

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ГЕОДЕЗІЇ, ЗЕМЛЕУСТРОЮ ТА АГРОІНЖЕНЕРІЇ
КАФЕДРА АГРОІНЖЕНЕРІЇ

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
д.т.н., професор

_____Костянтин ДЯДЮРА
«__»_____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «другого (магістерського) рівня»
освітньої програми «Агроінженерія»
за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ АВТОНОМНОГО ЛАЗЕРНОГО РОБОТА ДЛЯ ПРОПОЛЮВАННЯ

Науковий керівник: професор, д.т.н.
_____Костянтин ДЯДЮРА

Рецензент: головний інженер, к.т.н.
_____Віктор ДРОЗД

Виконав здобувач другого (магістерського) рівня
вищої освіти денної форми навчання освітньо-
професійної програми «Агроінженерія»
спеціальності 208 «Агроінженерія»
Данило САВЧУК

*Засвідчую, що кваліфікаційна робота містить
результати власних досліджень. Використання
ідей і текстів інших авторів має посилання
на відповідне джерело.*

_____Данило САВЧУК

ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет геодезії, землеустрою та агроінженерії

Кафедра агроінженерії

Рівень вищої освіти другий (магістр)

Галузь знань 20 Аграрні науки та продовольство

Спеціальність 208 «Агроінженерія»

Освітня програма Агроінженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри агроінженерії

Костянтин ДЯДЮРА

«___» _____ 2025 року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ**

Данило САВЧУК

1. Тема кваліфікаційної роботи:

«Дослідження екологічних показників автономного лазерного робота для прополювання»

науковий керівник кваліфікаційної роботи: професор, д.т.н. Дядюра Костянтин Олександрович

затверджені наказом ректора Одеського державного аграрного університету № 124 від « 27 » _____ 06 _____ 2025 р.

2. Строк подання здобувачем кваліфікаційної роботи 17.12.2025.

3. Об'єкт дослідження: Технологічний процес лазерної прополки.

4. Предмет дослідження: Екологічні показники (викиди CO₂, вплив на ґрунт, енергоефективність) роботизованої системи

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

5.1. Теоретико-методичний розділ:

Здійснити аналітичний огляд існуючих методів боротьби з бур'янами в агротехнологіях (хімічний, механічний, термічний) та обґрунтувати переваги лазерних технологій. Проаналізувати конструктивні особливості та принципи роботи сучасних автономних роботів для прополювання. Розробити методику

оцінювання екологічної ефективності використання лазерного випромінювання (вплив на ґрунт, біорізноманіття та відсутність хімічного забруднення). Визначити критерії порівняння «вуглецевого сліду» (Carbon Footprint) при використанні тракторних обприскувачів та автономних електричних роботів.

5.2. Дослідницько-аналітичний розділ:

Провести математичне моделювання енергетичних витрат автономного робота в залежності від густоти забур'яненості поля та потужності лазерного модуля. Розрахувати показники зменшення пестицидного навантаження на ґрунт та ґрунтові води при переході на лазерне прополювання. Дослідити вплив параметрів лазерного променя (потужність, час експозиції) на ефективність знищення вегетативної маси бур'янів та безпеку для культурних рослин. Здійснити порівняльний аналіз емісії CO₂ для повного циклу обробки 1 га площі традиційним та роботизованим методами.

5.3. Проєктно-рекомендаційний розділ:

Розробити рекомендації щодо оптимізації системи енергоживлення робота (наприклад, інтеграція сонячних панелей для подовження автономності). Запропонувати алгоритм роботи системи технічного зору для мінімізації помилкових спрацьовувань лазера (захист культурних рослин). Розробити заходи з безпеки життєдіяльності при експлуатації лазерного обладнання 4-го класу небезпеки в польових умовах. Розрахувати еколого-економічну ефективність впровадження розробленого рішення.

