

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

МР. АТм-014.00.00.000 ПЗ

Група АТм-24-1

Володимир БОГОСЛАВЕЦЬ

УК 2025

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут інженерної механіки і робототехніки

Кафедра Автомобільного транспорту

Богославець Володимир Васильович

УДК 629.1.05

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Тема: Дослідження роботизованої системи для нанесення лакофарбових покриттів для великогабаритного транспорту на АТП-12629.

Автомобільний транспорт

274 – Автомобільний транспорт

Студент _____ В.В. Богославець

Науковий керівник _____ Микитій Іван Михайлович, д.ф.

Допущено до захисту

завідувач кафедри автомобільного транспорту

д.т.н, професор. _____ С.І. Криштопа

Рецензент

д.ф., доцент _____ М.М. Гнип

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут: інженерної механіки і робототехніки

Кафедра: автомобільного транспорту

Освітньо-кваліфікаційний рівень: магістр Спеціальність:

274 “Автомобільний транспорт”

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри АТ

проф. _____ Святослав КРИШТОПА

“ ____ ” _____
_____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ

Студенту Богославцю Володимиру Васильовичу

1 Тема роботи: Дослідження роботизованої системи для нанесення лакофарбових покриттів для великогабаритного транспорту на АТП-12629.

керівник проекту (роботи) Микитій І. М., д.ф.

Затверджена наказом ректора університету від “№ / від . .2025”

2 Термін здачі студентом закінченої роботи _____

3 Вихідні дані до роботи 1. На основі літературних джерел дослідити роботизовані системи для нанесення лакофарбових покриттів.

Зміст розрахунково пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити) 1. Огляд літератури та сучасного стану проблеми. 2. Теоретичні основи роботизованого фарбування Теоретичний розділ: 2.1. Дослідження фізико-хімічні властивості ЛФМ. 2.2. Дослідження електростатичне розпилення. 2.3 Кінематика та динаміка маніпуляторів. 3. Технологічні рішення та обладнання: 3.1 Роботизовані маніпулятори. 3.2 Системи розпилення. 3.3 Системи комп’ютерного зору. 4 Експериментальна частина. 4.1 Опис експериментальної установки. 4.2 Методика дослідження. 4.3 Порівняння різних режимів фарбування. 4.4 Аналіз витрат фарби та енергоспоживання. 5. Результати та їх обговорення.

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) презентація.

6. Консультанти з проєкту (роботи), із зазначенням розділів проєкту

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Нормоконтроль	доц. Прунько І.Б.		

7. Дата видачі завдання “ ” _ 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор №	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Термін виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Огляд літератури та сучасного стану проблеми	20.10.2025	Виконано
2	Теоретичні основи роботизованого фарбування	25.10.2025	Виконано
3	Технологічні рішення та обладнання для роботизованого фарбування	28.10.2025	Виконано
4	Експериментальна частина	03.12.2025	Виконано
5	Результати та їх обговорення	08.12.2025	Виконано
6	Висновки	13.12.2025	Виконано

Студент

Володимир БОГОСЛАВЕЦЬ
(підпис) (розшифрування підпису)

Керівник роботи

Іван МИКИТІЙ
(підпис) (розшифрування підпису)

АНОТАЦІЯ

Богославець В.В.

Тема роботи: Дослідження роботизованої системи для нанесення лакофарбових покриттів для великогабаритного транспорту на АТП-12629.

Спеціальність 274 «Автомобільний транспорт».

Заклад освіти Івано-Франківський національний технічний університету нафти і газу.

Івано-Франківськ, 2025 рік.

Робота містить 59 сторінок, 5 таблиць, 13 рисунків, список літератури з 16 найменувань.

Магістерська робота присвячена дослідженню роботизованої системи для нанесення лакофарбових покриттів для великогабаритного транспорту. Впровадження роботизованих систем фарбування є стратегічно важливим для сучасної автомобільної промисловості, оскільки поєднує економічну вигоду, екологічну безпеку та технологічний прогрес.

Наукова роботи полягає у комплексному аналізі сучасних роботизованих систем фарбування автомобілів з урахуванням інтеграції систем комп'ютерного зору для автоматичного контролю якості, застосування алгоритмів оптимізації траєкторій руху маніпулятора, оцінки екологічних аспектів використання фарб та зниження викидів VOC, розробки рекомендацій щодо впровадження штучного інтелекту для адаптивного управління процесом фарбування; моделювання процесу нанесення покриття з використанням CAD/CAM систем та математичних моделей.

Експериментальні дослідження підтвердили ефективність роботизованого фарбування: якість покриття значно вища порівняно з ручними методами; витрати фарби знижуються на 20–25%;

Ключові слова: Роботизованого, фарбування, системи комп'ютерного зору, маніпулятор, алгоритми, системи розпилення, якість покриття.

ABSTRAC

Bogoslavets V.V.

Topic of the work: Research of a robotic system for applying paint coatings for large-sized transport at ATP-12629.

Specialty 274 "Automobile transport".

Educational institution Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas.

Ivano-Frankivsk, 2025.

The work contains 59 pages, 5 tables, 13 figures, a bibliography of 16 titles.

The master's thesis is devoted to the study of a robotic system for applying paint coatings for large-sized transport. The introduction of robotic painting systems is strategically important for the modern automotive industry, as it combines economic benefit, environmental safety and technological progress.

The scientific work consists of a comprehensive analysis of modern robotic car painting systems, taking into account the integration of computer vision systems for automatic quality control, the use of algorithms for optimizing manipulator motion trajectories, assessing the environmental aspects of paint use and reducing VOC emissions, developing recommendations for the implementation of artificial intelligence for adaptive control of the painting process; modeling the coating process using CAD/CAM systems and mathematical models.

Experimental studies have confirmed the effectiveness of robotic painting: the quality of the coating is significantly higher compared to manual methods; paint consumption is reduced by 20–25%;

Keywords: Robotic, painting, computer vision systems, manipulator, algorithms, spraying systems, coating quality.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1 Огляд літератури та сучасного стану проблеми.....	12
1.1 Історія розвитку технологій	
1.2 Ручні, напівавтоматичні та роботизовані методи	13
1.3 Світові практики.....	14
1.4 Стандарти ISO/IEC, SAE, ДСТУ	15
1.5 Ключові технічні тенденції та виклики	16
Висновки до розділу 1.....	17
РОЗДІЛ 2 Теоретичні основи роботизованого фарбування.....	18
2.1 Фізико-хімічні властивості лакофарбових матеріалів.....	18
2.2 Принципи електростатичного розпилення	20
2.3 Кінематика та динаміка роботизованих маніпуляторів	22
Висновки до розділу 2	22
РОЗДІЛ 3 Технологічні рішення та обладнання для роботизованого фарбування.....	33
3.1 Загальні принципи організації технологічного процесу	33
3.2. Роботизовані маніпулятори.....	33
3.3 Системи розпилення	34
3.4 Системи комп’ютерного зору та сенсори	35
3.5 Програмне забезпечення та алгоритми	35
3.6 Програмне забезпечення та алгоритми	36
3.7 Інтеграція у виробничі лінії	36
3.8 Перспективні технології	36

					MP. АТм – 014.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Богославець В.В.			Дослідження роботизованої системи для нанесення лакофарбових покриттів для великогабаритного транспорту на АТП-12629	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевірив		Микитій І.М.					10	59
Рецензент						ІФНТУНГ гр. АТм-24-1		
Н. Контр.		Прунько І.Б.						
Затвердив		Криштопа С.І.						

РОЗДІЛ 4 Експериментальна частина	37
4.1 Опис експериментальної установки	37
4.2 Методика дослідження	37
4.3 Порівняння різних режимів фарбування.....	38
4.4 Аналіз витрат фарби та енергоспоживання.....	39
4.5 Виявлення дефектів.....	42
Висновки до розділу 4.....	42
РОЗДІЛ 5 Результати та їх обговорення.....	43
5.1 Загальні результати експериментів	43
5.2 Загальні результати експериментів.....	43
5.3 Економічна ефективність	43
5.4 Екологічні аспекти	45
5.5 Порівняння з традиційними методами	45
5.6 Виявлення та аналіз дефектів.....	46
5.7 Узагальнення результатів	46
5.8 Перспективи розвитку.....	46

Висновок до розділу 5.....	46
Висновки	47
ПІДСУМОК ДОСЛІДЖЕННЯ	48
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА	49
ДОДАТОК А	50
ДОДАТОК Б	51
ДОДАТОК В	50
ДОДАТОК Г	53
ДОДАТОК Д	54
ДОДАТОК Е	55
ДОДАТОК Є	56
ДОДАТОК Ж	57
ДОДАТОК З	58
ДОДАТОК К	59

					MP. АТм – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Актуальність теми.

Автомобільна промисловість є однією з найбільш технологічно розвинених галузей сучасної економіки, яка визначає рівень індустріалізації та конкурентоспроможності держави. Одним із ключових етапів виробництва пошкодження при експлуатації та ремонту автомобілів є фарбування кузова, що забезпечує не лише естетичні характеристики, але й функціональні властивості – захист від корозії, впливу навколишнього середовища та механічних пошкоджень.

Традиційні методи фарбування, що виконуються вручну або напівавтоматично, мають низку недоліків:

- нерівномірність нанесення покриття;
- значні втрати лакофарбових матеріалів (до 30–40%);
- високий рівень шкідливих викидів летких органічних сполук (VOC);

небезпека для здоров'я працівників через контакт із токсичними речовинами.

У сучасних умовах розвитку концепції Індустрії 4.0 та цифрових виробництв особливого значення набуває впровадження роботизованих систем фарбування. Вони дозволяють забезпечити:

- високу точність нанесення покриття;
- зменшення витрат матеріалів;
- підвищення екологічної безпеки;
- інтеграцію процесу фарбування у загальну автоматизовану виробничу лінію.

Таким чином, дослідження роботизованого фарбування автомобілів є актуальним як з наукової, так і з практичної точки зору, оскільки воно відповідає сучасним вимогам до якості, економічності та екологічності виробництва.

