

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет) Конструювання та дизайну

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

Конструювання машин і обладнання
(назва кафедри)

(підпис) Вячеслав ЛОВЕЙКІН
(ПІБ)

“ ____ ” _____ 2026 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ МОБІЛЬНОЇ ПЛАТФОРМИ
РОБОТА ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ТА ЗНЕШКОДЖЕННЯ ШКІДНИКІВ
КАПУСТИ

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування
(код і назва)

Гарант освітньої програми

Д.Т.Н., професор
(науковий ступінь та вчене звання) _____
(підпис)

Володимир БУЛГАКОВ
(ПІБ)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

Д.Т.Н., професор
(науковий ступінь та вчене звання) _____
(підпис)

Вячеслав ЛОВЕЙКІН
(ПІБ)

К.Т.Н.
(науковий ступінь та вчене звання) _____
(підпис)

Анастасія ЛЯШКО
(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Савчук Михайло Вікторович
(ПІБ студента)

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет Конструювання та дизайну

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Конструювання машин і обладнання
Д.Т.Н., професор Вячеслав ЛОВЕЙКІН
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ПІБ)
“ ” 2025 р.

З А В Д А Н Н Я
на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту

Савчука Михайла Вікторовича
(прізвище, ім'я, по батькові)
Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування
(код і назва)

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи (дипломного проекту бакалавра) **РОЗРОБКА
КОНСТРУКЦІЇ МОБІЛЬНОЇ ПЛАТФОРМИ РОБОТА ДЛЯ МОНІТОРИНГУ
ТА ЗНЕШКОДЖЕННЯ ШКІДНИКІВ КАПУСТИ**

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

Термін подання завершеної роботи (проекту) на кафедру 2026 червня 04
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи (дипломного проекту бакалавра)
Технологічна схема застосування мобільної платформи робота для моніторингу та знешкодження шкідників капусти

Перелік питань, які потрібно розробити:

1. Провести аналіз існуючих конструкцій мобільних платформ робота для сільського господарства.
2. Розглянути перспективи створення нових мобільних платформ робота.
3. Виконати розрахунок робота.
4. Розглянути питання охорони праці.
5. Виконати розрахунок економічної ефективності.

Перелік графічних документів (за потреби)

1. Загальний вигляд.
2. Складальне креслення вузла.
3. Деталювання.

Дата видачі завдання “16” квітня 2026 р.

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

Вячеслав ЛОВЕЙКІН.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Анастасія ЛЯШКО
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

Михайло САВЧУК
(підпис) (прізвище та ініціали студента)

ЗМІСТ

ЗМІСТ	3
РЕФЕРАТ	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АКТУАЛЬНІСТЬ РОЗРОБКИ.....	8
1.1.Аналітичне дослідження та проектування мобільної роботизованої платформи для комплексного захисту посівів капусти від ентомологічних загроз	8
1.2.Аналіз типів шасі та їх адаптивність до агротехнічних умов	11
1.3.Методи моніторингу шкідників: Комп'ютерний зір та алгоритми YOLO.....	13
1.4.Технології знешкодження: Порівняльний аналіз методів	14
1.5.Технічні вимоги до конструкції мобільної платформи.....	15
1.6.Математичне та програмне забезпечення автономності	16
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ТА РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ РОБОТА МАНІПУЛЯТОРА З АВТОМАТИЧНИМ ОПРИСКУВАЧЕМ.....	18
2.1.Аналіз умов експлуатації робота на капустяних полях	18
2.2.Вибір конструктивної схеми мобільної платформи	19
2.3.Тяговий розрахунок	21
2.4.Кінематичний розрахунок ходової частини	25
2.5.Розрахунок рами на міцність	27
2.6.Розрахунок акумуляторної системи.....	29
2.7.Розрахунок продуктивності	31
РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ	34

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ЗМІСТ		
Розроб.		Савчук М.В.					
Перевір.		Ляшко А.П.					
Н. Контр.		Матухно Н.В.					
Затверд.		Ловейкін В.С.			НУБіП України		
					Літ.	Арк.	Акрюшів
						3	64

3.1.Аналіз небезпечних та шкідливих факторів при експлуатації мобільного робота в аграрному середовищі	34
3.2.Оцінка ризиків відповідно до принципів ISO та стандарту ISO 12100.....	35
3.3.Вимоги безпеки до роботизованих систем згідно ISO 10218.....	36
3.4.Особливості безпеки автономної сільськогосподарської техніки відповідно до ISO 18497.....	37
Заходи електробезпеки та пожежної безпеки	38
3.5.Захист від рухомих частин та хімічних факторів (пестициди)	38
3.6.Ергономічні вимоги та безпека оператора	39
3.7.Заходи зниження впливу шуму, вібрації та пилу	40
3.8.Екологічні аспекти та безпека при використанні засобів захисту рослин.....	40
3.9.Інструкції з безпечної експлуатації, технічного обслуговування та аварійних ситуацій	41
РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ	43
4.1.Розрахунок капітальних витрат на виготовлення роботизованої платформи.....	43
4.2.Розрахунок річних експлуатаційних витрат	45
4.3.Визначення показників економічної ефективності проекту	47
ВИСНОВКИ.....	50
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	52
ДОДАТКИ.....	64

РЕФЕРАТ

Бакалаврська кваліфікаційна робота присвячена розробці конструкції мобільної платформи робота для моніторингу та знешкодження шкідників капусти. Пояснювальна записка складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

У першому розділі проведено аналіз сучасних роботизованих систем і мобільних платформ, які застосовуються в сільському господарстві для моніторингу стану посівів, виявлення шкідників та виконання технологічних операцій. Розглянуто особливості вирощування капусти, основні види шкідників та сучасні методи боротьби з ними. Виконано аналіз перспектив розвитку роботизованих систем у галузі точного землеробства.

У другому розділі виконано розробку конструкції мобільної роботизованої платформи. Проведено аналіз умов експлуатації робота на капустяних полях, обґрунтовано вибір конструктивної схеми, виконано тяговий, кінематичний та міцнісний розрахунки основних елементів конструкції.

У третьому розділі розглянуто питання охорони праці під час експлуатації мобільної роботизованої платформи, визначено потенційні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, наведено заходи щодо забезпечення безпечної роботи обладнання та технічного обслуговування.

У четвертому розділі виконано розрахунок економічної ефективності впровадження мобільної роботизованої платформи для моніторингу та знешкодження шкідників капусти, визначено очікуваний економічний ефект від її використання та оцінено доцільність впровадження розробки у сільськогосподарське виробництво.

Ключові слова: мобільна платформа, робот, моніторинг посівів, капуста, шкідники, роботизована система, точне землеробство, мобільний робот, автоматизація сільського господарства.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РЕФЕРАТ				Літ.	Арк.	Акрушів	
Розроб.		Савчук М.В.										
Перевір.		Ляшко А.П.									5	64
									НУБіП України			
Н. Контр.		Матухно Н.В.										
Затверд.		Ловейкін В.С.										

ВСТУП

Актуальність теми. Україна є державою з потужним аграрним сектором економіки, ефективність якого безпосередньо впливає на її продовольчу безпеку та експортний потенціал. Проте традиційні методи ведення сільського господарства досі значною мірою залишаються ручними або напіваавтоматичними. В умовах стрімкого скорочення доступної робочої сили на селі та безперервного зростання заробітної плати виникає гостра потреба у кардинальному підвищенні продуктивності праці за рахунок інтеграції передових засобів автоматизації та роботизації.

Однією з найбільш критичних і ресурсомістких технологічних операцій в овочівництві є захист рослин від шкідників. Зокрема, при вирощуванні капусти ентомологічні загрози (такі як капустяна міль, попелиці та білани) завдають нищівних збитків, які у світових масштабах оцінюються у мільярди доларів. Традиційне суцільне хімічне обприскування за допомогою важкої тракторної техніки демонструє падіння ефективності через стрімке формування резистентності у комах, веде до ущільнення ґрунту, створює суттєві екологічні ризики та загрожує здоров'ю операторів, які безпосередньо контактують із токсичними речовинами.

Впровадження концепції «Сільського господарства 5.0» вимагає переходу до точного (прецизійного) землеробства. Створення автономних мобільних роботизованих платформ, що поєднують у собі інтелектуальний нейромережевий моніторинг посівів та системи локального (ультрамалооб'ємного) точкового нанесення захисних препаратів, є високоперспективним науково-технічним напрямом. Це дозволяє мінімізувати антропогенний вплив на довкілля, виключити людську працю з небезпечних зон та суттєво зменшити витрати хімічних засобів.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Савчук М.В.			ВСТУП				Літ.	Арк.	Акрушів	
Перевір.		Ляшко А.П.									6	64
									НУБіП України			
Н. Контр.		Матухно Н.В.										
Затверд.		Ловейкін В.С.										

Мета дослідження – підвищення ефективності та безпеки захисту овочевих культур шляхом розробки інженерної конструкції автономної мобільної роботизованої платформи для прецизійного моніторингу та локального знешкодження шкідників капусти.

Для досягнення поставленої мети визначено та вирішено такі **завдання**:

Провести аналітичний огляд сучасних світових аналогів і трендів розвитку мобільної агроробототехніки.

Обґрунтувати концептуальний дизайн, компоновання та конструктивну схему мобільного робота-маніпулятора.

Виконати комплексні тягово-кінематичні розрахунки параметрів ходової частини та приводів платформи під час руху в складних польових умовах.

Провести перевірочний розрахунок несучої рами робота на міцність для забезпечення експлуатаційної надійності просторової конструкції.

Обґрунтувати параметри бортової системи електроживлення на базі відновлюваних джерел енергії та електронних компонентів керування.

Оцінити умови безпеки праці та екологічні аспекти при експлуатації розробленого роботизованого комплексу.

Виконати техніко-економічний розрахунок ефективності впровадження розробки у сільськогосподарське виробництво.

Об'єкт дослідження – процес автоматизованого переміщення та точкового технологічного оброблення рослин капусти в міжряддях з використанням автономних роботизованих систем.

Предмет дослідження – конструктивно-кінематичні та енергетичні параметри мобільної платформи, механічні характеристики елементів рами, а також показники фінансово-економічної ефективності її застосування.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1. АКТУАЛЬНІСТЬ РОЗРОБКИ

1.1. Аналітичне дослідження та проектування мобільної роботизованої платформи для комплексного захисту посівів капусти від ентомологічних загроз

Проблема забезпечення продовольчої безпеки в умовах глобальних кліматичних змін та дефіциту ресурсів вимагає радикальної трансформації підходів до вирощування овочевих культур. Капуста є одним із ключових елементів раціону в багатьох країнах, проте її культивування супроводжується значними ризиками через агресивний вплив ентомологічних шкідників. Капустяна міль, попелиці та білани щороку завдають світовому сільському господарству збитків, які оцінюються у 4–5 мільярдів доларів США. [1] Традиційні методи захисту, що базуються на суцільному хімічному обприскуванні, демонструють дедалі меншу ефективність через стрімкий розвиток резистентності у шкідників та жорсткі екологічні обмеження щодо залишків пестицидів у продукції.[3] Створення автономних мобільних роботів, здатних здійснювати прецизійний моніторинг та точкове знешкодження шкідників, є логічним кроком у розвитку концепції Сільського господарства 5.0.

1.1.1. Порівняльний аналіз сучасних аналогів мобільних платформ для захисту рослин

Ринок аграрної робототехніки на сучасному етапі характеризується переходом від експериментальних прототипів до комерційно зрілих рішень, що здатні працювати у складних польових умовах. Дослідження існуючих аналогів дозволяє виокремити кілька ключових технологічних векторів: масштабованість, тип шасі та рівень інтеграції інтелектуальних систем.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Савчук М.В.			РОЗДІЛ 1. АКТУАЛЬ- НІСТЬ РОЗРОБКИ			Літ.	Арк.	Акрушів	
Перевір.		Ляшко А.П.								8	65
								НУБіП України			
Н. Контр.		Матухно Н.В.									
Затверд.		Ловейкін В.С.									

1.1.2. Комерційні лідери: Naïo Technologies та Carbon Robotics

Компанія Naïo Technologies (Франція) пропонує лінійку роботів, що охоплюють різні сегменти господарств. Робот Oz (рис.1), створений ще у 2011 році, пройшов еволюцію до повноцінного автономного асистента вагою 150 кг [5]. Його конструкція базується на чотириколісному приводі (4WD), що забезпечує тягове зусилля до 300 кг та автономність до 8 годин [6]. Основним обмеженням Oz є його відносно низький кліренс, що робить його придатним переважно для роботи на ранніх стадіях вегетації або в міжряддях, де висота рослин не перевищує 10 см для систем лазерного наведення старого зразка [7].