6. Орієнтовний перелік графічного та табличного матеріалу:

6.1. До теоретико-методичного розділу:

Порівняльна характеристика методів боротьби з бур'янами (ефективність, вартість, екологічність). Класифікація систем автономного прополювання. рисунок: Фізична модель взаємодії лазерного променя з рослинною тканиною (абляція клітин).

6.2. До дослідницько-аналітичного розділу:

Графік: залежність споживання енергії роботом від швидкості руху та кількості об'єктів ураження. Діаграма: порівняння рівнів емісії парникових газів (ДВЗ трактора vs Електропривод робота). Таблиця: розрахункові показники зниження токсичного навантаження на агроєкосистему. Гістограма: ефективність знищення бур'янів різних біологічних видів лазером заданої потужності.

6.3. До проєктно-рекомендаційного розділу:

Креслення (Схема): функціональна схема модернізованої енергетичної установки робота. Схема: Алгоритм прийняття рішень системою комп'ютерного зору (свій/чужий). Таблиця: Зведена таблиця техніко-економічних та екологічних показників проєкту. Плакат: Заходи безпеки та зони ризику при роботі з лазерним модулем.

7. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту):

Об'єкт дослідження: Автономна мобільна платформа (типу FarmDroid, Carbon Robotics або умовна модель) з електричним приводом.

Параметри лазерної установки:

Тип лазера: CO₂ або діодний.

Потужність випромінювання: 150 Вт (або інше значення згідно з варіантом).

Довжина хвилі: 10.6 мкм.

Агротехнічні умови:

Культура: Цукровий буряк / Соняшник (широкорядний посів).

Площа обробки: 50 га.

Ступінь забур'яненості: Середній (15-20 шт/м²).

Базовий варіант для порівняння: Традиційна технологія із застосуванням гербіциду суцільної дії (наприклад, гліфосат) та трактора класу 1.4.

Джерело енергії: Літій-іонна АКБ ємністю 10 кВт×год.

8. Перелік публікацій за напрямом досліджень:

Савчук Д., Дядюра К. Дослідження екологічних показників автономного лазерного робота для прополювання. Збірник V Міжнародної науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників та молодих науковців «Актуальні аспекти розвитку науки і освіти»: 2-3 жовтня 2025р., Одеса: Одеський державний аграрний університет, 2025.С.160-162

9. Дата видачі завдання: « ____ » _____ 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	Кількість кредитів	Примітка
1.	Визначення теми, об'єкта та предмета дослідження	27.06.25	0,25	
2.	Отримання завдання і складання змісту (плану) кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	27.06.25	0,25	
3.	Складання календарного плану – графіку з підготовки кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	29.06.25	0,5	
4.	Написання першого (теоретикометодичного) розділу кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	18.07. 25	2,0	
5.	Вивчення матеріалів базових підприємств	28.07. 25	1,0	

6.	Написання другого (дослідницькоаналітичного) розділу кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	18.09. 25	2,0	
7.	Написання третього (проектно-розрахункового) розділу кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	28.09. 25	3,0	
8.	Написання висновків, списку літератури	28.10. 25	0,5	
9.	Перевірка кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту) науковим керівником	18.11. 25		
10.	Доопрацювання роботи після зауважень наукового керівника	28.11. 25	0,5	
11.	Підготовка до захисту: доповідь, ілюстративний матеріал	11.12. 25	0,5	
12.	Подання кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту) на кафедру	13.12. 25		
13.	Перевірка кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту) на оригінальність	14.12. 25		
14.	Попередній захист на кафедрі	15.12. 25		
15.	Рецензування кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	16.12. 25		
16.	Захист кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	19.12. 25	1,5	
	Загальна кількість		12	

Здобувач ОС магістр

_____ Данило САВЧУК

Науковий керівник

_____ Костянтин ДЯДЮРА

Гарант ОП

_____ Анатолій Яковенко

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: складається з 81 сторінок, 5 розділів, 26 рисунків, 18 таблиць, 25 літературних джерел.