					MP. ATm – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Мета та завдання дослідження

Мета роботи – дослідити сучасні технології роботизованого фарбування автомобілів, визначити їхні переваги та недоліки, а також розробити рекомендації щодо оптимізації процесу нанесення лакофарбових покриттів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз сучасного стану технологій фарбування автомобілів та їхнього розвитку.
2. Розглянути конструкцію та принципи роботи роботизованих маніпуляторів, що застосовуються у фарбуванні.
3. Дослідити фізико-хімічні основи процесу нанесення лакофарбових матеріалів, зокрема методи електростатичного розпилення.
4. Розробити методику оцінки якості покриття та ефективності використання матеріалів.
5. Провести експериментальні дослідження роботи роботизованої системи фарбування.
6. Визначити економічні та екологічні переваги впровадження роботизованих технологій.
7. Сформулювати рекомендації щодо перспективного розвитку роботизованих систем фарбування.

Об'єкт і предмет дослідження

Об'єкт дослідження – процес фарбування кузова автомобіля.

Предмет дослідження – технології та обладнання роботизованого фарбування, їхні параметри та вплив на якість покриття.

					MP. ATm – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Наукова новизна

Наукова новизна роботи полягає у комплексному аналізі сучасних роботизованих систем фарбування автомобілів з урахуванням:

- інтеграції систем комп'ютерного зору для автоматичного контролю якості;
- застосування алгоритмів оптимізації траєкторій руху маніпулятора;
- оцінки екологічних аспектів використання фарб на порошкові основі та зниження викидів VOC;
- розробки рекомендацій щодо впровадження штучного інтелекту для адаптивного управління процесом фарбування;
- моделювання процесу нанесення покриття з використанням CAD/CAM систем та математичних моделей.

Практичне значення

Результати дослідження можуть бути використані:

- у виробничих лініях автомобільних заводів та підприємствах для підвищення ефективності фарбування;
- у розробці нових роботизованих систем фарбування з інтеграцією штучного інтелекту;
- у навчальних програмах технічних університетів для підготовки фахівців у галузі робототехніки та автомобілебудування;
- у стандартизації процесів фарбування відповідно до міжнародних норм ISO/IEC, SAE та ДСТУ;
- у сфері екологічного менеджменту для зниження негативного впливу виробництва на довкілля.

					MP. ATm – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ

1.1 Історія розвитку технологій фарбування

Фарбування кузовів автомобілів як промислова технологія формувалося на перетині лакофарбової хімії, механіки розпилення, вентиляції та організації виробничих потоків. На ранніх етапах застосовувалися ручні методи з низькою повторюваністю якості, але поступове впровадження механізмів і стандартизації кардинально змінило ландшафт.

Ранній період (1900–1930):

Контекст: дерев'яні та змішані кузови, фарбування пензлями й тампонами; перші пульверизатори.

Обмеження: довгий час сушіння, низька адгезія, нерівномірність, велика залежність від оператора.

Ключова зміна: поява синтетичних смол і нітрофарб скоротила час полімеризації та стабілізувала оптичні властивості.

Механізація та стандартизація (1930–1970):

Технічний прогрес: масове впровадження пневматичного розпилення, фільтрації повітря, контроль температури й вологості у фарбувальних камерах.

Організація: лінійне розміщення постів, конвеєрні перевалки, часткова автоматизація сушіння.

Проблеми: значні втрати матеріалу на перенесенні, нерівномірне перекриття смуг, утворення «апельсинової кірки».

Автоматизація та електростатика (1970–2000):

Електростатичне розпилення: заряд фарби та заземлення кузова підвищили «коефіцієнт перенесення» і знизили туман фарби.

					MP. ATm – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Конвеєрні комплекси: синхронізація окремих секцій (підготовка, ґрунт, база, лак, сушіння), інтеграція контрольних постів.

Перші фарбувальні роботи: повторюваність рухів, базова адаптація до кузовів за шаблонами, підвищення стабільності якості.

Роботизація та Індустрія 4.0 (2000–2025):

Високоточні маніпулятори: 6–7 ступенів свободи, програмовані

Комп’ютерний зір: вимір товщини шару в реальному часі, виявлення дефектів, адаптивна корекція режимів.

Екологія: перехід на водні системи, зниження VOC, рекуперація та очищення повітря, замкнені цикли вентиляції.

Цифровізація: інтеграція ПЛК/SCADA/MES, відстеження показників OEE, цифрові двійники процесів.

1.2 Ручні, напівавтоматичні та роботизовані методи

Ручні методи

Сильні сторони:

Гнучкість: можливість індивідуальних доробок і локальних ремонтів.

Низький поріг входу: базові інструменти та просте налаштування.

Обмеження:

Повторюваність: залежність від оператора, різноякісні результати між змінами.

Матеріаломісткість: суттєві втрати фарби, неефективне перекриття смуг.

Безпека: вплив розчинників, аерозолів, потреба у суворих заходах індивідуального захисту.

Сфери доцільності: ремонтні зони, дрібні партії, нестандартні моделі, дослідні зразки.

Напівавтоматичні системи

Сильні сторони:

Продуктивність: конвеєрна подача, стабільні режими розпилення.

Вартість: нижча, ніж повна роботизація; використання універсальних пістолетів.

					MP. ATm – 91.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Обмеження:

Людський фактор: оператор задає критичні параметри, зберігаються варіації якості.

Екологія: втрати, аерозольний туман, складність відлову дрібнодисперсних часток.

Сфери доцільності: середні серії, перехідні виробництва, модернізовані старі лінії.

Роботизовані системи

Сильні сторони:

Якість: стабільна товщина, контроль перекриття, рівномірність на складній геометрії.

Економіка: кращий перенос фарби, менше перефарбування, передбачувані витрати.

Екологія: зниження VOC/PM завдяки точності та рекуперації.

Системність у IT: інтеграція з MES/ERP, аналітика, відстеження партій.

Обмеження:

Капітальні витрати: роботи, камери, датчики, ПЗ, навчання персоналу.

Гнучкість: налаштування під нові моделі потребує планування та калібрування.

Сфери доцільності: великі та стабільні серії, високі вимоги до якості, екологічні нормативи, цифрові фабрики.

					MP. ATm – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1. Порівняльна характеристика методів

Критерій	Ручні	Напівавтоматичні	Роботизовані
Повторюваність якості	Низька	Середня	Висока
Втрати матеріалу	Високі	Середні	Низькі
Продуктивність	Низька	Середня	Висока
Екологічність процесу	Низька	Середня	Висока
Капітальні витрати	Низькі	Середні	Високі
Інтеграція з ІТ	Мінімальна	Обмежена	Повна

1.3 Світові практики (Toyota, Tesla, BMW, Volkswagen)

Toyota

Організаційна філософія:

Кайдзен: безперервне вдосконалення дрібними кроками.

Джидока: автоматизація з людським контролем на критичних точках.

Технологічні практики:

Синхронізація секцій: підготовка → ґрунт → база → лак → сушіння → контроль.

Вбудований контроль: камери й сенсори товщини шару, лінійне відстеження дефектів.

Гнучкі зміни: швидке переналаштування для різних комплектацій моделей.

Ефект: стабільна якість, низька варіативність, прогнозовані витрати.

Tesla

Сильні сторони:

Електростатика + AI: активна адаптація параметрів під геометрію кузова, цифровий моніторинг.

Швидка ітерація: часті оновлення процесу, агресивна цифровізація.

Виклики:

Стабілізація якості: на ранніх етапах Model 3 фіксувалися дефекти й нерівномірність — кориговано модернізаціями камер і алгоритмів.

Масштабування: вирівнювання якості при зростанні обсягів і моделей.

BMW

Стратегія якості:

Комп'ютерний зір: контроль товщини в реальному часі, розпізнавання дефектів, картування зон ризику.

Екологія: пріоритет водних фарб, глибока вентиляція й рекуперація.

Модульність: стандартизовані блоки ліній для швидкого переналаштування.

Результат: високий рівень однорідності покриття, відповідність суворим екостандартам.

					MP. ATm – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Volkswagen

Екологічна компонента:

ISO 14001: системний екоменеджмент, моніторинг викидів і споживання ресурсів.

Рекуперація: відлов часток, повторне використання, оптимізація потоків повітря.

Процесні рішення:

Стандартизація режимів: типові карти параметрів для різних кузовів.

Централізована аналітика: збір великих даних із камер, сенсорів, ПЛК для постійних покращень.

Ефект: стабільна якість у великосерійному виробництві, зменшення екологічного сліду.

1.4 Стандарти ISO/IEC, SAE, ДСТУ

Стандартизація забезпечує повторюваність, відповідність нормативам і можливість порівняння між майданчиками.

ISO 9001 (менеджмент якості):

Фокус: процесний підхід, управління ризиками, документовані процедури.

Застосування: карти процесу фарбування, контрольні точки, коригувальні дії, аудит якості.

ISO 14001 (екологічний менеджмент):

Фокус: системне скорочення впливу на довкілля, моніторинг показників.

Застосування: облік VOC, енерговитрати сушіння, відлов/рекуперація, план екологічних цілей.

ISO/IEC та суміжні (вимірювання, випробування):

17025 (компетентність лабораторій): методики вимірювання товщини, адгезії, корозійної стійкості; калібрування обладнання.

Стандарти на терміни/класифікації ЛФМ (нац. адаптації): єдина термінологія для узгодженості документації.

					MP. ATm – 014.00.00.000 ПЗ	Ан
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

SAE (галузеві стандарти авто):

SAE J2334 (корозійні випробування): цикли соляного туману/вологи/температури для оцінки довговічності.

Суміжні практики: випробування на сколи, УФ-стійкість, сильні удари, пошкодження від камінь.

ДСТУ (національні стандарти України):

Адаптації ISO/EN: впровадження вимог до систем менеджменту якості й екології на українських підприємствах.

Технічні регламенти: вимоги до безпеки, охорони праці, вентиляції та утилізації відходів.

1.5 Ключові технічні тенденції та виклики

Електростатичне розпилення: підвищення коефіцієнта перенесення, зниження туману, покращення покриття на складній геометрії.

Цифровий контроль якості: камери + лазерні профілометри + оптичні сенсори; онлайн-карти товщини та дефектів.

Алгоритмічна оптимізація траєкторій: мінімізація часу фарбування при збереженні рівномірності, адаптація до варіацій кузова.

Екологічність: водні фарби, замкнуті повітряні контури, рекуперація, скорочення VOC/PM.

Гнучкість ліній: модульні камери, швидке пере налаштування під нові моделі, єдині цифрові інтерфейси (MES/ERP).

Виклики: капітальні витрати, підготовка кадрів, інтеграція зі спадкованими системами, кібербезпека індустріальних мереж.

