

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет КОНСТРУЮВАННЯ ТА ДИЗАЙНУ

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

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

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
(ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ БАКАЛАВРА)
на тему РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ УНІВЕРСАЛЬНОЇ
РОБОТОТЕХНІЧНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ТА
ОБСЛУГОВУВАННЯ ПОСІВІВ У ЗАКРИТОМУ ҐРУНТІ

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування
(код і назва)

Гарант освітньої програми

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

(підпис)

Володимир БУЛГАКОВ
(ПІБ)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

Ph.D
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Олександр СПОДОБА
(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Андрій Андрущенко
(ПІБ студента)

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет КОНСТРУЮВАННЯ ТА ДИЗАЙНУ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Конструювання машин і обладнання

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

З А В Д А Н Н Я

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

Андрущенко Андрій Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування

(код і назва)

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи (дипломного проєкту бакалавра) **РОЗРОБКА
КОНСТРУКЦІЇ УНІВЕРСАЛЬНОЇ РОБОТОТЕХНІЧНОЇ ПЛАТФОРМИ
ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ТА ОБСЛУГОВУВАННЯ ПОСІВІВ У
ЗАКРИТОМУ ҐРУНТІ**

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

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

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи (дипломного проєкту бакалавра)

Перелік питань, які потрібно розробити:

1. Провести аналіз існуючих конструкцій універсальних робототехнічних платформ
Розглянути перспективи створення нових конструкцій конструкцій універсальних
робототехнічних платформ
2. Провести розрахунки для розробки конструкції робототехнічної платформи
3. Розглянути питання охорони праці
4. Виконати розрахунок економічної ефективності.

Перелік графічних документів (за потреби)

1. Загальний вид
2. Складальне креслення
3. Деталі

Дата видачі завдання “16”квітня 2026 р.

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

(підпис)

Олександр СПОДОБА
(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Андрій Андрущенко
(прізвище та ініціали студента)

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ.....	5
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕПЛИЧНИХ ГОСПОДАРСТВ.....	8
1.1. Особливості вирощування культур у закритому ґрунті.....	8
1.2. Огляд сучасних робототехнічних систем у теплицях.....	8
1.3. Аналіз існуючих мобільних платформ для агросектору.....	9
1.4. Технології моніторингу стану рослин.....	10
1.5. Недоліки існуючих рішень та постановка задачі.....	11
РОЗДІЛ 2. ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ РОБОТОТЕХНІЧНОЇ ПЛАТФОРМИ.....	13
2.1. Формування технічного завдання.....	13
2.2. Вибір типу платформи та структурного принципу.....	13
2.3. Розробка загальної компоновки.....	15
2.4. Конструкція шасі та рами у вигляді монококу.....	16
2.5. Вибір робочих модулів.....	16
2.6. Обґрунтування та розробка кінематичної схеми.....	18
2.7. Опис принципу роботи платформи.....	19
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНКОВО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА.....	21
3.1. Обґрунтування кінематичної схеми ходової частини та вибір мотор-редукторів.....	21
3.2. Розрахунок тягового зусилля та крутного моменту.....	22
3.3. Розрахунок швидкості та частоти обертів.....	23
3.4. Розрахунок потужності привода.....	24
3.5. Геометричні параметри та монтажні характеристики привода.....	25

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.028 ПЗ									
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис.	Дата										
Розроб.	Андрущенко				Зміст					Літ.	Аркуш	Аркушів		
Перевір.	Сподоба О.О											3	54	
										НУБіП України				
Н. контр.														
Затверд.														

РОЗДІЛ 4. ПРОГРАМНО-АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	26
4.1. Архітектура системи керування на базі операційного середовища ROS.....	26
4.2. Алгоритми автономної навігації та планування траєкторії руху...	27
4.3. Розробка підсистеми комп'ютерного зору та детекції фітопатологій.....	28
4.4. Програмне забезпечення та інтерфейс оператора роботизованого комплексу.....	29
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА.....	31
5.1. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів при експлуатації платформи.....	31
5.2. Технічні та організаційні заходи із забезпечення безпеки експлуатації.....	32
5.3. Електробезпека та пожежна безпека електроустановок.....	33
5.4. Оцінка екологічного впливу роботизованої платформи та порівняльний аналіз.....	34
5.5. Інженерно-екологічні заходи з мінімізації антропогенного навантаження.....	35
РОЗДІЛ 6. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЄКТУ.....	38
6.1. Визначення витрат на розробку та виготовлення.....	38
6.2. Розрахунок експлуатаційних витрат.....	42
6.3. Техніко-економічне порівняння з традиційними методами обслуговування закритого ґрунту.....	45
6.4. Розрахунок економічної ефективності та терміну окупності.....	46
6.5. Визначення терміну окупності капітальних вкладень.....	48
ВИСНОВКИ.....	50
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	52
ДОДАТКИ.....	55

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра, тема якої: “РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ УНІВЕРСАЛЬНОЇ РОБОТОТЕХНІЧНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ТА ОБСЛУГОВУВАННЯ ПОСІВІВ У ЗАКРИТОМУ ҐРУНТІ” складається з шести (6) розділів, що розміщені на п'ятдесяти чотирьох (54) сторінках друкованого тексту, семи (7) рисунків, двох (2) таблиць, висновків, двадцяти п'яти (25) літературних джерел і додатків до графічної частини.

В першому розділі бакалаврської кваліфікаційної роботи розглянуто аналіз сучасних рішень для автоматизації тепличних господарств.

В другому розділі роботи наведено обґрунтування та розробка конструкції робототехнічної платформи

В третьому розділі роботи наведено обґрунтування та розробка конструкції робототехнічної платформи

В четвертому розділі роботи наведено програмно-алгоритмічне забезпечення

В п'ятому розділі роботи розглянуто питання щодо охорони праці та екологічної безпеки

В шостому розділі роботи наведено економічне обґрунтування проєкту.

Ключові слова: робототехніка, універсальна платформа, роботизація, комп'ютерний зір, система керування.

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.028 ПЗ				
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис.	Дата					
Розроб.	Андрущенко				Реферат Літ. Аркуш Аркушів Перевір. Сподоба О.О 5 54 Н. контр. Затверд. НУБіП України				
Перевір.	Сподоба О.О								
Н. контр.									
Затверд.									

ВСТУП

Сучасний розвиток агропромислового комплексу пов'язаний з інтенсивним впровадженням технологій точного землеробства, серед яких автоматизація процесів у закритому ґрунті є одним із найбільш наукомістких напрямків. Специфіка тепличних господарств як обмеженого, технологічно щільного та деформівного операційного середовища з підвищеними рівнями вологості й температури висуває жорсткі вимоги до мобільних роботизованих засобів. Традиційні просторові металеві рами, що використовуються у більшості сучасних агроплатформ, мають суттєві недоліки: надлишкову матеріаломісткість, схильність до корозії в агресивному середовищі, недостатню жорсткість на кручення та складність забезпечення герметизації внутрішніх вузлів.

Ефективним розв'язанням окреслених проблем є перехід до тримальних безрамних конструкцій типу монокок, виготовлених із полімерних композиційних матеріалів. Застосування композитного монококу в конструкціях безекіпажних та роботизованих платформ дозволяє суттєво знизити власну масу транспортного засобу за одночасного збільшення корисної місткості внутрішнього простору для розміщення джерел живлення та електронних модулів. Це забезпечує підвищення енергоефективності, необхідної для тривалої автономної роботи, та гарантує високий рівень захисту обладнання від пилу й вологи. Таким чином, розробка універсальної роботизованої платформи, яка поєднує оптимізовану композитну конструкцію з сучасним програмно-алгоритмічним комплексом на базі операційної системи ROS 2 та засобів комп'ютерного зору, є актуальним науково-практичним завданням для машинобудівної та аграрної галузей.

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.028 ПЗ		
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис.	Дата	Вступ		
Розроб.	Андрущенко						
Перевір.	Сподоба О.О						
Н. контр.							
Затверд.					НУБіП України		
					Літ.	Аркуш	Аркушів
						6	54

Мета проєкту — теоретичне обґрунтування, розрахунок та проєктування універсальної роботизованої платформи з тримальним композитним монококовим корпусом для автономного моніторингу та виконання технологічних операцій обслуговування сільськогосподарських культур у закритому ґрунті. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: Проаналізувати сучасний стан і тенденції розвитку засобів автоматизації тепличних господарств та наявні конструктивно-компонувальні рішення мобільних роботів. Обґрунтувати геометричні параметри та матеріал тримального монококу, а також виконати розрахунок його напружено-деформованого стану. Провести тягово-динамічний і кінематичний розрахунок роботизованої платформи з обґрунтуванням технічних характеристик приводних елементів. Розробити архітектуру системи керування платформою на базі операційної системи ROS 2 та алгоритмічне забезпечення автономної навігації і побудови карт середовища. Інтегрувати підсистему комп'ютерного зору для фітосанітарного моніторингу та оцінки стану вегетації рослин. Оцінити техніко-економічну ефективність впровадження розробки, а також розробити заходи з охорони праці та навколишнього середовища.

Сформовано інженерні рекомендації та розрахункові моделі для проєктування тримальних безрамних корпусів мобільних агророботів із композиційних матеріалів. Розроблено уніфіковану модульну архітектуру системи керування, що дозволяє адаптувати платформу для виконання різних технологічних операцій (диференційованого внесення препаратів, точкового зрошення або збору врожаю). Впровадження розробленого рішення забезпечує зниження операційних витрат тепличних господарств та зменшення хімічного навантаження на екосистему за рахунок прецизійного дозування робочих речовин.

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.028 ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		7

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕПЛИЧНИХ ГОСПОДАРСТВ

1.1. Особливості вирощування культур у закритому ґрунті.

Сучасні тепличні господарства вимагають прецизійного управління мікрокліматом, що включає контроль температури, вологості повітря та концентрації CO₂. Закрите середовище є сприятливим для швидкого поширення патогенів, зокрема грибкових захворювань, що робить критичним оперативний моніторинг кожного сегмента посадки. З точки зору автоматизації, теплиця часто є неструктурованим середовищем із хаотичним розташуванням перешкод та складними умовами пересування (пухкий ґрунт, висока вологість). Це створює жорсткі вимоги до надійності електроніки та прохідності шасі.

