

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 РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА
ДЛЯ МАЛЯРНИХ РОБІТ

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)

Когденко Андрій Віталійович
(ПІБ студента)

КИЇВ – 2026

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет (ННІ) Конструювання та дизайну

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Конструювання машин і обладнання

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

З А В Д А Н Н Я

на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту

Когденка Андрія Віталійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування

(код і назва)

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи (дипломного проекту бакалавра) **РОЗРОБКА
КОНСТРУКЦІЇ РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА ДЛЯ МАЛЯРНИХ РОБІТ**

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 робота-маніпулятора для малярних робіт.

Перелік питань, які потрібно розробити:

1. Провести аналіз існуючих конструкцій роботів-маніпуляторів для малярних робіт.
2. Розглянути перспективи створення нових роботів-маніпуляторів для малярних робіт.
3. Виконати розрахунок робота-маніпулятора для малярних робіт.
4. Розглянути питання охорони праці.
5. Виконати розрахунок економічної ефективності.

Перелік графічних документів (за потреби)

1. Загальний вигляд
2. Складальне 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

Андрій КОГДЕНКО
(підпис) (прізвище та ініціали студента)

ЗМІСТ

ЗМІСТ	3
РЕФЕРАТ	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ КОНСТРУКЦІЙ РОБОТІВ-МАНІПУЛЯТОРІВ ДЛЯ МАЛЯРНИХ РОБІТ	8
1.1.Актуальність автоматизації малярних робіт	8
1.2.Аналіз існуючих роботів-маніпуляторів для малярних робіт	10
1.3.Приводи та системи керування	16
1.4.Колаборативна робототехніка та гнучка автоматизація	18
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ТА РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА ДЛЯ МАЛЯРНИХ РОБІТ	20
2.1.Вихідні дані для проєктування	20
2.2.Обґрунтування конструктивної схеми робота	21
2.3.Кінематичний розрахунок маніпулятора.....	22
2.4.Силовий та моментний розрахунок приводів	25
2.5.Розрахунок точності позиціювання	27
2.6.Розрахунок продуктивності при малярних роботах	28
2.7.Розрахунок енергоспоживання системи	29
РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ	31
3.1.Вимоги безпеки при експлуатації робота-маніпулятора	31
3.2.Заходи щодо захисту працівників від шкідливих факторів малярних робіт	31
3.3.Аналіз можливих аварійних ситуацій та шляхи їх запобігання.....	32
РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ	34

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.022 ПЗ							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Когденко А.В.			ЗМІСТ				Літ.	Арк.	Акрушів	
Перевір.		Ляшко А.П.									3	58
									НУБіП України			
Н. Контр.		Матухно Н.В.										
Затверд.		Ловекін В.С.										

4.1.Вихідні дані для проведення економічних розрахунків	34
4.2.Розрахунок капітальних вкладень на розробку та виготовлення робота-маніпулятора.....	35
4.3.Розрахунок річних операційних витрат (собівартості фарбування)	37
4.4.Визначення показників економічної ефективності проєкту	40
ВИСНОВКИ.....	42
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	44
ДОДАТКИ.....	58

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.022 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 58 аркушах друкованого тексту.

В першому розділі бакалаврської кваліфікаційної роботи розглянуто сучасний стан автоматизації малярних робіт у машинобудуванні, проведено класифікацію промислових робіт за основними показниками, виконано аналіз існуючих конструкцій малярних робіт у різних галузях. Розглянуті конструкції провідних закордонних аналогів та визначено перспективи створення нових роботизованих комплексів.

В другому розділі роботи проведено розрахунок конструкції шестиосового робота-маніпулятора, а саме обґрунтовано його кінематичну схему, розраховано силові параметри приводів (серводвигунів та редукторів). Також виконано аналіз та розрахунок точності позиціювання робочого органа.

В розділі охорона праці розглянуто вимоги безпеки при експлуатації роботизованого малярного комплексу, проведено аналіз можливих ризиків (зокрема вибухо- та пожежонебезпеки) і заходів щодо їх мінімізації, визначено правила технічного обслуговування та безпеки життєдіяльності.

Також в бакалаврській кваліфікаційній роботі виконано розрахунок економічної ефективності від впровадження розробленої конструкції робота-маніпулятора для малярних робіт, визначено капітальні витрати та термін окупності проєкту.

Ключові слова: робот-маніпулятор, малярні роботи, кінематична схема, серводвигун, точність позиціювання, економічна ефективність.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.022 ПЗ					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РЕФЕРАТ			Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Когденко А.В.								
Перевір.		Ляшко А.П.							5	58
								НУБіП України		
Н. Контр.		Матухно Н.В.								
Затверд.		Ловекін В.С.								

ВСТУП

Сучасне машинобудування вимагає ефективних і надійних систем автоматизації складних технологічних процесів, серед яких малярні роботи займають одне з ключових місць. Одним із найбільш перспективних і перевірених часом засобів для цього є промисловий робот-маніпулятор антропоморфного типу. Цей механізм забезпечує постійний і точний процес нанесення лакофарбових матеріалів на деталі складної конфігурації, що дозволяє інтегрувати його у виробничі лінії з високою точністю і продуктивністю.

Роботизовані малярні комплекси використовуються у багатьох галузях промисловості: автомобілебудуванні, сільськогосподарському машинобудуванні, важкому виробництві та інших сферах. Вони характеризуються високою точністю позиціонування, надійністю, можливістю значного заощадження дороговартісних матеріалів і здатністю стабільно працювати в агресивних чи вибухонебезпечних умовах, повністю виключаючи людський фактор на шкідливих ділянках виробництва.

Мета цієї бакалаврської кваліфікаційної роботи полягає у розробці конструкції робота-маніпулятора для малярних робіт. Основними завданнями дослідження є: аналіз існуючих конструкцій промислових роботів та їхніх закордонних аналогів, визначення переваг і недоліків сучасних рішень, обґрунтування шестиосьової кінематичної схеми маніпулятора, проведення силових розрахунків елементів приводу і точності позиціонування робочого органа, а також розробка комплексних заходів з охорони праці та оцінка економічної ефективності впровадження проєкту.

У даній роботі буде проведено детальний аналіз технічних та кінематичних характеристик робота-маніпулятора, розглянуто методи його проектування та підбору комплектуючих, зокрема серводвигунів і планетарно-цевочних

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.022 ПЗ							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Когденко А.В.			ВСТУП				Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Ляшко А.П.									6	58
									НУБіП України			
Н. Контр.		Матухно Н.В.										
Затверд.		Ловекін В.С.										

редукторів. Також будуть обґрунтовані конструктивні рішення щодо забезпечення вибухозахисту обладнання в малярній камері та виконані необхідні інженерні розрахунки, що підтверджують загальну працездатність і жорсткість запропонованої конструкції.

Отримані результати можуть бути використані при модернізації існуючих малярних дільниць на машинобудівних підприємствах, а також при розробці нових роботизованих комплексів для автоматизованого нанесення захисних покриттів. Впровадження розробленої конструкції дозволить суттєво підвищити якість лакофарбового покриття, зменшити операційні та експлуатаційні витрати, мінімізувати відходи матеріалів та повністю убезпечити персонал від шкідливого впливу хімічних речовин.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.022 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ КОНСТРУКЦІЙ РОБОТІВ-МАНІПУЛЯТОРІВ ДЛЯ МАЛЯРНИХ РОБІТ

1.1. Актуальність автоматизації малярних робіт

Сучасний етап розвитку промислового виробництва характеризується глобальним переходом до концепції Industry 4.0 (рис.1.1), де ключову роль відіграє повна автоматизація та цифровізація технологічних процесів. Серед найбільш складних для автоматизації операцій малярні роботи займають особливе місце через високу варіативність геометрії об'єктів, жорсткі вимоги до рівномірності покриття та надзвичайно агресивне робоче середовище [1]. Традиційне ручне фарбування, хоча й забезпечує високу адаптивність, супроводжується низкою критичних недоліків, серед яких головними є суб'єктивність якості, низька ефективність використання матеріалів та значні ризики для здоров'я персоналу [3].



Рис. 1.1. Концепція Industry 4.0.

Актуальність впровадження роботів-маніпуляторів у малярні процеси підтверджується стрімким зростанням світового ринку фарбувальних роботів, який, за прогнозами, досягне 5,82 мільярдів доларів США до 2029 року [2]. Основними

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.022 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Когденко А.В.			РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ КОНСТРУКЦІЙ РОБОТІВ-МАНІПУЛЯТОРІВ ДЛЯ МАЛЯРНИХ РОБІТ		
Перевір.		Ляшко А.П.					
Н. Контр.		Матухно Н.В.					
Затверд.		Ловейкін В.С.					
					Літ.	Арк.	Акрушів
						8	58
					НУБіП України		

драйверами цього зростання є необхідність мінімізації викидів летких органічних сполук (VOC), суворе дотримання екологічних стандартів та дефіцит кваліфікованої робочої сили в розвинених країнах [1]. Роботизовані системи здатні забезпечити ефективність перенесення фарби на рівні 85–95%, у той час як при ручному розпиленні цей показник рідко перевищує 50–65%, що веде до колосальних втрат дороговартісних лакофарбових матеріалів [1].

У машинобудуванні (рис. 1.2), особливо в автомобілебудуванні та аерокосмічній галузі, роль малярних роботів вийшла за межі простої заміни людини. Сьогодні це складні кіберфізичні системи, що забезпечують мікронну точність товщини покриття, яка є критичною для аеродинамічних характеристик літальних апаратів та корозійної стійкості вузлів [1]. В агросекторі автоматизація фарбування великогабаритних рамних конструкцій тракторів та комбайнів дозволяє захистити техніку від агресивного впливу добрив та вологи, забезпечуючи тривалий термін експлуатації в екстремальних польових умовах [4]. В будівництві малярні роботи все частіше застосовуються для нанесення вогнетривких та захисних покриттів на металоконструкції, де швидкість та рівномірність нанесення напряму впливають на безпеку експлуатації споруд [6].



Рис. 1.2. Використання малярних роботів в машинобудуванні

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.022 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

1.2. Аналіз існуючих роботів-маніпуляторів для малярних робіт

1.2.1. Класифікація та структурні особливості

Малярні роботи-маніпулятори класифікуються за декількома ключовими ознаками, що визначають їхню придатність для конкретних виробничих умов. Найбільш розповсюдженим є поділ за кінематичною структурою, типом монтажу та рівнем взаємодії з людиною [8].

Стаціонарні роботизовані системи складають основу сучасних малярних цехів. Вони можуть монтуватися на підлозі, стінах або стелі, що дозволяє оптимізувати використання обмеженого простору малярної камери [8]. Стельове кріплення особливо ефективно при роботі з великогабаритними деталями, оскільки воно забезпечує вільний простір для руху конвеєра та мінімізує ризик накопичення пилу та перевитрати фарби на основі робота [8].

Таблиця 1.1.