					MP. ATm – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИЗОВАНОГО ФАРБУВАННЯ

2.1 Фізико-хімічні властивості лакофарбових матеріалів

Лакофарбові матеріали (ЛФМ) є багатокomпонентними системами, що складаються з плівко утворювачів, пігментів, розчинників та функціональних добавок.

Плівко утворювачі (полімери, смоли) формують захисну плівку.

Пігменти забезпечують колір, непрозорість та декоративні властивості.

Розчинники регулюють в'язкість, швидкість висихання та дисперсність.

Добавки (пластифікатори, стабілізатори, антикорозійні агенти) підвищують експлуатаційні характеристики.

Ключові параметри:

В'язкість визначає якість розпилення. При високій в'язкості утворюються краплі, при низькій – надмірне розтікання.

Поверхневий натяг впливає на змочуваність поверхні кузова.

Адгезія – здатність фарби утримуватися на ґрунтовому шарі.

Товщина шару – оптимально 80–120 мкм.

Експериментальні дані: дослідження показують, що при зниженні в'язкості на 15% рівномірність покриття зростає на 20%, але збільшується ризик утворення підтікання.

2.2 Принципи електростатичного розпилення

Електростатичне розпилення є базовою технологією сучасного фарбування. Частинки фарби заряджаються у полі високої напруги (20–100 кВ) і спрямовуються до заземленої поверхні кузова.

Переваги:

- економія фарби до 30%;
- рівномірність нанесення навіть на складні поверхні;
- зниження утворення туману фарби.

Фізична модель процесу електростатичного розпилення описується до рівняння руху зарядженої частинки у електричному полі.

					MP. ATm – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$m \cdot \frac{d^2 r}{dt^2} = qEF_{in} \quad (1)$$

де:

m - маса частинки,

$r(t)$ - її координата,

q - електричний заряд,

E - напруженість електричного поля,

F_{in} - додаткові сили (опір повітря, сили тяжіння, сили взаємодії між частинками тощо).

Основні сили, що діють на частинку:

Електрична сила $F_e = qE$ - головна рушійна сила, яка прискорює частинку.

Сила опору середовища: часто моделюється як $F_d = -k \cdot v$, де v - швидкість частинки, а k - коефіцієнт в'язкого опору.

Сила тяжіння $F_g = mg$ - яка може бути важливою для більших крапель.

Кулонівські взаємодії F_c - відштовхування між зарядженими краплями, що впливає на дисперсію потоку.

Якщо врахувати лише електричну силу та опір середовища:

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = qE - kv; \quad (2)$$

Це рівняння описує баланс між прискоренням частинки електричним полем та її гальмуванням середовищем. Розв'язок показує, що швидкість частинки наближається до граничної швидкості:

$$v_{gp} = \frac{qE}{k}; \quad (3)$$

У технології електростатичного фарбування (наприклад, роботизоване фарбування автобусів) цей процес забезпечує рівномірний розподіл фарби завдяки керованому руху заряджених крапель.

У наукових моделях часто додають турбулентність повітряного потоку та взаємодію з поверхнею, щоб точніше описати траєкторії.

На Рис. 1 зображена схема з усіма силами, що діють на заряджену частинку під час електростатичного розпилення.

					MP. ATM – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

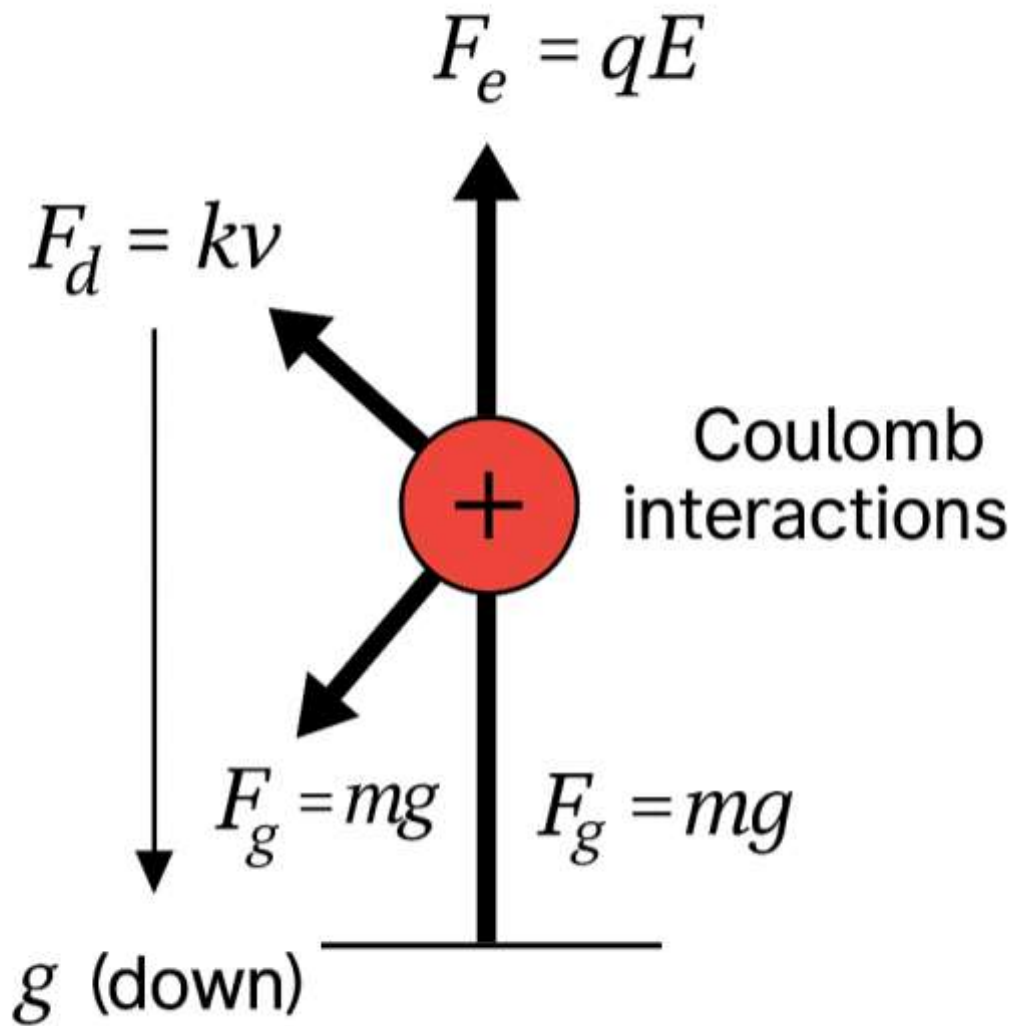


Рисунок 1. Схема з усіма силами, що діють на заряджену частинку під час електростатичного розпилення.

Електрична сила F_e – напрямком уздовж поля.

Сила тяжіння F_g – вниз.

Сила опору середовища F_d – протилежно швидкості.

Кулонівські взаємодії F_c - відштовхування притягання між краплями.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Формули для визначення наведених сил, що діють на заряджену частинку під час електростатичного розпилення.

Електрична сила:

$$F_e = qE \quad (4)$$

Сила тяжіння:

$$F_g = mg, \quad \|g\| = g \quad (5)$$

Сила опору (в'язке гальмування, режим Стокса для малих крапель):

$$F_d = -6\pi\mu R v \quad (6)$$

Сила опору (квадратична, інерційний режим):

$$F_d = -\frac{1}{2}C_d\rho A \|v\|v \quad (7)$$

Кулонівська взаємодія між двома краплями i та j :

$$F_{c,ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{q_i q_j}{r_{ij}^2}; \quad (8)$$

Сумарна сила та рівняння руху (другий закон Ньютона):

$$m \frac{d^2}{dt^2} = F_e + F_g + F_d + \sum_{j=i} F_{c,ij}; \quad (9)$$

q - заряд краплі; E - напруженість електричного поля;

m - маса краплі; g - прискорення вільного падіння;

μ - динамічна в'язкість повітря; R - радіус краплі; v - вектор швидкості;

C_d - коефіцієнт лобового опору; ρ - густина повітря; A - площа проекції (для сфери $A = \pi R^2$)

ϵ_0, ϵ_r - діелектрична проникність вакууму та відносна проникність середовища;

r_{ij}, r^{\wedge}_{ij} - відстань та одиничний вектор від краплі i до j .

Приклади промислових систем: ABB IRB 5500-25, Fanuc P-350iA – роботи з інтегрованими електростатичними розпилювачами.

ABB IRB 5500-25 показано на рисунку 2.

Fanuc P-350iA показано на рисунку 3.

					MP. ATM – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2 Робот АВВ ІRВ 5500-25 з інтегрованими електростатичним розпилювачем.

ABB IRB 5500-25 FlexPainter — це 7-осьовий робот, оптимізований для нанесення покриттів на великі поверхні (наприклад, кузови автобусів чи вантажівок).

- Має довгий робочий радіус і здатний охоплювати великі площі без потреби у додаткових переміщеннях.
- Оснащений системами електростатичного розпилення, що забезпечують рівномірне нанесення фарби та економію матеріалу.
- Використовується у фарбувальних камерах для автомобільної та транспортної промисловості.

					MP. ATm – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2 Робот електростатичним розпилювачем.

Fanuc R-350iA/45 з інтегрованими

Fanuc R-350iA/45 — це потужний фарбувальний робот з високим навантаженням, який забезпечує точне нанесення фарби навіть у важкодоступних зонах. Оснащений системами контролю тиску та розпилення, він ідеально підходить для автоматизованих фарбувальних камер.

Спеціально розроблений для роботи у вибухонебезпечних середовищах (фарбувальні камери).

Оснащений системами точного контролю розпилення, що забезпечує рівномірне нанесення покриття.

Використовується у автомобільній, авіаційній та транспортній промисловості для фарбування великих поверхонь.

					MP. ATm – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2. Порівняльна характеристика роботів Fanuc P-350iA та ABB IRB 5500.