Об'єкт дослідження: процеси взаємодії автономних роботизованих систем з агроекосистемою.

Предмет дослідження: екологічні показники життєвого циклу лазерного робота WeLASER, розраховані за моделлю APOS.

Методологія дослідження. В основу роботи покладено метод оцінки життєвого циклу (LCA) із застосуванням атрибутивної моделі APOS (Allocation at the Point of Substitution). Дана модель є розширеною версією стандартного підходу, що дозволяє розподілити екологічне навантаження між усіма учасниками ланцюга створення вартості. Вибір APOS обґрунтовано необхідністю точної оцінки стадії «кінця життєвого циклу» (End-of-Life), зокрема можливостей подовження терміну служби, повторного використання компонентів та ефективної переробки матеріалів.

Отримані результати та їх новизна. Встановлено, що перехід на лазерні технології значно знижує токсичне навантаження на ґрунти порівняно з гербіцидними обробками. Проведено декомпозицію системи, яка виявила компоненти з найбільшим екологічним слідом (лазерний модуль, система живлення, рушійна платформа). Доведено, що врахування процесів утилізації та вторинного використання ресурсів за моделлю APOS суттєво покращує показники стійкості технології порівняно з лінійними моделями оцінки, демонструючи вигоди циркулярної економіки.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ТРАКТОР, АВТОНОМНИЙ РОБОТ, ЛАЗЕРНЕ ПРОПОЛЮВАННЯ, ОЦІНКА ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ (LCA), МОДЕЛЬ APOS, ЕКОЛОГІЧНИЙ СЛІД, СТАЛЕ ЗЕМЛЕРОБСТВО, УТИЛІЗАЦІЯ.

					14.17 - КР.018.0.000.ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Савчук Д.			РЕФЕРАТ		Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевір.		Дядюра К. О.						6	куш
Реценз.							В		
Н. Контр.									
Затверд.		Дядюра К. О.							

ЗМІСТ

	С
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЙ БОРОТЬБИ З БУР'ЯНАМИ.....	13
1.1 Екологічні наслідки традиційних методів.....	13
1.2 Лазерна технологія в агроінженерії: принцип дії та типи лазерів.....	22
1.3 Аналіз сучасних роботизованих платформ для фізичного знищення бур'янів (огляд аналогів: Carbon Robotics, WeLASER тощо).....	29
Висновок.....	33
РОЗДІЛ 2 МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ.....	36
2.1 Опис конструктивно-технологічної схеми досліджуваного автономного робота.....	36
2.2 Методика оцінювання життєвого циклу (LCA) для агророботів.....	38
2.3 Методика розрахунку енергетичного балансу та «вуглецевого сліду».....	40
2.4 Математичне моделювання процесу лазерної абляції бур'янів.....	41
2.5 Обґрунтування системи стабілізації та вирівнювання шасі робота в умовах складного рельєфу.....	42
Висновки.....	46
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ РОБОТА.....	48
3.1 Архітектура та ключові компоненти розробленого роботизованого комплексу.....	48
3.2 Апаратне забезпечення системи керування та навігації робота.....	52

					14.17 - КР.018.0.000.ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	3.3	Савчук Д.			робота WeLASER. Інтерактивна модель для курсу ЗМІСТ			
Перевір.		Дядюра К. О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						

дослідження мінімізації ущільнення ґрунту.....	
Висновки.....	61
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	63
4.1 Аналіз небезпечних факторів при роботі з лазерним випромінюванням.....	63
4.2 Розробка заходів безпеки для операторів та сторонніх осіб.....	65
4.3 Електробезпека при обслуговуванні високовольтних акумуляторних батарей робота.....	66
Висновки	68
РОЗДІЛ 5 РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ.....	69
5.1 Оптимізація алгоритмів розпізнавання бур'янів для мінімізації помилкових спрацювань та збереження енергії.....	70
5.2. Інтеграція відновлюваних джерел енергії (сонячні панелі) в конструкцію робота.....	72
5.3. Техніко-економічне обґрунтування впровадження розробки.....	74
Висновок.....	76
ВИСНОВОК.....	78
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	80