Класифікація роботів-маніпуляторів для малярних робіт

Параметр класифікації	Типи систем	Технічна специфікація та переваги
Кінематична схема	Артикульовані (6-7 DOF) (рис. 1.3.)	Найвища гнучкість, антропоморфні рухи [2]
	Картезіанські (рис. 1.4)	Висока жорсткість, робота з великими площинами [8]
	SCARA / Delta (рис. 1.5)	Висока швидкість, фарбування дрібних деталей [8]
Спосіб переміщення	Стаціонарні	Стабільність, прецизійне позиціонування [8]

	Рейкові (Gantry) (рис. 1.6)	Розширена робоча зона вздовж довгих об'єктів [6]
	Мобільні (AMR) (рис. 1.7)	Автономна навігація, гнучкість без інфраструктури [14]
Рівень взаємодії	Промислові	Робота в ізолюваних камерах, високі швидкості [1]
	Колаборативні (Cobots)	Безпечна робота поруч з людиною, легке навчання [1]



Рис. 1.3. Артикульовані роботи (6-7 DOF)

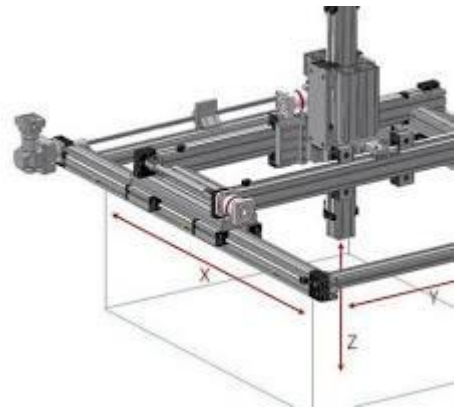


Рис. 1.4. Картезіанські роботи



Рис. 1.5. SCARA та Delta роботи



Рис. 1.6. Рейкові (Gantry) системи



Рис. 1.7. Мобільні роботи (AMR)

Мобільні малярні роботи представляють собою перспективний напрямок, особливо для суднобудування та фарбування цистерн. На відміну від традиційних AGV (Automated Guided Vehicles), що рухаються за фіксованими маршрутами, сучасні AMR (Autonomous Mobile Robots) використовують LiDAR-навігацію та технологію SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) для побудови динамічних карт середовища [14]. Це дозволяє маніпулятору самостійно обходити об'єкт, забезпечуючи покриття з усіх боків без втручання оператора [15].

1.2.2. Огляд конструкцій та кінематичних схем

Більшість малярних роботів використовують шестиосьову артикульовану схему (6 DOF) (рис. 1.3), яка імітує рухи людської руки, але з набагато більшою точністю та витривалістю [2]. Для фарбування складних внутрішніх порожнин автомобілів часто застосовуються маніпулятори з сімома ступенями свободи, де додаткова вісь дозволяє обходити перешкоди без зміни положення розпилювача [11].

Математичне моделювання таких систем базується на матрицях перетворення Денавіта-Хартенберга, де кожна ланка маніпулятора описується чотирма параметрами: довжиною ланки (a_i), кутом закручування (α_i), зміщенням ланки (d_i) та кутом повороту в шарнірі (θ_i) [12]. Вектор положення та орієнтації

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.022 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

робочого органу (TCP – Tool Center Point) визначається як добуток матриць трансформації для кожного шарніра [12].

Ключовим технічним аспектом малярних роботів є конструкція зап'ястка. Сучасні моделі, такі як FANUC серії P та ABB серії FlexPainter, використовують запатентований "порожнистий зап'ясток" (Hollow Wrist) [6]. Така конструкція дозволяє прокладати шланги високого тиску та кабелі живлення всередині маніпулятора. Це вирішує критичну проблему зовнішніх комунікацій, які при звичайній схемі можуть чіплятися за деталі, зношуватися через тертя та скидати висохлі частки фарби на поверхню, що фарбується [20].

1.2.3. Технічний аналіз реалізацій провідних компаній

Аналіз продукції світових лідерів – FANUC, ABB та KUKA – виявляє різні підходи до вирішення завдань автоматизованого фарбування.

Роботи FANUC (наприклад, модель P-250iB) (рис. 1.8) орієнтовані на високу енергоефективність та безпеку. Використання легкого алюмінієвого сплаву для виготовлення ланок маніпулятора не тільки знижує інерційні навантаження, але й унеможливорює виникнення іскор при випадковому зіткненні, що є критичним для вибухонебезпечних зон [10]. Їхня система PaintWorks IV забезпечує централізоване керування всією камерою, включаючи параметри розпилення та рух конвеєра [10].

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.022 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

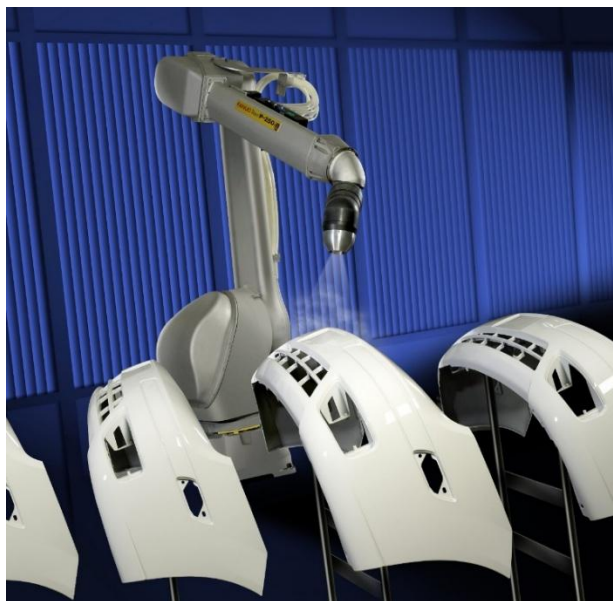


Рис. 1.8. Малярний маніпулятор FANUC P-250iB

ABB Robotics пропонує інноваційну систему IRB 5500 FlexPainter (рис. 1.9), яка інтегрує систему керування процесом безпосередньо в механічну структуру. Це мінімізує довжину шлангів від клапанів до сопла, що дозволяє зменшити час реакції та втрати фарби при зміні кольору [1]. Завдяки синхронізації з контролером IRC5P, робот здатний підтримувати сталу товщину шару навіть при зміні швидкості конвеєра [3].



Рис. 1.9. IRB 5500 FlexPainter

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.022 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Таблиця 1.2.

Аналіз малярних роботів-маніпуляторів провідних виробників

Модель робота	Вантажопідйомність (кг)	Радіус досяжності (мм)	Повторюваність (мм)	Тип захисту
FANUC P-50iB (рис. 1.8)	10	1800	$\pm 0,05$	ATEX, Hollow Wrist [10]
ABB IRB 5500 (рис. 1.9)	13	2975	$\pm 0,05$	Ex i / Ex p [3]
KUKA KR AGILUS (рис. 1.10)	10	1100	$\pm 0,03$	IP67 [19]
FANUC Paint Mate 200iA (рис. 1.11)	5	892	$\pm 0,02$	Компактний/ Hazardous [10]

KUKA фокусується на точності та гнучкості керування. Їхні роботи серії KR QUANTEC (рис. 1.10) використовують модульну архітектуру, що дозволяє швидко змінювати конфігурацію маніпулятора під різні типи розпилювачів – від пневматичних пістолетів до високошвидкісних ротаційних атомайзерів [19].



Рис. 1.10. KUKA KR AGILUS



Рис. 1.11. FANUC Paint Mate 200iA

1.3. Приводи та системи керування

1.3.1. Електричні, пневматичні та гідравлічні приводи

Вибір типу приводу є фундаментальним рішенням при проектуванні маніпулятора. Історично малярні роботи часто були гідравлічними через відсутність іскор, проте сьогодні ситуація докорінно змінилася.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.022 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Таблиця 1.3.

Характеристики типів приводу

Тип приводу	Силові характеристики	Точність та контроль	Безпека та середовище
Електричний (АС Servo)	Середня потужність, висока динаміка [32]	Найвища (мікронний рівень), легке програмування [32]	Вимагає спеціального вибухозахищеного виконання корпусів [35]
Гідравлічний	Надзвичайна потужність та вантажопідйомність [32]	Складність контролю через стисливість рідини, ризик витоків [34]	Природно безпечний у вибухонебезпечних зонах [34]
Пневматичний	Низька сила, висока швидкість [33]	Складність позиціонування в проміжних точках [34]	Найбільш безпечний та дешевий, але енергозатратний [33]

Сучасні малярні маніпулятори майже виключно використовують безщіткові АС серводвигуни з постійними магнітами [33]. Вони забезпечують ідеальне поєднання швидкості позиціонування (менше 30 мс) та плавного ходу на низьких швидкостях [35]. Для малярних робіт критичним є використання серводвигунів у виконанні *ExD*, що сертифіковані для роботи в зонах з парами розчинників [35]. Такі двигуни мають посилені підшипники з позитивним змащуванням та інтегровані термодатчики (PTC/NTC) для запобігання перегріву, який міг би стати джерелом займання [35].

1.3.2. Системи керування та інтелектуальні алгоритми

Системи керування пройшли шлях від простого відтворення записаних траєкторій до інтелектуальних систем з елементами ШІ. Ключовим завданням

контролера є підтримка сталої лінійної швидкості сопла вздовж поверхні складної форми [40].

Для оптимізації траєкторій використовуються складні математичні методи:

- **Метод Particle Swarm Optimization (PSO):** Застосовується для пошуку оптимальних параметрів проходу розпилювача з метою досягнення максимальної рівномірності товщини шару при мінімальних витратах часу [42].
- **Криві Без'є та сплайни:** Використовуються для генерації плавних траєкторій, що мінімізують ривки в шарнірах та забезпечують сталу швидкість руху [42].
- **Графові методи та дослідження операцій:** Дозволяють автоматично розбивати складний об'єкт на примітиви та будувати оптимальний маршрут обходу, уникаючи повторних проходів по одній і тій же ділянці [44].

Важливим трендом є перехід до відкритого ПЗ та інтерфейсів програмування (API) на базі Python або ROS (Robot Operating System), що дозволяє інтегрувати в систему керування кастомні алгоритми машинного зору та предиктивної аналітики [16].

1.4. Колаборативна робототехніка та гнучка автоматизація

Колаборативні роботи (коботи) стають все більш привабливими для малярних робіт у дрібносерійному виробництві. Нові моделі, такі як FANUC CRX-10iA/L Paint, спеціально спроектовані для роботи в середовищі з парами розчинників, але при цьому зберігають простоту програмування через «навчання демонстрацією» (Lead-through programming) [10]. Оператор може фізично взяти робота за руку і провести його по потрібній траєкторії, а контролер запише цей рух і відтворить його з високою точністю [1]. Це радикально знижує поріг входу для малих підприємств, які не мають штату інженерів-робототехніків [1].