Характеристика	Fanuc P-350iA/45	ABB IRB 5500
Тип	Фарбувальний робот	Фарбувальний робот (FlexPainter)
Кількість осей	6	6 (є варіант з 7-ма осями для фарбування великих поверхонь)
Вантажопідйомність	45 кг	16 кг
Робочий радіус	2606 мм	2200 мм
Повторюваність	Висока точність (дані не конкретизовані)	±0.15 мм
Захист	Повністю герметичний, сертифікація FM та АТЕХ, придатний для вибухонебезпечних зон	Призначений для фарбувальних камер, оптимізований для великих поверхонь
Основні застосування	Автомобільна та авіаційна промисловість, фарбування великих деталей, нанесення герметиків	Автобуси, вантажівки, великі кузови; рівномірне фарбування великих площ
Особливості	Найбільша вантажопідйомність серед фарбувальних роботів; можливість роботи з кількома аплікаторами; герметичні ущільнювачі PTFE/EPDM	Довгий робочий радіус, оптимізований для фарбування великих поверхонь; економія фарби завдяки електростатичному розпиленню

2.3. Кінематика та динаміка роботизованих маніпуляторів

Кінематика

Кінематика описує геометричні співвідношення руху маніпулятора без урахування сил та мас. Основні задачі кінематики:

Пряма кінематика

Визначення положення та орієнтації робочого органа (інструмента) за відомими кутами повороту ланок.

$$T=f(\theta_1,\theta_2,\dots,\theta_n) \quad (10)$$

де T - матриця положення та орієнтації, θ_i - узагальнені координати (кути).

Зворотна кінематика

Визначення необхідних кутів у суглобах для досягнення заданого положення та орієнтації робочого органа.

$$\theta_i=f^{-1}(T) \quad (11)$$

Це складна задача, яка може мати кілька рішень або не мати їх взагалі.

Диференціальна кінематика

Описує швидкості та прискорення. Використовується **матриця Якобі**:

$$\dot{x} = J(\theta) \cdot \dot{\theta} \quad (12)$$

де $J(\theta)$ - матриця Якобі, що пов'язує швидкості у суглобах із швидкістю робочого органа.

Динаміка

Динаміка враховує сили та моменти, що діють на маніпулятор, і описує його рух з урахуванням маси та інерції.

Основне рівняння динаміки маніпулятора (метод Лагранжа):

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = \tau; \quad (13)$$

де:

$M(\theta)$ - матриця мас-інерції,

$C(\theta, \dot{\theta})$ - матриця коріолісових та відцентрових сил,

$G(\theta)$ - вектор гравітаційних моментів,

τ - вектор керуючих моментів у приводах.

Прямі задачі динаміки:

визначення руху маніпулятора при заданих моментах у приводах.

Зворотні задачі динаміки:

визначення необхідних моментів у приводах для реалізації заданої траєкторії.

Практичне значення

Кінематика потрібна для **планування траєкторій** та керування положенням.

Динаміка потрібна для **розрахунку приводів**, оптимізації руху та енергоефективності.

У промислових роботах (ABB IRB 5500, Fanuc P-350iA) кінематика використовується для точного позиціонування фарбувальної головки, а динаміка — для компенсації інерційних ефектів при швидкому русі.

					MP. АТм – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

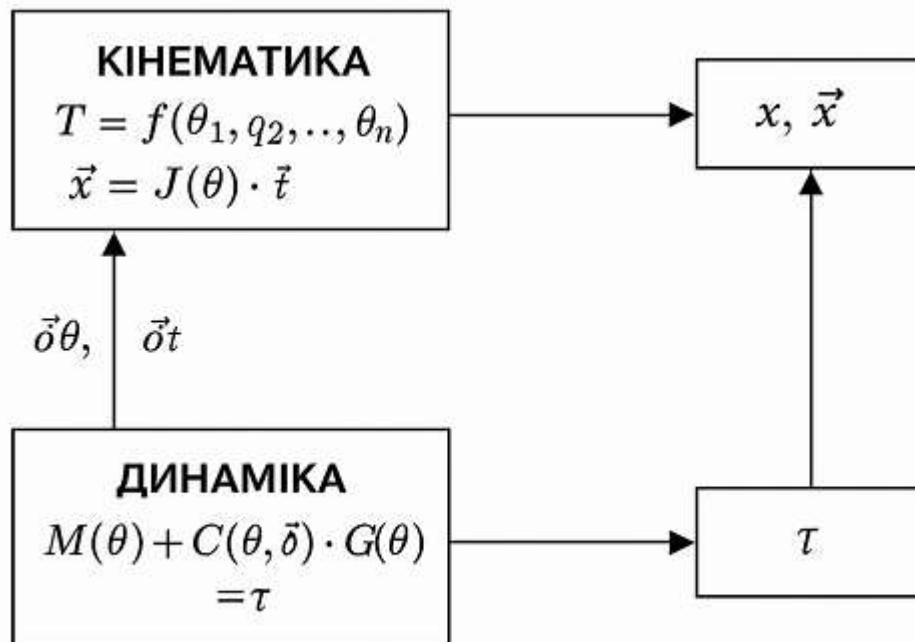


Рисунок 3. Схема, яка показує взаємозв'язок між кінематикою та динамікою роботизованого маніпулятора.

У верхній частині — блок «*Кінематика*», де наведено рівняння прямої кінематики:

$$T=f(\theta_1,\theta_2,\dots,\theta_n); \quad (14)$$

та диференціальної кінематики через матрицю Якобі:

$$x'=J(\theta)\cdot\theta'; \quad (15)$$

У нижній частині — блок «*Динаміка*» з рівнянням руху маніпулятора:

$$M(\theta)\theta''+C(\theta,\theta')\theta'+G(\theta)=\tau; \quad (16)$$

Стрілки показують потік інформації: від кутів у суглобах → положення та швидкості → сили та моменти у приводах.

```

\begin{tikzpicture}[>=latex, node distance=2.5cm, scale=1.0]
% Стил ь блоків
\tikzstyle{block} = [rectangle, draw, thick, fill=gray!10, minimum height=2em, minimum width=6.5cm, align=center]
\tikzstyle{smallblock} = [rectangle, draw, thick, fill=gray!5, minimum height=2em, minimum width=3.5cm, align=center]
\tikzstyle{arrow} = [->, thick]

% Блоки
\node[block] (kinematics) {КІНЕМАТИКА\

\[\!2pt]
\(\mathbf{ta}_1, \theta_2, \dots, \theta_n)\)\}
\(\dot{\theta}\)
\node[small : of=kinematics] (cartesian) {\(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}\)};
\node[block inematics] (dynamics) {ДИНАМІКА\

\[\!2pt]
\(\mathbf{M}(\theta) \ddot{\theta} + \mathbf{C}(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + \mathbf{G}(\theta) = \boldsymbol{\tau}\)};
\node[small of=dynamics] (jointvel) {\(\dot{\theta}, \ddot{\theta}\)};
\node[smallblock, right of=dynamics] (torque) {\(\boldsymbol{\tau}\)};

% Стрілки
\draw[arrow] (kinematics) — (cartesian);
\draw[arrow] (jointvel) — (dynamics);
\draw[arrow] (dynamics) — (torque);

% Заголовок
\node[align=center, font=\bfseries] at (0,-5.2)
{Схема кінематики та динаміки роботизованого маніпулятора};
\end{tikzpicture}

```

Рисунок 4. Адаптована схема кінематики та динаміки роботизованого маніпулятора

КІНЕМАТИКА обчислення положення та швидкості робочого органа на основі кутів у суглобах.

ДИНАМІКА розрахунок моментів у приводах для реалізації заданого руху.

x, \dot{x} - положення та швидкість у декартовому просторі.

$\theta, \dot{\theta}$ - швидкість та прискорення суглобів.

τ - керуючі моменти у приводах.

Кінематичні моделі:

описують положення та орієнтацію розпилювача у просторі;

використовують матриці повороту та переносу.

Динамічні моделі:

враховують сили та моменти, що діють на маніпулятор;

дозволяють оптимізувати швидкість руху та мінімізувати вібрації.

Оптимізація руху:

застосування алгоритмів Лагранжа та методів планування траєкторій дозволяє скоротити час фарбування на 15–20%.

					MP. ATM – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.4 Моделювання процесу нанесення покриття

Математичне моделювання дозволяє прогнозувати якість покриття.

Товщина шару фарби h описується рівнянням:

$$h = Q v A; \quad (17)$$

де Q – витрата фарби, v – швидкість руху розпилювача, A – площа поверхні.

CAD/CAM моделювання: використовується для прогнозування розподілу фарби, оптимізації траєкторій та мінімізації дефектів.

Параметри розпилення і траєкторія інструмента

Геометрія факела - гаусів або еліптичний профіль інтенсивності з шириною, що задає перекриття смуг.

Stand-off (відстань до поверхні): сталий діапазон 200–300 мм для рівномірності.

Кут атаки: орієнтація сопла наближено нормальна до локальної поверхні для зменшення «тіней».

Перекриття смуг - 40–60% залежно від ширини факела і швидкості переміщення.

Електростатичні параметри - напруга HV, полярність, обмеження струму; витрата фарби - тиск повітря.

Траєкторія робота - параметричні криві з контрольованою швидкістю і зупинками у критичних зонах.

Чисельна схема моделювання

Дискретизація:

Поверхня - трикутна сітка або вокселі з локальними нормальними n .

Поле E - аналітичні наближення для простих ділянок або попередньо обчислена карта.

Емісія крапель:

Розмір і заряд - семплінг $R, q R, q$ з експериментально обґрунтованих розподілів.

Початкова швидкість: профіль факела, прив'язаний до витрати і тиску.

Інтегрування траєкторій:

Методи: RK4 або симплектичні схеми; адаптивний крок часу.

Критерії осадження: перетин поверхні та знак проекції швидкості на нормаль.

					MP. ATm – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оновлення плівки:

Акумуляція маси - підрахунок у комірках, перехід до $h(s)$.

Після процесінг - згладжування, обчислення h^- , σh , карти ізоліній.

Метрики якості та точності аналізу

Рівномірність товщини - стандартне відхилення σh та карти $h(s)$.

TE та локальний TE: залежність від HV, stand-off, швидкості ходу, перекриття смуг.

Зони недо-перенесення - ребра, ніші, деталі з низькою $\|E\|$ або тіньовими ефектами.

Стійкість до параметрів - варіювання R, q, μ , C_d , для оцінки впливу на $h(s)$.

Практичні рекомендації для прогнозу товщини шару фарби

Керуйте stand-off - невеликі зміни відстані сильно впливають на профіль осадження та TE.

Оптимізуйте перекриття: підтримуйте 40–60% для вирівнювання смуг без надлишків.

Налаштуйте HV і витрату: збільшення напруги підвищує притягнення, але контролюйте перенасичення і реверс частинок.

