000 \cdot 12 \cdot 1,22 = 2\,196\,000 \text{ грн/рік.} \quad (4.6)$$

ФОП проектного варіанту: Середня ЗП кваліфікованого оператора робото-техніки – 35 000 грн.

$$\text{ФОП}_{\text{проект}} = 2 \cdot 35\,000 \cdot 12 \cdot 1,22 = 1\,024\,800 \text{ грн/рік.} \quad (4.7)$$

Абсолютна річна економія на заробітній платі становить:

$$\Delta \text{ФОП} = 2\,196\,000 - 1\,024\,800 = 1\,171\,200 \text{ грн/рік.} \quad (4.8)$$

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.4. Розрахунок сумарного економічного ефекту та терміну окупності

Окрім прямої економії на зарплаті, автоматизація усуває суб'єктивний людський фактор. Ручне перенесення деталей часто призводить до їх переохолодження на повітрі або падіння, що є причиною браку. Впровадження робота знижує рівень браку на 2%, що за річного обсягу випуску дозволяє зекономити матеріалів та енергоносіїв на суму $E_{\text{брак}} = 250\,000$ грн/рік.

Річна економія поточних витрат (економічний ефект ΔC) від впровадження проекту визначається як різниця між отриманою вигодою та новими експлуатаційними витратами:

$$\Delta C = \Delta \text{ФОП} + E_{\text{брак}} - B_{\text{ел}} - B_{\text{ТО}} - A \quad (4.9)$$

$$\Delta C = 1\,171\,200 + 250\,000 - 83\,538 - 92\,400 - 231\,000 = 1\,014\,262 \text{ грн/рік.}$$

Простий термін окупності капітальних інвестицій ($T_{\text{ок}}$) становить:

$$T_{\text{ок}} = K_{\Sigma} / \Delta C = 2\,310\,000 / 1\,014\,262 \approx 2,28 \text{ роки.} \quad (4.10)$$

Розрахунковий коефіцієнт економічної ефективності (E_p):

$$E_p = 1 / T_{\text{ок}} = 1 / 2,28 \approx 0,438 \quad (4.11)$$

4.5. Зведені техніко-економічні показники (ТЕП)

Для наочного відображення доцільності впровадження розробленої конструкції результати економічних розрахунків зведено у порівняльну таблицю.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 4.1

Зведені техніко-економічні показники проекту

Найменування показника	Одиниця виміру	Базовий варіант (Ручна праця)	Проектний варіант (Маніпулятор)	Відхилення (+/-)
Капітальні інвестиції	грн	0	2310000	+ 2310000
Кількість виробничого персоналу	чол.	6	2	- 4
Річний фонд оплати праці (з ЄСВ)	грн	2196000	1024800	- 1171200
Витрати на електроенергію	грн	0*	83 538	+ 83 538
Витрати на ТО і ремонт обладнання	грн	15000	92400	+ 77400
Амортизаційні відрахування	грн	0	231000	+ 231000
Втрати від технологічного браку	грн	320000	70000	- 250000
Річний економічний ефект	грн	-	1 014 262	-

Термін окупності інвестицій	роки	-	2,28	-
-----------------------------	------	---	------	---

*Примітка: У базовому варіанті енерговитратами ручного інструменту знехтувано.

Висновки до розділу

Проведений детальний техніко-економічний розрахунок переконливо доводить рентабельність модернізації термічної дільниці. Загальні капітальні інвестиції у розмірі 2,31 млн грн мають відносно короткий термін окупності – 2,28 роки. Економічний ефект досягається переважно за рахунок вивільнення 4 робітників зі шкідливих умов праці (економія ФОП понад 1,17 млн грн щорічно) та суттєвого зменшення кількості бракованих деталей. Отриманий коефіцієнт економічної ефективності ($E_p = 0,438$) значно перевищує нормативне значення для галузі машинобудування ($E_n = 0,15$), що свідчить про високу інвестиційну привабливість та абсолютну життєздатність розробленого проекту.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

ВИСНОВКИ

На основі аналізу технологічних процесів та просторових обмежень термічних цехів обґрунтовано вибір антропоморфної 6-осьової послідовної кінематичної схеми робота-маніпулятора. Така архітектура забезпечує оптимальне співвідношення між габаритами та корисним об'ємом робочої зони, дозволяючи реалізовувати складні просторові траєкторії для уникнення зіткнень з елементами печі.