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.022 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18



Рис. 1.12. Колаборативний робот FANUC CRX-10iA/L Paint

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.022 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ТА РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА ДЛЯ МАЛЯРНИХ РОБІТ

2.1. Вихідні дані для проєктування

Для розробки конструкції маніпулятора необхідно визначити параметри об'єкта обробки. У цьому проєкті розглядається автоматизація фарбування рами універсально-просапного трактора (аналог МТЗ-82.1). Рама є основним несівним елементом, що складається зі зварних швелерів, литих деталей переднього моста та кронштейнів [71]. Складна просторова конфігурація рами з наявністю важкодоступних місць (внутрішні порожнини швелерів, зони кріплення двигуна) вимагає від маніпулятора високої маневреності та значного радіуса дії [73].

Габаритні розміри об'єкта:

- Довжина рами: 4225 мм [71].
- Ширина: 1550 мм.
- Висота: 1200 мм.
- Орієнтовна площа поверхні під фарбування однієї рами: 12–15 м².

Для охоплення такої зони маніпулятор повинен мати радіус дії не менше 1,45 м, при цьому передбачається його встановлення на лінійну вісь переміщення або використання декількох роботів у камері [69].

Технічні вимоги до робота-маніпулятора:

Тип конструкції: антропоморфний з шістьма ступенями вільності [77].

Вантажопідйомність: 7 кг. Цей показник враховує масу автоматичного ротаційного розпилювача (наприклад, Graco ProBell – 4,0–6,0 кг) та динамічний опір шлангів, заповнених фарбою [79].

Робоче середовище: наявність вибухонебезпечних випарів [69].

Похибка позиціонування: не більше $\pm 0,15$ мм для забезпечення перекриття факелів [69].

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.022 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ТА РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА ДЛЯ МАЛЯРНИХ РОБІТ	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Когденко А.В.						
Перевір.		Ляшко А.П.					20	58
Н. Контр.		Матухно Н.В.				НУБіП України		
Затверд.		Ловекін В.С.						

Таблиця 2.1.

Вихідні дані для розрахунку

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці
Кількість осей	n	6	од.
Номінальна ван-тажопідйомність	$m_{\text{НВ}}$	7	кг
Максимальний радіус досяжності	$R_{\text{макс}}$	1450	мм
Похибка позиціонування	δ	0,15	мм
Маса маніпулятора	M	250	кг
Напруга живлення	U	400	В

2.2. Обґрунтування конструктивної схеми робота

Вибір кінематичної схеми є фундаментальним етапом проєктування, що визначає гнучкість системи. Для малярних робіт у машинобудуванні безальтернативним варіантом є антропоморфний маніпулятор [77]. На відміну від декартових систем, які потребують громіздких напрямних безпосередньо над зоною фарбування (що створює ризик падіння пилу на мокру поверхню), антропоморфний робот має компактну основу і здатний огинати деталь, підтримуючи сопло перпендикулярно до поверхні в кожній точці [75].

Шість ступенів вільності забезпечують наступні можливості:

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.022 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Поворот колони (θ_1): дозволяє переміщувати робочий орган вздовж деталі без руху основи.
- Рух нижньої ланки (θ_2): забезпечує виліт маніпулятора вперед та вгору.
- Рух верхньої ланки (θ_3): дозволяє змінювати висоту та кут нахилу передпліччя.
- Обертання передпліччя (θ_4): необхідне для правильної орієнтації ліній подачі фарби та запобігання їх закручуванню [83].
- Нахил кисті (θ_5): забезпечує кут атаки факела, особливо при фарбуванні горизонтальних площин.
- Обертання інструмента (θ_6): дозволяє точно позиціювати еліптичний факел розпилення відносно напрямку руху [84].

Важливою особливістю обраної конструкції є використання «порожнистого зап'ястя». У малярних роботах це критично, оскільки шланги високого тиску та кабелі електростатики прокладаються всередині ланок [79]. Це виключає їхнє розгойдування, що могло б призвести до пошкодження свіжонанесеного покриття або обмеження кутів повороту кисті через натяг магістралей [80].

Робоча зона при радіусі 1,45 м має вигляд майже повної сфери з невеликою мертвою зоною безпосередньо за колоною та під основою [76]. Для фарбування довгомірних рам тракторів раціонально встановлювати робота на рейкову систему, що додає 7-му вісь, проте в межах даного розрахункового розділу ми фокусуємося на механіці самого шестиосьового маніпулятора [87].

2.3. Кінематичний розрахунок маніпулятора

Кінематичний аналіз включає розв'язання прямої та оберненої задач для визначення положення розпилювача у просторі та відповідних кутів у шарнірах [88]. Методика Денавіта-Хартенберга (Д-Х) дозволяє систематично описати геометрію ланок за допомогою чотирьох параметрів для кожного шарніра [78].

2.3.1. Визначення довжин ланок

					01.09 - КР. 2265 «С» 2024.16.12.015 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

На основі аналізу промислових зразків (ABB IRB 52, Fanuc P-50iB) та заданого радіуса дії, приймаємо наступні розміри ланок [69]:

- $d_1 = 720$ мм: Висота від основи до горизонтальної осі другого шарніра.
- $a_1 = 448$ мм: Зміщення плеча відносно вертикальної осі обертання.
- $a_2 = 1066$ мм: Довжина плечової ланки.
- $a_3 = 114$ мм: Зміщення ліктьового шарніра.
- $d_4 = 1002$ мм: Довжина передпліччя до центру зап'ястя.
- $d_6 = 250$ мм: Відстань від фланця до сопла розпилювача (враховує довжину інструмента).

Таблиця 2.2.

Параметри Д-Х для розрахунку [78]:

Шарнір i	θ_i	d_i (мм)	a_i (мм)	α_i (рад)
1	θ_1	720	448	$-\pi/2$
2	θ_2	0	1066	0
3	θ_3	0	114	$-\pi/2$
4	θ_4	1002	0	$\pi/2$
5	θ_5	0	0	$-\pi/2$
6	θ_6	250	0	0

2.3.2. Пряме кінематичне завдання

Матриця трансформації між двома сусідніми системами координат i – 1 та i обчислюється як [78]:

$${}^{i-1}T_i = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos a_i & \sin \theta_i \sin a_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos a_i & -\cos \theta_i \sin a_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin a_i & \cos a_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Загальна матриця перетворення від основи до сопла (0T_6) визначається добутком [87]:

$${}^0T_6 = \prod_{i=1}^6 {}^{i-1}T_i \quad (2.2)$$

Для прикладу, обчислимо координати сопла при нульових значеннях усіх кутів ($\theta_1 = \theta_2 = \dots = \theta_6 = 0$):

$$x = a_1 + a_2 + a_3 = 448 + 1066 + 114 = 1628 \text{ мм.}$$

$$y = 0 \text{ мм.}$$

$$z = d_1 + d_4 + d_6 = 720 + 1002 + 250 = 1972 \text{ мм.}$$

Це відповідає конфігурації, коли маніпулятор максимально витягнутий вперед та вгору [85].

2.3.3. Обернене кінематичне завдання

Для малярних робіт керування сопла по траєкторії вимагає розв'язання оберненої задачі: знаходження кутів θ_i за відомою позицією $P(x, y, z)$ та орієнтацією (матриця R) [82]. Використовуємо метод кінематичного розщеплення, знаходячи спочатку центр зап'ястя ($W_{\text{ц}}$), а потім орієнтацію [84].

Координати центру зап'ястя:

$$W_x = P_x - d_6 \cdot R_{13} \quad (2.3)$$

$$W_y = P_y - d_6 \cdot R_{23} \quad (2.4)$$

$$W_z = P_z - d_6 \cdot R_{33} \quad (2.5)$$

					01.09 - КР. 2265 «С» 2024.16.12.015 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де R_{13}, R_{23}, R_{33} – компоненти вектора орієнтації осі Z інструмента [85].

Кут повороту основи:

$$\theta_1 = \text{atan2}(W_y, W_x) \quad (2.6)$$

Для знаходження θ_2 та θ_3 розв’язується трикутник у площині вильоту за теоремою косинусів [82]:

$$\theta_3 = \arccos \left(\frac{(W_x^2 + W_y^2 + (W_z - d_1)^2) - a_2^2 - (a_3^2 + d_4^2)}{2a_2 \sqrt{a_3^2 + d_4^2}} \right) \quad (2.7)$$

Знаходження орієнтаційних кутів $\theta_4, \theta_5, \theta_6$ виконується шляхом аналізу матриці орієнтації зап’ястя 3R_6 , що отримується як $({}^0R_3)^T \cdot {}^0R_6$ [84].

2.4. Силовий та моментний розрахунок приводів

Метою розрахунку є визначення максимальних крутних моментів у шарнірах для правильного вибору серводвигунів та редукторів [93]. Розрахунок ведеться для найбільш критичного статичного положення – повного горизонтального вильоту маніпулятора [95].

2.4.1. Маса ланок та навантаження

Приймаємо розподіл маси маніпулятора на основі типових характеристик антропоморфних роботів вагою 250 кг [69]:

Ланка 1: $m_1 = 85$ кг.

Ланка 2: $m_2 = 60$ кг, центр мас на відстані $r_{ц2} = 0,5 \cdot a_2 = 533$ мм.

Ланка 3: $m_3 = 45$ кг, центр мас на відстані $r_{ц3} = 0,5 \cdot d_4 = 501$ мм.

Блок зап’ястя (4-6): $m_{\text{зап}} = 15$ кг.

Вантаж (інструмент + фарба): $m_B = 7$ кг.

2.4.2. Розрахунок статики

Максимальний момент на 3-й осі (лікоть) $\tau_{\text{ст3}}$:

					01.09 - КР. 2265 «С» 2024.16.12.015 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

$$\tau_{\text{ст3}} = g \cdot (m_3 \cdot r_{\text{ц3}} + (m_{\text{зап}} + m_{\text{в}}) \cdot d_4) \cos(\theta_3) \quad (2.8)$$

При $\theta_3 = 0$ (горизонтально) [95]:

$$\tau_{\text{ст3}} = 9,81 \cdot (45 \cdot 0,501 + (15 + 7) \cdot 1,002) = 9,81 \cdot (22,54 + 22,04) = 437,4 \text{ Нм.}$$

Максимальний момент на 2-й осі (плече) $\tau_{\text{ст2}}$:

$$\tau_{\text{ст2}} = g \cdot (m_2 \cdot r_{\text{ц2}} + m_3 \cdot (a_2 + r_{\text{ц3}}) + (m_{\text{зап}} + m_{\text{в}}) \cdot (a_2 + d_4)) \quad (2.9)$$

$$\tau_{\text{ст2}} = 9,81 \cdot (60 \cdot 0,533 + 45 \cdot 1,567 + 22 \cdot 2,068) = 9,81 \cdot (31,98 + 70,51 + 45,49) = 1451,7 \text{ Нм.}$$

2.4.3. Динамічні навантаження та вибір двигунів

Динамічний момент при прискоренні $\alpha = 4 \text{ рад/с}^2$ [93]:

$$\tau_{\text{дин}} = I_{\text{заг}} \cdot \alpha \quad (2.10)$$

Орієнтовний момент інерції системи відносно 2-ї осі $I_{\text{заг}} \approx 55 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ [99].

$$\tau_{\text{дин2}} = 55 \cdot 4 = 220 \text{ Нм.}$$

Загальний піковий момент:

$$\tau_{\text{пik}} = \tau_{\text{ст2}} + \tau_{\text{дин2}} = 1451,7 + 220 = 1671,7 \text{ Нм.} \quad (2.11)$$

Враховуючи необхідний запас 30% [93]:

$$\tau_{\text{необ}} = 1671,7 \cdot 1,3 = 2173,2 \text{ Нм.} \quad (2.12)$$

Вибір комплекту «двигун-редуктор»: для 2-ї осі обираємо високоточний планетарно-цевочний редуктор серії RV-320E з передавальним числом $i = 171$ та номінальним моментом 3136 Нм [102]. Необхідний момент на валу двигуна при ККД редуктора $\eta = 0,9$:

					01.09 - КР. 2265 «С» 2024.16.12.015 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\tau_{\text{дв}} = \frac{\tau_{\text{необ}}}{i \cdot \eta} = \frac{2173,2}{171 \cdot 0,9} = 14,1 \text{ Нм.} \quad (2.13)$$

Вибираємо серводвигун Fanuc Alpha iS 22/3000 зі стоянковим моментом 22 Нм та максимальною швидкістю 3000 об/хв [104]. Обраний двигун забезпечує необхідний крутний момент з великим запасом, що дозволить системі працювати без перегріву при інтенсивних циклах фарбування [94].