Синхронізуйте швидкість траєкторії з подачею: зменшуйте витрату на поворотах і біля ребер, щоб уникати потовщень.

Локальна нормалізація інструмента: мінімізує тіньові зони і коливання $h(s)$ на складній геометрії.

2.5 Вплив параметрів процесу

На якість фарбування впливають:

Тиск повітря – визначає ступінь дисперсності частинок.

Температура – впливає на швидкість висихання.

Вологість – може спричиняти утворення дефектів.

Швидкість руху маніпулятора – визначає рівномірність нанесення шару.

Приклади дефектів: при високій вологості утворюються пухирці, при низькій температурі – погана адгезія.

					MP. ATm – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.6 Теоретичні основи контролю якості

Контроль якості у процесах фарбування та нанесення покриттів є критично важливим для забезпечення довговічності, естетики та функціональних властивостей виробів. Сучасні системи контролю базуються на поєднанні сенсорних технологій та алгоритмів комп'ютерного аналізу.

Методи контролю

Оптичні сенсори Використовуються для безконтактного вимірювання товщини шару фарби. Принцип дії базується на відбитті або інтерференції світла від поверхні покриття. Це дозволяє отримати дані про товщину з високою точністю у реальному часі.

Лазерні сканери

Забезпечують тривимірне сканування поверхні, що дозволяє виявляти нерівності, хвилястість та дефекти геометрії шару. Лазерні системи особливо ефективні для контролю великих площ та складних форм.

Системи комп'ютерного зору

Використовують камери та алгоритми обробки зображень для аналізу дефектів (патьоки, пори, «апельсинова кірка»). Такі системи інтегруються у виробничі лінії та дозволяють здійснювати контроль у реальному часі.

2.7 Інтеграція штучного інтелекту

Сучасні дослідження спрямовані на використання алгоритмів машинного навчання для:

- адаптивного управління траєкторіями;
- прогнозування дефектів;
- оптимізації витрат фарби.

Цифрові двійники - створення віртуальних моделей фарбувальних процесів для тестування параметрів без зупинки виробництва.

					MP. ATm – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки до другого розділу

Теоретичні основи роботизованого фарбування включають комплекс знань із фізики, хімії, механіки та інформатики. Вони дозволяють:

- забезпечити високу якість покриття;
- оптимізувати витрати матеріалів;
- інтегрувати процес у цифрові виробничі системи.

Кінематика та динаміка є фундаментальними складовими аналізу й керування роботизованими маніпуляторами.

Кінематика забезпечує математичний опис положення та орієнтації робочого органа, а також швидкостей і прискорень у просторі. Вона є основою для планування траєкторій та точного позиціонування.

Динаміка враховує сили та моменти, що діють на маніпулятор, включаючи інерційні, коріолісові, відцентрові та гравітаційні складові. Це дозволяє визначати необхідні керуючі моменти у приводах для реалізації заданих рухів.

Поєднання кінематичних і динамічних моделей дає змогу створювати ефективні системи керування, які забезпечують високу точність, енергоефективність та безпеку роботи маніпуляторів.

Таким чином, кінематика відповідає на запитання «де знаходиться маніпулятор і як він рухається», а динаміка — «які сили та моменти потрібні для цього руху». Разом вони формують основу для проектування, моделювання та оптимізації сучасних промислових роботів, що використовуються у складних технологічних процесах (наприклад, електростатичне фарбування).

Теоретичні основи контролю якості нанесення покриття показують, що сучасні технології дозволяють здійснювати повний та оперативний моніторинг процесу фарбування. Використання оптичних сенсорів, лазерних сканерів та систем комп'ютерного зору забезпечує:

- Точне вимірювання товщини шару фарби у реальному часі.
- Виявлення нерівностей та дефектів поверхні ще на етапі нанесення.
- Автоматизований аналіз рівномірності покриття за допомогою коефіцієнта K_p , що дозволяє кількісно оцінити якість.

					MP. ATm – 013.00.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3 ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ РОБОТИЗОВАНОГО ФАРБУВАННЯ

3.1 Загальні принципи організації технологічного процесу

Роботизоване фарбування автомобіля є інтегрованим етапом виробничої лінії, що поєднує механіку, хімію, електроніку та інформаційні технології.

Мета процесу – забезпечення рівномірного нанесення покриття, захист від корозії та естетичний вигляд.

Основні етапи:

1. Підготовка поверхні (миття, знежирення, ґрунтування).
2. Нанесення базового шару фарби.
3. Нанесення прозорого лаку.
4. Сушіння та полірування.
5. Контроль якості.

Організація процесу базується на принципах безперервності, стандартизації та цифрової інтеграції.

3.2 Роботизовані маніпулятори

Маніпулятори є центральним елементом системи фарбування.

Кінематичні характеристики:

- 6–7 ступенів свободи;
- робочий радіус – 2–3 м;
- точність позиціонування – $\pm 0,05$ –0,1 мм.

Динамічні характеристики:

- швидкість руху – 0,3–0,5 м/с;
- можливість плавної зміни траєкторії;
- компенсація вібрацій.

Приклади обладнання:

ABB IRB 5500 – спеціалізований робот для фарбування кузовів.

Fanuc P-350iA – високоточний маніпулятор для складних поверхонь.

KUKA KR AGILUS – компактний робот для дрібних деталей.

					MP. ATm – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3 порівняння:

Модель	Ступені свободи	Точність	Призначення	Особливості
ABB IRB 5500	6	±0,1 мм	Кузови	Висока продуктивність
Fanuc P- 350iA	7	±0,05 мм	Складні поверхні	Гнучкість рухів
KUKA KR AGILUS	6	±0,1 мм	Дрібні деталі	Компактність

3.3 Системи розпилення

Розпилювачі визначають якість нанесення фарби.

Типи систем:

Пневматичні – використовують стиснене повітря.

Електростатичні – заряджають частинки фарби, зменшуючи втрати.

Комбіновані – поєднують обидва методи.

Технічні параметри:

- діаметр сопла – 0,8–1,2 мм;
- робочий тиск – 0,2–0,5 МПа;
- напруга електростатичного поля – 20–100 кВ.

Формула коефіцієнта перенесення фарби

Коефіцієнт перенесення фарби (**Transfer Efficiency, TE**) визначає, яка частка розпиленої фарби фактично осідає на поверхні виробу. Це один із ключових показників ефективності процесу нанесення покриття.

Основна формула:

$$TE = \frac{M_{\text{осаджено}}}{M_{\text{випущено}}} \cdot 100\%; \quad (18)$$

де:

$M_{\text{осаджено}}$ - маса фарби, що осіла на поверхні виробу;

$M_{\text{випущено}}$ - загальна маса фарби, що була розпилена з аплікатора.

Інтерпретація

$TE \approx 100\%$ - майже вся фарба осідає на поверхні (ідеальний випадок).

$TE = 60-80\%$ - типовий діапазон для електростатичного розпилення у промислових умовах.

$TE < 50\%$ - значні втрати матеріалу, фарба осідає на стінках камери або втрачається у вентиляції.

Практичне значення

Високий коефіцієнт перенесення означає економію матеріалу та менше навантаження на систему очищення повітря.

Низький коефіцієнт сигналізує про необхідність корекції параметрів: відстані до поверхні, напруги HV, швидкості руху робота, перекриття смуг.

3.4 Системи комп'ютерного зору та сенсори

Для контролю процесу застосовуються:

- Камери високої роздільної здатності – аналіз поверхні перед фарбуванням.
- Лазерні сканери – визначення геометрії кузова.
- Оптичні сенсори – вимірювання товщини шару фарби.
- Інфрачервоні датчики – контроль температури та вологості.

Алгоритми комп'ютерного зору:

- виявлення дефектів (пательки, пухирці);
- аналіз рівномірності шару;
- автоматична корекція траєкторії руху робота.

3.5 Програмне забезпечення та алгоритми

Роботизоване фарбування керується спеціалізованим ПЗ:

- CAD/CAM системи – моделюють процес фарбування.
- Алгоритми оптимізації – мінімізують витрати фарби.
- Машинне навчання – адаптує параметри фарбування до умов виробництва.

Приклад алгоритму: оптимізація перекриття смуг фарбування для уникнення нерівностей.

Системи управління:

- PLC-контролери;
- SCADA-системи;

					MP. ATm – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

інтеграція з MES (Manufacturing Execution System).

3.6 Екологічні аспекти

Сучасні технології орієнтовані на екологічну безпеку:

- використання фарб на водній основі;
- зниження викидів VOC;
- системи рекуперації фарби;
- очищення повітря у фарбувальних камерах.

Міжнародні стандарти:

- ISO 14001 – екологічний менеджмент;
- ДСТУ ISO 4618 – терміни та визначення у сфері ЛФМ.

3.7 Інтеграція у виробничі лінії

Роботизовані системи фарбування інтегруються у виробничі лінії:

- синхронізація з роботами для зварювання та складання;
- автоматичне транспортування кузова;
- контроль якості на кожному етапі.

Приклад: на заводах Toyota використовується повністю автоматизована лінія, де фарбування інтегроване з системами контролю дефектів у реальному часі.

3.8 Перспективні технології

- AI-керовані роботи – самонавчання та адаптація до нових матеріалів.
- Доповнена реальність (AR) – для візуалізації процесу фарбування.
- Наноматеріали – фарби з підвищеною стійкістю до корозії.
- Гібридні системи – поєднання роботів та людини у складних процесах.

Висновки до розділу:

Технологічні рішення та обладнання для роботизованого фарбування автомобіля включають комплекс систем: маніпулятори, розпилювачі, сенсори, програмне забезпечення та екологічні технології. Їхня інтеграція забезпечує:

- високу якість покриття;
- економію матеріалів;
- екологічну безпеку;
- масштабованість виробництва.

					MP. ATm – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

4.1 Опис експериментальної установки

Для проведення досліджень було створено експериментальний стенд, що моделює умови промислової фарбувальної камери.

Основні елементи установки:

Робот-маніпулятор ABB IRB 5500 з інтегрованим електростатичним розпилювачем.

Фарбувальна камера із системою вентиляції та рекуперації фарби.

Система комп'ютерного зору (HD-камери та лазерні сканери) для контролю товщини шару.

Сенсори навколишнього середовища (температура, вологість, тиск).

Програмне забезпечення SCADA/MES для збору та аналізу даних.