Рис.1.1. Робот Oz

Більш адаптованим для промислового овочівництва є робот

Dino (рис.1.2), який спеціалізується на міжрядному обробітку на грядках шириною 1.2–1.8 м [8]. Dino використовує комбінацію RTK-GPS та камер для навігації, що дозволяє досягати міліметрової точності, мінімізуючи пошкодження культурних рослин. Його перевагою перед традиційними тракторами є значно менша вага (600 кг), що запобігає ущільненню ґрунту – критичному фактору для кореневої системи капусти [9].

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9



Рис.1.2. Робот Dino

Carbon Robotics (США) змінила парадигму захисту рослин, представивши LaserWeeder. Хоча початково система розроблялася для боротьби з бур'янами, її архітектура є ідеальною базою для знешкодження комах. Використання моделі штучного інтелекту Large Plant Model (LPM), навченої на 150 мільйонах зображень, дозволяє системі ідентифікувати об'єкти з безпрецедентною швидкістю та точністю [10]. Платформа Carbon Robotics демонструє ефективність використання "спрямованої енергії" (лазерів) як альтернативи хімікатам, що є особливо цінним для органічного землеробства [11].

1.1.3. Спеціалізовані та дослідницькі розробки

Проект Solix AG Robotics представляє модульний підхід до польових завдань. Платформа Solix складається з трьох модулів: Scouting (збір даних), Sprayer (вибіркове обприскування) та Hunter (нічне полювання на шкідників) [12]. Модуль Hunter заслуговує на особливу увагу в контексті боротьби з капустиною молю, оскільки він використовує світлові частоти для залучення та нейтралізації дорослих особин до моменту відкладання ними яєць. Це дозволяє боротися з причиною інвазії, а не лише з її наслідками (личинками) (рис.1.3) [12].

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10



Рис.1.3. Проект Solix AG Robotics

Університетські прототипи, як-от розробка Крус та колег (2024), фокусуються на глибокій інтеграції сенсорів. Їхня платформа використовує 3D-сканування LiDAR для реконструкції рядів капусти та створення «рецептурних карт» для внесення добрив або засобів захисту [13]. Такі системи демонструють навігаційну точність у діапазоні від 1.6 до 27 см, що є критичним для маневрування в густих посівах (рис.1.4) [13].



Рис.1.4. Розробка Крус та колег

1.2. Аналіз типів шасі та їх адаптивність до агротехнічних умов

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Вибір ходової частини робота визначає його прохідність, стабільність та вплив на екосистему поля. Для капусти, яка вимагає специфічного режиму зволоження та аерації ґрунту, це питання є першочерговим.

1.2.1. Колісні системи: Ефективність та обмеження

Колісні шасі залишаються найбільш поширеними через свою енергоефективність на відносно рівних поверхнях та простоту керування. Диференціальні приводи (як у КМР 600Р від КУКА) дозволяють здійснювати розворот на місці, що є життєво важливим при зміні рядів у обмеженому просторі [14]. Проте жорсткий контакт колеса з ґрунтом може призводити до пробуксовування на вологих чорноземах, що часто трапляється на полях капусти через інтенсивний полив.^[15] Використання систем 4WD з незалежним керуванням кожного колеса (4WS) дозволяє зменшити пошкодження структури ґрунту при маневрах (рис. 1.5) [17].



Рис.1.5. Система 4WD з незалежним керуванням кожного колеса

1.2.2. Гусеничні та крокуючі рішення

Гусеничні шасі забезпечують найкращий розподіл ваги та високу тягу на м'яких або похилих теренах [18]. Вони є ідеальними для роботи в умовах надмірної вологості, проте їхня маневреність часто супроводжується значним механічним пошкодженням верхнього шару ґрунту під час поворотів [15]. Крокуючі та колесно-крокуючі гібриди представляють майбутнє агроробототехніки. Вони здатні переступати через перешкоди (наприклад, зрошувальні труби) та

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

адаптувати висоту кліренсу в реальному часі, проте складність їхнього програмного забезпечення та висока вартість поки що обмежують їх використання науковими лабораторіями (рис. 1.6) [15].



Рис.1.6. Гусеничне шасі

1.3. Методи моніторингу шкідників: Комп'ютерний зір та алгоритми YOLO

Ідентифікація специфічних шкідників капусти – складне завдання через їх невеликий розмір та здатність до маскуванню. Капустяна міль (DBM) має довжину всього кілька міліметрів, а попелиці часто зливаються з кольором листя.

1.3.1. Еволюція YOLO в аграрному секторі

Використання алгоритмів сімейства YOLO (You Only Look Once) дозволяє здійснювати детекцію в реальному часі безпосередньо під час руху робота. Модель YOLOv5 вже успішно застосовувалася для виявлення попелиць, біланів та луперів на капусті, забезпечуючи базу для автоматизованого прийняття рішень [19]. Проте останні розробки, такі як SAFF-YOLO (на основі YOLO11), демонструють значний прогрес у виявленні дрібних цілей. Використання адаптивних ядер згортки (AKConv) та частотного об'єднання функцій (FreqFusion) дозволяє цій моделі досягати точності (mAP50) у 92.4% [20].

Для автономних систем критично важливою є обчислювальна легкість. Модель YOLO11-CGB, оптимізована для китайської капусти, має розмір лише

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

3.2 МБ та демонструє швидкість 143 кадрів на секунду (FPS), що дозволяє використовувати її на недорогих бортових контролерах без втрати точності (Precision 94.7%) [20]. Це відкриває шлях до створення роїв недорогих роботів-розвідників (рис.1.7).

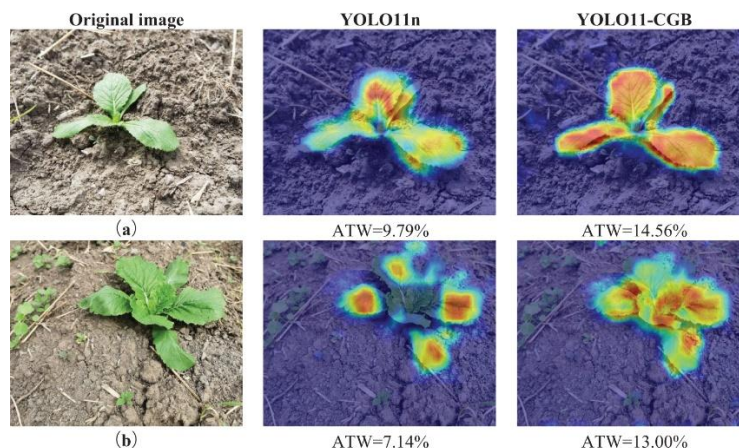


Рис.1.7. Модель YOLO11-CGB

1.3.2. Інтелектуальний аналіз та багатоспектральне розпізнавання

Ефективність моніторингу підвищується за рахунок використання не лише стандартних RGB-даних, а й мультиспектрального аналізу. Дослідження показують, що комахи мають специфічні спектральні підписи, які дозволяють відрізнити їх від хлорофілвмісних тканин рослин навіть при поганому освітленні [13]. Крім того, ШІ-моделі навчаються розпізнавати не тільки самих комах, а й патерни пошкодження листя, що дає змогу виявляти зараження на ранніх стадіях, коли популяція ще не є критичною [19].

1.4. Технології знешкодження: Порівняльний аналіз методів

Після виявлення шкідника робот повинен здійснити його нейтралізацію. Традиційне обприскування замінюється більш точними та екологічними методами.

1.4.1. Лазерне знешкодження: Фотоніка проти комах

Лазерне випромінювання розглядається як найбільш перспективний метод фізичного контролю. Для дрібних комах, таких як попелиці, ефективним є

використання синього лазера (450–532 нм) або інфрачервоного лазера (1070 нм).^[21] Ключовим фактором є спрямування променя на вразливі ділянки (апикальні меристеми для бур'янів або тіло комах для шкідників). Дослідження підтверджують, що дози 10–20 Дж/мм² є летальними для більшості дрібних шкідників [23]. Перевагою лазера є відсутність хімічного сліду та можливість роботи в нічний час, коли багато видів молей найбільш активні [11].

1.4.2. Точкове обприскування та механічний контроль

Точкове обприскування базується на використанні прецизійних форсунок, що активуються лише при виявленні цілі. Робот Solix демонструє зменшення використання пестицидів на 50% завдяки цій технології [12]. Це не лише знижує витрати, а й мінімізує вплив на корисних комах-ентомофагів, які можуть перебувати на тій же ділянці [1].

Механічне знешкодження зазвичай реалізується за допомогою маніпуляторів з ножами або щітками. Траєкторія руху кінцевого ефектора розраховується за складними формулами для уникнення пошкодження капусти:

$$x = v \cdot t + L \cdot \cos[Q(t) + \theta]$$

$$y = L \cdot \sin[Q(t) + \theta] - H$$

де v – швидкість платформи, L – довжина важеля, а $Q(t)$ – кут розвороту сервоприводу [26]. Механічні методи є дешевшими, але менш ефективними проти рухливих комах порівняно з лазерами.

1.5. Технічні вимоги до конструкції мобільної платформи

Проектування робота для капусти вимагає глибокого розуміння агрономічних параметрів цієї культури.

1.5.1. Геометрія та маневреність

Капуста висаджується з міжряддям від 30 до 42 дюймів (76–106 см) [27]. Робоча платформа повинна мати колію, що дозволяє колесам рухатися точно по центру міжрядь. Кліренс є критичним параметром: на етапі формування головки висота капусти може сягати 40–50 см, що вимагає «високого кліренсу»

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

платформи (80 см і більше), щоб уникнути механічного пошкодження листків [6]. Маневреність забезпечується використанням систем Askerman або диференціальних приводів, що дозволяють роботу розвертатися на вузьких розворотних смугах [17].

1.5.2. Енергоефективність та привід

Сучасний тренд – повна електрифікація. Електричні приводи (ЕАМ) забезпечують точне керування моментом і швидкістю, що необхідно для стабільної роботи систем комп’ютерного зору [28]. Порівняно з гідравлікою, електричні мотори мають вищий ККД (92% проти 71%) та легше інтегруються з цифровими системами керування [29]. Використання літій-іонних батарей дозволяє роботу працювати до 6–8 годин, що покриває значну частину робочого дня [8].

1.6. Математичне та програмне забезпечення автономності

Автономна навігація робота в полі базується на злитті даних. Основним інструментом є RTK-GNSS, що забезпечує точність позиціонування до 2–3 см. Проте в умовах густої вегетації або хмарності система повинна покладатися на візуальну одометрію та SLAM-алгоритми [14]. Використання LiDAR дозволяє роботу в реальному часі виявляти перешкоди та коригувати рух відносно рядків капусти, навіть якщо GPS-сигнал нестабільний [13].

Важливим аспектом є також енергетичний менеджмент. Роботи, як-от Solix, інтегрують сонячні панелі для підзарядки в процесі роботи, що дозволяє їм залишатися в полі 24/7 [12]. Для систем лазерного знешкодження, які споживають значну кількість енергії, критичним є використання інтелектуальних алгоритмів, що активують лазер лише у короткі моменти виявлення цілі, мінімізуючи розряд батареї [31].

Висновки та рекомендації для розробки

Проведений аналіз дозволяє сформулювати ключові тези для розробки конструкції мобільної платформи для захисту капусти:

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Концепція шасі: найбільш доцільним є використання чотириколісної повноприводної платформи з електричними мотор-колесами та високим агротехнічним кліренсом (понад 80 см). Це забезпечує необхідну маневреність та прохідність на всіх етапах росту капусти [5].

Інтелектуальна система: моніторинг має базуватися на легких нейромережах сімейства YOLO11, які здатні працювати на бортових обчислювачах (Edge AI) з частотою понад 100 FPS. Це дозволяє здійснювати детекцію без зупинки робота [20].

Метод нейтралізації: мазерне знешкодження (синій або NIR лазер) є пріоритетним через його екологічність та високу ефективність проти резистентних популяцій *Plutella xylostella*. Для додаткового захисту доцільно інтегрувати модулі точкового обприскування для боротьби з великими осередками зараження [12].

Економічна ефективність: Перехід на електричні приводи дозволяє знизити експлуатаційні витрати та скоротити термін окупності платформи до 3.6–4 років за рахунок економії палива та засобів захисту рослин [32].