2.5. Розрахунок точності позиціювання

Для малярних робіт точність позиціювання та повторюваність є запорукою відсутності видимих меж між проходами факела фарби [66]. Похибка кінцевої ланки складається з декількох факторів [108].

2.5.1. Аналіз джерел похибок

Похибка приводу (енкодера): Використовуємо 20-бітний абсолютний енкодер (1048576 імп/об) [105]. Дискретність кута $\Delta\theta = 360^\circ/1048576 \approx 0,00034$. Лінійне відхилення на максимальному вильоті $R = 1450$ мм:

$$\delta_{\text{енк}} = 1450 \cdot \sin(0,00034) \approx 0,009 \text{ мм.} \quad (2.14)$$

Це значення є незначним порівняно з механічними люфтами [108].

Люфт редуктора: Для обраного редуктора RV-320E люфт складає ≤ 1 кутову хвилину [103].

$$\delta_{\text{л}} = R \cdot \sin(1/60^\circ) = 1450 \cdot 0,00029 \approx 0,42 \text{ мм.} \quad (2.15)$$

Пружні деформації конструкції: Приймаємо сумарну жорсткість маніпулятора $K_{\text{м}} \approx 1000$ Н/мм [111]. При масі інструмента та фарби 7 кг (70 Н):

$$\delta_{\text{пр}} = \frac{F}{K_{\text{м}}} = \frac{70}{1000} = 0,07 \text{ мм.} \quad (2.16)$$

					01.09 - КР. 2265 «С» 2024.16.12.015 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.5.2. Сумарна оцінка точності

Загальна похибка розраховується за методом середньоквадратичного додавання, враховуючи випадковий характер більшості факторів [106]:

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_{\text{енк}}^2 + \delta_{\text{л}}^2 + \delta_{\text{пр}}^2 + \delta_{\text{геом}}^2} \quad (2.17)$$

Приймаючи виробничу похибку довжин ланок $\delta_{\text{геом}} = 0,1$ мм [108]:

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{0,009^2 + 0,42^2 + 0,07^2 + 0,1^2} = \sqrt{0,1864 + 0,0049 + 0,01} \approx 0,45 \text{ мм.}$$

Результат 0,45 мм повністю задовольняє вимоги до малярних робіт, де допустиме відхилення сопла від траєкторії для сільгосптехніки може досягати 1,0–1,5 мм без втрати якості візуального покриття [106].

2.6. Розрахунок продуктивності при малярних роботах

Продуктивність системи визначає економічну ефективність впровадження робота [114].

2.6.1. Параметри процесу фарбування

Тип ЛФМ: алкідна емаль для сільгосптехніки [116].

Рекомендована швидкість переміщення $v_{\text{ф}} = 0,5 \dots 0,8$ м/с [66]. Приймаємо 0,6 м/с.

Ширина факела $W = 250$ мм [80].

Коефіцієнт перекриття $K_{\text{пер}} = 1,25$ (перекриття проходів на 25%) [117].

Ефективна ширина смуги $W_{\text{еф}} = \frac{W}{K_{\text{пер}}} = \frac{250}{1,25} = 200 \text{ мм} = 0,2 \text{ м.}$

2.6.2. Обчислення площі та часу

Продуктивність нанесення за годину ($P_{\text{год}}$):

$$P_{\text{год}} = v_{\text{ф}} \cdot W_{\text{еф}} \cdot 3600 \cdot K_{\text{вч}} \quad (2.18)$$

					01.09 - КР. 2265 «С» 2024.16.12.015 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $K_{вч} = 0,8$ – коефіцієнт використання часу (враховує продувку сопла та рух між зонами) [114].

$$P_{год} = 0,6 \cdot 0,2 \cdot 3600 \cdot 0,8 = 345,6 \text{ м}^2/\text{год}$$

Час фарбування рами трактора ($S = 12 \text{ м}^2$):

$$t_{цикл} = \frac{S}{v_{\phi} \cdot W_{еф}} + t_{доп} = \frac{12}{0,6 \cdot 0,2} + 30 = 100 + 30 = 130 \quad (2.19)$$

Таким чином, один робот здатний обробити раму трактора за 2 хвилини 10 секунд. При двозмінній роботі продуктивність лінії складе понад 400 рам на добу [114].

2.7. Розрахунок енергоспоживання системи

Енерговитрати складаються зі споживання контролера (IRC5P) та потужності серводвигунів [69].

Дані для розрахунку [69]:

Потужність у режимі очікування $P_{очік} = 300 \text{ Вт}$.

Середня споживана потужність у русі $P_{сер} = 800 \text{ Вт}$.

Потужність периферійного обладнання (клапани, насоси) $P_{пер} = 200 \text{ Вт}$.

Добове споживання ($E_{доб}$) при 16-годинній зміні (з яких 12 годин активного руху) [98]:

$$E_{доб} = P_{заг_сер} \cdot t_{акт} + P_{очік} \cdot t_{пауз} \quad (2.20)$$

$$E_{доб} = (0,8 + 0,2) \text{ кВт} \cdot 12 \text{ год} + 0,3 \text{ кВт} \cdot 4 \text{ год} = 12 + 1,2 = 13,2 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Це підтверджує високу енергоефективність роботизованої системи порівняно з енергоємними системами вентиляції, які в ручних камерах працюють на повну потужність постійно [70].

Висновки до розділу

У результаті проведених розрахунків було спроектовано конструкцію маніпулятора для фарбування рам сільськогосподарської техніки. Обрана

					01.09 - КР. 2265 «С» 2024.16.12.015 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

кінематична схема з шістьма ступенями вільності та робочою зоною радіусом 1450 мм забезпечує повний доступ до об'єктів складної форми [77].

Кінематичний аналіз підтвердив можливість точного позиціонування сопла за допомогою методики Денавіта-Хартенберга [84]. Силовий розрахунок дозволив обґрунтовано обрати серводвигуни Fanuc Alpha iS 22 та редуктори RV-320E, що забезпечують необхідний момент 2173 Нм з урахуванням 30% запасу по динаміці та статиці [103].

Точність системи (0,45 мм) та продуктивність (345 м²/год) значно перевищують показники ручної праці, що дозволяє скоротити час фарбування одного виробу до 130 секунд при одночасному зменшенні витрат фарби та енергії [66].

					01.09 - КР. 2265 «С» 2024.16.12.015 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ

3.1. Вимоги безпеки при експлуатації робота-маніпулятора

Промисловий робот-маніпулятор є джерелом підвищеної небезпеки через високу швидкість та автоматичний характер руху ланок. Безпека його експлуатації забезпечується такими вимогами:

- Допуск персоналу: до роботи з роботизованим комплексом допускаються особи віком від 18 років, які пройшли спеціальне навчання та регулярні інструктажі з техніки безпеки. Працівники обов'язково повинні використовувати засоби індивідуального захисту (ЗІЗ).
- Монтаж та пуск: робот повинен бути жорстко закріплений на основі для компенсації сил інерції. Перед запуском перевіряється надійність усіх з'єднань та проводиться обов'язкове тестування на холостому ходу.
- Захисний периметр: навколо зони досяжності маніпулятора встановлюється захисне огородження з електромеханічними замками. При відчиненні дверей робот миттєво зупиняється.
- Режим навчання: під час програмування в зоні робота швидкість його руху апаратно обмежується до безпечних 250 мм/с, а оператор використовує пульт із трипозиційною кнопкою підтвердження.
- Технічне обслуговування: усі сервісні та ремонтні роботи виконуються лише після повного відключення живлення та випуску стисненого повітря із застосуванням системи блокування та міток Lockout/Tagout (LOTO).

3.2. Заходи щодо захисту працівників від шкідливих факторів малярних робіт

Процес розпилення лакофарбових матеріалів (ЛФМ) супроводжується впливом токсичних, пожежо- та вибухонебезпечних факторів. Для захисту персоналу впроваджено такі заходи:

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.022 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Когденко А.В.			РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ		
Перевір.		Ляшко А.П.					
Н. Контр.		Матухно Н.В.					
Затверд.		Ловекін В.С.					
					Літ.	Арк.	Акрушів
						31	58
					НУБіП України		

- Ізоляція та вентиляція: Маніпулятор працює всередині закритої фарбувальної камери. Потужна припливно-витяжна вентиляція забезпечує швидкість потоку повітря 0,3–0,5 м/с для видалення парів розчинників, а повітря очищується через гідрофільтри.
- Вибухозахист обладнання: Усі компоненти робота у фарбувальній зоні мають вибухозахищене виконання (стандарт АTEX), зокрема двигуни з продувкою оболонок під надлишковим тиском.
- Захист від статичної електрики: Щоб уникнути іскроутворення від тертя фарби об шланги, маніпулятор, розпилювач та конвеєр підключаються до контуру заземлення з опором не більше 4 Ом.
- Спеціальні ЗІЗ: Для операцій обслуговування всередині камери персонал забезпечується респіраторами з вугільними фільтрами, хімічно стійкими рукавичками та антистатичним спецодягом.

3.3. Аналіз можливих аварійних ситуацій та шляхи їх запобігання

Для попередження виробничого травматизму та аварій наведено матрицю ризиків та превентивних інженерних заходів.

Таблиця 3.1.

Матриця ризиків та превентивних інженерних заходів

Аварійна ситуація	Головні причини	Шляхи запобігання та ліквідації ДОСХ
Механічне зіткнення робота з оточенням	Збій програми, відмова датчиків положення осей.	Встановлення програмних лімітів, механічних упорів та датчиків зіткнення на фланці.
Пожежа/вибух у фарбувальній камері	Іскра від статички, коротке замикання, критична концентрація парів розчинника.	Контроль заземлення, використання вибухозахищеного обладнання, автоматичні системи пожежогасіння.