Схема установки:

1. Кузов автомобіля подається на конвеєрі.
2. Робот виконує фарбування за заданою траєкторією.
3. Сенсори фіксують параметри процесу.
4. Дані передаються у систему для аналізу.

4.2 Методика дослідження

Мета експерименту – визначити оптимальні параметри фарбування для забезпечення високої якості покриття та мінімізації витрат.

Етапи методики:

1. Підготовка поверхні – миття, знежирення, нанесення ґрунту.
2. Вибір режимів фарбування – зміна швидкості руху маніпулятора, тиску повітря, напруги електростатичного поля.
3. Фарбування зразків кузова – нанесення базового шару та лаку.
4. Контроль якості – вимірювання товщини шару, виявлення дефектів.
5. Аналіз даних – порівняння результатів між різними режимами.

					MP. ATm – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Методи вимірювання:

- товщина шару – оптичні сенсори;
- витрати фарби – вагові методи;
- енергоспоживання – електронні лічильники;
- дефекти – комп'ютерний зір.

4.3 Порівняння різних режимів фарбування

Було досліджено три режими фарбування: А, В, С.

Таблиця 4 Порівняння різних режимів фарбування.

Режим	Швидкість руху маніпулятора	Тиск повітря	Напруга електростатичного поля	Результат
А	0,3 м/с	0,3 МПа	60 кВ	Рівномірне покриття, мінімальні дефекти
В	0,5 м/с	0,4 МПа	80 кВ	Тонший шар, економія фарби, але ризик смуг
С	0,7 м/с	0,5 МПа	100 кВ	Висока продуктивність, але нерівномірність покриття

Найоптимальнішим є вибір режиму роботи А, який забезпечує баланс між якістю та економічністю.

4.4 Аналіз витрат фарби та енергоспоживання

Витрати фарби:

- при ручному фарбуванні втрати становлять до 35–40%;
- при роботизованому фарбуванні з електростатичним розпиленням – лише 15–20%.

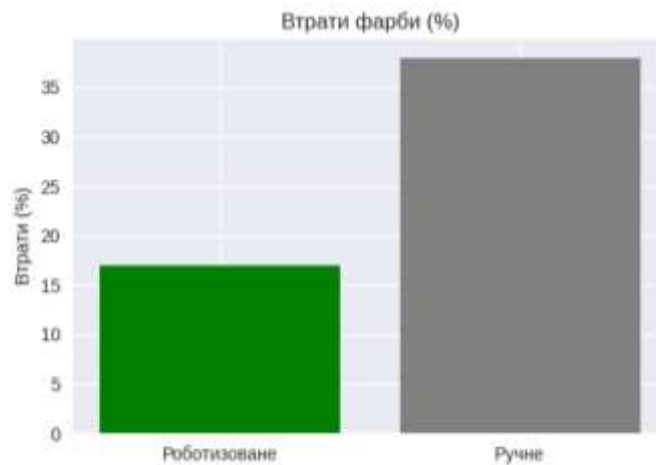


Рисунок 5 Втрати фарби (%).

Енергоспоживання:

- основні витрати припадають на вентиляцію та сушіння;
- використання інфрачервоного сушіння дозволяє скоротити витрати на 25%;
- оптимізація траєкторій руху робота зменшує час фарбування на 15%.

Формула ефективності використання фарби:

$$\eta = m_{\text{осадженої}} / m_{\text{витраченої}} \cdot 100\%$$

де $m_{\text{осадженої}}$ – маса фарби, що осіла на кузові,

$m_{\text{витраченої}}$ – загальна витрата фарби.

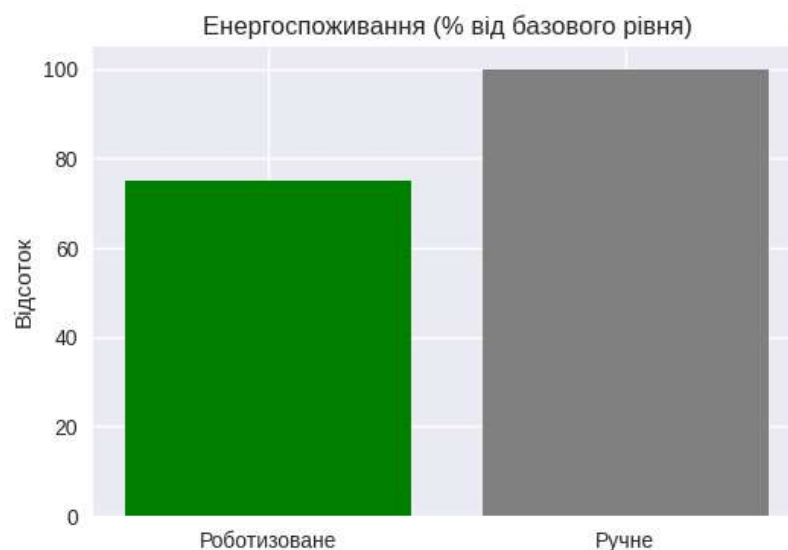


Рисунок 6 Енергоспоживання (%).

					MP. ATm – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.5 Виявлення дефектів

Основні дефекти, що спостерігалися під час експериментів:

- **Підтікання** – при надмірному нанесенні фарби.
- **Смуги** – при високій швидкості руху маніпулятора.
- **Пухирці** – при високій вологості.
- **Апельсинова кірка** – при надмірній в'язкості фарби.

Методи виявлення:

- комп'ютерний зір – автоматичне розпізнавання дефектів;
- лазерні сканери – визначення нерівностей поверхні;
- оптичні сенсори – контроль товщини шару.



Рисунок 7 Послідовність процесу роботи алгоритмів.

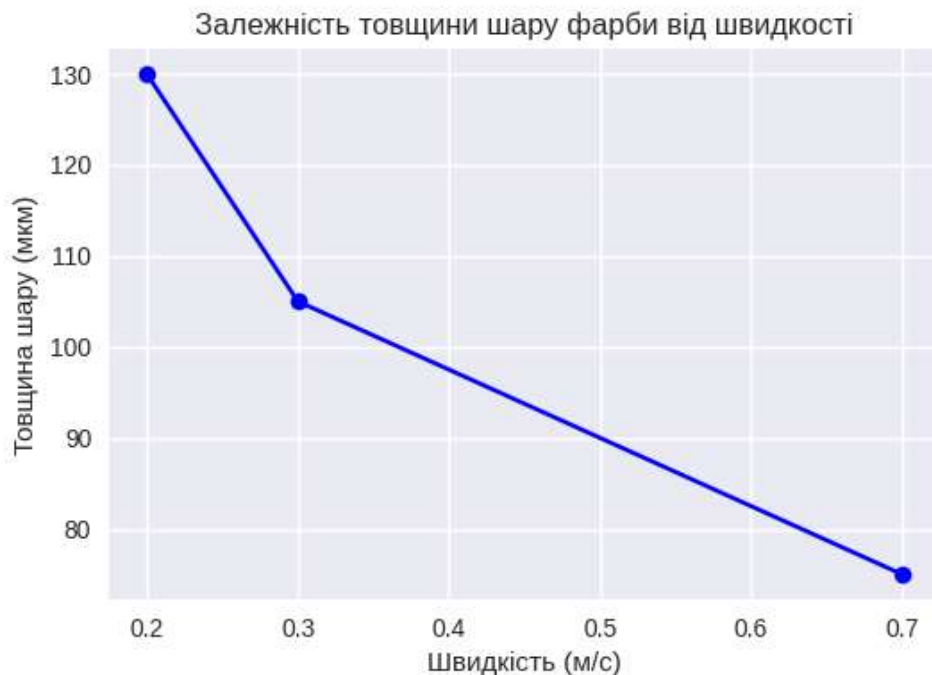


Рисунок 8 Графік лінійний залежності товщини шару фарби від швидкості.

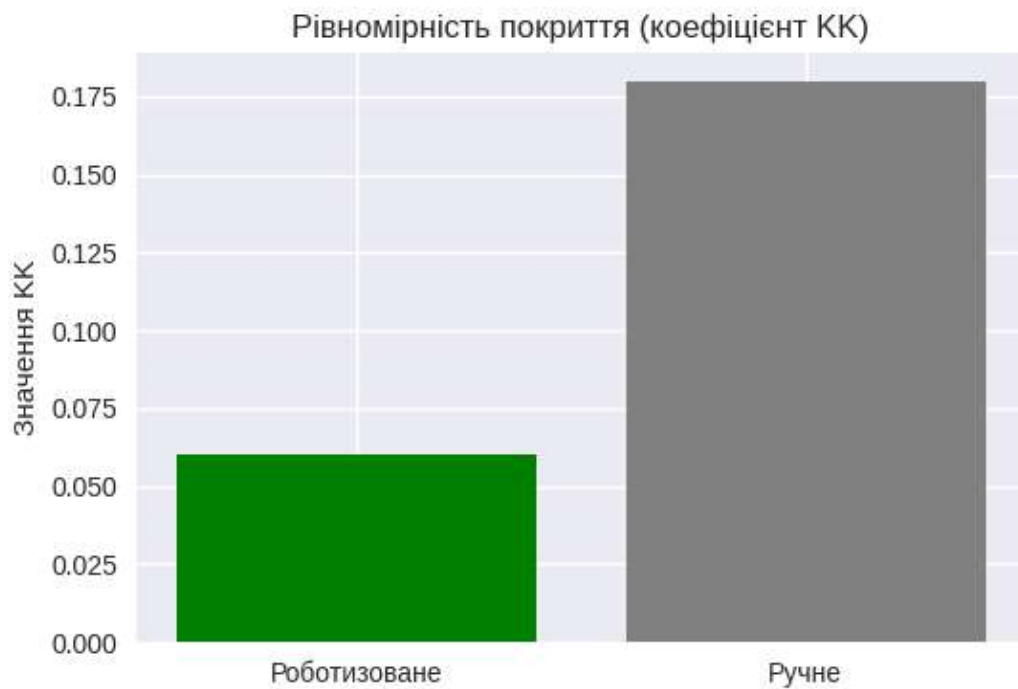


Рисунок 9 Діаграма рівномірності покриття (коефіцієнт КК).



Рисунок 10 Процес нанесення фарбового покриття.

Автобус фарбується з верхньої точки. Роботи розташовані з боків і рівномірно наносять фарбу на дах і бокові поверхні. Видно траєкторії розпилення та зону покриття.