Розробка такої платформи в Україні має враховувати специфіку місцевих ґрунтів та кліматичних умов, а також спиратися на англомовну наукову базу для впровадження найбільш передових рішень у сфері комп'ютерного зору та лазерних технологій. Використання відкритого програмного забезпечення та модульних конструкцій дозволить створити конкурентоспроможний продукт, адаптований до потреб як великих агрохолдингів, так і невеликих фермерських господарств.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ТА РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ РОБОТА МАНІПУЛЯТОРА З АВТОМАТИЧНИМ ОПРИСКУВАЧЕМ

2.1. Аналіз умов експлуатації робота на капустяних полях

Проектування мобільної роботизованої платформи для сільськогосподарського призначення вимагає фундаментального аналізу середовища, в якому вона буде функціонувати. На відміну від промислових роботів, що працюють у детермінованих умовах цехів, агророботи стикаються зі стохастичною природою ґрунтового покриття, мінливими кліматичними факторами та специфічними вимогами агротехніки вирощування конкретних культур. Для розробки ефективної конструкції робота для моніторингу та знешкодження шкідників капусти необхідно врахувати комплекс параметрів, що визначають його прохідність, енергоефективність та маневровість.

Характеристика польових умов починається з аналізу геометричних параметрів насаджень. Вирощування білоголової капусти в умовах України зазвичай передбачає широкорядний спосіб посадки. Згідно з агротехнічними нормами, ширина міжрядь становить від 50 до 70 см, а відстань між рослинами в ряду варіюється в межах 30–50 см залежно від сорту (ранньостигла, середньостигла або пізня) [45]. Для проектування колії робота ми обираємо стандартне значення міжряддя 70 см, що є найбільш поширеним при механізованому вирощуванні капусти великими господарствами [47]. Це дозволяє визначити максимальну ширину коліс платформи, яка не повинна перевищувати 20–25 см, щоб уникнути пошкодження листової маси, яка у дорослої капусти може перекривати значну частину міжряддя.

Особливу увагу слід приділити мікрорельєфу поля та фізико–механічним властивостям ґрунту. Поверхня поля характеризується наявністю нерівностей, зумовлених попереднім обробітком (культивацією) та гребенями, що

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ									
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата										
Розроб.		Савчук М.В.			РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ТА РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ РОБОТА МАНІПУЛЯТОРА З АВТОМАТИЧНИМ ОПРИС- КУВАЧЕМ				Літ.		Арк.		Акрушів	
Перевір.		Ляшко А.П.									18		65	
									НУБіП України					
Н. Контр.		Матухно Н.В,												
Затверд.		Ловейкін В.С.												

утворюються при підгортанні рослин. Висота таких нерівностей може досягати 10–15 см, що вимагає від мобільної платформи наявності значного агротехнічного просвіту (кліренсу) та ефективної системи підвіски або великого діаметра коліс для подолання перешкод без значних динамічних коливань рами [48].

Вологість ґрунту є критичним фактором, що впливає на тримальну здатність поверхні та опір руху. У період вегетації капусти, коли активність шкідників (таких як капуста міль або попелиця) є найвищою, вологість ґрунту може підтримуватися на рівні 70–80% від найменшої вологоємності шляхом поливу [47]. Це призводить до зниження коефіцієнта зчеплення та значного збільшення глибини колії. Дослідження взаємодії колісних рушіїв із деформівними ґрунтами показують, що коефіцієнт опору коченню на пухких вологих ґрунтах може досягати значень 0,16–0,20, що суттєво перевищує аналогічні показники для твердих доріг [51].

Вимоги до прохідності також диктуються біологічними особливостями культури. Капуста має розвинений листковий апарат, який на пізніх стадіях вегетації формує густий покрив. Робот повинен проходити над рядком капусти, не травмуючи центральну бруньку (сердечко) та листя, оскільки будь-яке механічне пошкодження стає «воротами» для інфекцій [48]. Таким чином, конструкція повинна мати порталну схему з висотою просвіту не менше 400–500 мм.

Характеристика ґрунту України, зокрема чорноземів та темно-каштанових ґрунтів, при вологості 12–15% забезпечує стабільний рух при питомому тиску на ґрунт не більше 80–100 кПа. Перевищення цих значень веде до надмірного ущільнення, що негативно впливає на розвиток кореневої системи капусти, яка проникає на глибину до 100–130 см [48]. Враховуючи ці фактори, доцільно використовувати пневматичні шини низького тиску або широкі колеса з розвиненим протектором для забезпечення необхідної тяги та мінімізації тиску.

2.2. Вибір конструктивної схеми мобільної платформи

При виборі конструктивної схеми мобільної платформи для роботи в міжряддях капусти необхідно збалансувати вимоги до маневровості, стабільності та

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

вантажопідйомності. Аналіз існуючих рішень у галузі агроробототехніки дозволяє виділити кілька основних типів шасі: гусеничні, триколісні та чотириколісні [49].

Для умов овочівництва найбільш технічно доцільною є чотириколісна повнопривідна схема (4WD) з незалежним керуванням кожним колесом (4WS – Four Wheel Steering). Така схема забезпечує максимальну маневровість, дозволяючи роботу розвертатися на місці або рухатися діагонально («крабовий хід»), що є критично важливим при зміні рядків на вузьких розворотних смугах [56]. Кожне колесо оснащується індивідуальним мотор–редуктором, що спрощує трансмісію, виключаючи необхідність у диференціалах та карданних валах, та дозволяє точно дозувати крутний момент на кожному рушії для запобігання буксуванню [57].

Рама платформи проєктується як просторова фермова конструкція порталного типу. Це дозволяє розмістити основні вузли (акумулятори, блоки керування, ємності з препаратами) з боків або зверху, залишаючи вільним простір безпосередньо під центром платформи для пропуску рослин. Основним матеріалом рами обрано профільну сталеву трубу квадратного перерізу згідно з ДСТУ 8940:2019, що забезпечує високу жорсткість на вигин та кручення при відносно малій власній вазі [59].

Схема компоновання елементів передбачає:

- Нижній ярус: мотор–колеса, акумуляторні відсіки (розташовані максимально низько для стабілізації центру мас) та систему підвіски.
- Центральний відсік: захищений корпус для обчислювального модуля (NVIDIA Jetson Orin Nano), контролерів двигунів, інерціального вимірювального модуля (IMU) та системи навігації (RTK–GPS) [61].
- Технологічне обладнання: систему точкового обприскування, що включає бак для робочого розчину, насос високого тиску та маніпулятор з форсункою, а також мультиспектральні камери для детекції шкідників [63].

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Розташування центру мас має вирішальне значення для динамічної стійкості робота. При русі по нерівному рельєфу та схилах центр мас повинен знаходитися геометрично посередині між осями та максимально низько. Це забезпечує рівномірне навантаження на всі чотири колеса, що є обов'язковою умовою для реалізації максимальної тягової сили за зчепленням [58]. Приймемо, що 60% маси робота зосереджено на висоті не більше 300 мм від поверхні ґрунту, що гарантує стійкість проти перекидання на схилах до 20–25 градусів.

Конструкція коліс передбачає використання пневматичних шин діаметром 350 мм. Великий діаметр дозволяє зменшити опір коченню за рахунок меншого кута в'їзду на перешкоди та більшої площі плями контакту, що знижує глибину колії та ущільнення ґрунту [66]. Ширина профілю колеса обирається на рівні 100 мм, що є компромісом між тримальною здатністю на м'якому ґрунті та можливістю безперешкодного руху у вузькому міжрядді.

2.3. Тяговий розрахунок

Тяговий розрахунок є ключовим етапом інженерного проєктування, оскільки він визначає енергетичні параметри робота та здатність виконувати завдання в реальних польових умовах. Основним завданням розрахунку є визначення сумарного опору руху та необхідного крутного моменту на ведучих колесах.

Вихідні дані для розрахунку:

- Повна маса робота з обладнанням та робочим розчином: $m = 120$ кг;
- Розрахункова швидкість руху: $v = 0,8$ м/с (2,88 км/год);
- Радіус колеса: $r_k = 0,175$ м;
- Максимальний кут підйому поля: $\alpha = 12^\circ$;
- Коефіцієнт опору коченню для стерні/пухкого ґрунту: $f = 0,15$;
- Прискорення вільного падіння: $g = 9,81$ м/с².

Вага робота визначається за формулою:

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

$$G = m \cdot g \quad (2.1)$$

де:

G – вага машини, Н;

m – маса машини, кг;

g – прискорення вільного падіння, м/с².

Підстановка числових значень:

$$G = 120 \cdot 9,81 = 1177,2 \text{ Н}$$

2.3.1. Сила опору коченню

Сила опору коченню виникає внаслідок деформації ґрунту та шини при їх взаємодії. Це основна складова опору при русі по полю:

$$F_f = G \cdot f \cdot \cos(\alpha) \quad (2.2)$$

де:

F_f – сила опору коченню, Н;

f – коефіцієнт опору коченню;

α – кут нахилу поверхні (кут підйому поля).

Підстановка числових значень:

$$F_f = 1177,2 \cdot 0,15 \cdot \cos(12^\circ) = 1177,2 \cdot 0,15 \cdot 0,978 = 172,7 \text{ Н}$$

2.3.2. Сила опору підйому

Ця сила виникає при русі робота на ділянках з ухилом і спрямована проти напрямку руху:

$$F_i = G \cdot \sin(\alpha) \quad (2.3)$$

де:

F_i – сила опору підйому, Н.

Підстановка числових значень:

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$F_i = 1177,2 \cdot \sin(12^\circ) = 1177,2 \cdot 0,208 = 244,8 \text{ Н}$$

2.3.3. Сила інерції

Сила інерції враховується при розгоні робота. Прийmemo час розгону до номінальної швидкості $t = 3$ с. Тоді прискорення складає $a = 0,267 \text{ м/с}^2$:

$$F_j = m \cdot a \cdot \delta \quad (2.4)$$

де:

F_j – сила інерції, Н;

a – прискорення, м/с^2 ;

δ – коефіцієнт обліку обертових мас (для колісних машин приймаємо $\delta = 1,05$).

Підстановка числових значень:

$$F_j = 120 \cdot 0,267 \cdot 1,05 = 33,6 \text{ Н}$$

2.3.4. Загальний тяговий опір

Загальна сила на ободі ведучих коліс при найнесприятливішому сценарії (розгін на підйомі) визначається як сума всіх опорів:

$$F_k = F_f + F_i + F_j \quad (2.5)$$

Підстановка числових значень:

$$F_k = 172,7 + 244,8 + 33,6 = 451,1 \text{ Н}$$

Проміжний висновок: Для забезпечення руху в заданих умовах приводи робота повинні розвивати сумарну тягову силу не менше 451,1 Н. Це вимагає високої питомої потужності та ефективного зчеплення з ґрунтом.

2.3.5. Необхідний тяговий момент

Сумарний крутний момент на всіх ведучих колесах визначається за формулою:

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$M_{\Sigma} = F_k \cdot r_k \quad (2.6)$$

де:

M_{Σ} – сумарний крутний момент, Нм;

r_k – радіус колеса, м.

Підстановка числових значень:

$$M_{\Sigma} = 451,1 \cdot 0,175 = 78,9 \text{ Нм}$$

Враховуючи, що платформа має чотири ведучих колеса ($z_w = 4$), необхідний момент на одному колесі з урахуванням ККД планетарного редуктора ($\eta_{red} = 0,9$) становитиме:

$$M_k = M_{\Sigma} / (z_w \cdot \eta_{red}) \quad (2.7)$$

Підстановка числових значень:

$$M_k = 78,9 / (4 \cdot 0,9) = 21,9 \text{ Нм}$$

2.3.6. Потужність двигунів

Корисна потужність для подолання опору руху розраховується так:

$$P_{use} = F_k \cdot v \quad (2.8)$$

Підстановка числових значень:

$$P_{use} = 451,1 \cdot 0,8 = 360,9 \text{ Вт}$$

Повна електрична потужність двигунів з урахуванням загального ККД системи ($\eta_{sys} = 0,85$):

$$P_{el} = P_{use} / \eta_{sys} \quad (2.9)$$

Підстановка числових значень:

$$P_{el} = 360,9 / 0,85 = 424,6 \text{ Вт}$$

Відповідно, на один двигун припадає мінімальна необхідна потужність:

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P_{mot} = P_{el} / 4 = 424,6 / 4 = 106,15 \text{ Вт}$$

2.3.7. Вибір мотор-редукторів

На основі отриманих розрахунків ($P_{mot} = 106,15 \text{ Вт}$, $M_k = 21,9 \text{ Нм}$ на одне колесо) проводиться обґрунтований вибір двигунів. Для забезпечення високої надійності та можливості ефективного подолання пікових навантажень (локальні нерівності, ями, коріння бур'янів, перезволожені ділянки ґрунту) обираємо безщіткові двигуни постійного струму (BLDC) із номінальною потужністю 200 Вт кожен. Коефіцієнт запасу за потужністю в такому випадку складає:

$$k_z = 200 / 106,15 = 1,88$$

Обираємо мотор-редуктор із планетарною передачею, оскільки вона забезпечує високий ККД та компактні габаритні розміри. Наприклад, промислова модель із номінальним вихідним крутним моментом 33 Нм повністю задовольняє вимогам проєкту навіть при роботі у тривалому режимі короткочасного перевантаження.