За допомогою методу Денавіта–Хартенберга побудовано геометричну модель та отримано аналітичні розв'язки прямої та оберненої задач кінематики, що дозволяє керувати рухом у декартових координатах у реальному часі.

Виконано силовий та моментний розрахунки для найнесприятливішого витягнутого положення руки маніпулятора. Визначено максимальні розрахункові моменти: 896,05 Н·м на плечовій осі та 323,94 Н·м на ліктьовій. Відповідно до цих даних підібрано високодинамічні серводвигуни потужністю 2,2 кВт та 0,8 кВт.

Спроектовано кліщовий двоважільний кутовий захват із пневматичним приводом для утримання гарячих деталей (800 °С). Використання композиційних кремнеземних аерогелевих панелей товщиною 15 мм мінімізує теплопровідність, підтримуючи безпечну температуру пневмоциліндра на рівні до 70 °С. Забезпечено надійну силу затиску в 740,5 Н на кожній губці.

Аналіз точності підтвердив високу жорсткість конструкції: сумарна просторова похибка з урахуванням люфтів редукторів, пружного згину та температурного розширення становить 0,44 мм, що вкладається в допустимі технологічні межі ($\pm 0,5$ мм). Продуктивність системи досягає 183 деталі за годину.

Впровадження маніпулятора є економічно вигідним. Загальні капітальні інвестиції складають 2,31 млн грн, а річний економічний ефект перевищує 1,01 млн грн. Термін окупності проєкту становить 2,28 роки. Головними факторами

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Пріма О.Є.			ВИСНОВКИ		
Перевір.		Ляшко А.П.					
Н. Контр.		Матухно Н.В.					
Затверд.		Ловейкін В.С.					
					Літ.	Арк.	Акрушів
						56	67
					НУБіП України		

економії є зниження рівня браку на 2% та вивільнення 4 робітників зі шкідливих умов праці.

Сформовано комплексний підхід до безпеки експлуатації. Впроваджено захист від термічних, кінематичних та електричних ризиків за рахунок встановлення оптичних бар'єрів безпеки, використання термостійких захисних чохлаів ARMATEX та застосування розширеного переліку ЗІЗ (каска з інфрачервоними фільтрами, вогнестійкі костюми).

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дипломний проєкт. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» : електронний архів. URL: <https://ela.kpi.ua/bitstreams/34f7fc05-4190-4eb6-9230-4793800a01c6/download> (дата звернення: 15.04.2026).
2. Робототехнічні системи та комплекси. Освітньо-кваліфікаційна програма 14-136 «Металургія». Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» : офіційний сайт. URL: <https://web.kpi.kharkov.ua/lv/wp-content/uploads/sites/121/2025/11/OKVP-14.-136.-Metalurgiya.-Robototekhnichni-sistemi-ta-kompleksi.-2025.pdf> (дата звернення: 15.04.2026).
3. Foundry and Forging. IPR – Intelligente Peripherien für Roboter : website. URL: <https://en.iprworldwide.com/solutions/foundry-and-forging/> (дата звернення: 15.04.2026).
4. High-temperature robotic gripper with ceramic insulation for additive manufacturing. Indian Journal of Engineering and Materials Sciences (IJEMS). URL: <https://or.niscpr.res.in/index.php/IJEMS/article/download/14499/5020> (дата звернення: 15.04.2026).
5. FANUC Industrial Robots. FANUC Europe : official website. URL: <https://www.fanuc.eu/eu-en/fanuc-industrial-robots> (дата звернення: 15.04.2026).
6. Gripper for hot parts. Zimmer Group : product finder. URL: <https://www.zimmer-group.com/en/service-contact/pre-sales/product-finder/system-showroom/system/gripper-for-hot-parts> (дата звернення: 15.04.2026).
7. Demag KBK cranes for manipulators. Demag Cranes & Components : official website. URL: <https://www.demagcranes.com/en/products/cranes-and-cranes-sets/kbk-light-crane-system/kbk-cranes-manipulators> (дата звернення: 15.04.2026).