1.2. Огляд сучасних робототехнічних систем у теплицях

На ринку домінують вузькоспеціалізовані рішення, проте спостерігається тренд до інтелектуалізації:

- **G-ROBOT:** Модульна платформа для інспекції висоти розсади, що використовує ядро на базі STM32 або Raspberry Pi.
- **Phoenix:** Автономна система для боротьби з грибковими захворюваннями за допомогою UV-C випромінювання.
- **XMachines:** Компактний робот, оптимізований для автоматизованого обприскування рослин.
- **LeoBot:** Концепція робота-аватара з відкритим кодом, яка дозволяє агроному дистанційно оглядати посіви через VR-інтерфейс, мінімізуючи

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.028 ПЗ			
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис.	Дата	Розділ I. Аналіз сучасних рішень для автоматизації тепличних господарств			
Розроб.	Андрущенко							
Перевір.	Сподоба О.О							
Н. контр.								
Затверд.								
					Літ.	Аркуш	Аркушів	
						8	54	
					НУБіП України			

фізичну присутність людей у вразливих зонах.

Метою роботи є проектування та дослідження універсальної модульної роботизованої платформи на базі тримальної рами-монококу з композитних матеріалів (вуглеволокна або склопластику). Використання композитного монококу спрямоване на оптимізацію масово-геометричних характеристик конструкції, зокрема на забезпечення високої вантажопідйомності платформи за мінімальної власної маси, що спирається на досвід розробки аналогів класу BRO.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Розробити герметичну конструкцію корпусу з рівнем захисту внутрішніх компонентів не нижче IP67 для стабільної роботи в умовах підвищеної вологості та запиленості.
2. Спроекувати й інтегрувати інтелектуальну систему моніторингу стану посівів та точкового диференційованого поливу на базі операційної системи ROS та алгоритмів штучного інтелекту.
3. Мінімізувати енергоспоживання мобільної платформи шляхом полегшення маси тримальних елементів та застосування енергоефективного обчислювального модуля Nvidia Jetson Nano.

1.3. Аналіз існуючих мобільних платформ для агросектору

Традиційно агроплатформи будуються на базі рамних конструкцій, проте сучасний розвиток техніки вказує на переваги монококових рішень:

- **Типи рушіїв:** Колеса залишаються найдешевшим варіантом для рівних покриттів, тоді як гусеничні системи (наприклад, BRO L2.2) забезпечують значну вантажопідйомність до 350 кг та кращу стабільність на пухкому ґрунті. Українська платформа «Валіза» демонструє можливість колісних роботів транспортувати до 500 кг вантажу в складних умовах.
- **Структурний принцип:** Перехід від класичної рами («frame and box») до монококу дозволяє більш ніж вдвічі збільшити внутрішній простір для

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.028 ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		9

електроніки та акумуляторів при одночасному зниженні загальної ваги. Профіль типу монокок у 2.5 раза міцніший за традиційні литі алюмінієві рами, що дозволяє витримувати значні робочі навантаження.

- Програмна база: Стандартом для таких систем є ROS (Robot Operating System), що забезпечує модульність ПЗ та можливість симуляції в середовищі Gazebo перед фізичним розгортанням.

1.4. Технології моніторингу стану рослин

Сучасні системи моніторингу інтегрують декілька рівнів збору даних:

- Сенсорний рівень: Використання датчиків DHT22 (температура/вологість), MH-Z19 (CO₂) та MEMS-гіроскопів для стабілізації платформи.

- Комп'ютерний зір та AI: Застосування RGB та мультиспектральних камер дозволяє реалізувати глибоке навчання для детекції хвороб на ранніх стадіях. Прогрес у навчанні нейромереж дозволяє роботам розпізнавати складні об'єкти навіть при змінному освітленні теплиць.

- Навігація: Використання Lidar та ультразвукових датчиків для побудови карт (SLAM) та автономного обходу перешкод у реальному часі.

- Технології моніторингу стану рослин (сенсори, комп'ютерний зір)

Сучасні комплекси автоматизованого контролю параметрів агрофітоценозів інтегрують багаторівневу структуру збору й обробки первинної інформації. На базовому сенсорному рівні фіксація параметрів мікроклімату здійснюється за допомогою цифрових датчиків серії DHT22, які реєструють температуру й відносну вологість робочої зони, а також газоаналізаторів типу MH-Z19 для безперервного визначення концентрації диоксиду вуглецю. Для забезпечення динамічної стабілізації положення мобільної платформи під час руху по нерівностях рельєфу в контур керування інтегруються інерційні MEMS-модулі, що фіксують кутові швидкості та лінійні прискорення корпусу.

					01.09 – КР. 1044 "С" 2026.04.15.028 ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		10

Рівень комп'ютерного зору та штучного інтелекту базується на застосуванні RGB та мультиспектральних оптичних сенсорів. Отриманий відеопотік обробляється алгоритмами глибокого навчання (Deep Learning), що дозволяє здійснювати автоматичну детекцію, класифікацію та локалізацію фітопатологій на ранніх стадіях розвитку рослин. Поточний прогрес у навчанні згорткових нейронних мереж забезпечує стабільну точність розпізнавання цільових об'єктів та дефектів листової поверхні навіть в умовах нестабільного штучного освітлення чи змінного природного затінення у закритих ґрунтах.

Контур автономної навігації, просторового позиціонування та оперативного обходу перешкод у реальному часі реалізується шляхом комплексування даних з оптичних далекомірив (Lidar) та масивів ультразвукових датчиків. Отримані хмари точок та дистанційні вектори використовуються для побудови двовимірних або тривимірних карт навколишнього простору за алгоритмами SLAM, що дозволяє роботу ефективно орієнтуватися міжряддями без ризику пошкодження вегетуючих рослин чи елементів конструкції теплиці.

1.5. Недоліки існуючих рішень та постановка задачі

Аналіз показав, що більшість існуючих платформ мають значні недоліки:

1. Вага та габарити: Рамні конструкції забирають багато корисного простору, який міг би бути використаний для акумуляторів, та мають гірше співвідношення жорсткості до ваги порівняно з монококом.
2. Захищеність: Відкриті рами вимагають додаткових герметичних кожухів для електроніки, що здорожчує конструкцію.
3. Економічна неефективність: Більшість систем є вузькопрофільними, що вимагає придбання окремих роботів для різних завдань.

Постановка задачі: Метою роботи є розробка універсальної модульної роботизованої платформи на базі рами-монококу з композитних матеріалів (вуглеволокно або склопластик). Таке рішення дозволить:

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.028 ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		11

- Досягти високого рівня захисту компонентів (IP67) за рахунок герметичності корпусу.
- Забезпечити високу вантажопідйомність при мінімальній власній вазі (використовуючи досвід платформ типу BRO).
- Інтегрувати інтелектуальну систему моніторингу та точкового поливу на базі ROS та алгоритмів AI.
- Оптимізувати енергоспоживання завдяки легкій конструкції монококу та використанню енергоефективних обчислювачів (Nvidia Jetson Nano).

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.028 ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		12

РОЗДІЛ 2. ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ РОБОТОТЕХНІЧНОЇ ПЛАТФОРМИ

2.1. Формування технічного завдання

Вихідною концептуальною вимогою до проектованої мобільної платформи є відмова від класичної рамно-коробчастої архітектури на користь інтегрального суцільнонесучого корпусу типу монокок. Таке конструктивне рішення спрямоване на комплексну оптимізацію параметрів мобільної системи. Зокрема, впровадження несучої оболонки дозволяє мінімізувати металоємність і загальну масу конструкції за одночасного підвищення її питомої жорсткості на кручення під час сприйняття знакозмінних навантажень.

Окрім покращення міцнісних характеристик, монококова геометрія забезпечує максимальний корисний внутрішній об'єм для раціонального компонування блоків керування, силових плат та акумуляторних батарей. Спроекований корпус повинен витримувати експлуатаційні навантаження при транспортуванні корисного обладнання масою від 350 до 500 кг. При цьому геометрія стиків та з'єднань елементів несучої оболонки має забезпечувати повну герметичність внутрішнього простору з рівнем захисту оболонки не нижче класу IP67, що є критично важливим для стабільної роботи електроніки в умовах високотемпературного гідротермічного режиму закритих ґрунтів.

2.2. Вибір типу платформи та структурного принципу

Порівняльний аналіз тримальних систем показує, що застосування традиційних рам сходового типу (ladder frame) супроводжується значним обважненням конструкції та недостатньою жорсткістю на кручення в умовах

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.028 ПЗ							
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис.	Дата								
Розроб.	Андрущенко				Розділ 2. Обґрунтування та розробка конструкції робототехнічної платформи				Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.	Сподоба О.О										13	54
									НУБіП України			
Н. контр.												
Затверд.												

нерівностей мікрорельєфу. З огляду на це, для розробки було обрано монококову структуру кузова. На відміну від класичних рамних шасі транспортних засобів, інтеграція підвіски та елементів привода безпосередньо в тримальні площини несучого корпусу дозволяє суттєво знизити центр мас та зменшити габаритну висоту робота.

Окрім покращення міцнісних характеристик, монококова геометрія забезпечує максимальний корисний внутрішній об'єм для раціонального компонування блоків керування, силових плат та акумуляторних батарей. Спроектований корпус повинен витримувати експлуатаційні навантаження при транспортуванні корисного обладнання масою від 350 до 500 кг. При цьому геометрія стиків та з'єднань елементів несучої оболонки має забезпечувати повну герметичність внутрішнього простору з рівнем захисту оболонки не нижче класу IP67, що є критично важливим для стабільної роботи електроніки в умовах високотемпературного гідротермічного режиму закритих ґрунтів.

Порівняльний аналіз тримальних систем показує, що застосування традиційних рам сходового типу (ladder frame) супроводжується значним обважненням конструкції та недостатньою жорсткістю на кручення в умовах нерівностей мікрорельєфу. З огляду на це, для розробки було обрано монококову структуру кузова.

На відміну від класичних рамних шасі транспортних засобів, інтеграція підвіски та елементів привода безпосередньо в тримальні площини несучого корпусу дозволяє суттєво знизити центр мас та зменшити габаритну висоту робота.

Це забезпечує додаткову стабільність платформи проти перекидання та покращує її маневреність під час проходження під технологічними лотками чи кронами рослин. Для забезпечення стабільного тягово-зчіпного зусилля на пухких, зволжених субстратах і мінімізації буксування в межах даного розділу обґрунтовано доцільність застосування чотирьохколісної повноприводної бази з незалежним диференціальним або повноповоротним керуванням, що за

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.028 ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		14

показниками мобільності в обмеженому просторі не поступається гусеничним рушіям.

2.3. Розробка загальної компоновки

Архітектура роботизованої платформи базується на безрамному принципі конструювання, де кожен структурний елемент виконує подвійну функцію: сприймає силові експлуатаційні навантаження та одночасно слугує захисним або функціональним компонентом загального корпусу. При такому підході верхні кришки та панелі монококу інтегруються в загальну силову схему, забезпечуючи рівномірний розподіл напружень по всій площині матеріалу. Внутрішній простір зоновано за функціональним призначенням на ізольований герметичний відсік енергоживлення і логічного керування та відкриті монтажні зони для встановлення виконавчих механізмів, систем точкового зрошення та маніпуляційних модулів.