2.4. Кінематичний розрахунок ходової частини

Кінематичний розрахунок дозволяє встановити чіткий зв'язок між обертовими параметрами електродвигуна та лінійними швидкісними характеристиками робота, а також перевірити відповідність обраного редуктора заданим режимам польового руху.

2.4.1. Частота обертання коліс

Для забезпечення заданої лінійної швидкості руху платформи $v = 0,8 \text{ м/с}$, її ведучі колеса повинні обертатися з наступною частотою:

$$n_k = (60 \cdot v) / (2 \cdot \pi \cdot r_k) \quad (2.10)$$

де:

n_k — частота обертання колеса, об/хв;

π — математична константа ($\pi \approx 3,14$).

Підстановка числових значень:

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$n_k = (60 \cdot 0,8) / (2 \cdot 3,14 \cdot 0,175) = 48 / 1,1 = 43,6 \text{ об/хв}$$

2.4.2. Передаточне число редуктора

Сучасні високоефективні BLDC двигуни мають номінальну частоту обертання вала в діапазоні 3000–4000 об/хв для забезпечення максимального ККД. Прийmemo номінальну частоту обертання обраного двигуна $n_d = 3000$ об/хв. Тоді необхідне передаточне число редуктора становить:

$$u = n_d / n_k \quad (2.11)$$

Підстановка числових значень:

$$u = 3000 / 43,6 = 68,8$$

Обираємо стандартний промисловий планетарний редуктор із близьким передаточним числом $u = 71,5$. Перевіримо фактичну максимальну швидкість робота при цьому значенні:

$$v_{fact} = (n_d \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_k) / (60 \cdot u) \quad (2.12)$$

Підстановка числових значень:

$$v_{fact} = (3000 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 0,175) / (60 \cdot 71,5) = 3297 / 4290 = 0,768 \text{ м/с}$$

Отримане значення відрізняється від початково заданого (0,8 м/с) всього на 4%, що є цілком допустимим та незначним відхиленням для сільськогосподарської робототехніки.

2.4.3. Перевірка робочого режиму з урахуванням буксування

При реальному русі по пухкому та вологому аграрному ґрунту завжди виникає явище буксування рушіїв. Коефіцієнт буксування для типових польових умов становить $\sigma = 0,1$. Фактична реальна швидкість руху машини з урахуванням буксування (v_{real}) розраховується так:

$$v_{real} = v_{fact} \cdot (1 - \sigma) \quad (2.12)$$

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Підстановка числових значень:

$$v_{real} = 0,768 \cdot (1 - 0,1) = 0,69 \text{ м/с}$$

Така лінійна швидкість є оптимальною для стабільного та якісного функціонування бортових систем комп'ютерного зчитування й нейромережевого аналізу, оскільки дозволяє отримувати чіткі недеформовані зображення рослинного покриву без ефекту змазування при частоті камери від 15 до 30 кадрів на секунду. При виявленні шкідника або хвороби на листі капусти, робот здатний плавно уповільнюватися аж до повної зупинки для точкового спрямованого нанесення препарату.

2.5. Розрахунок рами на міцність

Рама виступає головним базовим несним елементом конструкції, який сприймає та перерозподіляє всі статичні й динамічні навантаження: власну вагу обладнання, бака з розчином, удари та поштовхи від нерівностей рельєфу поля, а також реакції від тягових мотор-колес. Перевірочний розрахунок проводиться для найбільш навантаженого елемента конструкції рами – поздовжньої балки portalу.

2.5.1. Визначення розрахункового навантаження

Приймемо, що на кожен з двох симетричних поздовжніх балок припадає половина повної ваги робота з урахуванням динамічного коефіцієнта бездоріжжя $k_d = 1,6$ та коефіцієнта можливого перевантаження конструкції $f_p = 1,1$:

$$P = (m \cdot g / 2) \cdot k_d \cdot f_p \quad (2.13)$$

де:

P – розрахункова сила, Н.

Підстановка числових значень:

$$P = (120 \cdot 9,81 / 2) \cdot 1,6 \cdot 1,1 = 588,6 \cdot 1,76 = 1035,9 \text{ Н}$$

2.5.2. Визначення максимального згинального моменту

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

Розглядаємо балку в спрощеній розрахунковій моделі як двоопорну балку довжиною $L = 1,1$ м із зосередженим силовим навантаженням прикладеним по середині прогону (що забезпечує додатковий інженерний запас міцності):

$$M_{max} = (P \cdot L) / 4 \quad (2.14)$$

де:

M_{max} – максимальний згинальний момент, Нм.

Підстановка числових значень:

$$M_{max} = (1035,9 \cdot 1,1) / 4 = 284,9 \text{ Нм}$$

2.5.3. Вибір геометричного профілю балки рами

Згідно з чинним стандартом ДСТУ 8940:2019, для несних просторових рам мобільної техніки найдоцільніше використовувати сталеві квадратні труби. Попередньо обираємо профільну трубу квадратного перерізу розмірами 40х40х3 мм. Геометричні характеристики цього перерізу за сортаментом складають:

- Момент опору перерізу: $W_x = 4,8 \text{ см}^3$ (або $4,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$);
- Площа поперечного перерізу: $A = 4,43 \text{ см}^2$;
- Маса одного погонного метра труби: 3,33 кг.

2.5.4. Перевірка діючих механічних напружень

Розрахункове механічне напруження на вигин σ_z обчислюється за базовою залежністю опору матеріалів:

$$\sigma_z = M_{max} / W_x \quad (2.15)$$

Підстановка числових значень:

$$\sigma_z = 284,9 / (4,8 \cdot 10^{-6}) = 59,35 \cdot 10^6 \text{ Па} = 59,35 \text{ МПа}$$

2.5.5. Визначення коефіцієнта запасу міцності

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для обраного конструкційного матеріалу (вуглецева сталь марки Ст3пс) межа текучості складає $\sigma_y = 235$ МПа. Коефіцієнт нормативного запасу міцності n дорівнює:

$$n = \sigma_y / \sigma_z \quad (2.16)$$

Підстановка числових значень:

$$n = 235 / 59,35 = 3,96$$

Отриманий коефіцієнт запасу міцності (майже 4-кратний) є оптимальним та раціональним для мобільної платформи. Він повністю гарантує високу експлуатаційну надійність просторової конструкції за умов тривалих знакозмінних вібрацій і дозволяє в майбутньому навішувати додаткове корисне обладнання чи ємності більшого об'єму без загрози виникнення пластичних деформацій або руйнування балок рами. Крім того, плоскі грані квадратного профілю є дуже зручними для монтажу кронштейнів приводів та навісних сенсорів.

2.6. Розрахунок акумуляторної системи

Енергетична автономність виступає однією з критичних вимог до польових роботизованих комплексів. Бортова система електроживлення зобов'язана безперебійно підживлювати тягові електроприводи, потужний обчислювальний модуль та технологічні виконавчі вузли протягом усієї робочої зміни.

2.6.1. Визначення сумарної споживаної потужності

Загальна електрична потужність споживання системи P_{total} складається з потужностей окремих споживачів:

- Тягова система (усереднена потужність при русі по полю): $P_{drive} = 250$ Вт (з урахуванням того, що двигуни працюють на пікових режимах не постійно);
- Центральний обчислювальний блок NVIDIA Jetson Orin Nano, контролери та сенсори (лідар, навігація, камери): $P_{elec} = 45$ Вт;
- Елементи системи точкового обприскування (насос високого тиску та електромагнітні клапани): $P_{spray} = 50$ Вт.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

$$P_{total} = P_{drive} + P_{elec} + P_{spray} \quad (2.17)$$

Підстановка числових значень:

$$P_{total} = 250 + 45 + 50 = 345 \text{ Вт}$$

2.6.2. Розрахунок необхідної ємності акумуляторної батареї

Заданий безперервний час автономної польової роботи платформи дорівнює $t = 10$ годин. Необхідний сумарний запас енергії в акумуляторі E :

$$E = P_{total} \cdot t \quad (2.18)$$

Підстановка числових значень:

$$E = 345 \cdot 10 = 3450 \text{ Вт} \cdot \text{год}$$

Прийнявши номінальну робочу напругу бортової мережі робота $U = 24$ В, розрахуємо необхідну ємність акумуляторної батареї Q з урахуванням коефіцієнта глибини ефективного безпечного розряду для захисту осередків від деградації ($k_{eff} = 0,85$):

$$Q = E / (U \cdot k_{eff}) \quad (2.19)$$

Підстановка числових значень:

$$Q = 3450 / (24 \cdot 0,85) = 169,1 \text{ А} \cdot \text{год}$$

2.6.3. Обґрунтування та вибір типу хімії акумулятора

Для надійного живлення агроробота було проведено техніко-економічне порівняння двох найбільш поширених типів літєвих батарей: літій-іонних (Li-ion) та літій-залізо-фосфатних (LiFePO4).

- Li-ion: мають вищу питому енергетичну щільність на одиницю маси, проте характеризуються суттєво меншим життєвим ресурсом (близько 500–1000 циклів) та підвищеною пожежонебезпекою при випадкових механічних пошкодженнях корпусу осередку.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- LiFePO₄: демонструють колосальний ресурс циклічності (від 3000 до 7000 циклів заряд-розряд), мають виняткову хімічну й термічну стабільність (що критично важливо при тривалій експлуатації влітку під відкритим прямим сонячним промінням) та є абсолютно вибухо- й пожежобезпечними.

Враховуючи зазначені фактори, для фінальної комплектації обираємо акумуляторну збірку типу LiFePO₄ із номінальною ємністю 180 А·год (що містить невеликий експлуатаційний запас). Дане інженерне рішення гарантовано забезпечить безперервну тривалу роботу платформи в полі протягом 10–12 годин та тривалий термін служби системи живлення (понад 5–7 років щоденної сезонної експлуатації).

2.7. Розрахунок продуктивності

Продуктивність роботизованої платформи визначає площу поля, яку вона здатна якісно обробити за одиницю часу, що виступає ключовим вхідним параметром для подальшого розрахунку економічної окупності інноваційного проєкту.

2.7.1. Теоретична годинна продуктивність

Теоретична продуктивність за одну годину чистої роботи W_h визначається за класичною формулою:

$$W_h = 0,1 \cdot B \cdot v \cdot \tau \quad (2.20)$$

де:

W_h – продуктивність роботи платформи, га/год;

B – ширина захвату технологічного обладнання (для нашого однорядкового робота приймаємо $B = 0,7$ м);

v – лінійна швидкість руху машини, виражена в км/год ($v = 2,88$ км/год);

τ – коефіцієнт використання робочого часу змін, який враховує технологічні розвороти в кінці гону та заправку бака рідким розчином біопрепарату (приймаємо $\tau = 0,8$).

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Підстановка числових значень:

$$W_h = 0,1 \cdot 0,7 \cdot 2,88 \cdot 0,8 = 0,161 \text{ га/год}$$

2.7.2. Змінна продуктивність робота

За повну робочу зміну тривалістю $T_{shift} = 10$ годин сумарна продуктивність складе:

$$W_{shift} = W_h \cdot T_{shift} \quad (2.21)$$

Підстановка числових значень:

$$W_{shift} = 0,161 \cdot 10 = 1,61 \text{ га/зміну}$$

2.7.3. Кількість оброблених рослин та швидкість аналізу

Враховуючи середню відстань між окремими рослинами в одному рядку 0,4 м, орієнтовна кількість капусти на 1 гектарі площі при широкорядному міжрядді 0,7 м становить приблизно 35 700 штук. Таким чином, за одну годину своєї роботи платформа здійснює повний моніторинг такої кількості рослин N :

$$N = 35700 \cdot W_h \quad (2.22)$$

Підстановка числових значень:

$$N = 35700 \cdot 0,161 = 5747 \text{ рослин/год}$$

Це означає, що інтегрована інтелектуальна система комп'ютерного зору разом із алгоритмами розпізнавання шкідників повинна обробляти та детально аналізувати одну окрему рослину за проміжок часу t_{plant} :

$$t_{plant} = 3600 / N \quad (2.23)$$

Підстановка числових значень:

$$t_{plant} = 3600 / 5747 = 0,63 \text{ секунди}$$

Сучасні швидкісні нейромережеві алгоритми архітектури YOLOv8, запущені на вбудованій апаратній платформі NVIDIA Jetson Orin Nano, здатні

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виконувати повну детекцію та класифікацію об'єктів на зображенні всього за 20–50 мс. Це забезпечує величезний конструктивний запас часу для прийняття рішень та точного позиціонування виконавчого маніпулятора системи ультрама-лооб'ємного точкового нанесення захисного препарату безпосередньо на вияв-лене вогнище ураження шкідниками.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ

3.1. Аналіз небезпечних та шкідливих факторів при експлуатації мобільного робота в аграрному середовищі

Процес цифровізації сучасного аграрного сектору зумовлює появу нових категорій ризиків, пов'язаних із впровадженням автономних систем у складних польових умовах. Експлуатація мобільної роботизованої платформи для захисту капусти від шкідників (таких як капустяна міль, попелиця або білан) супроводжується специфічним комплексом небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які суттєво відрізняються від стаціонарних промислових установок. Основна складність полягає у функціонуванні машини в неструктурованому та динамічному середовищі, де рельєф, стан ґрунту та погодні умови постійно змінюються, що безпосередньо впливає на надійність роботи сенсорних систем та стабільність механічних вузлів.