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ			
Розроб.		Пріма О.Є						
Перевір.		Ляшко А.П.						
Н. Контр.		Матухно Н.В.						
Затверд.		Ловекін В.С.						
					Літ.	Арк.	Актуальність	
							58	67
					НУБіП України			

8. Robotic Assembly. High Precision Industrial Automation. Stäubli International : official website. URL: <https://www.staubli.com/global/en/robotics/applications/assembly-robot.html> (дата звернення: 15.04.2026).

9. Інформаційні інтелектуальні роботизовані технічні системи (ІПРК-2025) : зб. тез доп. II Міжнар. наук.-практ. конф. Харків : Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», 2025. URL: https://education.khai.edu/conferences/published/iirtk-2025_compressed.pdf (дата звернення: 15.04.2026).

10. Industrial robots for every application and industry. KUKA Global : official website. URL: <https://www.kuka.com/en-us/products/robotics-systems/industrial-robots> (дата звернення: 15.04.2026).

11. V-type crane. Demag Cranes : universal cranes. URL: <https://www.demagcranes.com/en-us/products/cranes/universal-cranes/v-type-crane> (дата звернення: 15.04.2026).

12. Mobile robot platforms. Stäubli Robotics : products. URL: <https://www.staubli.com/global/en/robotics/products/mobile-robotics/mobile-robot-platform.html> (дата звернення: 15.04.2026).

13. Проць Я. І. Захоплювальні пристрої промислових роботів : навч. посіб. Тернопіль : ТДТУ ім. І. Пулюя, 2008. 232 с. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/783/1/Textbook-Prots_Ya-Gripping_devices_of_industrial_robots__2008.pdf (дата звернення: 15.04.2026).

14. KBK portal cranes. Demag Light Crane System : products. URL: <https://www.demagcranes.com/en/products/cranes-and-cranes-sets/kbk-light-crane-system/kbk-portal-cranes> (дата звернення: 15.04.2026).

15. High reach, Heavy Payload Industrial Robot TX2-200. Stäubli Robotics : products. URL: <https://www.staubli.com/global/en/robotics/products/industrial-robots/6-axis/tx2-200.html> (дата звернення: 15.04.2026).

16. Automation solutions in the semiconductor industry. Staubli Robotics : brochure. URL:

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

<https://www.staubli.com/content/dam/robotics/industries/semicon/semiconductors-brochure-EN.pdf> (дата звернення: 15.04.2026).

17. Industrial Robots for Manufacturing. FANUC America : official website. URL: <https://www.fanucamerica.com/products/robots> (дата звернення: 15.04.2026).

18. KUKA vs. ABB vs. FANUC: What's the best industrial robot? Standard Bots : blog. URL: <https://standardbots.com/blog/kuka-vs-abb-vs-fanuc> (дата звернення: 15.04.2026).

19. Industrial Robot Comparison: Fanuc vs Motoman vs ABB vs Kuka. Industrial Monitor Direct : knowledgebase. URL: <https://industrialmonitordirect.com/blogs/knowledgebase/industrial-robot-comparison-fanuc-vs-motoman-vs-abb-vs-kuka> (дата звернення: 15.04.2026).

20. Demag KBK light crane system : technical documentation. URL: https://www.demagcranes.com/sites/default/files/media/documents/20838544_141031_0.pdf (дата звернення: 15.04.2026).

21. Demag gantry cranes for Dillinger : case studies. Demag Cranes. URL: <https://www.demagcranes.com/en-us/industry-expertise/case-studies/demag-gantry-cranes-dillinger> (дата звернення: 15.04.2026).

22. Experts in Man and Machine. STÄUBLI : PDF Catalogs & Technical Documentation. URL: <https://pdf.aeroexpo.online/pdf/staebli/experts-man-machine/170642-21131.html> (дата звернення: 15.04.2026).