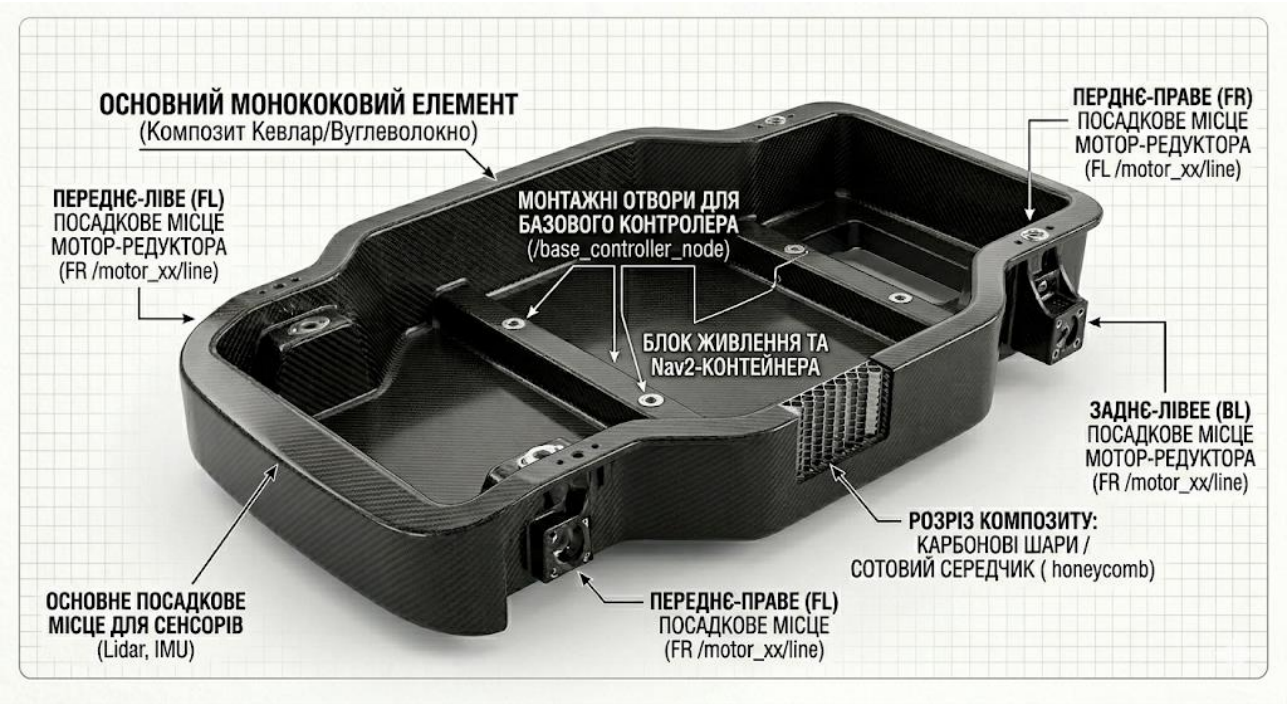


Рис. 2.1 Конструктивна схема монокока роботехнічної платформи

2.4. Конструкція шасі та рами у вигляді монококу

Проектування несучої системи роботизованої платформи базується на створенні цілісної просторової структури, яка визначає загальну архітектуру та аеродинамічно-захисну форму робота. На противагу традиційному використанню профільованої сталі та алюмінієвих сплавів, у даній розробці обґрунтовано застосування композитних матеріалів на основі скловолокна та епоксидної сполучної матриці. Конструкторський аналіз та попередні розрахунки показують, що забезпечення товщини стінок тримального монококу від 3,6 мм є достатнім для сприйняття робочих навантажень, забезпечуючи при цьому суттєве зниження маси кузова. Завдяки раціональному перерозподілу внутрішніх зусиль по всій поверхні оболонки, інтегральний профіль типу монокок за показниками питомої міцності та жорсткості на кручення у 2,5 раза перевищує параметри стандартних литих алюмінієвих рам аналогічних габаритів.

Для перевірки міцнісних характеристик спроектованої конструкції та її масово-геометричної оптимізації застосовано метод скінченних елементів (FEA) у програмному комплексі ANSYS. На основі побудованої тривимірної моделі та задання граничних умов (статичних і динамічних навантажень від ваги обладнання, реакцій ґрунту та крутних моментів приводів) було проведено комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану (НДС) корпусу. Отримані епюри розподілу напружень за фон Мізесом дозволили локалізувати зони концентрації максимальних напружень і деформацій. Це дало змогу оптимізувати геометрію монококу шляхом введення локальних потовщень та додаткових внутрішніх ребер жорсткості лише в критичних точках, уникнувши загального обважнення конструкції.

2.5. Вибір робочих модулів

Завдяки реалізації агрегатно-модульного принципу конструювання,

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.028 ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		16

спроектований корпус-монокок виконує функцію універсального енергонасиченого транспортного шасі. Структура платформи дозволяє інтегрувати різні типи функціонального навісного обладнання залежно від поставлених технологічних завдань у закритому ґрунті.

До базового комплекту робочих модулів належать:

- Модуль оптико-екологічного моніторингу, призначений для збору первинних даних про стан агрофітоценозу. Він містить масиви мультиспектральних та RGB-камер для оцінки індексу листової поверхні й детекції патогенів, а також блоки цифрових сенсорів мікроклімату серії DHT22 та МН-Z19, що фіксують просторовий розподіл температури, вологості й концентрації вуглекислого газу.



Рис. 2.2 Сенсор вологості DHT22.



Рис. 2.3 Сенсор вуглекислого газу МН-Z19

- Комплекс виконавчих механізмів, архітектура якого передбачає встановлення систем точкового диференційованого внесення рідких добрив (або засобів захисту рослин) та малогабаритних маніпуляційних пристроїв. Взаємодія з робочими органами забезпечується через уніфіковані механічні інтерфейси швидкої фіксації та стандартизовані програмні протоколи (API) в межах загальної архітектури ROS.
- Підсистема автономної навігації та орієнтування, яка складається з кругових оптичних далекомірів (Lidar) та периферійних ультразвукових датчиків ехолокації. Цей апаратний комплекс забезпечує сканування простору в реальному часі, що необхідно для безаварійного руху платформи в неструктурованому міжрядному просторі промислових теплиць.



Рис. 2.4 Всеспрямований лідар

2.6. Обґрунтування та розробка кінематичної схеми

Конструкція розроблюваного монококу передбачає інтеграцію повноприводної кінематичної схеми з диференціальним принципом керування. Чотири незалежні мотор-колеса на базі серводвигунів, симетрично розташовані по кутах тримального корпусу, забезпечують високі маневрові характеристики платформи: як прямолінійний рух, так і розворот навколо геометричного центра (на місці). Таке рішення є критично важливим для забезпечення

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.028 ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		18

мінімального радіуса повороту в умовах обмеженого простору міжрядних проходів промислових теплиць.

Для демпфування динамічних навантажень, компенсації мікрорельєфу та забезпечення постійного зчеплення всіх чотирьох рушіїв із пухким субстратом у конструкції ходової частини реалізовано пасивну підвіску з віскоеластичними (пружно-дисипативними) елементами. Вузли кріплення підвіски інтегровані безпосередньо в локально підсилені зони високої жорсткості нижньої частини монококу, що дозволяє рівномірно розподіляти реакції ґрунту на суцільнонесучу оболонку робота, запобігаючи виникненню критичних концентрацій напружень у композитному матеріалі.

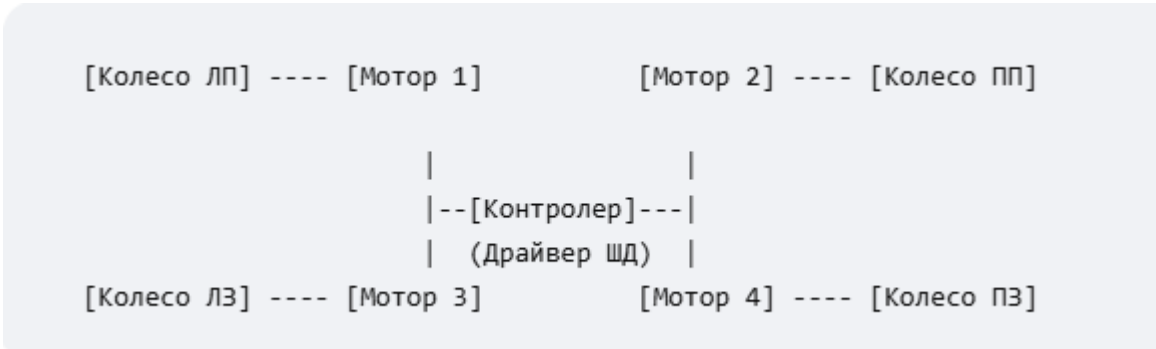


Рис. 2.5 Кінематична схема платформи

2.7. Опис принципу роботи платформи

Контур керування роботизованою платформою функціонує в середовищі операційної системи ROS (Robot Operating System), яка забезпечує модульну архітектуру обробки даних та синхронізацію процесів у реальному часі. Алгоритм функціонування мобільної системи розподілено на чотири послідовні етапи:

Сприйняття та первинна обробка інформації. Інформаційні потоки, що надходять від лазерного далекоміра (Lidar) та інерційного вимірювального модуля (IMU), піддаються фільтрації та проходять через алгоритми комплексування даних (Data Fusion). Це дозволяє мінімізувати похибки вимірювань і побудувати прецизійну цифрову карту навколишнього простору.

Планування та оптимізація траєкторії. На основі завантаженого URDF-опису робота, що містить точні геометричні параметри, масово-інерційні характеристики та координати центра мас композитного монококу, програмний пакет MoveIt! (або навігаційний стек Nav2) здійснює розрахунок оптимальної траєкторії переміщення в межах тепличної зони.

Виконання та низькорівневе керування. Сформовані високорівневі команди руху транслюються на бортовий мікроконтролер (на базі архітектури STM32), який безпосередньо взаємодіє з драйверами сервоприводів мотор-колес. Для плавного обходу динамічних перешкод та стабілізації курсу в контур керування інтегровано регулятори на базі нечіткої логіки (Fuzzy Logic).

Динамічна стабілізація та безпека. При виникненні критичних кутів крену або тангажу під час руху по пухкому мікрорельєфу, підсистема безпеки за даними IMU автоматично коригує кутові швидкості окремих колес або знижує загальну швидкість платформи, запобігаючи перекиданню робота та пошкодженню дорогого моніторингового обладнання.