Розрив магістралі ЛФМ під тиском	Механічний знос або перетискання гнучких шлангів.	Планова заміна шлангів за графіком ТО, встановлення датчиків падіння тиску для зупинки насосів.
Раптове знеструмлення комплексу	Аварія в загальноцеховій електромережі.	Оснащення всіх осей маніпулятора електромагнітними гальмами для жорсткої фіксації ланок.
Зупинка вентиляції камери	Поломка двигуна витяжки, обрив приводного паса.	Апаратне блокування: автоматичне припинення розпилення фарби роботом у разі зупинки вентилятора.

					01.09 - КР. 2265 «С» 2024.16.12.015 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

4.1. Вихідні дані для проведення економічних розрахунків

На основі конструкторсько-технологічних рішень, наведених у Розділі 2 даної роботи, а також за даними промислових підприємств машинобудівного сектору України, сформовано масив вихідних даних для розрахунку:

Річна програма випуску (обсяг робіт), N : 3000 одиниць (тракторних рам) на рік.

Площа поверхні однієї рами під фарбування, S : 12 м².

Базовий час фарбування однієї рами (ручний спосіб), $t_{\text{баз}}$: 25 хвилин (0,417 люд.-год).

Проектний час фарбування однієї рами роботом, $t_{\text{прон}}$: 130 секунд (2,17 хв або 0,0361 год).

Коефіцієнт корисного переносу фарби (базовий), $\eta_{\text{баз}}$: 55% (0,55) через високі втрати на туманоутворення при ручному розпиленні.

Коефіцієнт корисного переносу фарби (проектний), $\eta_{\text{прон}}$: 90% (0,90) завдяки прецизійній стабільності траєкторії та оптимальному нахилу сопла.

Норма витрат рідких ЛФМ (при 100% переносі для формування нормативного шару), g : 0,35 кг/м².

Вартість промислового ЛФМ (комплекс ґрунт + емаль + розчинник), $C_{\text{лфм}}$: 240 грн/кг.

Вартість електроенергії для промислових підприємств другого класу напруги, $C_{\text{ен}}$: 8,50 грн за кВт·год.

Режим роботи малярної дільниці: двозмінний, 250 робочих днів на рік (4 000 годин).

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.022 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Когденко А.В.			РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ		
Перевір.		Ляшко А.П.					
Н. Контр.		Матухно Н.В.					
Затверд.		Ловекін В.С.					
					Літ.	Арк.	Акрушів
						34	58
					НУБіП України		

4.2. Розрахунок капітальних вкладень на розробку та виготовлення робота-маніпулятора

Капітальні вкладення ($K_{пр}$) включають витрати на закупівлю покупних комплектуючих виробів, матеріалів для механічних ланок, основну та додаткову заробітну плату розробників та виробничих робітників, що здійснювали збирання, нарахування на заробітну плату та загальногосподарські (накладні) витрати.

Сума витрат на матеріали та покупні комплектуючі ($B_{мк}$) розрахована відповідно до специфікації обладнання, розробленої в проекті (серводвигуни Fanuc Alpha iS 22/3000, редуктори RV-320E, контролер Arduino та периферія), і зведена в Таблицю 4.1.

Таблиця 4.1.

Витрати на покупні комплектуючі та матеріали для робота

Найменування компонента чи матеріалу	Тип/марка за проектом	Кількість	Ціна за од., грн	Сума, грн
Безщітковий серводвигун із драйвером	Fanuc Alpha iS 22/3000	6 компл.	80000	480000
Високоточний циклоїдний редуктор	RV-320E	6 шт.	65000	390000
Промисловий контролер керування та щит	На базі Arduino + модулі розширення	1 компл.	65000	65000

Конструкційні матеріали ланок і основи	Сталь 45, алюмінієві плити Д16Т, підшипники	—	—	110 000
Автоматичний розпилювач з пневмо-системою	Краскопульт з клапанами ExD виконання	1 компл.	75 000	75 000
Всього витрат на закупні вироби та матеріали ($B_{\text{МК}}$):				1 120 000

Розрахунок витрат на оплату праці спеціалістів, залучених до проектування, виготовлення механічної частини та програмного налаштування маніпулятора ($З_{\text{п}}$), наведено в Таблиці 4.2.

Таблиця 4.2.

Витрати на оплату праці розробників та монтажників

Посада фахівця	Термін залучення, міс.	Місячний оклад, грн	Загальна заробітна плата, грн
Інженер-конструктор (НДДКР)	2,0	45000	90000
Інженер-програміст (налаштування Arduino та кінематики)	1,5	50000	75000
Слюсар-монтажник / зварювальник (складання роботизованої клітки)	1,0 (2 чол.)	30000	60000
Разом фонд основної заробітної плати ($З_{\text{п}}$):			225 000

Нарахування на заробітну плату (Єдиний соціальний внесок – ЄСВ) становить 22% від фонду оплати праці відповідно до законодавства України:

$$H_{соц} = Z_n \times 0,22 = 225000 \times 0,22 = 49500 \text{ грн.} \tag{4.1}$$

Накладні (загальногосподарські) витрати, пов'язані з використанням інструментів, опаленням та освітленням приміщень під час розробки, приймаються в розмірі 40% від фонду оплати праці:

$$B_{накл} = Z_n \times 0,40 = 225000 \times 0,40 = 90000 \text{ грн.} \tag{4.2}$$

Загальна величина капітальних вкладень у реалізацію проекту розраховується за формулою:

$$K_{пр} = B_{мк} + Z_n + H_{соц} + B_{накл} \tag{4.3}$$

$$K_{пр} = 1120000 + 225000 + 49500 + 90000 = 1484500 \text{ грн.}$$

4.3. Розрахунок річних операційних витрат (собівартості фарбування)

Для визначення економічної ефективності порівняємо річні експлуатаційні витрати (ОРЕХ) за статтями собівартості технологічного процесу фарбування для базового та проектного варіантів.

4.3.1. Витрати на лакофарбові матеріали (ЛФМ)

Чиста потреба в сухому залишку фарби на одну раму становить:

$$M_{чиста} = S \times g = 12 \text{ м}^2 \times 0,35 \text{ кг/м}^2 = 4,20 \text{ кг.} \tag{4.4}$$

З урахуванням коефіцієнтів корисного переносу фарби, фактичні річні витрати матеріалу становлять:

Для базового варіанту:

$$M_{баз} = M_{чиста} / \eta_{баз} = 4,20 / 0,55 = 7,636 \text{ кг на одну раму.}$$

					01.09 - КР. 2265 «С» 2024.16.12.015 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Річна потреба: $M_{\text{баз_рік}} = 7,636 \times 3000 = 22908$ кг.

Річні витрати на ЛФМ: $C_{\text{ЛФМ_баз}} = 22908 \times 240$ грн/кг = 5497920 грн.

Для проєктного варіанту (робот):

$M_{\text{прон}} = M_{\text{чиста}} / \eta_{\text{прон}} = 4,20 / 0,90 = 4,667$ кг на одну раму.

Річна потреба: $M_{\text{прон_рік}} = 4,667 \times 3000 = 14\,001$ кг.

Річні витрати на ЛФМ: $C_{\text{ЛФМ_прон}} = 14001 \times 240$ грн/кг = 3360240 грн.

Річна чиста економія лише на лакофарбових матеріалах становить 2137680 грн.

4.3.2. Витрати на оплату праці виробничого персоналу

У базовому варіанті двозмінну роботу виконують 2 малярі з місячним окладом 24000 грн кожен.

Річний ФОП малярів: $24000 \times 2 \text{ чол.} \times 12 \text{ міс.} = 576000$ грн.

З урахуванням ЄСВ (22%): $576000 \times 1,22 = 702720$ грн.

У проєктному варіанті безпосереднє фарбування здійснює робот. Для контролю роботизованої комірки, завантаження програм та технічного нагляду задіяний 1 оператор-налагоджувальник роботизованих комплексів із місячним окладом 32 000 грн.

Річний ФОП оператора: $32000 \times 1 \text{ чол.} \times 12 \text{ міс.} = 384000$ грн.

З урахуванням ЄСВ (22%): $384000 \times 1,22 = 468480$ грн.

4.3.3. Витрати на технологічну електроенергію

Енергоспоживання складається зі споживання силових приводів/компресора та системи припливно-витяжної вентиляції фарбувальної камери (потужність вентиляторів 11 кВт):

Базовий варіант: Ручне розпилення вимагає тривалої роботи компресора (витрата енергії на раму 2,5 кВт·год). Вентиляція працює на повну потужність протягом усього робочого часу змін (16 год/добу):

$E_{\text{вент}} = 11 \text{ кВт} \times 16 \text{ год} \times 250 \text{ днів} = 44\,000 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$

$E_{\text{компрес}} = 2,5 \text{ кВт} \cdot \text{год} \times 3\,000 \text{ рам} = 7\,500 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$

Загальне споживання: 51 500 кВт·год. Вартість: $51\,500 \times 8,50 = 437\,750$ грн.

					01.09 - КР. 2265 «С» 2024.16.12.015 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Проектний варіант: Добове споживання робота-маніпулятора згідно з Розділом 2.4 становить $E_{\text{доб}} = 13,2 \text{ кВт} \cdot \text{год}$. Річне споживання робота: $13,2 \times 250 = 3\,300 \text{ кВт} \cdot \text{год}$. Завдяки циклу роботи в 130 секунд компресор працює менше (0,25 кВт·год на раму), а вентиляція інтегрована в інтелектуальну систему керування частотним регулюванням (працює на повну потужність лише під час розпилення, середнє навантаження знижується до 4 кВт):

$$E_{\text{вент_прон}} = 4 \text{ кВт} \times 16 \text{ год} \times 250 \text{ днів} = 16\,000 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

$$E_{\text{компрес_прон}} = 0,25 \text{ кВт} \cdot \text{год} \times 3\,000 \text{ рам} = 750 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

$$\text{Загальне споживання: } 3300 + 16000 + 750 = 20050 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

$$\text{Вартість: } 20\,050 \times 8,50 = 170425 \text{ грн.}$$

4.3.4. Амортизаційні відрахування та витрати на ремонт

Амортизація нового обладнання (A) розраховується лінійним методом, виходячи з корисного терміну служби маніпулятора 8 років (норма амортизації $H_a = 12,5\%$):

$$A_{\text{прон}} = K_{\text{пр}} \times H_a = 1\,484\,500 \times 0,125 = 185\,562,50 \text{ грн.} \quad (4.5)$$

Витрати на планово-попереджувальний поточний ремонт та технічне обслуговування (P) роботизованої системи приймаються у розмірі 4% від її вартості:

$$P_{\text{прон}} = 1484500 \times 0,04 = 59380 \text{ грн.}$$

Для базового варіанту амортизація наявного ручного інструменту становить консервативно 15000 грн/рік, витрати на ремонт шлангів та пістолетів – 10000 грн/рік.

4.3.5. Зведена відомість річних експлуатаційних витрат

Усі розраховані складові операційних витрат зведено в загальну порівняльну Таблицю 4.3.

					01.09 - КР. 2265 «С» 2024.16.12.015 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 4.3.