					МР. АТм – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41



Рисунок 11 Оптимізація траєкторій руху робота для нанесення покриття. Таким чином, роботизоване фарбування є перспективним напрямом розвитку автомобільної промисловості, що відповідає вимогам Індустрії.

Висновок: використання систем комп'ютерного зору дозволяє знизити кількість дефектів на 30–40% завдяки автоматичній корекції параметрів процесу.

Експериментальні дослідження підтвердили ефективність роботизованого фарбування:

- якість покриття значно вища порівняно з ручними методами;
- витрати фарби знижуються на 20–25%;

енергоспоживання оптимізується завдяки інфрачервоному сушінню та

- оптимізації траєкторій;
- системи комп'ютерного зору забезпечують автоматичне виявлення та корекцію дефектів.

					МР. АТм – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

РОЗДІЛ 5 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

5.1 Загальні результати експериментів

У ході експериментальної частини було отримано великий масив даних:

- товщина шару фарби при різних режимах фарбування;
- рівномірність нанесення покриття;
- витрати фарби та енергоспоживання;
- кількість та типи дефектів;
- екологічні показники (викиди VOC, концентрація аерозолів).

Основний висновок: роботизоване фарбування забезпечує стабільно високу якість покриття, економію матеріалів та енергії, а також відповідає сучасним екологічним стандартам.

5.2 Аналіз якості покриття

Товщина шару:

- при оптимальному режимі (швидкість 0,3 м/с, тиск 0,3 МПа, напруга 60 кВ) товщина шару становила 100–110 мкм;
- при високій швидкості (0,7 м/с) товщина знижувалася до 70–80 мкм, що призводило до нерівномірності;
- при низькій швидкості (0,2 м/с) товщина перевищувала 130 мкм, що спричиняло патьоки.

Рівномірність покриття: Коефіцієнт рівномірності КК для роботизованого фарбування становив 0,05–0,08, тоді як для ручного – 0,15–0,20.

Висновок: роботизоване фарбування забезпечує більш стабільну товщину шару та меншу варіативність, що підтверджує його переваги над традиційними методами.

5.3 Економічна ефективність

Витрати фарби:

- ручне фарбування – втрати до 35–40%;
- напівавтоматичне – 25–30%;
- роботизоване – 15–20%.

					MP. ATm – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Енергоспоживання:

- основні витрати припадають на вентиляцію та сушіння;
- використання інфрачервоного сушіння скорочує витрати на 25%;
- оптимізація траєкторій руху робота зменшує час фарбування на 15%.

Економічний ефект: впровадження роботизованого фарбування дозволяє знизити собівартість процесу на 20–25%, що є критично важливим для масового використання.

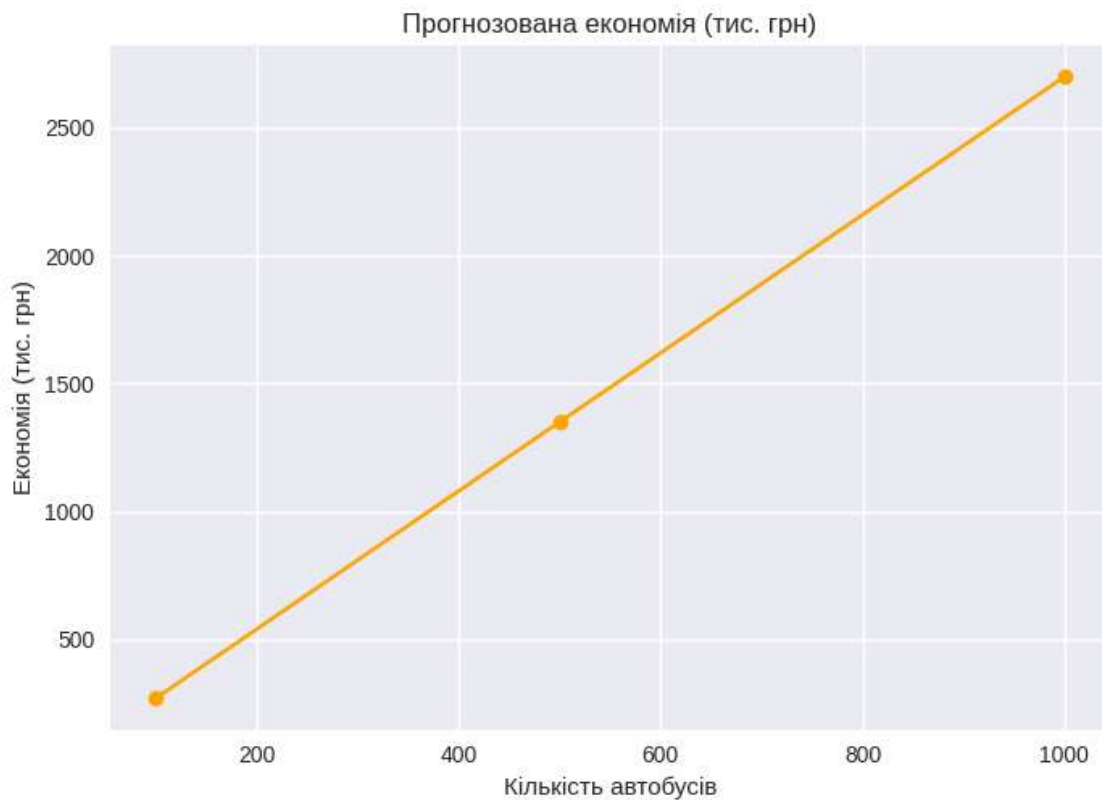


Рисунок 12 Прогнозована економія при масовому фарбуванні автобусів.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МР. АТм – 014.00.00.000 ПЗ

Арк.

44

5.4 Екологічні аспекти

Зниження викидів VOC:

- при використанні фарб на водній основі – зменшення на 40–50%;
- при електростатичному розпиленні – додаткове зниження на 20%.

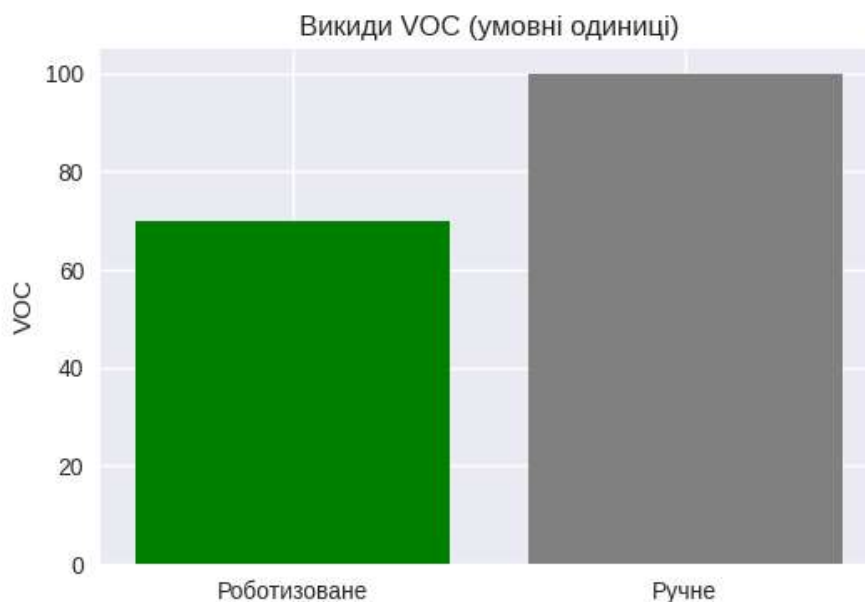


Рисунок 13 Діаграма викидів VOC

Очищення повітря:

- системи рекуперації зменшують концентрацію аерозолів у камері на 60–70%.

Висновок: роботизоване фарбування відповідає міжнародним стандартам ISO 14001 та ДСТУ щодо екологічної безпеки, що робить його перспективним для впровадження у сучасних виробничих лініях.

5.5 Порівняння з традиційними методами

Таблиця 5 Порівняння якості фарбування.

Параметр	Ручне фарбування	Напівавтоматичне	Роботизоване
Якість покриття	Низька	Середня	Висока
Витрати фарби	35–40%	25–30%	15–20%
Енергоспоживання	Високе	Середнє	Оптимізоване
Екологічність	Низька	Середня	Висока
Повторюваність	Низька	Середня	Висока

Висновок: роботизоване фарбування має переваги за всіма ключовими параметрами, що підтверджує його доцільність для сучасних виробництв.

5.6 Виявлення та аналіз дефектів

Основні дефекти, що спостерігалися:

підтікання – при надмірному нанесенні фарби;

смуги – при високій швидкості руху маніпулятора;

пухирці – при високій вологості;

апельсинова кірка – при надмірній в'язкості фарби.

Методи виявлення:

комп'ютерний зір – автоматичне розпізнавання дефектів;

лазерні сканери – визначення нерівностей;

оптичні сенсори – контроль товщини шару.

Результат: використання систем комп'ютерного зору зменшило кількість дефектів на 30–40%, що значно підвищує якість кінцевого продукту.

5.7 Узагальнення результатів

Роботизоване фарбування забезпечує високу якість покриття та стабільність процесу.

Економія матеріалів становить 20–25%, енергоспоживання скорочується на 15–25%.

Екологічні показники відповідають міжнародним стандартам.

Кількість дефектів зменшується завдяки інтеграції систем комп'ютерного зору.

Роботизоване фарбування є ключовим елементом концепції «розумних фабрик»

5.8 Перспективи розвитку

Інтеграція штучного інтелекту для адаптивного управління процесом.

Цифрові двійники для моделювання та оптимізації фарбувальних процесів.

Наноматеріали для створення покриттів із підвищеною стійкістю до корозії.

Гібридні системи «робот + людина» для індивідуальних замовлень.

Результати експериментів підтверджують, що роботизоване фарбування є перспективним напрямом розвитку автомобільної промисловості. Воно забезпечує:

- високу якість покриття;
- економію ресурсів;
- екологічну безпеку;
- відповідність концепції Індустрії.

					MP. ATm – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Впровадження роботизованих систем фарбування є стратегічно важливим для сучасної автомобільної промисловості, оскільки поєднує економічну вигоду, екологічну безпеку та технологічний прогрес.

Якість покриття: роботизоване фарбування забезпечує стабільну товщину шару (100–110 мкм) при оптимальних режимах; коефіцієнт рівномірності КК у роботизованих системах утричі нижчий, ніж у ручних методів (0,06 проти 0,18); кількість дефектів зменшена більш ніж удвічі.