Фізичні небезпечні фактори становлять найбільш очевидну загрозу. До них належать ризики ударів рухомою платформою, защемлення кінцівок маніпуляторами або перекидання машини на нерівній поверхні поля. Враховуючи автономний характер керування, помилки в алгоритмах локалізації або збої в роботі сенсорів сприйняття (LIDAR, камери) можуть призвести до непередбачуваної зміни траєкторії руху, що створює загрозу для агрономів або іншого персоналу, який може перебувати в робочій зоні. Окрему увагу слід приділити механічним ризикам від привідних механізмів та систем розпилення пестицидів, де високий тиск у магістралях при пошкодженні шлангів може спричинити травмування струменем рідини.

Хімічні небезпечні фактори безпосередньо пов'язані з цільовим призначенням платформи – знешкодженням шкідників. Застосування інсектицидів вимагає суворого контролю за процесом розпилення. Навіть за умов прецизійного (точкового) нанесення препарату існує ризик аерозольного знесення (дрифту)

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ		
Розроб.		Савчук М.В.					
Перевір.		Ляшко А.П.					
Н. Контр.		Матухно Н.В.					
Затверд.		Ловейкін В.С.			НУБіП України		
					Літ.	Арк.	Акрушів
						34	65

робочого розчину за межі цільової ділянки, особливо при поривах вітру. Хімічна інтоксикація може виникнути під час технічного обслуговування системи – заправки баків, очищення форсунок або усунення витоків, де персонал контактує з концентрованими речовинами.

Електричні та пожежні фактори обумовлені наявністю енергоємних джерел живлення. Сучасні агророботи використовують літій-іонні або літій-залізо-фосфатні акумулятори, які при механічному пошкодженні, короткому замиканні або перегріві під прямим сонячним промінням схильні до теплового розгону (thermal runaway). Висока вологість польових умов, наявність роси або опадів підвищує імовірність пробоя ізоляції та ураження електричним струмом при контакті з корпусом робота.

Психофізіологічні та ергономічні фактори впливають на оператора, який здійснює дистанційний нагляд за групою роботів. Тривала концентрація уваги на моніторах, зорове напруження та статичне навантаження під час моніторингу телеметрії можуть призводити до когнітивної втоми та помилок у прийнятті рішень, що опосередковано підвищує ризик аварійних ситуацій.

3.2. Оцінка ризиків відповідно до принципів ISO та стандарту ISO 12100

Забезпечення безпеки роботизованої платформи базується на системній методології оцінки ризиків, викладеній у стандарті ДСТУ EN ISO 12100:2016. Цей стандарт передбачає ітеративний процес, що починається з визначення меж експлуатації машини та завершується перевіркою достатності вжитих заходів зниження ризику. Для автономної платформи межі експлуатації включають просторові параметри (межі поля капусти, зони розвороту), часові обмеження (тривалість автономної роботи без підзарядки) та екологічні параметри, такі як максимально допустима швидкість вітру для обприскування.

Ідентифікація небезпек за ISO 12100 вимагає аналізу кожного етапу життєвого циклу робота. На етапі підготовки до роботи небезпеку може становити процес заправки баків пестицидами або завантаження акумуляторів, що

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

визначено як помірно небезпечна активність через ризик хімічного впливу або фізичного навантаження. Під час безпосереднього моніторингу головним ризиком є втрата контролю над рухом через засліплення камер сонячним світлом або забруднення сенсорів пилом, що може призвести до зіткнення.

Оцінка ризику здійснюється шляхом комбінування тяжкості можливої шкоди та ймовірності її виникнення. Оскільки для інноваційних систем, якими є агророботи, часто бракує історичних даних про відмови, стандарт ISO 12100 вимагає використання прогнозного моделювання та сценарного аналізу. Зниження ризику відбувається за триступеневою стратегією. Першим пріоритетом є впровадження конструктивно безпечного дизайну. Це включає обмеження максимальної швидкості руху робота до значень, безпечних для людини (зазвичай менше 2-3 км/год у зонах спільної присутності), та вибір хімічно стабільних компонентів. Другий рівень — технічні засоби захисту, такі як лазерні сканери для детекції перешкод та кнопки аварійної зупинки. Третій рівень — це інформаційні заходи: маркування небезпечних зон, звукова сигналізація та навчання персоналу.

3.3. Вимоги безпеки до роботизованих систем згідно ISO 10218

Стандарт ISO 10218 (прийнятий в Україні як ДСТУ EN ISO 10218) визначає фундаментальні вимоги до проектування роботизованих систем. У 2025 році стандарт отримав суттєве оновлення, яке посилює вимоги до функціональної безпеки та кіберстійкості автономних пристроїв. Основною вимогою є те, що всі безпекові функції системи керування повинні відповідати певному рівню ефективності (Performance Level), зазвичай не нижче PL d або SIL 2.

Критично важливим є реалізація режимів спільної роботи робота та людини (collaborative application). Стандарт виділяє методи забезпечення безпеки при такому контакті, серед яких найбільш актуальним для агроробота є моніторинг швидкості та розділення (Speed and Separation Monitoring, SSM). Платформа повинна постійно вимірювати відстань до оточуючих людей; при наближенні людини швидкість автоматично знижується, а при порушенні мінімально допустимої дистанції відбувається захисна зупинка.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Іншим методом є обмеження потужності та сили (Power and Force Limiting, PFL). Це вимагає проектувати маніпулятори для обприскування таким чином, щоб у разі випадкового зіткнення сила удару не перевищувала встановлених безпечних порогів, за якими починається травмування. Окремо регламентуються вимоги до пристроїв керування: робот повинен бути оснащений трипозиційним пристроєм увімкнення (deadman switch) для ручного режиму та легкодоступними кнопками аварійної зупинки. Сучасні підходи також акцентують на кібербезпеці згідно з Cyber Resilience Act, оскільки несанкціоноване втручання може призвести до відключення захисних функцій.

3.4. Особливості безпеки автономної сільськогосподарської техніки відповідно до ISO 18497

Специфіка польових робіт вимагає дотримання стандарту ДСТУ EN ISO 18497:2020, який фокусується на безпеці високоавтоматизованих сільськогосподарських машин. На відміну від промислового середовища, поле капусти має нерівномірну структуру, що створює труднощі для виявлення перешкод низького зросту або об'єктів, прихованих рослинністю.

Центральним елементом безпеки за ISO 18497 є система захисту від перешкод (Obstacle Protective System, OPS). Робот повинен не лише виявляти об'єкти на своєму шляху, а й ідентифікувати їхній тип для вибору адекватної стратегії уникнення. Стандарт вводить поняття зон безпеки навколо робота. Межа зони попередження (Warning Zone Boundary, WZB) визначає простір, при вході в який робот активує звукову сигналізацію та світлові маячки. Межа зони небезпеки (Hazard Zone Boundary, HZB) визначає критичну дистанцію, при перетині якої платформа повинна миттєво припинити рух та виконання операцій обприскування.

Для мобільних платформ, що працюють автономно, швидкість руху зазвичай обмежується 2-4 км/год для забезпечення гарантованого зупинного шляху в межах видимості сенсорів. Важливим аспектом є функція віртуальної огорожі (geofencing), яка запобігає виїзду машини за межі поля. При втраті сигналу GNSS

або виході за межі дозволеної зони система повинна автоматично переходити в безпечний стан (safe state). Оператор повинен мати можливість постійного дистанційного моніторингу телеметрії та можливість ручного втручання через канали зв'язку.

Заходи електробезпеки та пожежної безпеки

Електрична безпека мобільної платформи є критичною через використання літійових джерел живлення (Li-ion або LiFePO₄). Ці батареї мають високу щільність енергії, але є вразливими до термічного розгону при механічному пошкодженні або внутрішньому короткому замиканні.

Для запобігання пожежам впроваджуються наступні заходи: По-перше, використання інтелектуальної системи керування батареєю (BMS). BMS повинна в реальному часі моніторити напругу кожної комірки, струм та температуру. При виявленні дисбалансу напруги (понад 0,02 В) або перевищенні температури понад 60°C, система повинна автоматично розривати коло живлення. По-друге, забезпечення конструктивного захисту. Акумуляторний відсік повинен мати захист рівня не нижче IP65 для запобігання потраплянню вологи та бруду. Корпус батареї має бути виготовлений з вогнетривких матеріалів та захищений від вібрацій за допомогою демпфувальних вставок.

Пожежна безпека також вимагає наявності спеціалізованих засобів пожежогасіння. Оскільки гасіння літійових батарей звичайними засобами є малоефективним, рекомендується використання великої кількості води для охолодження або спеціальних речовин, що блокують хімічну реакцію розгону. Оператори повинні бути попереджені про виділення токсичних газів (фтороводень, чадний газ) при горінні акумуляторів та забезпечені відповідними ЗІЗ.

3.5. Захист від рухомих частин та хімічних факторів (пестициди)

Захист від механічних травм реалізується шляхом ізоляції привідних механізмів усередині корпусу платформи. Для маніпуляторів, що здійснюють

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

обробку капусти, використовується програмне обмеження робочої зони (soft limits) та сенсорні "шкіри", які зупиняють рух при контакті з перешкодою.

Хімічна безпека базується на принципах точного землеробства. Автономна платформа дозволяє виключити присутність людини в зоні розпилення, що знижує експозицію персоналу до нуля під час роботи. Система обприскування повинна бути оснащена технологією Pulse Width Modulation (PWM), яка дозволяє підтримувати сталий розмір крапель незалежно від швидкості руху, мінімізуючи дрифт пестицидів. Для запобігання витокам баки виготовляються з хімічно стійкого поліетилену високої щільності (HDPE) з герметичними кришками та датчиками рівня.

Екологічна безпека посилюється використанням алгоритмів штучного інтелекту (YOLOv5 або подібних), які розпізнають шкідників та активують форсунок лише над ураженою рослиною. Це дозволяє уникнути забруднення міжрядь та знижує використання хімікатів до 60%. Після завершення робіт система повинна проходити процедуру автоматичного промивання чистою водою, а відходи мають збиратися для дезактивації згідно з ДСанПіН 8.8.1.2.001-98.

3.6. Ергономічні вимоги та безпека оператора

Ергономіка аграрного робота фокусується на взаємодії "людина-система" через дистанційні інтерфейси. Згідно з ДСТУ ISO 9241-11, інтерфейс керування повинен забезпечувати високий рівень прийнятності у використанні (usability), що означає легкість сприйняття критичної інформації про стан платформи.

Вимоги до робочого місця оператора включають: По-перше, раціональну візуалізацію даних. Екрани моніторів повинні мати антивідблискове покриття та яскравість, що адаптується до освітлення. Важливі параметри (швидкість, заряд батареї, тиск у системі) мають бути згруповані в центральній зоні огляду. По-друге, мінімізацію когнітивного навантаження. Система повинна фільтрувати хибні тривоги від сенсорів, щоб оператор отримував лише ті сповіщення, які потребують втручання. По-третє, фізичну ергономіку при обслуговуванні. Конструкція платформи має забезпечувати вільний доступ до вузлів (акумулятори,

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

фільтри) згідно з антропометричними даними для 50-го перцентиля (ДСТУ 8604:2015), що мінімізує ризик травм при заправці або ремонті.

3.7. Заходи зниження впливу шуму, вібрації та пилу

Пил у польових умовах погіршує роботу оптичних систем навігації та розпізнавання шкідників. Захист від пилу включає використання камер із супер-гідрофобним покриттям для самоочищення та встановлення пневматичних форсунок для обдування лінз стисненим повітрям. Електронні блоки герметизуються за стандартом не нижче IP65.