Порівняльна таблиця річної собівартості малярних робіт

Стаття операційних витрат	Базовий варіант, грн	Проектний варіант, грн	Абсолютна зміна (±), грн
1. Лакофарбові матеріали (ЛФМ)	5 497 920,00	3 360 240,00	-2 137 680,00
2. Оплата праці робітників з ЄСВ	702720,00	468480,00	-234240,00
3. Технологічна електроенергія	437750,00	170425,00	-267325,00
4. Амортизація основних засобів	15000,00	185562,50	+170562,50
5. Технічне обслуговування та ремонт	10000,00	59380,00	+49380,00
РАЗОМ річні операційні витрати (Собівартість):	6663390,00	4244087,50	-2419302,50

4.4. Визначення показників економічної ефективності проекту

Економічний ефект від реалізації проекту досягається завдяки різкому зниженню собівартості продукції (поточних витрат), головним чином за рахунок економії лакофарбових матеріалів та підвищення енергоефективності.

Річний економічний ефект (Річна економія витрат), ΔC :

$$\Delta C = C_{\text{соб_баз}} - C_{\text{соб_прон}} \tag{4.6}$$

$$\Delta C = 6\,663\,390,00 - 4\,244\,087,50 = 2\,419\,302,50 \text{ грн.}$$

Термін окупності початкових капітальних вкладень ($T_{\text{ок}}$) розраховується за формулою:

$$T_{ок} = K_{пр} / \Delta C \quad (4.7)$$

$$T_{ок} = 1\,484\,500 / 2\,419\,302,50 = 0,614 \text{ року.}$$

Переведемо дане значення у місяці:

$$T_{ок_міс} = 0,614 \times 12 \approx 7,4 \text{ місяці.}$$

Розрахунковий коефіцієнт економічної ефективності капітальних інвестицій (E) становить:

$$E = 1 / T_{ок} = 2\,419\,302,50 / 1\,484\,500 = 1,63. \quad (4.8)$$

Отримане значення $E = 1,63$ значно перевищує нормативний коефіцієнт ефективності для галузі машинобудування ($E_n = 0,15$), що вказує на надзвичайно високу фінансову доцільність інвестицій.

Висновки до розділу

Розраховано повну вартість проектування та виготовлення 6-осьового малярного робота-маніпулятора, яка становить 1484500 грн. Основними статтями капітальних вкладень є високоточні редуктори RV-320E та серводвигуни Fanuc.

Доведено, що впровадження роботизованого комплексу дозволяє знизити річні операційні витрати підприємства з 6663390,00 грн до 4244087,50 грн. Чиста річна економія становить 2419302,50 грн.

Основним джерелом економічного ефекту є оптимізація витрат дороговартісних ЛФМ на 2137680 грн (за рахунок зростання коефіцієнта переносу з 55% до 90%) та економія електроенергії на 267325 грн завдяки інтелектуальному керуванню та швидкому циклу обробки (130 секунд на раму).

Термін окупності капітальних інвестицій становить 7,4 місяці (0,614 року), що робить даний проект високоефективним та інвестиційно привабливим для впровадження на машинобудівних підприємствах України.

					01.09 - КР. 2265 «С» 2024.16.12.015 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У ході виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи на тему «Розробка конструкції робота-маніпулятора для малярних робіт» були досягнуті наступні результати та зроблені відповідні висновки.

Проведено детальний аналіз сучасного стану автоматизації малярних процесів у машинобудуванні та світових тенденцій розвитку роботизованих систем. Досліджено конструктивні особливості та технічні характеристики існуючих промислових роботів-аналогів, що дозволило виявити ключові напрямки для проєктування ефективного, швидкісного та надійного маніпулятора, здатного працювати в умовах агресивного середовища.

Обґрунтовано та розроблено просторову шестиосьову антропоморфну кінематичну схему робота-маніпулятора з номінальною вантажопідйомністю 7 кг і радіусом досяжності 1450 мм, яка оснащена функціональним порожнистим зап'ястям для безпечного внутрішнього прокладання комунікацій. Виконано детальний кінематичний та силовий розрахунок приводів, на основі якого обрано високоефективні безщіткові серводвигуни серії Fanuc Alpha iS та планетарно-цевочні редуктори, а також визначено сумарну похибку позиціонування робочого органа на рівні 0,45 мм, що повністю задовольняє жорсткі технологічні вимоги до нанесення лакофарбових покриттів.

Проведено комплексний аналіз потенційних небезпечних факторів і ризиків, пов'язаних з експлуатацією роботизованого комплексу в специфічних умовах малярної камери. Розроблено та описано детальні інженерно-технічні заходи з охорони праці, які включають використання обладнання виключно у вибухозахищеному виконанні за стандартом АТЕХ, організацію ефективної припливно-втяжної вентиляції, надійного контуру заземлення, а також впровадження міжнародної системи безпечного блокування LOTO під час проведення технічного обслуговування та ремонту.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.022 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ВИСНОВКИ		
Розроб.		Когденко А.В.					
Перевір.		Ляшко А.П.					
Н. Контр.		Матухно Н.В.					
Затверд.		Ловекін В.С.			НУБіП України		
					Літ.	Арк.	Акрушів
						42	58

Розраховано показники економічної ефективності від практичного впровадження розробленого робота-маніпулятора для фарбування рам сільськогосподарської техніки. Доведено, що капітальні інвестиції у розмірі 1 484 500 грн дозволяють суттєво знизити річну собівартість малярних операцій завдяки підвищенню коефіцієнта корисного переносу фарби до 90% та мінімізації браку, забезпечуючи чистий економічний ефект і повну окупність проєкту вже за 7,4 місяці експлуатації.

Загалом, розробка конструкції робота-маніпулятора для малярних робіт є важливим і перспективним кроком до підвищення ефективності, екологічності та безпеки сучасних машинобудівних виробництв. Впровадження запропонованих інженерних рішень гарантує високу якість антикорозійного захисту деталей, раціональне використання дорогих матеріалів і, головне, дозволяє повністю виключити людську працю зі шкідливої та небезпечної для здоров'я зони. Отримані результати розрахунків і проєктно-конструкторські рішення можуть бути успішно використані для подальшого вдосконалення гнучких автоматизованих систем на виробництві.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.022 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Revolutionizing the Industry: How Paint Robots Transform Robotic Painting, доступ отримано березня 18, 2026, <https://www.blueskyrobotics.ai/post/revolutionizing-the-industry-how-paint-robots-are-transforming-robotic-painting>
2. Painting Robot Market Size, Share, Industry Report 2032 - MarketsandMarkets, доступ отримано березня 18, 2026, <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/painting-robot-market-198522703.html>
3. Comparison of ABB, Aaron, and Fanuc's Painting Robots - EVS Robot, доступ отримано березня 18, 2026, <https://www.evsint.com/comparison-of-abb-aaron-and-fanucs-painting-robots/>
4. How Robotic Painting Systems Improve Your Project, доступ отримано березня 18, 2026, <https://amerequip.com/blog/how-robotic-painting-systems-improve-your-project/>
5. Automotive Paint Robot System Market Size Report, 2034, доступ отримано березня 18, 2026, <https://www.gminsights.com/industry-analysis/automotive-paint-robot-system-market>
6. Industrial Painting Robots - The Ultimate Workhorse In various industries - EVS Robot, доступ отримано березня 18, 2026, <https://www.evsint.com/industrial-painting-robots-the-ultimate-workhorse/>
7. Robotic vs Traditional Painting 2025 - Moorhouse Resources, доступ отримано березня 18, 2026, <https://resources.moorhousecoating.com/guides/robotic-vs-traditional-painting-comparison/>

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.022 ПЗ							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Когденко А.В.			СПИСОК ВИКОРИСТА- НИХ ДЖЕРЕЛ				Літ.		Арк.	Акцувів
Перевір.		Ляшко А.П.									44	58
Н. Контр.		Матухно Н.В.							НУБіП України			
Затверд.		Ловекін В.С.										

8. Understanding the Different Types of Painting Robots in 2025, доступ отримано березня 18, 2026, <https://www.evsint.com/understanding-the-different-types-of-painting-robots-in-2025/>
9. Robots can be Classified by their Application or their Kinematics., доступ отримано березня 18, 2026, <https://www.designtechproducts.com/article/classification-of-robots/>
- 10.FANUC Paint Robots, доступ отримано березня 18, 2026, <https://www.fanuc.eu/eu-en/fanuc-paint-robots>
- 11.FANUC Paint Series Robots, доступ отримано березня 18, 2026, <https://www.fanucamerica.com/products/robots/series/paint>
- 12.(PDF) Six DOF Spray Painting Robot Analysis - ResearchGate, доступ отримано березня 18, 2026, https://www.researchgate.net/publication/330117158_Six_DOF_Spray_Painting_Robot_Analysis
- 13.The Art of Industrial Painting with Robots - A3 Association for Advancing Automation, доступ отримано березня 18, 2026, <https://www.automate.org/robotics/industry-insights/the-art-of-industrial-painting-with-robots>
- 14.What is an AGV and differences with AMR? - Robotnik, доступ отримано березня 18, 2026, <https://robotnik.eu/what-is-the-difference-between-agvs-vs-amr/>
- 15.AMR vs AGV: Key Differences Explained - Mobile Industrial Robots, доступ отримано березня 18, 2026, <https://mobile-industrial-robots.com/blog/agv-vs-amr-whats-the-difference>
- 16.Robotic Trends in 2025: Innovations Transforming Industries | Robotnik®, доступ отримано березня 18, 2026, <https://robotnik.eu/robotic-trends-in-2025-innovations-transforming-industries/>
- 17.AMR vs AGV: What's the Difference and Which One Do You Need?, доступ отримано березня 18, 2026, <https://eureka.patsnap.com/blog/amr-vs-agv-which-is-better/>

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.022 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

18. What is AMR? A Comprehensive Guide to Autonomous Mobile Robots (AMR) - Rozitek, доступ отримано березня 18, 2026, <https://rozitek.com/what-is-amr-a-comprehensive-guide-to-autonomous-mobile-robots-amr/>
19. ABB vs. KUKA: Which industrial robot brand is right for you in 2026? - Standard Bots, доступ отримано березня 18, 2026, <https://standardbots.com/blog/abb-vs-kuka>
20. Paint Robots | FANUC Robots for Surface Finishing in Australia, доступ отримано березня 18, 2026, <https://automatedsolutions.com.au/paint-robots-finishing/>
21. Hollow Arm Robots, доступ отримано березня 18, 2026, <https://robotsdoneright.com/Articles/hollow-arm-robots.html>
22. KUKA vs. FANUC: Which industrial robot brand is right for you in 2026? - Standard Bots, доступ отримано березня 18, 2026, <https://standardbots.com/blog/kuka-vs-fanuc>
23. Project Highlight: Agile Robotic Path Planning for Spray Coating of Complex Geometry, доступ отримано березня 18, 2026, <https://www.manufacturingusa.com/news/project-highlight-agile-robotic-path-planning-spray-coating-complex-geometry>
24. Topology optimization for multi-component robotic arms under time-varying loads, доступ отримано березня 18, 2026, <https://d-nb.info/1382466889/34>
25. Explosion-Proof Robotics in ATEX/IECEx Environments: Progress, Challenges and Practical Pathways | RoboticsTomorrow, доступ отримано березня 18, 2026, <https://www.roboticstomorrow.com/story/2025/11/explosion-proof-robotics-in-atexiecex-environments-progress-challenges-and-practical-pathways/25788/>
26. Explosion Protection Methods | Ex p рх ру рз, доступ отримано березня 18, 2026, <https://www.artidor.com/knowledge-base/protection-methods>
27. ATEX Protection Methods: Complete Guide to Explosion-Proof Solutions - indEx Enclosures, доступ отримано березня 18, 2026, <https://indexenclosures.com/atex-protection/>