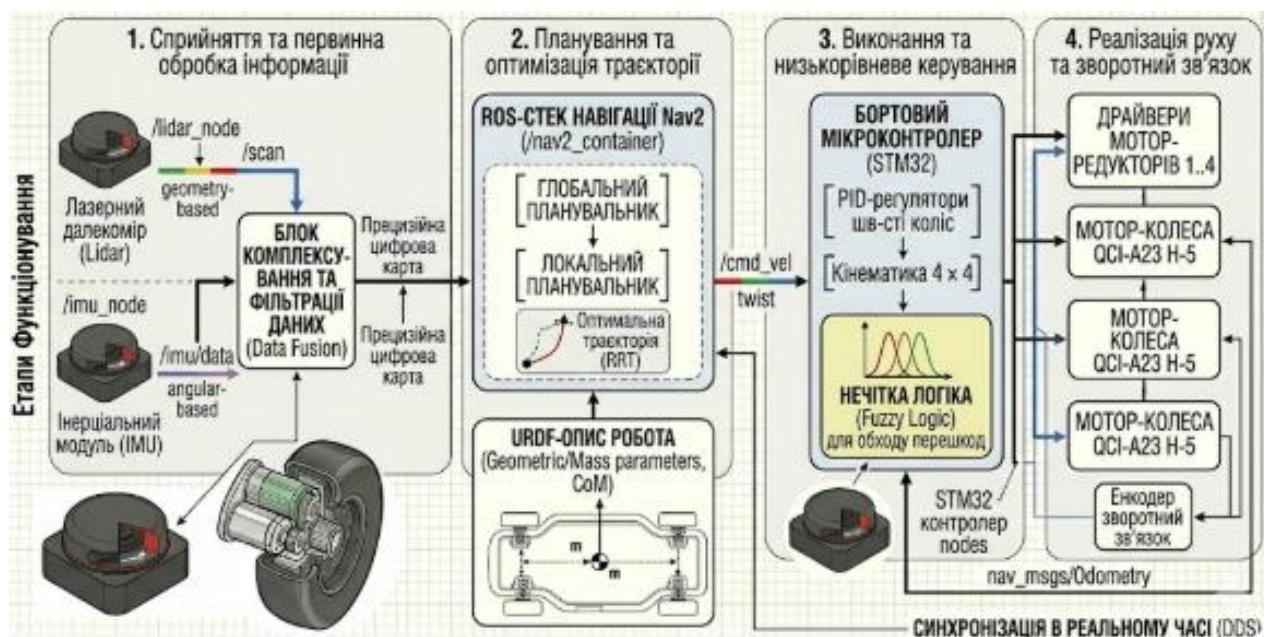


Рис. 2.6 Схема функціонування роботехнічної платформи

3.1. Обґрунтування кінематичної схеми ходової частини та вибір р-редукторів

Основним критерієм вибору елементів привода є забезпечення високого пускового крутного моменту при мінімальних габаритах і високій енергоефективності. На основі аналізу існуючих рішень мобільної робототехніки (зокрема, платформи MOLLEBot III), як електроприводні вузли обрано інтелектуальні серводвигуни QuickSilver QCI-A23 H-5. Конструктивне виконання цього привода передбачає наявність інтегрованого планетарного редуктора з передаточним числом $U = 15$, що дозволяє досягти необхідних тягово-зчіпних характеристик на низьких частотах обертання колеса під час руху по пухкому субстрату.

Для організації замкненого контуру керування та точного відпрацювання кутового переміщення двигуни оснащені вбудованими енкодерами зворотного зв'язку. Комунікація між приводами та бортовим обчислювальним ROS-контролером здійснюється через послідовний інтерфейс RS-232, що спрощує апаратну інтеграцію та підвищує завадостійкість каналів керування.

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.028 ПЗ								
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис.	Дата									
Розроб.	Андрущенко				Розділ 3. Розрахунково-конструкторська частина				Літ.	Аркуш	Аркушів		
Перевір.	Сподоба О.О										21	54	
Н. контр.													
Затверд.									НУБіП України				

Параметри двигуна QCI-A23 H-5:

- Тип: Гібридний сервопривід (NEMA 23).
- Максимальна швидкість: 4000 об/хв (рекомендована для стабільної роботи — до 2700 об/хв).
- Пікова потужність: 95 Вт.
- Енкодер: I-Grade, 8000 відліків на оберт.
- Вага вузла: 2.56 кг (разом із редуктором та маточиною)

Загальний вид обраного мотор-редуктора

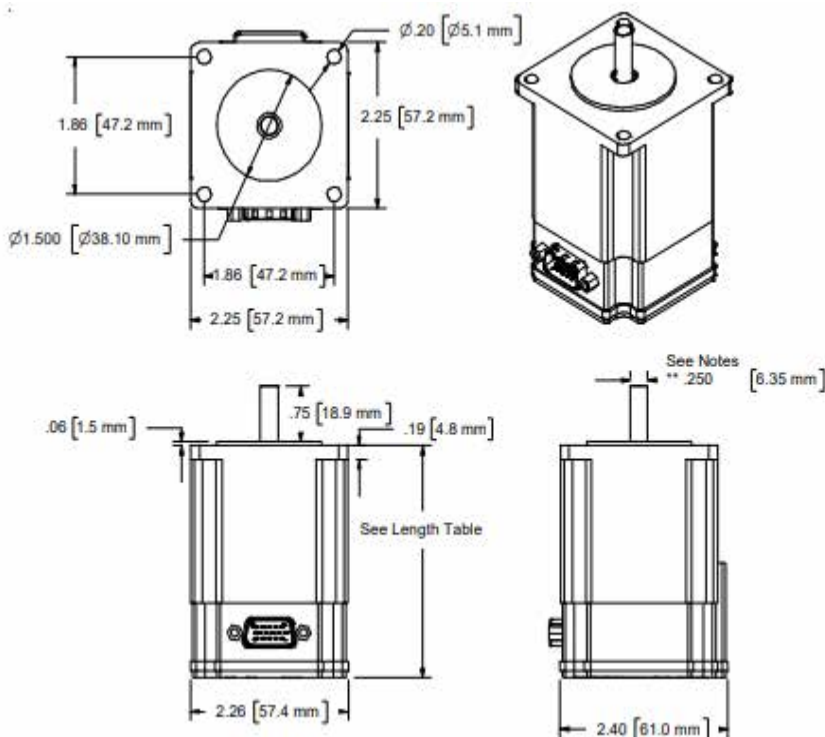


Рис. 3.1. Приєднувальні розміри двигуна QCI-A23 H-5

3.2. Розрахунок тягового зусилля та крутного моменту

Розрахунок базується на подоланні сил опору руху в специфічних умовах закритого ґрунту.

Вихідні дані:

- Повна маса платформи (GVW): $M=300$ кг.
- Кількість ведучих коліс: $n=4$.
- Радіус колеса: $R=0.158$ м (12.5 дюймів).

- Коефіцієнт опору коченню (пухкий ґрунт): $f=0.15$.
 - ККД редуктора: $\eta=0.85$.
1. Загальна сила опору руху ($F_{заг}$):

$$F_{total} = M \times g \times f = 300 \times 9.81 \times 0.15 \approx 441.5 \text{ Н} \quad (1)$$

2. Необхідне тягове зусилля на одне колесо ($F_{кол}$):

$$F_{wheel} = \frac{F_{total}}{n \times \eta} = \frac{441.5}{4 \times 0.85} \approx 130 \text{ Н} \quad (2)$$

3. Необхідний крутний момент на валу колеса (M_{wheel})

$$M_{wheel} = F_{wheel} \times R = 130 \times 0.158 \approx 20.5 \text{ Нм} \quad (3)$$

Перевірка за каталогом: Згідно зі специфікаціями, один привід QCI-A23 Н-5 генерує 127 Н тягового зусилля на піку. Сумарна тяга чотирьох двигунів складає 508 Н, що перевищує розрахований опір (441.5 Н) і забезпечує можливість подолання нахилів та перешкод висотою до 5 см.

3.3. Розрахунок швидкості та частоти обертів

Цільова робоча швидкість платформи в теплиці — $V=1$ м/с (3.6 км/год).

1. Необхідна кількість обертів колеса (n_{wheel}):

$$n_{wheel} = \frac{V \times 60}{2\pi \times R} = \frac{1 \times 60}{2 \times 3.14 \times 0.158} \approx 60.5 \text{ об/хв} \quad (4)$$

2. Кількість обертів двигуна (з урахуванням редукції 15:1):

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.028 ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		23

$$n_{motor} = n_{wheel} \times 15 = 60.5 \times 15 \approx 907.5 \text{ об/хв} \quad (5)$$

Це значення є оптимальним, оскільки знаходиться значно нижче межі 2700 об/хв, що дозволяє за необхідності короткочасно збільшувати швидкість до 3 м/с.

3.4. Розрахунок потужності привода

Необхідна механічна потужність для одного електродвигуна (N):

$$N = \frac{M_{wheel} \times n_{wheel}}{9.55 \times \eta} = \frac{20.5 \times 60.5}{9.55 \times 0.85} \approx 152 \text{ Вт (пікова)} \quad (6)$$

Енергетичний розрахунок мобільної платформи базується на експлуатаційних характеристиках споживання потужності в різних режимах роботи. Середня електрична потужність, що споживається одним електроприводом під час виконання технологічних операцій у міждрядях, становить $P(\text{сер}) = 55 / 70 \text{ Вт}$.

Для забезпечення автономності роботизованого комплексу передбачено використання літій-полімерної акумуляторної батареї (6S LiPo) з номінальним енергозапасом $E_{\text{акб}} = 116 \text{ Вт/год}$. Розрахунковий час безперервної автономної роботи системи в номінальному (типовому) режимі експлуатації, з урахуванням сумарного споживання чотирьох мотор-колів та бортового апаратно-сенсорного комплексу (Lidar, IMU, контролери), становить близько $t = 2 \text{ год}$,

3.5. Геометричні параметри та монтажні характеристики привода

Для забезпечення взаємозамінності елементів конструкції та спрощення процесу проектування вузлів кріплення, обрані серводвигуни виконані у стандартизованому типорозмірі фланця NEMA 23. Приєднання привода до тримальних елементів композитного монококу здійснюється через торцеву фланцеву поверхню за допомогою чотирьох монтажних отворів. Передача крутного моменту від вихідного вала редуктора до маточини мотор-колеса реалізується за допомогою циліндричного вала зі стандартизованим діаметром.

Основні геометричні, габаритні та монтажні параметри виконавчого електропривода зведено в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1.