23. Субота Ю. В. Дослідження та проектування робототехнічного комплексу завантаження деталей у нагрівальну піч : магістерська дисертація. Київ : НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2018. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/23841/1/Subota_magistr.pdf (дата звернення: 15.04.2026).

24. Hot Metal Gripper - BPGS10H. Bimba Manufacturing : official website. URL: <https://www.bimba.com/en/detail/bpgs10h> (дата звернення: 15.04.2026).

25. Using Robotiq Grippers in High-Temperature Environments. Robotiq Blog : knowledge base. URL: <https://blog.robotiq.com/knowledge/how-to-use-robotiq-grippers-in-high-temperature-environments> (дата звернення: 15.04.2026).

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

26. Маніпуляційні системи роботів. Освітній проект «На Урок» : матеріали до уроку. URL: <https://naurok.com.ua/manipulyaciyni-sistemi-robotiv-292614.html> (дата звернення: 15.04.2026).

27. Про затвердження Правил охорони праці при термічній обробці металів : Наказ Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду від 18.12.2007 № 303. Інформаційно-правова система ЛІГА:ЗАКОН. URL: <https://ips.ligazakon.net/document/RE14757> (дата звернення: 15.04.2026).

28. Heat-Resistant Coatings That Keep Industries Running. Domadia : industrial insights. URL: <https://domadia.net/heat-resistant-coatings-that-keep-industries-running/> (дата звернення: 15.04.2026).

29. Thermoset Composites for Robotics. Acculam : industries served. URL: <https://accumam.com/industries-served/robotics> (дата звернення: 15.04.2026).

30. Protective Ceramic Coatings. ASB Industries : coating materials. URL: <https://www.asbindustries.com/coating-materials/ceramic-coatings> (дата звернення: 15.04.2026).

31. Ceramic Powders for Industrial Applications. Oerlikon Metco : product catalogue. URL: <https://www.oerlikon.com/metco/en/products-services/materials/oxide-ceramics/ceramic-powders/> (дата звернення: 15.04.2026).

32. Ultra High Temperature Ceramic Coatings - Aremco Corr-Paint. Aremco Products : website. URL: <https://www.aremco.com/aremco-product/ultra-high-temperature-ceramic-coatings-1/> (дата звернення: 15.04.2026).

33. EN ISO 10218-1 Safety requirements for industrial robots. Gt-Engineering : technical standards. URL: <https://www.gt-engineering.it/en/technical-standards/en-iso-standards/en-iso-10218-1-safety-requirements-for-industrial-robots/> (дата звернення: 15.04.2026).

34. ДСТУ EN ISO 10218-1:2018 Роботи та роботизовані пристрої. Вимоги щодо безпечності промислових роботів. Частина 1. Роботи (EN ISO 10218-1:2011, IDT; ISO 10218-1:2011, IDT). БУДСТАНДАРТ Online. URL:

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=81561 (дата звернення: 15.04.2026).

35. ДСТУ EN ISO 10218-1:2014 Роботи та роботизовані пристрої. Вимоги щодо безпеки для промислових роботів. Частина 1. Роботи (EN ISO 10218-1:2011, IDT). БУДСТАНДАРТ Online. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=88217 (дата звернення: 15.04.2026).

36. ISO 10218-1:2025–Robots And Robotic Devices Safety. The ANSI Blog. URL: <https://blog.ansi.org/ansi/iso-10218-1-2025-robots-and-robotic-devices-safety/> (дата звернення: 15.04.2026).

37. Updated ISO 10218 | Answers to Frequently Asked Questions (FAQs). Association for Advancing Automation (A3). URL: <https://www.automate.org/robotics/blogs/updated-iso-10218-faq> (дата звернення: 15.04.2026).

38. ГОСТ 12.3.004-75 Термічна обробка металів. Загальні вимоги безпеки. БУДСТАНДАРТ Online. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=48113 (дата звернення: 15.04.2026).