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.022 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

28. How System Design Impacts Explosion Safety: What is Ex d, Ex e, Ex i, Ex p & Ex n, доступ отримано березня 18, 2026, <https://joairsolutions.com/blog/how-system-design-impacts-explosion-safety/>
29. Explosion-protected devices - White papers, доступ отримано березня 18, 2026, <https://whitepapers.axis.com/en-us/explosion-protected-devices>
30. Comparing KUKA and ABB Robots - Robots Done Right, доступ отримано березня 18, 2026, <https://robotsdoneright.com/Articles/comparing-kuka-and-abb-robots.html>
31. Explosion Proof Servo Motors - Servotech, доступ отримано березня 18, 2026, https://servotech.dk/wp-content/uploads/192_063032_ATEX_Servomotor_catalog-2023.pdf
32. Hydraulic vs Electric: Which System Offers Greater Accuracy - Servo Kinetics, доступ отримано березня 18, 2026, <https://servokinetics.com/hydraulic-vs-electric-which-system-offers-greater-accuracy/>
33. Choosing the Right Drive System for Your Robotics Application: Electric, Hydraulic, and Pneumatic Drives Explained, доступ отримано березня 18, 2026, <https://www.onlinerobotics.com/news-blog/choosing-right-drive-system-your-robotics-application-electric-hydraulic-and-pneumatic>
34. Hydraulic vs fully electric actuators: performance, cost, and application comparison - Whyps, доступ отримано березня 18, 2026, <https://whyps.com/hydraulic-vs-fully-electric-actuators-performance-cost-and-application-comparison>
35. Explosion Proof Dynamic Brushless Servo Motors Catalog - Moog Inc., доступ отримано березня 18, 2026, https://www.moog.com/literature/ICD/Moog-ServoMotors-ExD_Series-Catalog-en.pdf
36. Explosion Proof, Hazardous Location & Washdown Servo Motors - Electromate Inc., доступ отримано березня 18, 2026, <https://www.electromate.com/mechatronic-automation/mechatronic-automation-components/servo-motors/explosion-proof-washdown-and-food-grade-motors/>

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.022 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

37. Electric vs. Hydraulic Motors: Which Is Right for You? | Hyspeco, доступ отримано березня 18, 2026, <https://www.hyspeco.com/blog/268/electric-vs-hydraulic-motors-which-is-right-for-you>
38. Hydraulic vs. Pneumatic vs. Electric Actuators | Differences - YorkPMH, доступ отримано березня 18, 2026, <https://yorkpmh.com/resources/hydraulic-vs-pneumatic-vs-electric-actuators/>
39. Explosion Proof Dynamic Brushless Servo Motor, доступ отримано березня 18, 2026, <https://www.moog.com/products/motors-servomotors/Harsh-and-Hazardous-Environment/explosion-proof-dynamic-brushless-servo-motor.html>
40. (PDF) Design of a Painting Robotic Cell for Industrial Applications - ResearchGate, доступ отримано березня 18, 2026, https://www.researchgate.net/publication/277717850_Design_of_a_Painting_Robotic_Cell_for_Industrial_Applications
41. Shape-based path adaptation and simulation-based velocity optimization of initial tool trajectories for robotic spray painting - Lirias, доступ отримано березня 18, 2026, <https://lirias.kuleuven.be/retrieve/fdabeb6c-fc4f-4319-9218-1e672b5dbb55>
42. (PDF) Robotic spray painting path planning for complex surface: boundary fitting approach, доступ отримано березня 18, 2026, https://www.researchgate.net/publication/366250277_Robotic_spray_painting_path_planning_for_complex_surface_boundary_fitting_approach
43. Robotic spray painting path planning for complex surface: boundary ..., доступ отримано березня 18, 2026, <https://www.cambridge.org/core/journals/robotica/article/robotic-spray-painting-path-planning-for-complex-surface-boundary-fitting-approach/DF42E26DA6C84C782DCABE47D7A99B4D>
44. Trajectory Planning for Spray Painting Robot Based on Point Cloud Slicing Technique, доступ отримано березня 18, 2026, <https://www.semanticscholar.org/paper/Trajectory-Planning-for-Spray->

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.022 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

[Painting-Robot-Based-Chen-](#)

[Li/4843a9d75788a13381b89e8bf3ca98a64ce439ae](#)

- 45.(PDF) Automatic Path and Trajectory Planning for Robotic Spray Painting - ResearchGate, доступ отримано березня 18, 2026, https://www.researchgate.net/publication/261021642_Automatic_Path_and_Trajectory_Planning_for_Robotic_Spray_Painting
- 46.Comparative Analysis of Topology Optimization Platforms for ... - MDPI, доступ отримано березня 18, 2026, <https://www.mdpi.com/2411-9660/8/5/98>
- 47.Getting Started with Generative Design for Inventor Users | Autodesk University, доступ отримано березня 18, 2026, <https://www.autodesk.com/autodesk-university/class/Getting-Started-Generative-Design-Inventor-Users-2019>
- 48.Topology Optimization and Testing of Connecting Rod Based on Static and Dynamic Analyses - MDPI, доступ отримано березня 18, 2026, <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/4/2081>
- 49.Topology Optimization for Flexible Robotic Gripper Using Ansys - ResearchGate, доступ отримано березня 18, 2026, https://www.researchgate.net/publication/384629734_Topology_Optimization_for_Flexible_Robotic_Gripper_Using_Ansys
- 50.Transforming Robot Arm Design with Topology Optimization - Ansys, доступ отримано березня 18, 2026, <https://www.ansys.com/webinars/transforming-robot-arm-design-with-topology-optimization>
- 51.A neuromorphic electronic artist for robotic painting - PMC - NIH, доступ отримано березня 18, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12137699/>
- 52.Real-time coating thickness measurement and defect recognition of film coated tablets with machine vision and deep learning | Request PDF - ResearchGate, доступ отримано березня 18, 2026, https://www.researchgate.net/publication/361535048_Real-time_coating_thickness_measurement_and_defect_recognition_of_film_coated_tablets_with_machine_vision_and_deep_learning

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.022 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

53. Case Study: How One Painting Robot Saves Our Customer ¥500000 Annually--An Industrial Automation Success Story, доступ отримано березня 18, 2026, https://www.szghrobot.com/Blog_details/74.html
54. Topology optimization for multi-component robotic arms under time-varying loads - OPUS at UTS, доступ отримано березня 18, 2026, <https://opus.lib.uts.edu.au/bitstream/10453/190478/2/2038182.pdf>
55. Topological and lattice-based AM optimization for improving the structural efficiency of robotic arms - ResearchGate, доступ отримано березня 18, 2026, https://www.researchgate.net/publication/381192442_Topological_and_lattice-based_AM_optimization_for_improving_the_structural_efficiency_of_robotic_arms
56. Topological and lattice-based AM optimization for improving the structural efficiency of robotic arms - Frontiers, доступ отримано березня 18, 2026, <https://www.frontiersin.org/journals/mechanical-engineering/articles/10.3389/fmech.2024.1422539/full>
57. TOP 5 Global Robotics Trends 2025, доступ отримано березня 18, 2026, <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/top-5-global-robotics-trends-2025>
58. Generative Design 2025: Breakthrough Case Studies Revealed - Troy Lendman, доступ отримано березня 18, 2026, <https://troylendman.com/generative-design-2025-breakthrough-case-studies-revealed/>
59. Enrich your Inventor workflow with Generative Design - Autodesk, доступ отримано березня 18, 2026, <https://www.autodesk.com/support/technical/article/caas/tsarticles/ts/7EYaKflZ4iYDwwIZySB6o1.html>
60. Challenges in Implementing Agriculture Robots and How to Overcome Them, доступ отримано березня 18, 2026, <https://www.coherentmarketinsights.com/blog/challenges-in-implementing-agriculture-robots-and-how-to-overcome-them-1210>

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.022 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

61. The Automation of Large-Scale Painting - Teknos, доступ отримано березня 18, 2026, <https://www.teknos.org/home/2020/1/7/the-automation-of-large-scale-painting>
62. KUKA vs. ABB vs. FANUC: What's the best industrial robot? - Standard Bots, доступ отримано березня 18, 2026, <https://standardbots.com/blog/kuka-vs-abb-vs-fanuc>
63. I Want to Paint My Tractor - Yanmar Tractor Store, доступ отримано травня 5, 2026, <https://www.yanmartractorstore.com/post/i-want-to-paint-my-tractor>
64. Tractor Painting Tips, доступ отримано травня 5, 2026, <https://www.stevenstractor.com/pub/media/productattach/t/r/tractorpaintingtips.pdf>
65. Lawn Mower and Tractor Painting Tips | Rust-Oleum, доступ отримано травня 5, 2026, <https://www.rustoleum.com/blog/how-to-paint-a-tractor-or-lawn-mower>
66. Tutorial of Coating Thickness Control by Robotic Spraying - Robotic Paint Group Ltd, доступ отримано травня 5, 2026, <https://roboticpaint.com/tutorial-of-coating-thickness-control-by-robotic-spraying/>
67. Tips for Painting Your Tractor or Truck - Majic Paints, доступ отримано травня 5, 2026, <https://www.majicpaints.com/tips-painting-tractor-truck/>
68. Coating Calculations (The Math) - Paint Formula - Dangle Rope Access, доступ отримано травня 5, 2026, <https://www.onropes.co.uk/coating-calculations>
69. IRB 52 A compact painting specialist - ABB, доступ отримано травня 5, 2026, <https://library.e.abb.com/public/15e27939aa11fd8ec1257b130057a043/IRB%2052%20Datasheet.pdf>
70. — IRB 52 A compact painting specialist - ABB, доступ отримано травня 5, 2026, https://library.e.abb.com/public/6d0d2693c9834103b1bc623e921d3734/IRB52_DataSheet_USL.pdf