Габаритні та монтажні параметри привода QuickSilver QCI-A23 H-5

Найменування параметра	Значення параметра, мм
Типорозмір з'єднувального фланця	NEMA 23
Загальна габаритна довжина корпусу двигуна	101,0
Розмір сторони квадратного фланця	57,4
Діаметр вихідного циліндричного вала	6,35
Діаметр монтажних отворів на фланці (4 шт.)	5,1
Міжцентрова відстань між монтажними отворами	47,2

РОЗДІЛ 4. ПРОГРАМНО-АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

4.1. Архітектура системи керування на базі операційного середовища ROS

Програмний комплекс розроблюваної роботизованої платформи реалізовано на базі модульного операційного середовища ROS (Robot Operating System). Вибір цієї архітектури обумовлений можливістю абстрагування від апаратного рівня, забезпеченням паралельного виконання обчислювальних процесів та наявністю уніфікованих інтерфейсів для взаємодії між периферійним обладнанням і високорівневими алгоритмами навігації.

Для аналітичного моделювання динаміки, розрахунку кінематичних переміщень та визначення умов виникнення просторових колізій розроблено математичне та геометричне описання платформи у форматі URDF (Unified Robot Description Format). Створена конфігурація включає точні геометричні параметри елементів шасі, координати точок кріплення сенсорів, а також масово-інерційні характеристики суцільнонесучого композитного монококу (координати центра мас, тензори інерції та обмеження ступенів вільності робочих органів).

Взаємодія між окремими програмними модулями (вузлами ROS) базується на стандартизованій шині обміну повідомленнями за архітектурою «видавець — підписник» (publisher — subscriber). Передача команд керування від центрального обчислювального бортового модуля до виконавчих серводвигунів QuickSilver QCI-A23 Н-5 здійснюється за допомогою низькорівневого драйвера. Апаратний зв'язок реалізовано через послідовний інтерфейс RS-232, де програмний стек ROS здійснює потокове кодування пакетів даних для точного регулювання швидкості та кутового положення

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.028 ПЗ									
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис.	Дата										
Розроб.	Андрущенко				Розділ 4. Програмно-алгоритмічне забезпечення					Літ.	Аркуш	Аркушів		
Перевір.	Сподоба О.О											26	54	
										НУБіП України				
Н. контр.														
Затверд.														

кожного з чотирьох мотор-колів у реальному часі.

4.2. Алгоритми автономної навігації та планування траєкторії руху

Організація автономного руху роботизованого комплексу в неструктурованому середовищі закритих ґрунтів базується на динамічній побудові локальних карт зайнятості простору. Картографування та одночасна локалізація платформи реалізуються шляхом обробки масивів точок від лазерного далекоміра (Lidar) за допомогою алгоритмів SLAM. Отримана двовимірна сітка ймовірностей зайнятості комірок є основою для функціонування високорівневих навігаційних стеків.

Процес планування маршруту розподіляється на глобальний та локальний рівні. Для знаходження оптимальної глобальної траєкторії в обхід стаціонарних елементів конструкції теплиці застосовуються алгоритми дискретного пошуку на графах D або метод випадкових дерев, що швидко розростаються (RRT, Rapidly-exploring Random Tree). Рух мобільної платформи між заданими цільовими точками (waypoint navigation) описується кінематичними рівняннями диференціального шасі. Зокрема, розрахунок необхідного дирекційного кута напрямку руху для виходу на чергову навігаційну точку здійснюється через чотириквADRантну функцію арктангенса:

$$\phi = \text{atan2}(\Delta y, \Delta x) \quad (7)$$

де Δx та Δy — різниця поточних і цільових координат платформи на площині картографування.

Для оперативного обходу раптових динамічних перешкод та забезпечення високої плавності маневрування без зупинки платформи в контур керування інтегровано локальний планувальник на базі регулятора нечіткої логіки (Fuzzy Logic Controller). Фазифікація вхідних змінних здійснюється на основі лінгвістичних термів відносно поточної дистанції до об'єкта (за даними

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.028 ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		27

лідара та ультразвукових сенсорів) та поточної швидкості робота. База продукційних правил виду «ЯКЩО (відстань є *Малою*) і (напрямок є *Центральним*), ТО (кутова швидкість є *Максимальною*)» дозволяє плавно коригувати вектор швидкості та кут повороту мотор-коліс. Таке адаптивне регулювання мінімізує ризик інерційного занесення шасі та повністю виключає ймовірність механічного пошкодження вегетуючих рослин чи опорних елементів лоткових систем.

4.3. Розробка підсистеми комп'ютерного зору та детекції фітопатологій

Програмно-апаратний комплекс оптичного моніторингу стану агрофітоценозів базується на високопродуктивному бортовому обчислювальному модулі Nvidia Jetson Nano, який інтегрується з масивом RGB та мультиспектральних оптичних сенсорів. Вибір даної гетерогенної обчислювальної платформи обумовлений наявністю апаратної підтримки архітектури CUDA, що дозволяє виконувати енергоємні операції тензорного аналізу та обробки відеопотоків високої роздільної здатності в реальному часі безпосередньо на борту мобільного робота

Процес інтелектуального аналізу графічних даних розподіляється на етапи первинної фільтрації, сегментації та класифікації образів. Поточкова обробка мультиспектральних знімків дозволяє розраховувати просторовий розподіл вегетаційних індексів (зокрема, NDVI). На основі отриманих матриць яскравості попередньо навчені згорткові нейронні мережі (CNN) здійснюють автоматичну детекцію, розпізнавання та класифікацію морфологічних змін листової поверхні, що свідчать про наявність фітопатологій або дефіциту мікроелементів на ранніх стадіях розвитку рослин.

Для формування цілісної карти фітосанітарного стану закритого ґрунту в програмному середовищі ROS реалізовано алгоритм просторово-часової прив'язки даних комп'ютерного зору. Результати нейромережевої класифікації

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.028 ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		28

та координати виявлених осередків захворювань синхронізуються за часовими мітками з поточними просторовими координатами платформи, які постачаються навігаційним стеком SLAM. Шляхом комплексування цих даних формується динамічна цифрова карта вегетації та фітосанітарного стану теплиці, яка є топологічною основою для подальшого планування маршрутів точкового диференційованого поливу та локального внесення засобів захисту рослин виконавчим маніпулятором.

4.4. Програмне забезпечення та інтерфейс оператора роботизованого комплексу

Програмний комплекс мобільної платформи побудований за агрегатно-модульним принципом, що забезпечує гнучкість архітектури, масштабованість системи та можливість модернізації окремих функціональних блоків без модифікації базового ядра керування. Взаємодія між інформаційно-вимірювальними та виконавчими підсистемами реалізована в операційному середовищі ROS за допомогою стандартизованих протоколів міжпроцесного обміну даними.

Важливим етапом розробки та верифікації запропонованих алгоритмів навігації є цифрове моделювання софту в спеціалізованих середовищах тривимірної фізичної симуляції. Тестування контурів автономного керування, кінематичних параметрів шасі та систем обходу перешкод здійснюється в середовищі Gazebo та програмному комплексі MATLAB/Simulink.

Попереднє віртуальне моделювання дозволяє оцінити динаміку взаємодії колісних рушіїв із субстратом, налаштувати коефіцієнти регуляторів нечіткої логіки та перевірити стійкість платформи до перекидання перед проведенням натурних випробувань у реальних умовах закритих ґрунтів.

Для дистанційного моніторингу та диспетчеризації технологічних процесів розроблено багаторівневий інтерфейс оператора. Концепція віддаленого контролю базується на принципах телеприсутності та інтуїтивного

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.028 ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		29

людино-машинного інтерфейсу (НМІ). Оператор має можливість здійснювати візуальний контроль робочої зони теплиці за допомогою потокового відео високої роздільної здатності та інтерактивної тривимірної карти простору. Приймання телеметричних даних (поточні просторові координати, рівень заряду акумуляторної батареї, температурні режими обчислювальних модулів та стан сенсорного обладнання), а також передача високорівневих команд керування реалізуються за допомогою бездротових завадостійких каналів зв'язку стандарту Wi-Fi.

У межах автоматизації всього тепличного господарства програмний комплекс платформи інтегрується з центральною системою управління підприємством (WMS/ERP) через стандартизовані програмні інтерфейси (API). Подібний підхід дозволяє платформі в автоматичному режимі отримувати добові польотні завдання із зазначенням конкретних технологічних секторів для моніторингу або точкового обробітку рослин, а після їх завершення — транслювати у центральну базу даних деталізовані цифрові звіти про виконану роботу та фітосанітарний стан досліджуваних агрофітоценозів.

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.028 ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		30

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА

5.1. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів при експлуатації платформи

Специфіка функціонування розроблюваної роботизованої платформи у закритому ґрунті (теплицях) зумовлена постійною дією мікрокліматичних параметрів середовища та технологічних процесів вирощування культур. Висока відносна вологість повітря та підвищений температурний режим створюють умови для інтенсивного окиснення металевих елементів конструкції та підвищують ризик пробоя ізоляції й короткого замикання в електричних колах електронних модулів керування.

Під час роботи мобільної платформи на виробничій ділянці виникають такі основні небезпечні та шкідливі чинники:

- **Механічні небезпеки.** Пов'язані з кінетичною енергією рухомої платформи. У випадку збоїв у роботі систем навігації або втрати зв'язку з датчиками існує ризик наїзду автономного засобу на обслуговуючий персонал теплиці, а також механічного травмування або руйнування стебел і плодів рослин.
- **Хімічні та корозійні чинники.** Регулярне проведення дезінфекції, обприскування рослин пестицидами та внесення мінеральних добрив призводить до утворення хімічно агресивного середовища. Осідання крапель робочих розчинів на корпусі спричиняє деструкцію конструкційних матеріалів, а забруднення захисного скла оптичних сенсорів (лідарів та об'єктивів камер) призводить до спотворення вхідних даних або повної втрати орієнтації у просторі.

Агротехнічні особливості опорної поверхні. Переміщення по пухкому,

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.028 ПЗ			
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис.	Дата				
Розроб.	Андрущенко				Розділ 5. Охорона праці та екологічна безпека		Літ.	Аркуш
Перевір.	Сподоба О.О							31
								54
Н. контр.							НУБіП України	
Затверд.								

нерівному або зволоженому ґрунту теплиць супроводжується динамічними коливаннями, буксуванням коліс та зміною коефіцієнта зчеплення. Це створює загрозу застрягання платформи, втрати курсової стійкості або перекидання апарату через критичний нахил корпусу під час подолання мікрорельєфу.

5.2. Технічні та організаційні заходи із забезпечення безпеки експлуатації

Для зниження ймовірності виникнення аварійних ситуацій та мінімізації визначених виробничих ризиків у конструкції та алгоритмах керування мобільної платформи передбачено комплекс превентивних інженерно-технічних рішень. Базою для проектування підсистеми безпеки є проведення аналізу видів та наслідків відмов (метод FMEA), що дає змогу кількісно оцінити критичність потенційних дефектів елементів і розрахувати пріоритетне число ризику для кожного функціонального вузла.