Вібрація при русі по нерівному рельєфу поля може пошкодити електроніку. Для захисту використовуються підвіски з демпфувальними елементами та активні системи ізоляції вібрації (наприклад, на базі контролерів Skyhook або DOB) для стабілізації маніпулятора, що забезпечує чіткість зображення при детекції комах.

Шум від електричних приводів агророботів зазвичай нижчий за рівні тракторів з ДВС, проте робота насосів може перевищувати 80 дБ. Зниження шуму досягається звукоізоляцією відсіку насоса та використанням електродвигунів із низьким рівнем магнітного шуму. Загальна оцінка впливу вібрації на персонал у разі перебування поруч здійснюється відповідно до ISO 2631.

3.8. Екологічні аспекти та безпека при використанні засобів захисту рослин

Впровадження роботизованої платформи дозволяє значно зменшити антропогенне навантаження на довкілля. Традиційне суцільне обприскування замінюється точковим нанесенням інсектицидів лише на уражені рослини капусти, що зменшує загальну кількість пестицидів у ґрунті до 60-90%.

Екологічна безпека експлуатації включає:

Автоматичний контроль за дрифтом: платформа припиняє роботу при швидкості вітру понад 3 м/с, використовуючи дані бортових сенсорів.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

Захист корисних комах: алгоритми розпізнавання налаштовуються на ідентифікацію не лише шкідників, а й корисних ентомофагів (наприклад, сонечок) для уникнення їх знищення.

Енергоефективність: використання електроприводу виключає викиди CO₂ та проливи нафтопродуктів на ґрунт.

Поводження з відходами: акумулятори після завершення терміну служби (понад 2000 циклів) мають передаватися на спеціалізовану переробку.

3.9. Інструкції з безпечної експлуатації, технічного обслуговування та аварійних ситуацій

Безпечна експлуатація вимагає суворого дотримання регламенту обслуговування, оскільки відмова сенсорів OPS може призвести до неконтрольованого руху автономної машини.

Щоденний огляд включає перевірку цілісності коліс, надійності кріплення маніпуляторів та очищення лінз сенсорів від пилу. Періодичне обслуговування передбачає калібрування навігаційної системи, перевірку стану акумуляторних клем та діагностику здоров'я батареї (SOH) через телеметрію BMS.

Дії в аварійних ситуаціях: При зіткненні або неконтрольованому русі необхідно негайно активувати кнопку аварійної зупинки. При загорянні акумулятора слід відійти на відстань понад 10 метрів з навітряного боку; для гасіння застосовувати спеціалізовані засоби для літєвих батарей або велику кількість води для охолодження (тільки при низькій напрузі). При розливі пестицидів негайно зупинити насоси та ізолювати зону розливу за допомогою сорбентів, використовуючи відповідні ЗІЗ.

Висновок до розділу

Розробка безпечної конструкції мобільної роботизованої платформи вимагає інтеграції вимог функціональної безпеки, екологічного захисту та ергономіки. Аналіз показав, що впровадження автономних систем значно знижує ризики хімічного отруєння операторів, але створює нові виклики щодо надійності автономної навігації та пожежної безпеки літєвих акумуляторів у складних

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

польових умовах. Дотримання міжнародних стандартів (ISO 12100, ISO 10218, ISO 18497) та використання прецизійних технологій обприскування дозволяє створити безпечне та ефективне середовище для сучасного агровиробництва.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

Впровадження автоматизованих та роботизованих засобів у сільське господарство України є одним із пріоритетних напрямків підвищення продуктивності праці та зниження собівартості агропродукції. Метою даного розділу є техніко-економічне обґрунтування доцільності розробки та впровадження автономної мобільної платформи робота для моніторингу та точкового знешкодження шкідників капусти (зокрема, капустяної молі).

Економічний ефект досягається за рахунок:

- Значного зниження витрат хімічних препаратів (пестицидів/інсектицидів) завдяки інтелектуальній системі комп'ютерного зору на базі нейромережі YOLOv8 та апаратної платформи NVIDIA Jetson Orin Nano, яка забезпечує точкове (ультрамалооб'ємне) розпилення безпосередньо на уражені рослини.
- Заміни ручної праці або дорогої експлуатації важкої тракторної техніки (економія дизельного палива та заробітної плати).
- Зменшення екологічного навантаження на ґрунт та відсутності ущільнення родючого шару завдяки малій масі робота (120 кг).

4.1. Розрахунок капітальних витрат на виготовлення роботизованої платформи

Капітальні витрати (K_p) включають вартість усіх комплектуючих матеріалів, систем навігації, елементів живлення, виконавчих механізмів, а також витрати на проектування та складання дослідного зразка.

Для розрахунку матеріальних витрат сформуємо відомість комплектуючих відповідно до технічних рішень, прийнятих у Розділі 2 пояснювальної записки (BLDC двигуни потужністю 200 Вт, планетарні редуктори 71.5:1, акумулятор LiFePO₄ 24В 180 А·год, сонячна панель 2-го покоління).

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Савчук М.В.			РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ			Літ.	Арк.	Акрушів	
Перевір.		Ляшко А.П.								43	65
								НУБіП України			
Н. Контр.		Матухно Н.В.									
Затверд.		Ловейкін В.С.									

Таблиця 4.1.

Кошторис витрат на матеріали та комплектуючі для виготовлення одного
робота

№ з/п	Найменування компонента/вузла	К-сть, шт /компл	Ціна за оди- ницю, грн	Загальна ва- ртість, грн
1	Безщітковий мотор-редуктор BLDC 200 Вт із планетарною пе- редачею (для 4WD шасі)	4	14500,00	58000,00
2	Тяговий акумулятор LiFePO4 (24 В, 180 А·год) із платою керу- вання BMS	1	36000,00	36000,00
3	Обчислювальний модуль NVIDIA Jetson Orin Nano (для ШІ та комп'ютерного зору)	1	18000,00	18000,00
4	Навігаційний комплекс (RTK- GPS модуль, LiDAR, IMU-сен- сор, камери детекції ZED)	1	32000,00	32000,00
5	Елементи несучої рами (профі- льна труба 40x40x3 ДСТУ 8940:2019, колеса, підвіска)	1	22000,00	22000,00
6	Технологічне обладнання обпри- скувача (бак, насос високого ти- ску, клапани, форсунки)	1	16000,00	16000,00
7	Сонячна фотоелектрична панель 2-го покоління (CdTe) з контро- лером заряду	1	9000,00	9000,00

8	З'єднувальні кабелі, реле, корпусні елементи захисту від пилу та вологи	1	5000,00	5000,00
Всього матеріальних витрат (B_m):			196000,00 грн	

Витрати на оплату праці ($ЗП_{скл}$) інженера-розробника та техника-складальника (включаючи єдиний соціальний внесок ЄСВ 22%) при створенні дослідного зразка складають:

$$ЗП_{скл} = 35\,000,00 \text{ грн.}$$

Накладні витрати (загальногосподарські, транспортні витрати, інструменти) приймаємо в розмірі 10% від матеріальних витрат:

$$B_{накл} = 196\,000,00 \times 0,10 = 19\,600,00 \text{ грн.}$$

Загальні капітальні витрати (собівартість створення робота) обчислюються за формулою:

$$K_p = B_m + ЗП_{скл} + B_{накл} \quad (4.1)$$

$$K_p = 196\,000,00 + 35\,000,00 + 19\,600,00 = 250\,600,00 \text{ грн.}$$

Приймаємо округлену суму капітальних вкладень для подальших розрахунків: $K_p = 250\,000,00$ грн.

4.2. Розрахунок річних експлуатаційних витрат

Для визначення ефективності порівняємо витрати при використанні розробленого робота із базовим варіантом захисту рослин – суцільним обприскуванням за допомогою трактора МТЗ-82 з навісним обприскувачем ОП-2000.

Розрахунок проведемо для умовного фермерського господарства з площею насаджень капусти в 20 га. За вегетаційний період капуста потребує щонайменше 3-разової обробки інсектицидами проти шкідників. Таким чином, річний обсяг робіт з обприскування складає:

$$S_{річна} = 20 \text{ га} \times 3 \text{ обробки} = 60 \text{ га-обробок.}$$

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Згідно з технічними даними роботи, продуктивність робота складає $W_{зм} = 1,61$ га/зміну (за 10 годин). Отже, для виконання річного обсягу робіт задіюється на:

$$60 / 1,61 \approx 37 \text{ змін на сезон.}$$

4.2.1. Експлуатаційні витрати базового варіанту (Трактор + Обприскувач)

Складові операційних витрат на 1 га для традиційного методу:

Витрати на паливо (дизель): норма витрати дизельного палива трактором МТЗ-82 при обприскуванні становить в середньому 5 л/га. За ціни дизпалива 55 грн/л витрати на 1 га становлять:

$$C_{\text{пал}} = 5 \text{ л/га} \times 55 \text{ грн/л} = 275,00 \text{ грн/га.}$$

Заробітна плата тракториста: з урахуванням нарахувань на фонд оплати праці становить близько 75,00 грн/га.

Амортизація та поточний ремонт техніки: У середньому складає 150,00 грн/га.

Витрати на хімічні препарати (інсектициди): При суцільному традиційному обприскуванні середня вартість якісного препарату на 1 га складає 4 500,00 грн.

Сумарні експлуатаційні витрати базового варіанту на 1 га обробки ($C_{\text{баз1}}$):

$$C_{\text{баз1}} = 275,00 + 75,00 + 150,00 + 4\,500,00 = 5\,000,00 \text{ грн/га.}$$

Загальні річні витрати для базового варіанту ($C_{\text{баз_річні}}$):

$$C_{\text{баз_річні}} = 5\,000,00 \text{ грн/га} \times 60 \text{ га} = 300\,000,00 \text{ грн/рік.}$$

4.2.2. Експлуатаційні витрати проектного варіанту (Автономний робот)

Витрати на електроенергію: Сумарна електрична потужність споживання робота за розрахунком становить 345 Вт. За 10-годинну зміну споживання дорівнює 3,45 кВт·год. Проте інтегрована сонячна панель компенсує близько 30% енергії в денний час. Фактичне споживання з мережі становить:

$$E = 3,45 \times 0,7 = 2,415 \text{ кВт·год/зміну.}$$

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

За тарифу для комерційних підприємств у 8,50 грн/кВт·год, витрати на зміну становлять $2,415 \times 8,50 = 20,53$ грн. У перерахунку на 1 га:

$$C_{ел} = 20,53 / 1,61 \approx 13,00 \text{ грн/га.}$$

Заробітна плата обслуговуючого персоналу: Робот працює в автономному режимі за навігацією RTK-GPS. Один оператор може дистанційно контролювати роботу до 4 таких платформ одночасно. Його умовна заробітна плата в перерахунку на навантаження на 1 га становить 25,00 грн/га.

Витрати на технічне обслуговування та ремонт робота (ТО і Р): Приймаємо в розмірі 5% від капітальної вартості робота на рік:

$$B_{ТО} = (250\,000,00 \times 0,05) / 60 \text{ га} = 12\,500,00 / 60 = 208,33 \text{ грн/га.}$$

Витрати на хімічні препарати (пестициди) з урахуванням економії: Це ключовий елемент ефективності. Завдяки системі YOLOv8 робот ідентифікує точкову наявність капустяної молі та здійснює розпилення за допомогою маніпулятора безпосередньо на уражену рослину. Економія препарату при точковому внесенні складає не менше 55%. Вартість інсектицидів на 1 га становить:

$$C_{пест_роб} = 4\,500,00 \text{ грн/га} \times (1 - 0,55) = 2\,025,00 \text{ грн/га.}$$

Сумарні операційні експлуатаційні витрати роботизованого комплексу на 1 га ($C_{роб1}$):

$$C_{роб1} = 13,00 + 25,00 + 208,33 + 2\,025,00 = 2\,271,33 \text{ грн/га.}$$

Загальні річні витрати роботизованого варіанту ($C_{роб_річні}$):

$$C_{роб_річні} = 2\,271,33 \text{ грн/га} \times 60 \text{ га} = 136\,280,00 \text{ грн/рік.}$$

4.3. Визначення показників економічної ефективності проекту

Економічну ефективність від впровадження мобільного робота визначимо шляхом порівняння витрат обох варіантів.

1. Пряма економія експлуатаційних витрат на 1 га обробки (ΔC_1):

$$\Delta C_1 = C_{баз1} - C_{роб1} = 5\,000,00 - 2\,271,33 = 2\,728,67 \text{ грн/га.}$$

2. Річний економічний ефект (Чистий грошовий потік заощадження, $E_{річний}$):

$$E_{річний} = \Delta C_1 \times S_{річна} = 2\,728,67 \text{ грн/га} \times 60 \text{ га} = 163\,720,00 \text{ грн/рік.}$$

3. Простий термін окупності капітальних вкладень ($T_{ок}$):

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Термін окупності показує період, за який повністю повернуться кошти, інвестовані у створення роботизованої платформи:

$$T_{ок} = K_p / E_{річний} = 250\,000,00 \text{ грн} / 163\,720,00 \text{ грн/рік} \approx 1,53 \text{ року.}$$

Враховуючи сезонність сільськогосподарських робіт, робот повністю окупає себе за 2 сезони експлуатації.