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.022 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 71.MTZ 821/821.2/821.3 921/921.2/921.3/921.4, доступ отримано травня 5, 2026,
http://www.mtzequipment.com/sites/default/files/manuals/new_manuals/MTZ_921_User_Manual_En.pdf
- 72.OPERATION MANUAL, доступ отримано травня 5, 2026,
<https://www.belarus-tractor.com/upload/iblock/cd7/end0ngfd0hxg42y2q4w8ev8okyd42r53.pdf>
- 73.mtz tractors, доступ отримано травня 5, 2026,
http://www.mtzequipment.com/sites/default/files/manuals/new_manuals/920.3_952.3_English_big_User_Manual.pdf
- 74.6M 95 | Utility Tractors - John Deere, доступ отримано травня 5, 2026,
<https://www.deere.com/en/tractors/utility-tractors/6-family-utility-tractors/6m-95-tractor/>
- 75.IRB 52 - Paint-robot - ABB, доступ отримано травня 5, 2026,
<https://new.abb.com/products/robotics/nl/once-robots/paint-robot/irb-52>
- 76.6-Axis Articulated Robot Workspace Visualizer - Firgelli Automations, доступ отримано травня 5, 2026,
<https://www.firgelliauto.com/blogs/engineering-calculators/6-axis-articulated-robot-workspace-visualizer>
- 77.What is a 6-Axis Robot? Structure, Benefits, and Application - Servodynamics, доступ отримано травня 5, 2026, <https://servodynamics.com.vn/what-is-a-6-axis-robot/>
- 78.(PDF) Inverse Kinematics Analysis of Serial Manipulators Using ..., доступ отримано травня 5, 2026,
https://www.researchgate.net/publication/337605289_Inverse_Kinematics_Analysis_of_Serial_Manipulators_Using_Genetic_Algorithms
- 79.ProBell ® Rotary Applicator - MediaCZ.cz, доступ отримано травня 5, 2026,
<https://www.mediacz.cz/wp-content/uploads/2017/05/039-prospekt-graco-probell.pdf>
- 80.PROBELL-PROBELL ROTARY APPLICATOR - ALTEKMA, доступ

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.022 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- отримано травня 5, 2026, <https://www.altekma.com.tr/probell-probell-rotary-applicator>
- 81.High-Speed 6-Axis Articulated Robots - OMRON Robotics, доступ отримано травня 5, 2026, <https://robotics.omron.com/products/industrial-robots/articulated/>
- 82.Six DOF Spray Painting Robot Analysis - International Journal of ..., доступ отримано травня 5, 2026, https://www.ijareeie.com/upload/2015/september/61_updated.pdf
- 83.P-50iB Painting Robot - FANUC America, доступ отримано травня 5, 2026, <https://www.fanucamerica.com/products/robots/series/paint/p-50ib-paint-robot>
- 84.Mastering Inverse Kinematics for 6-DOF Robots - FussyBots, доступ отримано травня 5, 2026, <https://www.fussybots.com/post/the-reverse-game-unpacking-inverse-kinematics-for-6-dof-robots>
- 85.The Ultimate Guide to Inverse Kinematics for 6DOF Robot Arms - Automatic Addison, доступ отримано травня 5, 2026, <https://automaticaddison.com/the-ultimate-guide-to-inverse-kinematics-for-6dof-robot-arms/>
- 86.GRACO PROBELL ROTARY APPLICATORS - Fluid Transfer Systems, доступ отримано травня 5, 2026, <https://ftsonline.net/product-catalog/graco-probell/>
- 87.The Calculation of Inverse Kinematics for 6DOF Serial Robot - Communications - Scientific Letters of the University of Zilina, доступ отримано травня 5, 2026, <https://komunikacie.uniza.sk/pdfs/csl/2014/11/24.pdf>
- 88.Denavit–Hartenberg parameters - Wikipedia, доступ отримано травня 5, 2026, https://en.wikipedia.org/wiki/Denavit%E2%80%93Hartenberg_parameters
- 89.FORWARD KINEMATICS: THE DENAVIT-HARTENBERG CONVENTION - Duke Computer Science, доступ отримано травня 5, 2026, <https://users.cs.duke.edu/~brd/Teaching/Bio/asmb/current/Papers/chap3-forward-kinematics.pdf>
- 90.Robot Denavit-Hartenberg (DH) parameters - Duet3D Documentation, доступ

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.022 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

отримано травня 5, 2026,

https://docs.duet3d.com/User_manual/Machine_configuration/Configuring_Robot_DH_parameters

91. РОЗВ'ЯЗАННЯ ПРЯМОЇ ЗАДАЧІ КІНЕМАТИКИ ЗВАРЮВАЛЬНОГО МАНІПУЛЯТОРА З ІІІ - Львівська політехніка, доступ отримано травня 5, 2026, <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2022/feb/27023/4malyar.pdf>
92. Inverse kinematics, доступ отримано травня 5, 2026, http://www.diag.uniroma1.it/deluca/rob1_en/10_InverseKinematics.pdf
93. Servo Motor Selection Flow Chart, доступ отримано травня 5, 2026, https://www.ia.omron.com/data_pdf/guide/14/servo_selection_tg_e_1_1_3-13%28further_info%29.pdf
94. Complete Guide to Servo Motor Torque Calculation: Everything Engineers Need to Know, доступ отримано травня 5, 2026, <https://thinkrobotics.com/blogs/learn/complete-guide-to-servo-motor-torque-calculation-everything-engineers-need-to-know>
95. How to Determine What Torque You Need for Your Servo Motors - Automatic Addison, доступ отримано травня 5, 2026, <https://automaticaddison.com/how-to-determine-what-torque-you-need-for-your-servo-motors/>
96. stepper motor - What kind of torque is needed for a small 5-6 axis robotic arm?, доступ отримано травня 5, 2026, <https://robotics.stackexchange.com/questions/10125/what-kind-of-torque-is-needed-for-a-small-5-6-axis-robotic-arm>
97. Robot Arm Payload Calculator — Joint Torque - Firgelli Automations, доступ отримано травня 5, 2026, <https://www.firgelliauto.com/blogs/engineering-calculators/robot-arm-payload-calculator-joint-torque>
98. The model of the six-axis industrial robot; based on [19]. - ResearchGate, доступ отримано травня 5, 2026, https://www.researchgate.net/figure/The-model-of-the-six-axis-industrial-robot-based-on-19_fig1_261477564

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.022 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

99. Six-Axis Robotic-Arm Simulation - Kaggle, доступ отримано травня 5, 2026, <https://www.kaggle.com/code/aavigan/six-axis-robotic-arm-simulation>
100. An online payload identification method based on parameter difference for industrial robots | Robotica - Cambridge University Press & Assessment, доступ отримано травня 5, 2026, <https://www.cambridge.org/core/journals/robotica/article/an-online-payload-identification-method-based-on-parameter-difference-for-industrial-robots/23B4C016AAF275A1C4BED7322CDB23FF>
101. Servo Motor Sizing and Selection Guide - AMD Machines, доступ отримано травня 5, 2026, <https://amdmachines.com/blog/servo-motor-sizing-and-selection-guide/>
102. High Rigidity Planetary Gear RV Reducer Gearbox for Heavy Duty Robotic Arms, доступ отримано травня 5, 2026, <https://ozrobotics.com/shop/high-rigidity-planetary-gear-rv-reducer-gearbox-for-heavy-duty-robotic-arms/>
103. China Precision Reduction Gear RV-E Reducer Manufacturer and Supplier | Yunhua, доступ отримано травня 5, 2026, <https://www.yooheart-robot.com/precision-reduction-gear-rv-e-reducer-products/>
104. A06B-0227-B000 Specs - FANUC AC SERVO MOTOR αi series DESCRIPTIONS, доступ отримано травня 5, 2026, <https://www.servotechusa.com/Customer-Content/www/shop-parts-and-motors/Files/A06B-0227-B000.pdf>
105. Drive Systems - Product Overview - FANUC America, доступ отримано травня 5, 2026, <https://www.fanucamerica.com/docs/default-source/cnc-files/drive-systems-product-overview-brochure.pdf>
106. Engineering Mechanics CALCULATION OF THE MANIPULATOR ORIENTATION ACCURACY, доступ отримано травня 5, 2026, <https://engineeringmechanics.az/uploads/2023/05/issue12-volume4-topic10.pdf>
107. В.А. Кирилович, к.т.н., доц. І.Ю. Черепанська, к.т.н., доц. А.Ю. Са-
зонов, аспі, доступ отримано травня 5, 2026, <https://library.ztu.edu.ua/e->

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.022 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

[copies/Zbirnyk/Process_obrobky_12/41.pdf](#)

108. (PDF) A Gear Backlash Identification and Compensation Method to Enhance Industrial Robot Repeatability - ResearchGate, доступ отримано травня 5, 2026,
https://www.researchgate.net/publication/398643236_A_Gear_Backlash_Identification_and_Compensation_Method_to_Enhance_Industrial_Robot_Repeatability
109. Spatial Error Prediction and Compensation of Industrial Robots Based on Extended Joints and BO-XGBoost - PMC, доступ отримано травня 5, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12568001/>
110. FANUC α i-D series SERVO, доступ отримано травня 5, 2026, [https://www.fanuc.co.jp/en/product/catalog/pdf/servo/Servo_alpha-i-D\(E\)-01.pdf](https://www.fanuc.co.jp/en/product/catalog/pdf/servo/Servo_alpha-i-D(E)-01.pdf)
111. Stiffness Modeling of Industrial Robots for Deformation Compensation in Machining - Fraunhofer-Publica, доступ отримано травня 5, 2026, <https://publica.fraunhofer.de/bitstreams/0f1de37f-f343-4ca7-b375-156ab95b44e9/download>
112. Deflection estimation of industrial robots with flexible joints - PMC, доступ отримано травня 5, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11197551/>
113. Error Modeling and Parameter Calibration Method for Industrial Robots Based on 6-DOF Position and Orientation - MDPI, доступ отримано травня 5, 2026, <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/19/10901>
114. Productivity tables for professional painters - Resene, доступ отримано травня 5, 2026, <https://www.resene.co.nz/paintdec/productivity-tables/index.htm>
115. Introduction to Production Rate Estimation | PaintScout Help Center, доступ отримано травня 5, 2026, <https://help.paintscout.com/en/articles/8137528-introduction-to-production-rate-estimation>

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.022 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

116. Як визначити вихід фарби на 1 м² - ОЛДІ, доступ отримано травня 5, 2026,
https://oldimarket.com.ua/cms/blog/porady/yak_vyznachyty_vykhid_farby/
117. Autonomous Trajectory Planning for Spray Painting on Complex Surfaces Based on a Point Cloud Model - PMC, доступ отримано травня 5, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10747898/>
118. — IRC5 Industrial Robot Controller, доступ отримано травня 5, 2026, <https://icdn.tradew.com/file/201606/1569362/pdf/7083420.pdf>
119. (PDF) Energy Efficient Trajectories for an Industrial ABB Robot, доступ отримано травня 5, 2026, https://www.researchgate.net/publication/263202228_Energy_Efficient_Trajectories_for_an_Industrial_ABB_Robot

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.022 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.022 ПЗ								
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата									
Розроб.		Когденко А.В.			ДОДАТКИ				Літ.		Арк.	Акрушів	
Перевір.		Ляшко А.П.									58	58	
									НУБіП України				
Н. Контр.		Матухно Н.В.											
Затверд.		Ловекін В.С.											