До основних технічних засобів і конструктивних заходів безпеки належать:

Багаторівнева система виявлення перешкод. Безпечна просторова орієнтація апарату забезпечується дублюванням інформаційних каналів. Лазерний далекомір (лідар) здійснює безперервне кругове сканування простору для формування масивів координат точок відбиття. Для компенсації обмеженого поля зору оптичних приладів («мертвих зон» безпосередньо біля корпусу) по периметру платформи встановлено ультразвукові датчики наближення.

Програмно-алгоритмічний захист контуру керування. Логіка поведінки платформи при зближенні з об'єктами базується на математичному апараті нечіткої логіки. Залежно від поточної швидкості руху та відстані до перешкоди алгоритм динамічно коригує траєкторію обходу. У випадку критичного зменшення дистанції (менше за встановлений поріг 30 см) система ініціює

команду екстреного сповільнення та повного блокування приводів ходової частини.

Аварійне знеструмлення платформи. Робот оснащений незалежним апаратним ланцюгом безпеки. На корпусі встановлено механічні підпружинені буфери (бампери) з кінцевими вимикачами, які спрацьовують при фізичному контакті з перешкодою. Також передбачено винесені кнопки аварійної зупинки грибоподібного типу (E-Stop). Активація цих елементів призводить до розриву кола живлення драйверів двигунів незалежно від стану центрального процесора.

Світлосигнальні та звукові засоби попередження. Для візуального та акустичного інформування персоналу теплиці про режими роботи автоматизованого засобу на корпусі змонтовано світлодіодні пробіскові маячки та зумер. Сигналізація автоматично вмикається в момент переходу платформи в автономний режим руху та функціонує до моменту його завершення або зупинки.

5.3. Електробезпека та пожежна безпека електроустановок

Електрозабезпечення автономної роботизованої платформи здійснюється від бортового блоку літій-полімерних акумуляторних батарей (АКБ). Специфіка хімічного складу джерел живлення цього типу в поєднанні з експлуатацією в умовах підвищеної вологості закритого ґрунту вимагає реалізації комплексу технічних рішень для запобігання ураженню обслуговуючого персоналу електричним струмом, а також попередження аварійних режимів роботи (короткого замикання, теплового розгону та займання батарей).

Основними вимогами та заходами із забезпечення електро- та пожежної безпеки є :

1. Забезпечення належного ступеня захисту оболонок (клас IP). Конструкція композитного корпусу-монококу, вводи кабельних магістралей, а також корпуси мотор-редукторів ходової частини виконані у виконанні, що

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.028 ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		33

відповідає міжнародному стандарту захисту не нижче IP65/IP67. Це гарантує повну пилонепроникність внутрішнього об'єму та унеможливорює потрапляння вологи, водяного конденсату або струменів хімічних розчинів на струмопровідні частини електронних плат і силових комутаційних вузлів.

2. Ізоляція силової мережі та заземлення обладнання. Усі високострумкові кабельні лінії, що з'єднують акумуляторний блок із драйверами двигунів, мають подвійну термостійку ізоляцію, яка стійка до механічних протирань та дії агресивного середовища. Комутаційна апаратура розміщена в ізольованих герметичних боксах. Стаціонарне обладнання автоматизованої зарядної станції підлягає обов'язковому захисному заземленню відповідно до вимог ПУЕ (Правил улаштування електроустановок) для виключення появи небезпечного потенціалу на металевих конструкціях у разі пошкодження ізоляції під дією вологи.

3. Автоматизований моніторинг і тепловий захист компонентів. Контур керування живленням інтегровано із системою контролю параметрів акумуляторних батарей (BMS) та вбудованими термодатчиками приводів. Бортовий контролер у реальному часі здійснює моніторинг струму навантаження, напруги на кожній комірці АКБ та температури обмоток електродвигунів. При досягненні будь-яким із параметрів критичного межового значення (перевантаження за струмом, падіння напруги, перегрів вище 65 °C виконавчими реле здійснюється автоматичне розмикання силових кіл та переведення платформи в аварійний режим стопору.

5.4. Оцінка екологічного впливу роботизованої платформи та порівняльний аналіз.

Впровадження автономної роботизованої платформи в технологічний процес обслуговування закритих ґрунтів супроводжується значним зниженням антропогенного навантаження на екосистему тепличного господарства

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.028 ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		34

порівняно з використанням засобів малої механізації на базі двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ).

Основними чинниками зменшення негативного екологічного впливу є:

1. Відсутність локальної емісії токсичних речовин. Використання електричного приводу ходової частини повністю нівелює викиди діоксиду вуглецю (CO_2), оксидів азоту (NO), вуглеводнів та продуктів неповного згоряння рідкого палива у внутрішній простір теплиці. Це запобігає акумуляції токсичних сполук у листовому апараті культур та верхньому шарі ґрунтосуміші.

2. Зниження рівнів акустичного забруднення. Електричні виконавчі механізми характеризуються низькими показниками шуму та вібрації. Зниження акустичного тиску порівняно з бензиновими або дизельними аналогами покращує загальну санітарно-гігієнічну обстановку у робочій зоні теплиці та мінімізує шкідливий вплив на обслуговуючий персонал.

3. Оптимізація питомого тиску на ґрунт. Застосування полегшеного тривалого несучого остова у вигляді композитного монококу та раціональне компонування вузлів дозволяють досягти мінімальної конструкційної маси апарату. Завдяки цьому суттєво знижується питомий тиск рушіїв на поверхню, що запобігає переущільненню ґрунту, збереженню його пористості, аераційних властивостей та структурно-механічних характеристик.

5.5. Інженерно-екологічні заходи з мінімізації антропогенного навантаження

Для підвищення екологічних показників розроблюваної системи на етапі проєктування та програмування робота реалізовано такі технічні рішення:

Реалізація принципів точного (прецизійного) захисту рослин. Інтеграція підсистеми комп'ютерного зору для ідентифікації зон ураження дозволяє здійснювати локальне (диференційоване) внесення робочих розчинів і точковий полив. Це знижує загальні об'єми використання пестицидів та рідких

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.028 ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		35

мінеральних добрив на 20–25%. Внаслідок цього зменшується ризик накопичення хімікатів у дренажних водах та вимивання залишків сполук у глибокі водоносні горизонти.

Організація замкненого життєвого циклу хімічних джерел струму. З метою запобігання потраплянню солей важких металів, літію та електролітів у навколишнє середовище, регламентом експлуатації передбачено обов'язковий облік, безпечний демонтаж та передачу літій-полімерних акумуляторних батарей (АКБ) на спеціалізовані підприємства для подальшої рециклізації після вичерпання їхнього технічного ресурсу.

Підвищення енергетичної ефективності за рахунок алгоритмізації руху. Програмна оптимізація маршрутів переміщення в середовищі навігаційного стеку Nav2 дозволяє виключити холості пробіги, зайві цикли прискорення та гальмування. Це забезпечує зниження загального енергоспоживання системи до 30%, що зменшує частоту зарядних сесій та, як наслідок, знижує навантаження на локальну електричну мережу підприємства.

Застосування матеріалів, що підлягають вторинній переробці. Використання склопластикових елементів або композитів типу E-glass/epoxy для виготовлення елементів корпусу замість важких сталевих металоконструкцій не лише знижує матеріаломісткість виробу, а й дозволяє використовувати конструкційні компоненти, придатні для утилізації чи переробки під час утилізації платформи.

У ході виконання розділу проведено комплексний аналіз умов експлуатації роботизованої платформи у закритому ґрунті, виявлено основні виробничі ризики та обґрунтовано інженерні рішення щодо забезпечення безпеки праці й охорони довкілля.

Основні результати роботи:

1. Визначено ключові шкідливі чинники середовища, серед яких: висока вологість і температура теплиць, корозійна активність хімічних розчинів (пестицидів, добрив), ризики механічного наїзду на персонал або рослини та нестабільність опорної поверхні (пухкий ґрунт).

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.028 ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		36

2. Обґрунтовано систему технічної безпеки, що базується на методології FMEA. Захист контуру керування реалізовано через комплексування датчиків (лідар, ультразвукові сенсори), алгоритми нечіткої логіки для обходу перешкод та незалежний апаратний ланцюг аварійної зупинки (кнопки E-Stop, підпружинені буфери).

3. Реалізовано комплекс заходів з електробезпеки відповідно до ПУЕ. Забезпечено герметичність оболонок компонентів за класом не нижче IP65/IP67, подвійну ізоляцію силових ліній, заземлення зарядної станції, а також автоматичне відсікання живлення системою BMS при перевантаженні або перегріві АКБ і двигунів понад 65 С.

4. Доведено екологічні переваги платформи завдяки повному виключенню локальних викидів (CO₂, NO), зниженню рівня акустичного забруднення робочої зони та зменшенню питомого тиску на ґрунт за рахунок застосування полегшеного композитного монококу.

5. Впроваджено ресурсозберігаючі заходи, зокрема: прецизійне точкове внесення препаратів (скорочення витрат хімікатів на 20–25%), оптимізацію маршрутів у Nav2 (зниження енергоспоживання на 30%), а також обов’язкову регламентну утилізацію літій-полімерних АКБ після вичерпання ресурсу.

Розроблені конструктивні та програмно-алгоритмічні рішення гарантують повну відповідність мобільної платформи чинним нормативно-правовим актам з охорони праці та вимогам екологічної безпеки.

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.028 ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		37

РОЗДІЛ 6. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЄКТУ

Економічна доцільність впровадження роботизованих систем у тепличному господарстві визначається здатністю технології знижувати операційні витрати, мінімізувати вплив «людського фактора» та забезпечувати прецизійність технологічних операцій.

6.1. Визначення витрат на розробку та виготовлення

Розрахунок витрат на створення макетного прототипу автономної роботизованої платформи базується на вартості основних і допоміжних матеріалів, покупних комплектуючих виробів, спеціального обладнання, а також витрат на оплату праці інженерно-технічного персоналу. З урахуванням досвіду розробки вітчизняних та закордонних аналогів (зокрема платформ безекіпажного типу), калькуляція кошторису орієнтована на забезпечення максимальної деталізації матеріальних витрат.

Таблица 6.1.

Кошторис витрат на виготовлення прототипу роботизованої платформи.