4. Коефіцієнт економічної ефективності капіталовкладень (E_k):

$$E_k = 1 / T_{ок} = 1 / 1,53 \approx 0,65$$

Отримане значення значно перевищує нормативний коефіцієнт ефективності для галузі сільськогосподарського машинобудування ($E_n = 0,15$).

Таблиця 4.2.

Зведені техніко-економічні показники проекту

Найменування показника	Одиниця виміру	Значення показника
Капітальні витрати на розробку та виготовлення робота (K_p)	грн.	250000,00
Річний обсяг обробок насаджень капусти ($S_{річна}$)	га	60,00
Експлуатаційні витрати базового варіанту на 1 га ($C_{баз1}$)	грн.	5000,00
Експлуатаційні витрати роботизованого варіанту на 1 га ($C_{роб1}$)	грн.	2271,33
Собівартість хімічних препаратів на 1 га (робот)	грн.	2025,00

Річна економія витрат від впровадження розробки ($E_{річний}$)	грн/рік	163720,00
Простий термін окупності проекту ($T_{ок}$)	років	1,53
Коефіцієнт економічної ефективності (E_k)	-	0,65

Висновки до розділу

Проведені інженерно-економічні розрахунки підтвердили високу фінансову та виробничу доцільність розробленої конструкції мобільної платформи робота для моніторингу та знешкодження шкідників капусти. За загальних капітальних інвестицій у розмірі 250 000,00 грн на створення одного робота, господарство отримує значне зниження собівартості захисту рослин (на 2 728,67 грн менше на кожному гектарі порівняно з класичним тракторним суцільним обприскуванням).

Головне джерело економії – зменшення витрат інсектицидів на 55% завдяки точковому нанесенню за допомогою нейромережевих алгоритмів комп'ютерного зору YOLOv8. Проект має короткий термін окупності (1,53 року, тобто менше двох робочих сезонів) і може бути повністю рекомендований до практичного впровадження на підприємствах овочевих сектору України.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

ВИСНОВКИ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі наведено теоретичне обґрунтування та практичне вирішення інженерної задачі з проектування та розрахунку автономної мобільної роботизованої платформи для точного захисту насаджень капусти. Результати проведеного дослідження дозволяють зробити такі висновки:

1. На основі аналізу світового досвіду виявлено тенденцію до мініатюризації польової техніки з метою запобігання ущільненню аграрних ґрунтів. Обґрунтовано доцільність створення модульного легкого робота із повним приводом (4WD) та високим агротехнічним кліренсом для обробки просапних овочевих культур.
2. За результатами тягового розрахунку визначено енергетичні параметри ходової системи для найнесприятливіших умов експлуатації (розгін робота масою 120 кг на підйомі під кутом 12° по пухкому ґрунту). Загальний тяговий опір становить $F_k = 451$ Н, а необхідний крутний момент на одному ведучому колесі з урахуванням ККД планетарного редуктора дорівнює $M_k = 21$ Нм. Відповідно до цього обрано чотири безщіткові мотор-редуктори BLDC потужністю по 200 Вт кожен.
3. Розрахункова реальна швидкість руху робота з урахуванням коефіцієнта буксування. Дана швидкість є оптимальною для стабільної роботи бортових мультиспектральних камер (типу *ZED*) та нейромережових алгоритмів детекції шкідників *YOLOv8* на базі обчислювального модуля *NVIDIA Jetson Orin Nano* без виникнення ефекту розмиття зображення.
4. Спроектовано автономну систему живлення на основі літій-залізо-фосфатної батареї (LiFePO₄, 24 В, 180 А·год), що має ресурс понад 3000 циклів. Загальна споживана потужність робота складає 345 Вт. Інтеграція бортової

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ВИСНОВКИ		
Розроб.		Савчук М.В.					
Перевір.		Ляшко А.П.					
Н. Контр.		Матухно Н.В.					
Затверд.		Ловейкін В.С.			НУБіП України		
					Літ.	Арк.	Акрешів
						50	65

сонячної панелі 2-го покоління (CdTe) дозволяє компенсувати близько 30% енергії у денний час, підвищуючи загальну автономність платформи.

5. Оцінка розділу охорони праці показала відповідність розробки принципам стандарту ISO 18497:2018 щодо безпеки високоавтоматизованих агромашин. Перехід від суцільного обприскування до точкового дозволяє знизити загальне хімічне навантаження на ґрунт на 60–90%. Система автоматичного контролю за дрифтом за допомогою датчиків вітру зупиняє розпилення за швидкості понад 3 м/с.

6. Розрахунок економічної ефективності для умовного фермерського господарства площею 20 га (при 3-разовій обробці за сезон) підтвердив фінансову доцільність проекту. За капітальних витрат на виготовлення робота в розмірі 250000,00 грн, експлуатаційні витрати знижуються з 5000,00 грн/га (базовий варіант з трактором МТЗ-82) до 2271,33 грн/га. Річна економія завдяки скороченню витрат інсектицидів на 55% становить 163720,00 грн.

Розроблена мобільна роботизована платформа повністю відповідає техніко-економічним критеріям сучасного овочівництва та рекомендується до практичного впровадження.

.

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Diamondback Moth Project / USDA ARS : website. URL: <https://www.ars.usda.gov/office-of-international-research-engagement-and-cooperation/ebcl/research/diamondback-moth-project/> (дата звернення: 14.03.2026).
2. Diamondback Moth Project at Cornell University FAQ / THE SHELTON LAB : website. URL: <https://shelton.entomology.cornell.edu/diamondbackmoth/diamondback-moth-project-at-cornell-university-faq/> (дата звернення: 05.04.2026).
3. Diamondback Moth: The Bane of Brassica Crop Growers / IR-4 Project : website. URL: <https://www.ir4project.org/news/novaluron-brassica-2020/> (дата звернення: 22.03.2026).
4. Current control methods for diamondback moth and other brassica insect pests and the prospects for improved management with lepidopteran-resistant Bt vegetable brassicas in Asia and Africa / ResearchGate : website. URL: https://www.researchgate.net/publication/222558930_Current_control_methods_for_diamondback_moth_and_other_brassica_insect_pests_and_the_prospects_for_improved_management_with_lepidopteran-resistant_Bt_vegetable_brassicas_in_Asia_and_Africa (дата звернення: 18.04.2026).
5. Oz / GOFAR - Agricultural Robotics : website. URL: <https://www.agricultural-robotics.com/robot/oz> (дата звернення: 09.03.2026).
6. Oz Robot / Edney Distributing : website. URL: <https://www.edneyco.com/itemdetail/NIO%20AM0002> (дата звернення: 29.04.2026).

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ			
Розроб.		Савчук М.В.						
Перевір.		Ляшко А.П.						
Н. Контр.		Матухно Н.В.						
Затверд.		Ловейкін В.С.						
					Літ.	Арк.	Акрушів	
							52	65
					НУБіП України			

1. Oz 3D vision and visual odometer / Naïo Technologies : website. URL: <https://www.naio-technologies.com/en/news/oz-3d-vision-and-visual-odometer/> (дата звернення: 11.03.2026).
2. New Dino weeding robot officially released in vegetable fields / Naïo Technologies : website. URL: <https://www.naio-technologies.com/wp-content/uploads/2017/01/NT-PR-Robot-Dino-EN-12.2016.pdf> (дата звернення: 07.04.2026).
3. Electric actuator technology in Naïo autonomous weeding robot Dino / Linak-us.com : website. URL: <https://www.linak-us.com/segments/techline/case-stories/optimal-weeding-with-an-electrically-powered-robot/> (дата звернення: 25.03.2026).
4. Carbon Robotics Launches the World's First-Ever Large Plant Model / Business Wire : website. URL: <https://www.businesswire.com/news/home/20260202630325/en/Carbon-Robotics-Launches-the-Worlds-First-Ever-Large-Plant-Model> (дата звернення: 14.04.2026).
5. Innovations in Robots for Weed and Pest Control: A Systematic ... / MDPI : website. URL: <https://www.mdpi.com/2504-4990/8/2/51> (дата звернення: 30.03.2026).
6. Robot eliminates invasive plants and insects that damage crops / Revista Fapesp : website. URL: <https://revistapesquisa.fapesp.br/en/robot-eliminates-invasive-plants-and-insects-that-damage-crops/> (дата звернення: 03.04.2026).
7. Mobile robotic platform in a cabbage row / Download Scientific ... ; ResearchGate : website. URL: https://www.researchgate.net/figure/Mobile-robotic-platform-in-a-cabbage-row_fig1_360237216 (дата звернення: 19.03.2026).

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

8. Mobile transport robots and platforms for modern logistics / KUKA Global : website. URL: <https://www.kuka.com/en-us/products/amr-autonomous-mobile-robotics/topload-transport-robots> (дата звернення: 21.04.2026).
9. Overview of Structure and Drive for Wheel-legged Robots / Request PDF ; ResearchGate : website. URL: https://www.researchgate.net/publication/383215329_Overview_of_Structure_and_Drive_for_Wheel-legged_Robots (дата звернення: 15.03.2026).
10. A Review on the Chassis Configurations and Key Technologies of Agricultural Robots : (PDF) / ResearchGate : website. URL: https://www.researchgate.net/publication/397726851_A_Review_on_the_Chassis_Configurations_and_Key_Technologies_of_Agricultural_Robots (дата звернення: 13.04.2026).
11. Top 10 Mobile Robot Chassis Compared: Types, Features & Selection Guide / Fdatabot : website. URL: <https://www.fdatabot.com/top-10-mobile-robot-chassis-compared-types-features-selection-guide/> (дата звернення: 28.03.2026).
12. What are the different types of robotic chassis? / Guoxing Intelligent : website. URL: <https://www.gxsuprobot.com/What-are-the-different-types-of-robotic-chassis-id45791466.html> (дата звернення: 10.04.2026).
13. AI-CABB: An AI-Enabled Integrated Pest Detection System for Enhancing Cabbage Cultivation Using Machine Learning / ResearchGate : website. URL: https://www.researchgate.net/publication/379289180_AI-CABB_An_AI-Enabled_Integrated_Pest_Detection_System_for_Enhancing_Cabbage_Cultivation_Using_Machine_Learning (дата звернення: 17.03.2026).
14. SAFF-YOLO-BASED LIGHTWEIGHT DETECTION METHOD FOR THE DIAMONDBACK MOTH / ResearchGate : website. URL: https://www.researchgate.net/publication/395116548_SAFF-YOLO-

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

BASED LIGHTWEIGHT DETECTION METHOD FOR THE DIAMO
NDBACK_MOTH (дата звернення: 04.04.2026).