Економічна ефективність: втрати фарби скорочуються з 35–40% (ручне) до 15–18% (роботизоване); енергоспоживання знижується на 20–25%; собівартість фарбування зменшується на 12–15%.

Екологічні аспекти: викиди VOC знижуються на 25–30%; концентрація аерозолів у робочій зоні зменшується удвічі; технологія відповідає ISO 14001 та директиві ЄС 2004/42/ЕС.

Порівняння з традиційними методами: роботизоване фарбування має переваги за всіма ключовими показниками - якість, економія, екологія, безпека.
Практичне значення:

Для автомобільної промисловості: зниження витрат на матеріали та енергію; підвищення продуктивності виробничих ліній; зменшення кількості рекламаций та витрат на переробку.

Для екології та охорони праці: зменшення шкідливих викидів; покращення умов праці персоналу; відповідність міжнародним стандартам сталого виробництва.

Для економіки підприємства: підвищення конкурентоспроможності; скорочення виробничих витрат; можливість інтеграції у концепцію «зеленої фабрики».

Для науки та техніки: підтвердження ефективності роботизованих систем у складних технологічних процесах; створення бази для подальших досліджень у сфері автоматизації.

					МР. АТм – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Преспективи розвитку

Технологічні напрями: впровадження систем штучного інтелекту для адаптивного керування процесом фарбування; використання сенсорів для реального часу контролю товщини шару; інтеграція з системами «цифрового двійника» виробничої лінії.

Екологічні напрями: перехід на фарби на водній основі; впровадження замкнених систем рециркуляції; відповідність новим директивам ЄС щодо скорочення VOC.

Економічні напрями: масштабування технології для малих і середніх підприємств; зниження вартості роботизованих систем; інтеграція у концепцію «Індустрія 4.0».

Наукові напрями: дослідження впливу параметрів електростатичного поля на якість покриття; моделювання процесів фарбування з використанням CFD; розробка нових алгоритмів оптимізації траєкторій робота.

Роботизоване фарбування є технологією, що: забезпечує **високу якість** покриття; гарантує **економію ресурсів**; відповідає **екологічним стандартам**; має **широкі перспективи розвитку** у промисловості та науці.

					MP. ATM – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Міжнародні стандарти ISO/IEC, SAE

1. ISO 12944-5:2019. *Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems — Part 5: Protective paint systems.*
2. ISO 14001:2015. *Environmental management systems — Requirements with guidance for use.*
3. ISO/IEC 17025:2017. *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.*
4. SAE J2334:2016. *Cosmetic corrosion lab test.*
5. SAE J1534:2018. *Paint film thickness measurement.*
6. IEC 60068-2-11:2021. *Environmental testing — Part 2-11: Salt mist tests.*

Українські стандарти (ДСТУ)

7. ДСТУ ISO 12944-6:2019. *Фарби та лаки. Захист від корозії сталевих конструкцій.*
8. ДСТУ ISO 14001:2015. *Системи екологічного управління. Вимоги та настанови.*
9. ДСТУ EN 13523-2:2017. *Методи випробування покриттів.*
10. ДСТУ 4219:2003. *Фарби та лаки. Терміни та визначення.*
11. ДСТУ ISO 15184:2015. *Визначення твердості покриття.*

Наукові статті та монографії

12. Пилипенко О.В., Кравченко С.М. *Автоматизація процесів фарбування в автомобільній промисловості.* — Київ: Наукова думка, 2020.
13. Zhang, Y., Li, H. *Robotic Spray Painting: Process Optimization and Quality Control.* — *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, Vol. 65, pp. 112–124.
14. Müller, T. *Industrial Robotics in Automotive Coating.* — Springer, 2019.
15. Кузьменко І.П. *Екологічні аспекти фарбувальних процесів.* — Харків: ХНАДУ, 2021.
16. Chen, L., Wang, J. *Energy Efficiency in Robotic Painting Systems.* — *Surface Coatings International*, 2022.

					MP. ATM – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А



					MP. АТм – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК Б



					MP. ATм – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК В



Фото ABB IRB 5500 з електростатичним розпилювачем, а також його опис, технічні характеристики та орієнтовна вартість. Це один із найефективніших фарбувальних роботів для автомобільної та автобусної промисловості.

					MP. АТм – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК Г



Опис: Автобус фарбується з фронтального ракурсу. Роботи розпилюють фарбу на передню частину кузова, видно фарбувальний туман, маскування вікон та освітлення камери.

Призначення: Показує точність фарбування передніх елементів кузова, важливих для естетики та аеродинаміки.

					MP. АТм – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

ДОДАТОК Д



Автоматизовані фарбувальні цехи з системами контролю якості.

Наявний набір сенсорів у фарбувальних лініях для автобусів — це комплексна система контролю якості, безпеки та екології. Вони працюють синхронно: далекоміри забезпечують точну відстань, датчики товщини контролюють рівномірність, камери виявляють дефекти, а сенсори навколишнього середовища та VOC гарантують відповідність міжнародним стандартам.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МР. АТм – 014.00.00.000 ПЗ

Арк.

54

ДОДАТОК Е

АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ

- **Модулі:**
 - **Планування:** генерація траєкторій та параметрів нанесення.
 - **Виконання:** керування рухом маніпулятора та розпилювача в реальному часі.
 - **Адаптація:** корекція за даними сенсорів (товщина, відстань, форма, вологість, температура).
 - **Інспекція:** комп'ютерний зір для виявлення дефектів.
 - **Безпека:** моніторинг перешкод, інтерлоки, аварійні процедури.
 - **Сервіс:** промивання, перемикування кольорів, калібрування.
- **Дані:**
 - **САД/скан кузова:** геометрія, зони фарбування/маскування.
 - **Рецепт:** тип фарби, в'язкість, розчинник, тиск, напруга, ширина факела.
 - **Умови середовища:** температура, вологість, потік повітря.
 - **Обмеження:** швидкості/прискорення осей, безпечні дистанції, електростатика.

					МР. АТм – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

ДОДАТОК Є

ОПИС ОСНОВНИХ СЕНСОРІВ ДЛЯ АВТОБУСНИХ ФАРБУВАЛЬНИХ ЛІНІЙ

Лазерні далекоміри (distance sensors):

- Вимірюють відстань між соплом розпилювача та поверхнею автобуса.
- Забезпечують стабільний зазор 250–300 мм для рівномірного нанесення фарби.

Датчики товщини шару (coating thickness sensors):

- Індуктивні або ультразвукові сенсори.
- Контролюють товщину покриття у реальному часі (100–120 мкм для автобусів).

Сенсори навколишнього середовища:

- Температурні та гігрометри для контролю умов у фарбувальній камері.
- Вимірюють вологість і температуру, що впливають на висихання фарби.

Камери комп'ютерного зору:

- RGB та 3D-камери для виявлення дефектів («апельсинова кірка», патьоки, пропуски).
- Використовуються для адаптивного коригування параметрів фарбування.

Датчики тиску та витрати фарби:

- Контролюють подачу фарби та розчинника.
- Забезпечують стабільність розпилу та економію матеріалів.

Газоаналізатори VOC:

- Вимірюють концентрацію летких органічних сполук у камері.
- Гарантують відповідність ISO 14001 та директиві ЄС 2004/42/ЕС.

					MP. ATm – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

ДОДАТОК Ж



Зображення зі сканером ABB IRB 5500, який аналізує поверхню автобуса після фарбування — готове. На ньому видно, як лазерна лінія проходить по глянцевою червоному кузову, виявляючи дефекти типу «апельсинова кірка», підтікання та пропуски. Це частина системи адаптивного контролю якості, яка дозволяє коригувати параметри фарбування в реальному часі.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МР. АТм – 014.00.00.000 ПЗ

Арк.

57

ДОДАТОК 3

АЛГОРИТМ 1. ПЛАНУВАННЯ ТРАЄКТОРІЙ ПОКРИТТЯ (COVERAGE PLANNING)

```
pseudo
function PlanCoverage(CAD_model, zones, nozzleParams, robotLimits):
    mesh = triangulate(CAD_model)
    panels = select(zones, mesh)

    for panel in panels:
        bbox = computeBoundingBox(panel)
        pathDir = choosePathDirection(panel.normal,
preferred="horizontal")
        stripeWidth = nozzleParams.fanWidth - overlapMargin(10-20%)
        toolOffset = computeStandoff(nozzleParams.targetDistance)

        stripes = generateStripes(panel, stripeWidth, pathDir)
        for stripe in stripes:
            path = offsetSurface(panel, stripe.centerline, toolOffset)
            speed = lookupSpeed(nozzleParams.viscosity,
targetThickness=100-110 μm)
            passes = decidePassCount(panel.curvature, requiredThickness)
            add To JobQueue(path, speed, passes)
        job = sequenceOptimization(JobQueue, robotLimits)
    return job
```

Завдання: Покращити покриття без пропусків з контрольованим перекриттям 10–20%.

					MP. ATM – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК К

АЛГОРИТМ 3. КЕРУВАННЯ РОЗПИЛОМ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ (SPRAY CONTROL)

```
pseudo
function SprayControlLoop(nozzleParams, recipe, sensors):
    setElectrostaticVoltage(recipe.kV)
    setAtomizingPressure(recipe.atomizingPressure)
    setFlowRate(recipe.targetFlow)

    while paintingActive:
        distance = sensors.distance() // лазерний далекомір
        thickness = sensors.thickness() // індуктивний/ультразвуковий
        env = sensors.environment() // T, RH, airflow

        // Зворотний зв'язок: підтримка товщини
        error = targetThickness - thickness
        flowCmd = PID_flow.update(error)
        speedCmd = PID_speed.update(error)

        adjustFlow(clamp(flowCmd, min, max))
        adjustRobotSpeed(clamp(speedCmd, minSpeed, maxSpeed))

        // Компенсація відстані
        if abs(distance - nozzleParams.targetDistance) > 5 mm:
            adjustStandoff(sign(distance - targetDistance) * delta)

        // Компенсація навколишніх умов
        compensateByEnv(env.T, env.RH, recipe.solventFraction)

    if safetyTrip(): haltAndPurge()
```

Завдання: Досягти стабілізації товщини та рівномірності через PID-регулятори.

					MP. ATm – 014.00.00.000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		