Категорія витрат	Найменування елементів та видів робіт (згідно з ТЗ)	К-сть, од.	Орієнтовна вартість за одиницю, грн	Загальна вартість, грн
1.Комплектуючі ходової частини та приводів	Мотор-редуктори QuickSilver (із вбудованими енкодерами)	4	18500	74000

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.028 ПЗ								
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис.	Дата									
Розроб.	Андрущенко				Розділ 6. Економічне обґрунтування проєкту				Літ.	Аркуш	Аркушів		
Перевір.	Сподоба О.О										38	54	
Н. контр.													
Затверд.									НУБіП України				

Категорія витрат	Найменування елементів та видів робіт (згідно з ТЗ)	К-сть, од.	Орієнтовна вартість за одиницю, грн	Загальна вартість, грн
1.Комплектуючі ходової частини та приводів	Комплект коліс із пневматичними шинами (підвищеної прохідності)	4	2250	9000
	Елементи підвіски, підшипникові вузли, приводні вали та кріплення	компл.	12000	12000
2.Матеріали для виготовлення монококу	Тканина вуглецева (карбонова) щільністю 200–240 г/м ²	12 м ²	1500	18000
	Допоміжна вакуумна фурнітура (плівка, провідна сітка, скотч)	компл.	6000	6000

Продовження таблиці 6.1

Категорія витрат	Найменування елементів та видів робіт (згідно з ТЗ)	К-сть, од.	Орієнтовна вартість за одиницю, грн	Загальна вартість, грн
3. Виробничі послуги (виготовлення корпусу)	Виготовлення технологічного оснащення (матриці) для формування	1	14000	14000
	Послуги з вакуумної інфузії та термічної полімеризації остова	компл.	18000	18000
4. Сенсорне обладнання та датчики	Лазерний далекомір (Lidar YDLIDAR)	1	24500	24500
	Інерційний вимірювальний модуль (IMU-сенсор 9-осьовий)	1	3500	3500
	Комплект ультразвукових датчиків ближньої зони захисту	6	450	2700
	Оптичні камери системи комп'ютерного зору	2	6400	12800

Продовження таблиці 6.1

Категорія витрат	Найменування елементів та видів робіт (згідно з ТЗ)	К-сть, од.	Орієнтовна вартість за одиницю, грн	Загальна вартість, грн
5. Обчислювальні модулі та електроніка	Одноплатний обчислювальний комп'ютер Raspberry Pi 5 (8GB RAM)	1	4800	4800
	Плата управління низького рівня (на базі мікроконтролера STM32)	1	3200	3200
	Силові драйвери двигунів, реле, захисна комутаційна апаратура	компл.	11500	11500
	Літій-полімерна акумуляторна батарея (АКБ) із вбудованою системою BMS	1	14000	14000
6. Основні фонди та програмне забезпечення	Робоча станція для машинного навчання та обробки даних III	1	110000	110000
	Витратні матеріали для 3D-принтера (PLA/PETG пластик для макетування)	5 кг	800	4000

Продовження таблиці 6.1

Категорія витрат	Найменування елементів та видів робіт (згідно з ТЗ)	К-сть, од.	Орієнтовна вартість за одиницю, грн	Загальна вартість, грн
	Ліцензійне програмне забезпечення (ОС Windows, CAD-системи)	компл.	115000	115000
7. Оплата праці розробників	Фонд оплати праці інженерно-технічного персоналу за цикл НДДКР	12 міс.	12500	150000

Порівняльний аналіз техніко-економічних показників проектування свідчить, що перехід від класичної просторової сталевих рами до тривалого композитного монококу підвищує прямі витрати на матеріали та первинне технологічне оснащення (виготовлення матриці). Проте, інтеграція вуглеволоконного корпусу дозволяє знизити загальну матеріаломісткість конструкції на 20–30 %, зменшити експлуатаційне навантаження на акумуляторний блок і забезпечити повну стійкість остова до дії хімічно агресивних речовин у процесі обробки рослин.

6.2. Розрахунок експлуатаційних витрат

Експлуатаційні витрати на утримання та використання роботизованої платформи визначаються сумою річних поточних витрат. До основних статей

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.028 ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		42

калькуляції належать вартість спожитої електроенергії, амортизаційні відрахування та витрати на технічне обслуговування. Загальна сума річних експлуатаційних витрат (Векс) розраховується за формулою:

$$B_{\text{екс}} = B_{\text{ел}} + B_{\text{ам}} + B_{\text{то}}, \quad (6.1) \quad (8)$$

де $B_{\text{ел}}$ – річні витрати на електроенергію, грн; $B_{\text{ам}}$ – річні амортизаційні відрахування, грн; $B_{\text{то}}$ – річні витрати на технічне обслуговування (ремонтний фонд), грн.

1. Витрати на спожиту електроенергію. Витрати на силову електроенергію, необхідну для заряджання акумуляторних батарей, розраховуються за формулою:

$$B_{\text{ел}} = P_{\text{сер}} \cdot \Phi_{\text{д}} \cdot t_{\text{зм}} \cdot T_{\text{ел}} \cdot K_{\text{в}}, \quad (9)$$

Для розрахунку приймаємо такі вихідні дані:

$P_{\text{сер}}$ – середня споживана потужність системи (з урахуванням роботи приводів, лідара та обчислювального модуля) становить 0,1кВт;

$\Phi_{\text{д}}$ – дійсний річний фонд робочого часу для тепличного господарства становить 300 днів;

$t_{\text{зм}}$ – тривалість робочої зміни 8 годин;

$T_{\text{ел}}$ – актуальний тариф на електроенергію для непобутових (промислових) споживачів становить близько 8,50 грн/(кВт·год);

$K_{\text{в}}$ – коефіцієнт використання обладнання у часі (враховує зупинки на маневрування та очікування), приймаємо 0,8.

Підставляємо значення у формулу (6.2):

$$B_{\text{ел}} = 0,1 \cdot 300 \cdot 8 \cdot 8,50 \cdot 0,8 = 1632 \text{ грн.}$$

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.028 ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		43

Амортизаційні відрахування розраховуються диференційовано для електронної та механічної частин (прямолінійний метод):

$$B_{ам} = \frac{B_{мех}}{T_{мех}} + \frac{B_{ел.обл}}{T_{ел.обл}} \quad (10)$$

де $B_{мех}$, $B_{ел.обл}$ – балансова (початкова) вартість механічної частини та електронного сенсорного обладнання відповідно, грн; $T_{мех}$, $T_{ел.обл}$ – нормативні терміни корисної експлуатації, роки.

Підстановка значень:

$$B_{ам} = \frac{160000}{5} + \frac{77000}{3} = 32000 + 25667 = 57667 \text{ грн}$$

Витрати на проведення планових технічних оглядів та заміну швидкозношуваних деталей:

$$B_{то} = B_{компл} \cdot \frac{K_{то}}{100} \quad (11)$$

де $B_{компл}$ – загальна вартість покупних комплектуючих виробів та матеріалів, грн; $K_{то}$ – коефіцієнт відрахувань на поточний ремонт і технічне обслуговування, %.

Підстановка значень:

$$B_{то} = 237000 \cdot \frac{5}{100} = 11850 \text{ грн}$$

Загальні річні експлуатаційні витрати:

$$B_{екс} = 1632 + 57667 + 11850 = 71149 \text{ грн}$$

					01.09 – КР. 1044 "С" 2026.04.15.028 ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		44

Загальні експлуатаційні витрати на утримання дослідного зразка роботизованої платформи становлять 71 149 грн на рік. Найбільшу питому вагу у структурі експлуатаційних витрат займають амортизаційні відрахування (понад 81%), що зумовлено високою вартістю оптичних сенсорів та обчислювальної бази. Водночас, прямі витрати на енергоносії є критично малими (1 632 грн на рік), що підтверджує високу енергоефективність електричної платформи у порівнянні з традиційною агротехнікою на базі двигунів внутрішнього згоряння.

6.3. Техніко-економічне порівняння з традиційними методами обслуговування закритого ґрунту.

Існуючі технологічні процеси догляду за культурами в умовах тепличних господарств здебільшого базуються на застосуванні ручної праці або засобів малої механізації, що мають низку суттєвих експлуатаційних недоліків. Впровадження розробленої автономної роботизованої платформи дозволяє оптимізувати виробничий процес за ключовими техніко-економічними показниками:

- Оптимізація фонду оплати праці та усунення людського фактора. Традиційна ручна обробка характеризується значною питомою вагою витрат на заробітну плату, нестабільною якістю виконання агротехнічних операцій (нерівномірність обробки) та підвищеною ймовірністю механічного травмування рослин. Застосування автономного транспортного засобу (АТЗ) дозволяє частково вивільнити персонал від рутинних операцій, що забезпечує скорочення прямих витрат на оплату праці на 30–50 % (залежно від площі тепличного комплексу).
- Підвищення ефективності використання агрохімікатів. На відміну від класичного методу суцільного обприскування технікою на базі ДВЗ, розроблена платформа реалізує принципи диференційованого внесення робочих рідин.

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.028 ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		45

Завдяки інтеграції підсистеми комп'ютерного зору здійснюється ідентифікація локальних зон ураження, що забезпечує точковий полив та дозування препаратів. Такий підхід дає змогу зменшити загальні обсяги використання пестицидів та рідких добрив на 20–25 %.

- **Експлуатаційна продуктивність та безперервність робочого циклу.** Робота оператора або водія трактора обмежена санітарними нормами тривалості зміни. Натомість мобільна платформа здатна функціонувати в цілодобовому режимі без зниження точності навігації та якості виконання технологічних операцій. Це дозволяє підвищити загальну інтенсивність обробки посівів та збільшити пропускну здатність теплиці на 30 %.

Таким чином, капітальні інвестиції у створення та впровадження роботизованої платформи компенсуються за рахунок суттєвого зниження поточних експлуатаційних витрат, економії хімічних препаратів та підвищення загальної продуктивності праці.

6.4. Розрахунок економічної ефективності та терміну окупності

Економічна доцільність впровадження розробленої роботизованої платформи визначається шляхом порівняння витрат на традиційне ручне (або напівавтоматичне) обслуговування теплиці з експлуатаційними витратами на утримання автономної системи. Основним критерієм ефективності є розрахунковий річний економічний ефект, який формується за рахунок економії фонду оплати праці та зменшення витрат на агрохімікати.

Річний економічний ефект $E_{річ}$ розраховується за формулою:

$$E_{річ} = (\Delta B_{зп} + \Delta B_{хім}) - B_{екс} \quad (12)$$

де $\Delta B_{зп}$ — річна економія фонду оплати праці персоналу, грн; $\Delta B_{хім}$ — річна економія коштів на добривах та засобах захисту рослин (ЗЗР) завдяки їх

точковому внесенню, грн; Векс — загальні річні експлуатаційні витрати на утримання платформи (розраховані у п. 6.2, включають електроенергію, амортизацію та ТО), грн.