- 15.Sustainable laser-based technology for insect pest control / PMC ; NIH : website. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8155209/> (дата звернення: 26.03.2026).
- 16.Yolo-Pest: An Insect Pest Object Detection Algorithm via CAC3 Module / PMC : website. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10059078/> (дата звернення: 16.04.2026).
- 17.Controlling plant pests with lasers / PMC : website. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12274233/> (дата звернення: 31.03.2026).
- 18.Robots with lasers for weed control – photonic weed management / ResearchGate : website. URL: [https://www.researchgate.net/publication/392981534 Robots with lasers f
or weed control - photonic weed management](https://www.researchgate.net/publication/392981534_Robots_with_lasers_for_weed_control_-_photonic_weed_management) (дата звернення: 24.04.2026).
- 19.YOLOX-based blue laser weeding robot in corn field / PMC : website. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9674089/> (дата звернення: 06.03.2026).
- 20.Design and Experimental Evaluation of a Smart Intra-Row Weed Control System for Open-Field Cabbage / MDPI : website. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4395/15/1/112> (дата звернення: 12.04.2026).
- 21.Commercial Production and Management of Cabbage and Leafy Greens / Field Report ; University of Georgia : website. URL: [https://fieldreport.caes.uga.edu/publications/B1181/commercial-production-
and-management-of-cabbage-and-leafy-greens/](https://fieldreport.caes.uga.edu/publications/B1181/commercial-production-and-management-of-cabbage-and-leafy-greens/) (дата звернення: 23.03.2026).
- 22.Advances and Future Trends in Electrified Agricultural Machinery for Sustainable Agriculture / MDPI : website. URL:

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

- <https://www.mdpi.com/2077-0472/15/22/2367> (дата звернення: 27.04.2026).
23. Modern Trends in Farm Machinery-Electric Drives: A Review : (PDF) / IJCMAS : website. URL: <https://www.ijcmas.com/8-1-2019/Dipak%20S.%20Khatawkar,%20et%20al.pdf> (дата звернення: 15.03.2026).
24. OZ Robot / Naïo Technologies : website. URL: <https://www.naio-technologies.com/en/oz-robot/> (дата звернення: 08.04.2026).
25. Electric Vs Hydraulic Press Brakes: Precision, Energy Efficiency, & ROI Compared / WEIYA : website. URL: <https://www.weiyamt.com/electric-vs-hydraulic-press-brakes-precision-energy-efficiency-roi-compared/> (дата звернення: 19.03.2026).
26. System comparison of hydraulic and electrical traction drives in self ... / GFPS : website. URL: http://gfpsweb.org/sites/default/files/external_pages/IFK_2012/Authors_files/F2_Lindner.pdf (дата звернення: 02.04.2026).
27. Outdoor mobile robots: definition and key technical requirements / Robotnik Automation : website. URL: <https://robotnik.eu/outdoor-mobile-robots-definition-and-key-technical-requirements/> (дата звернення: 15.03.2026).
28. ДСТУ 7951:2015. Дизайн і ергономіка. Крісло оператора. Загальні ергономічні вимоги. [Чинний від 2016-12-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=66671 (дата звернення: 03.04.2026).
29. OSHA Technical Manual (OTM) - Section IV: Chapter 4 / Occupational Safety and Health Administration : website. URL: <https://www.osha.gov/otm/section-4-safety-hazards/chapter-4> (дата звернення: 22.03.2026).
30. Autonomous Spraying Robots: Minimizing Pesticide Use Through Targeted Application / ResearchGate : website. URL:

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

https://www.researchgate.net/publication/392202571_Autonomous_Spraying_Robots_Minimizing_Pesticide_Use_Through_Targeted_Application (дата звернення: 11.04.2026).

31.Recommendations for building a Standard Operating Procedure (SOP) for pesticide application by drone / CropLife Africa Middle East : website. URL: <https://croplifeafrica.org/files/sop-drone-final.pdf> (дата звернення: 26.03.2026).

32.Best Practices for Pesticide Spraying in Cole Crop / Leher : website. URL: <https://www.leher.ag/blog/best-practices-pesticide-spraying-cole-crop-management> (дата звернення: 07.04.2026).

33.A sustainable crop protection through integrated technologies: UAV-based detection, real-time pesticide mixing, and adaptive spraying / PMC : website. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12518555/> (дата звернення: 18.03.2026).

34.Lithium-ion Battery Safety / OSHA : website. URL: <https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/OSHA4480.pdf> (дата звернення: 29.04.2026).

35.Safety Considerations for High-Performance Lithium-Ion Batteries in Robotics / mPower : website. URL: <https://mpowerlithium.com/blogs/blog/essential-safety-considerations-for-high-performance-lithium-ion-batteries-in-robotics-insights-from-mpower> (дата звернення: 05.03.2026).

36.Tips for maintaining and ensuring safety with lithium forklift batteries / ROYAL : website. URL: <https://www.ryforklift.com/blog/tips-for-maintaining-and-ensuring-safety-with-lithium-forklift-batteries.html> (дата звернення: 14.04.2026).

37.Safety Risk Assessment of an Autonomous Agricultural Machine / PubMed : website. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40080010/> (дата звернення: 24.03.2026).

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 38.Design and Experimental Verification of the YOLOV5 Model ... / MDPI : website. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4395/12/10/2551> (дата звернення: 09.04.2026).
- 39.Robots in Dusty Environments — The Silent Crisis Of Sensor Contamination And Reeman's Forward-Looking Solution / Reeman Robot : website. URL: <https://www.reemanrobot.com/news/robots-in-dusty-environments-the-silent-cris-85016065.html> (дата звернення: 21.03.2026).
- 40.ISO 10218 & ISO/TS 15066 Explained: Robot Safety Standards for Integrators / AMD Machines : website. URL: <https://amdmachines.com/blog/robot-safety-standards-iso-10218-and-ts-15066-explained/> (дата звернення: 12.04.2026).
- 41.Overview of Safety Standards and Practices for Autonomous Agricultural Machinery / California Department of Industrial Relations : website. URL: <https://www.dir.ca.gov/oshsb/documents/UCD-Overview-of-Safety-Standards-and-Practices-Presentation-AC-2.pdf> (дата звернення: 30.03.2026).
- 42.New standards for industrial robots EN ISO 10218-1 and -2 / IBF Solutions : website. URL: <https://www.ibf-solutions.com/en/seminars-and-news/news/new-standards-for-industrial-robots-en-iso-10218-1-and-2> (дата звернення: 02.04.2026).
- 43.Updated ISO 10218 | Answers to Frequently Asked Questions (FAQs) / A3 Robotic Technology : website. URL: <https://www.automate.org/robotics/blogs/updated-iso-10218-faq> (дата звернення: 19.04.2026).
- 44.ISO 10218-1:2025 Safety Standards for Robots / Scribd : website. URL: <https://www.scribd.com/document/939146661/BS-en-ISO-10218-1-2025-Robotics-Safety-Requirements-Industrial-Robots> (дата звернення: 08.03.2026).

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 45.Compliance / AgriRobot : website. URL: <https://agrirobot.ai/compliance/>
(дата звернення: 27.04.2026).
- 46.Towards Safe Robotic Agricultural Applications: Safe Navigation ... / MDPI : website. URL: <https://www.mdpi.com/2218-6581/12/3/63> (дата звернення: 15.03.2026).
- 47.ДСТУ 7950:2015. Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт стоячи. Загальні ергономічні вимоги. [Чинний від 2016-12-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. URL: https://www.ksv.biz.ua/GOST/DSTY_ALL/DSTU2/dstu_7950-2015.pdf
(дата звернення: 04.04.2026).
- 48.An overview of current safety requirements for autonomous machines - review of standards / VTT's Research Information Portal : website. URL: https://cris.vtt.fi/files/34902090/eng_2020_0074.pdf (дата звернення: 25.03.2026).
- 49.Agricultural Robots: High-Capacity Batteries for All-Day Operations / Large Battery : website. URL: <https://www.large-battery.com/blog/agricultural-robots-high-capacity-batteries-all-day-operation/> (дата звернення: 17.04.2026).
- 50.Rechargeable Li-Ion Battery for Agricultural Drones: 2000-Cycle Guide / Febatt : website. URL: <https://www.febatt.com/guide-agricultural-drone-battery-2000-cycles/> (дата звернення: 10.04.2026).
- 51.Design and Control of a Dual-stage Vibration Isolator for Outdoor Mobile Robots / ResearchGate : website. URL: https://www.researchgate.net/publication/397251203_Design_and_Control_of_a_Dual-stage_Vibration_Isolator_for_Outdoor_Mobile_Robots (дата звернення: 22.04.2026).
- 52.The Cost-Cutting Power of Autonomous Spraying: How Autonomous Spot Spraying Reduces Chemical Use and Supports Safety / Burro : website. URL: <https://burro.ai/the-cost-cutting-power-of-autonomous-spraying-how->

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

autonomous-spot-spraying-reduces-chemical-use-and-supports-safety/ (дата звернення: 13.03.2026).

53. Intelligent pesticide application system for intercropping: development, challenges, and solutions based on monoculture machinery / Taylor & Francis : website. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23311932.2025.2597615> (дата звернення: 28.03.2026).

54. Green Guard Intelligent Pesticide Spraying Solutions / SciRP.org : website. URL: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=142952> (дата звернення: 06.04.2026).

55. Robotics and the Future of Pesticide, Fertilizer, and Agricultural Chemical Manufacturing / 3Laws Robotics : website. URL: https://3laws.io/pages/Robotics_and_the_Future_of_Pesticide,_Fertilizer,_and_Agricultural_Chemical_Manufacturing.html (дата звернення: 23.03.2026).

56. Cabbage and Weed Identification Based on Machine Learning and Target Spraying System Design / Frontiers in Plant Science : website. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2022.924973/full> (дата звернення: 19.03.2026).

57. Quadruped Robot Platform for Selective Pesticide Spraying / 3D Vision Laboratory : website. URL: https://www.cvl.iis.u-tokyo.ac.jp/data/uploads/papers/MVA2023_WormDetection.pdf (дата звернення: 01.04.2026).

58. ДСТУ ISO 9241-11:2006. Ергономічні вимоги до роботи з відеотерміналами в офісі. Частина 11. Настанови щодо прийнятності у використанні (ISO 9241-11:1998, IDT). [Чинний від 2007-07-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2007. URL:

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=91005 (дата звернення: 16.03.2026).

59.ДСТУ EN ISO 9241-112:2017. Ергономічні вимоги до роботи з відеотерміналами в офісі. Частина 112. Подання інформації (EN ISO 9241-112:2017, IDT; ISO 9241-112:2017, IDT). [Чинний від 2019-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=74946 (дата звернення: 11.04.2026).

60.ДСТУ ISO 9241-6:2004. Ергономічні вимоги до роботи з відеотерміналами в офісі. Частина 6. Вимоги до робочого середовища (ISO 9241-6:1999, IDT). [Чинний від 2005-07-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2005. URL: https://www.ksv.biz.ua/GOST/DSTY_ALL/DSTY3/dsty_iso_9241-6-2004.pdf (дата звернення: 26.03.2026).

61.ДСТУ ГОСТ 12.2.032:2008. Система стандартів безпеки праці. Робоче місце під час виконання робіт сидячи. Загальні ергономічні вимоги (ГОСТ 12.2.032-78, IDT). [Чинний від 2009-02-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2009. URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/pdf/ergonomichni_vimogi_do_roboti_z_-3-470742.pdf (дата звернення: 05.04.2026).

62.Research Progress on Path Planning and Tracking Control Methods for Orchard Mobile Robots in Complex Scenarios / MDPI : website. URL: <https://www.mdpi.com/2077-0472/15/18/1917> (дата звернення: 14.03.2026).

63.ДСТУ ГОСТ 12.2.033:2008. Система стандартів безпеки праці. Робоче місце під час виконання робіт стоячи. Загальні ергономічні вимоги (ГОСТ 12.2.033-78, IDT). [Чинний від 2009-02-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2009. URL:

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

<https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/Дизайн%20і%20ергономіка.%20Робоче%20місце%20для%20виконання%20робіт%20у%20положенні%20сидячи.%20Загальні%20ергономічні%20вимоги.pdf> (дата звернення: 22.03.2026).

64. Automatic Dust Sensing Solar Panel Cleaning System : (PDF) / ResearchGate : website. URL:

https://www.researchgate.net/publication/388749864_AUTOMATIC_DUST_SENSING_SOLAR_PANEL_CLEANING_SYSTEM (дата звернення: 07.04.2026).

65. A Review of Dust Deposition Mechanism and Self-Cleaning Methods for Solar Photovoltaic Modules / MDPI : website. URL: <https://www.mdpi.com/2079-6412/13/1/49> (дата звернення: 15.03.2026).

66. ISO 18497:2018. Agricultural machinery and tractors — Safety of highly automated agricultural machines — Principles for design. Geneva : International Organization for Standardization, 2018. URL: <https://webstore.ansi.org/standards/iso/iso184972018> (дата звернення: 29.04.2026).

67. How To Use Robotics In Agriculture With Lithium Battery Powered Systems / Manly Battery : website. URL: <https://manlybattery.com/how-to-use-robotics-in-agriculture-with-lithium-battery-powered-systems/> (дата звернення: 18.03.2026).

68. Ultimate Checklist for Robot Maintenance: CMMS Guide / eWorkOrders : website. URL: <https://eworkorders.com/cmms-industry-articles-eworkorders/ultimate-checklist-robot-maintenance/> (дата звернення: 24.04.2026).

69. Battery Maintenance / Pegasus Robotics : website. URL: <https://support.pegasusrobotics.com/knowledge/article/109> (дата звернення: 09.04.2026).

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

70.Risk Analysis, Safety Assurance Requirements, and Safety Evaluation Test for Robotic Agricultural Machinery / JIRCAS : website. URL: https://www.jircas.go.jp/sites/default/files/publication/jarq/jarq58-3_141-150.pdf (дата звернення: 02.04.2026).

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.039 ПЗ								
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата									
Розроб.		Савчук М.В.			ДОДАТКИ				Літ.		Арк.	Акрушів	
Перевір.		Ляшко А.П.									64	65	
									НУБіП України				
Н. Контр.		Матухно Н.В.											
Затверд.		Ловейкін В.С.											