39. Правила пожежної безпеки в Україні. Державна служба України з надзвичайних ситуацій : офіційний вебпортал. URL: <https://dsns.gov.ua/upload/4/8/7/4/2013-3-25-pravila3.doc> (дата звернення: 15.04.2026).

40. Вимоги безпеки при виконанні навчальних та науково-дослідних робіт в лабораторіях. Харківський національний автомобільно-дорожній університет : інструкція. URL: https://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_Tender/Admin_diyalnist/stvnz_20.5-12025.pdf (дата звернення: 15.04.2026).

41. Вимоги пожежної безпеки до об'єктів сільського виробництва. Журнал «Охорона праці і пожежна безпека». URL:

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

<https://ohoronapraci.com.ua/articles/486858-vymohy-pozhezhnoyi-bezpeky-do-obyektiv-silskoho-vyrobnytstva> (дата звернення: 15.04.2026).

42. Continuous Casting Installation with at Least One Robot and Method. Patent US20080058981A1. Google Patents. URL: <https://patents.google.com/patent/US20080058981A1/en> (дата звернення: 27.05.2026).

43. Handling robots automate the material handling tasks. KUKA Germany : official website. URL: <https://www.kuka.com/en-de/applications/handling-automation/handling-robots> (дата звернення: 27.05.2026).

44. Furnaces for Foundry. Nabertherm : product catalogue. URL: https://nabertherm.com/sites/default/files/2023-02/foundry_english.pdf (дата звернення: 27.05.2026).

45. Hyleh S. Control of Robots : Thesis. Theseus Repository. URL: https://www.theseus.fi/bitstream/10024/795023/3/Hyleh_Sirius.pdf (дата звернення: 27.05.2026).

46. Foundry and Forging Robots Market Size (\$5.8 Billion) 2030. Strategic Market Research : market report. URL: <https://www.strategicmarketresearch.com/market-report/foundry-forging-robots-market> (дата звернення: 27.05.2026).

47. KR 10 R1100-2. my.KUKA : product details. URL: https://my.kuka.com/s/product/kr-10-r11002/01t58000004l6jgAAA?language=en_US (дата звернення: 27.05.2026).

48. KR 10 R1420 Robot Specifications. Kuka Robotics. Scribd. URL: <https://www.scribd.com/document/325923078/Kuka-Robotics> (дата звернення: 27.05.2026).

49. Foundry. Nabertherm Industry. Prolific Heating International : catalogue. URL: https://phiheating.com/wp-content/uploads/2020/04/Nabertherm-Foundry-Industry_PHI.pdf (дата звернення: 27.05.2026).

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

50. Субота Ю. В. Дослідження та проектування робототехнічного комплексу завантаження деталей у нагрівальну піч : магістерська дисертація. Київ : НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2018. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/23841/1/Subota_magistr.pdf (дата звернення: 27.05.2026). (Прим.: Джерело дублює №23 з іншою датою звернення).

51. Physical Experiment and Numerical Simulation on Thermal Effect of Aerogel Material for Steel Ladle Insulation Layer. Coatings. 2021. Vol. 11, iss. 10. Article 1205. MDPI. URL: <https://www.mdpi.com/2079-6412/11/10/1205> (дата звернення: 27.05.2026).

52. M06 Materials and Hardware. EASA Part 66 Module 6. Scribd. URL: <https://www.scribd.com/document/404038484/M06-MATERIALS-AND-HARDWARE-pdf> (дата звернення: 27.05.2026).

53. The Paton Welding Journal. 2024. No. 09. International Association «Welding». URL: <https://patonpublishinghouse.com/tpwj/pdf/2024/tpwj202409all.pdf> (дата звернення: 27.05.2026).

54. Creating Robotic Protective Covers for Use in Extreme Environments. AZoM.com. URL: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=11726> (дата звернення: 27.05.2026).

55. Function Analysis of Industrial Robot under Cubic Polynomial Interpolation in Animation Simulation Environment. International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence (IJIMAI). URL: <https://www.ijimai.org/index.php/ijimai/article/view/722/830> (дата звернення: 27.05.2026).