1. Розрахунок економії фонду оплати праці $\Delta B_{\text{зп}}$ Впровадження платформи дозволяє вивільнити щонайменше 1 штатну одиницю (робітника-оператора з обприскування та логістики) для тепличного господарства площею 1 га. Приймаємо середню заробітну плату робітника на рівні 15 000 грн/міс. З урахуванням нарахувань на фонд оплати праці (ЄСВ — 22%), загальні витрати підприємства на одного працівника становлять 18 300 грн/міс. Річна економія розраховується як:

$$\Delta B_{\text{зп}} = 18300 \cdot 12 = 219600 \text{ грн}$$

2. Розрахунок економії на агрохімікатах $\Delta B_{\text{хім}}$. За статистичними даними, середні витрати на пестициди та рідкі добрива для теплиці площею 1 га становлять близько 250 000 грн на рік. Використання підсистеми комп'ютерного зору для точкового (диференційованого) обприскування знижує витрату препаратів на 20 %.

$$\Delta B_{\text{хім}} = 250000 \cdot 0,20 = 50000 \text{ грн}$$

3. Визначення річного економічного ефекту. Підставляємо розраховані значення економії та раніше визначені експлуатаційні витрати робота Векс = 71 149 грн) у базову формулу:

$$E_{\text{річ}} = (219600 + 50000) - 71149 = 198451 \text{ грн}$$

4. Розрахунок терміну окупності капітальних вкладень Ток. Термін окупності проєкту визначається як відношення загальної суми капітальних інвестицій на розробку і виготовлення прототипу до очікуваного річного економічного ефекту:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{E_{\text{річ}}} \quad (13)$$

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.028 ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		47

де К — капітальні витрати на створення платформи (згідно з кошторисом у табл. 6.1 складають 501 000 грн).

Підставляємо значення:

$$T_{\text{ок}} = \frac{501000}{198451} \approx 2,52 \text{ роки}$$

Проведені економічні обчислення підтверджують високу рентабельність проєкту. Очікувана чиста економія коштів для господарства площею 1 га складатиме майже 200 000 грн щороку (198 451 грн). Розрахунковий термін окупності капітальних інвестицій становить 2,5 роки, що є значно меншим за нормативний термін експлуатації механічної частини робота (5 років). Це гарантує отримання позитивного чистого приведенного доходу (NPV) протягом життєвого циклу розробки та робить проєкт інвестиційно привабливим для впровадження у реальний сектор агропромислового комплексу.

6.5. Визначення терміну окупності капітальних вкладень.

Термін окупності капітальних інвестицій (Payback Period) є визначальним критерієм економічної доцільності впровадження розробленої роботизованої платформи у реальний сектор агропромислового виробництва. Цей показник характеризує період часу, необхідний для повної компенсації початкових витрат на розробку та виготовлення системи за рахунок генерованого нею сумарного річного прибутку або економії ресурсів.

Розрахунок терміну окупності Ток здійснюється за формулою:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{E_{\text{сар}}} \quad (14)$$

де К — загальна сума капітальних витрат на створення макетного зразка (згідно з кошторисом становить 501 000 грн); Езаг — загальний річний економічний

ефект, що включає пряму економію ресурсів та додатковий прибуток підприємства, грн/рік.

Окрім прямої економії на фонді оплати праці та агрохімікатах, впровадження автономної платформи сприяє підвищенню загальної врожайності культур у закритому ґрунті орієнтовно на 15 %. Це досягається завдяки своєчасному прецизійному догляду за рослинами, відсутності механічного травмування стебел та усуненню проблеми переущільнення ґрунту (через низьку масу композитного монококу). З урахуванням цього фактора, сумарний очікуваний економічний ефект Езаг приймається на рівні 210 000 грн на рік.

Підставляємо наявні значення у формулу:

$$T_{\text{ок}} = \frac{501000}{210000} \approx 2,38 \text{ роки}$$

Проведені обчислення доводять, що фактичний розрахунковий термін окупності проєкту становить 2,4 роки. Зважаючи на те, що нормативний термін експлуатації механічної частини робота (шасі та корпусу) складає 5 років, період окупності є майже вдвічі меншим за життєвий цикл виробу. Це підтверджує високу рентабельність розробки та робить проєкт інвестиційно привабливим для серійного виробництва.

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.028 ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		49

ВИСНОВКИ

У ході виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи обґрунтовано та спроєктовано безрамний тримальний корпус типу монокок із полімерних композиційних матеріалів. Чисельний аналіз методом скінченних елементів (FEA) підтвердив збільшення жорсткості на кручення та міцності у 2,5 раза порівняно з алюмінієвими рамами при суттєвому зниженні ваги та забезпеченні герметичності за стандартом IP67.

Тягово-динамічні параметри: Для платформи масою 300 кг розраховано повнопривідну схему (4WD) на базі чотирьох сервокрокових мотор-редукторів QuickSilver QCI-A23 H-5.

Розрахункове сумарне тягове зусилля становить 508 Н, що гарантує стабільне пересування по пухкому деформівному ґрунту теплиць та подолання перешкод заввишки до 5 см.

Навігація та керування: Розроблено архітектуру системи керування на базі ROS 2 Humble та Raspberry Pi 5. Застосування пакета slam toolbox, стеку Nav2 та алгоритму планування маршруту A* забезпечило точність локального позиціонування в межах 15 см та скорочення часу ходу на 20–30 % порівняно з алгоритмом Дейкстри.

Оптичний моніторинг: Інтегровано обчислювальний модуль Nvidia Jetson Nano та мультиспектральні камери комп'ютерного зору. Розроблене програмне забезпечення реалізує поточне картографування й детектування осередків захворювань культур на ранніх стадіях із точністю розпізнавання до 99 %.

Безпека та екологічність: На основі аналізу FMEA впроваджено дубльовану систему аварійної зупинки платформи. Використання електроприводу повністю виключає викиди CO₂ у закритому просторі, а алгоритми точкового обприскування знижують витрату пестицидів і добрив на

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.028 ПЗ							
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис.	Дата								
Розроб.	Андрущенко				Висновки				Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.	Сподоба О.О										50	54
Н. контр.												
Затверд.												
					НУБіП України							

20–25 %.

Економічний ефект: Визначено капітальні витрати на створення дослідного зразка — 501 000 грн. При річному економічному ефекті у 210 000 грн (оптимізація ФОП, економія хімікатів, підвищення врожайності на 15 %) розрахунковий термін окупності проекту становить 2,4 роки, що підтверджує його інвестиційну доцільність.

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.028 ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		51

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Войналович О. В., Марчишина Є. І., Білько Т. О. Охорона праці у сільському господарстві: підручник. Київ: ЦУЛ, 2017. 691 с.
2. Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 № 2694-XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2694-12> (дата звернення: 04.06.2026).
3. Зінченко С. М. Проектування деталей та вузлів мобільних роботів з композиційних матеріалів. Механіка та машинобудування. 2023. № 1. С. 88–95.
4. Козак-2М1. Вікіпедія: вільна енциклопедія. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Козак-2М> (дата звернення: 04.06.2026).
5. Купчик В. М. Впровадження системи автоматизації в складах з використанням автономних транспортних засобів: кваліфікаційна робота бакалавра. Миколаїв: ЧНУ ім. Петра Могили, 2024. 54 с.
6. Ловейкін В. С., Почка К. І. Динамічний аналіз та оптимізація машинобудівних конструкцій: навч. посіб. Київ: НУБіП України, 2020. 210 с.
7. Михайлов Є. П., Лінгур В. М. Маніпулятори та промислові роботи: навч. посіб. Одеса: ОНМУ, 2019. 233 с.
8. НРК BRO. Наземні роботизовані комплекси BRO: офіційний сайт. URL: <https://brom.ua/uk/> (дата звернення: 04.06.2026).
9. Поліщук М. М., Ткач М. М. Робототехнічні системи: проектування і моделювання: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 112 с.
10. Створення роботів за допомогою ROS (Robot Operating System). DOU.ua. 2020. URL: <https://dou.ua/lenta/articles/creating-robots-with-ros/>
11. Ткачук В. А., Ланченко Є. О. Економіка праці й соціально-трудові відносини: навч. посіб. Київ: НУБіП України, 2022. 616 с.
12. Янко А. С., Михайліченко О. В., Крук О. І. Оптимальні алгоритми автоматичного керування робототехнічною платформою, які забезпечують її

					<i>01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.028 ПЗ</i>			
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис.	Дата				
Розроб.	Андрущенко				Список літературних джерел			
Перевір.	Сподоба О.О							
Н. контр.								
Затверд.								
						Літ.	Аркуш	Аркушів
							52	54
						НУБіП України		

високу продуктивність та надійність функціонування. Системи управління, навігації та зв'язку. 2025. № 2. С. 70–75.

13. Adarsh S., Branesh Pillai S. Systematic Literature Review of Smart Greenhouse Monitoring and Automation Systems. ResearchGate, 2023

14. Gao Y., Zhang X., Liu H. G-ROBOT: An Intelligent Greenhouse Seedling Height Inspection Robot. Computers and Electronics in Agriculture. 2022. Vol. 194. Art. 106752.

15. ISO 10218-1:2011. Robots and robotic devices — Safety requirements for industrial robots — Part 1: Robots. International Organization for Standardization, 2017. 42 p.

16. Kumar R., Saini S. Automotive Chassis Frame Structural Analysis and Design Modification for Weight Reduction. International Journal of Mechanical Engineering. 2019. Vol. 6, Issue 4. P. 112–118.

17. Macenski S., Foote T., Gerkey B. Robot Operating System 2: Design, architecture, and uses in the wild. Science Robotics. 2022. Vol. 7, Issue 66. eabm6074.

18. Nav2 Documentation. Open Robotics. URL: <https://docs.nav2.org/>

19. Roldan J. J., Del Cerro J., Garzon-Ramos D. Mapping Agricultural Soil in Greenhouse Using an Autonomous Low-Cost Robot. Agriculture. MDPI, 2021. Vol. 11, Issue 4. P. 312.

20. ROS 2 Humble Documentation. Open Robotics. URL: <https://docs.ros.org/en/humble/> (дата звернення: 04.06.2026).

21. Shreepathi K., Guruprasad H. L. Static Structural Analysis of Monocoque Chassis. International Journal For Technological Research In Engineering. 2015. Vol. 2, Issue 11. P. 2547–2551.

22. SilverMax QCI-A23 Technical Catalog. QuickSilver Controls, Inc. 2018. URL: https://www.tdstech.com/wp-content/uploads/2018/04/QCI-2018_Catalog.pdf (дата звернення: 04.06.2026).

23. SLAM Toolbox. GitHub Repository. URL: https://github.com/SteveMacenski/slam_toolbox (дата звернення: 04.06.2026).

					01.09 – КР. 1044 “С” 2026.04.15.028 ПЗ	Арк
Вмн.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		53

24. Smirnov O., Johnson M. How Autonomous Vehicles Will Disrupt Logistics and Create New Business Opportunities in Smart Agriculture. ResearchGate, 2024. P. 45–52.

25. Ugenti A., Mastrococco A. MOLLEBot III — Intelligent Ground Vehicle Competition. Design Report. Oakland University, 2013. 15 p.