56. Gilca G. Kinematic modeling of 6 DOF robotic arm with MATLAB. Fiability & Durability / Fiabilitate si Durabilitate. Târgu Jiu : Universitatea „Constantin Brâncuși”, 2023. No. 1. URL: https://www.utgjiu.ro/rev_mec/mecanica/pdf/2023-01/24_Gilca%20G_Kinematic%20modeling%20of%206%20doF%20robotic%20arm%20with%20matlab.pdf (дата звернення: 27.05.2026).

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

57. Розв'язання прямої задачі кінематики зварювального маніпулятора з шістьма ступенями свободи. Національний університет «Львівська політехніка» : інституційний репозиторій. URL: <https://ena.lpnu.ua/bitstreams/550f4ce4-a626-473c-99c0-5a8baab5999d/download> (дата звернення: 27.05.2026).

58. Forward Kinematics in Robot Manipulators : Lecture Slides. Scribd. URL: <https://www.scribd.com/document/737555992/Lecture-Slide-4-Forward-Kinematics> (дата звернення: 27.05.2026).

59. Wanxin Jin. Forward Kinematics – Modeling and Control of Robots : lecture notes. Arizona State University. URL: <https://wanxinjin.github.io/asu-robotics/lec6-8/fk.html> (дата звернення: 27.05.2026).

60. De Luca A. Direct kinematics : Course Material. Sapienza Università di Roma. URL: http://www.diag.uniroma1.it/~deluca/rob1_en/09_DirectKinematics.pdf (дата звернення: 27.05.2026).

61. Research Kinematics Analysis and Verification of Six-DoF Humanoid Robotic Manipulator. Third World Academy of Sciences Publications (TWASP) Journal. URL: <https://twasp.info/journal/archive/26-%20362-%20372-author%20backed.pdf> (дата звернення: 27.05.2026).

62. The D-H parameters of 6-DOF anthropomorphic manipulators. ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/figure/The-D-H-parameters-of-6-DOF-anthropomorphic-manipulators-DOF-degree-of-freedom_fig1_334056080 (дата звернення: 27.05.2026).

63. DH parameters of PUMA 560. ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/figure/DH-parameters-of-PUMA-560_tbl1_228412877 (дата звернення: 27.05.2026).

64. Проць Я. І. Захоплювальні пристрої промислових роботів : навч. посіб. Тернопіль : ТДТУ ім. І. Пулюя, 2008. 232 с. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/783/1/Textbook-Prots_Ya-Gripping_devices_of_industrial_robots__2008.pdf (дата звернення: 27.05.2026).
(Прим.: Джерело дублює №13 з іншою датою звернення).

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

65. Продуктивність праці: що таке, формула, методи вимірювання. Workafford Ukraine. URL: <https://workafford.com.ua/produktivnist-praczi/> (дата звернення: 27.05.2026).

66. Показники і методи вимірювання продуктивності праці. Економіка праці та соціально-трудова відносини. Електронна бібліотека BukLib.net. URL: <https://buklib.net/books/25956/> (дата звернення: 27.05.2026).

67. Продуктивність праці робітників: розповідаємо про всі нюанси цього показника. Nova Poshta Education Blog. URL: <https://online.novaposhta.education/blog/produktivnist-praci-robitnikov-rozpovidaemo-pro-vsi-nyuansi-cogo-pokaznika> (дата звернення: 27.05.2026).

68. Показники вимірювання продуктивності праці. Інформаційний портал Studentam.net.ua. URL: <https://studentam.net.ua/content/view/4684/132/> (дата звернення: 27.05.2026).

69. Практична робота №4 : методичні вказівки. URL: <https://s26dc4f20940b84ee.jimcontent.com/download/version/1584093688/module/14691110822/name/%D0%9F%D0%A0%20%E2%84%964.pdf> (дата звернення: 27.05.2026).

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.027 ПЗ							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДОДАТКИ			Літ.	Арк.	Акрушів		
Розроб.		Пріма О.Є.										
Перевір.		Ляшко А.П.								67	67	
								НУБіП України				
Н. Контр.		Матухно Н.В.										
Затверд.		Ловекін В.С.										