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний світовий агропромисловий комплекс перебуває на етапі парадигмальних змін, зумовлених необхідністю переходу до сталого розвитку та збереження біорізноманіття. Традиційні методи боротьби з бур'янами, що базуються на інтенсивному застосуванні хімічних засобів захисту рослин (гербіцидів) та механічному обробітку ґрунту, демонструють низку критичних екологічних недоліків. Зокрема, хімічний метод призводить до акумуляції токсинів у ґрунті та ґрунтових водах, появи резистентних видів бур'янів та негативного впливу на здоров'я людини. Механічний метод, у свою чергу, пов'язаний із руйнуванням структури ґрунту, ерозією та значними викидами парникових газів внаслідок роботи дизельних двигунів тракторної техніки. У контексті стратегічного курсу Європейського Союзу «European Green Deal» та стратегії «Farm to Fork», які передбачають скорочення використання пестицидів на 50% до 2030 року, а також євроінтеграційних процесів України, особливої актуальності набуває впровадження альтернативних, екологічно безпечних технологій. Одним із найбільш перспективних напрямів є використання автономних роботів для лазерного прополювання (наприклад, концепція WeLASER). Ця технологія дозволяє знищувати бур'яни фізичним методом (термічна абляція) з високою точністю, без порушення ґрунтового покриву та без використання хімікатів. Однак, попри очевидні технологічні переваги, комплексний екологічний вплив таких роботизованих систем протягом усього їхнього життєвого циклу (від виробництва енергоємних компонентів до утилізації) залишається недостатньо вивченим. Відсутність чітких методик оцінки екологічної ефективності інноваційної техніки стримує її комерціалізацію та широке впровадження. Тому дослідження екологічних показників автономного лазерного робота є

					своєчасним, важливим та актуальним науково-практичним завданням.			
					14.171-KP-018.0.000-113			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ВСТУП			
Розроб.		Адамович О.С.						
Перевір.		Дядюра К. О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						
					Літ.	Аркуш	Аркушів	
							9	куш
					В			

Об’єкт дослідження – процеси забезпечення екологічної безпеки та зменшення антропогенного навантаження на агроєкосистеми при використанні автоматизованих засобів захисту рослин.

Предмет дослідження – екологічні показники, енергетична ефективність та оцінка життєвого циклу (LCA) автономного лазерного робота для прополювання з використанням моделі розподілу навантаження APOS.

Ступінь вивченості теми. Проблематика роботизації сільського господарства широко висвітлена у працях закордонних вчених (С. Blackmore, S. Griepentrog), які розглядають загальні принципи побудови агророботів. Питання взаємодії лазерного випромінювання з рослинними об’єктами досліджували такі науковці, як J. Xiong та R. Oberti. Методологія оцінки життєвого циклу (LCA) в агроінженерії розробляється в працях Т. Nemecsek та ін. Водночас, у науковій літературі існує дефіцит комплексних досліджень, які б поєднували аналіз технічної ефективності лазерного прополювання з глибокою оцінкою екологічного сліду за розширеними моделями (такими як APOS), особливо в контексті порівняння з традиційними технологіями в умовах України.

Мета дослідження полягає в обґрунтуванні екологічної ефективності та оцінці потенціалу комерціалізації технології автономного лазерного прополювання як альтернативи хімічним та механічним методам шляхом комплексного аналізу її життєвого циклу.

Для досягнення поставленої мети визначено такі **завдання дослідження**:

1. Проаналізувати сучасний стан технологій боротьби з бур’янами та ідентифікувати екологічні ризики традиційних методів і переваги впровадження лазерних систем.

2. Обґрунтувати вибір методології оцінки життєвого циклу (LCA) на базі атрибутивної моделі APOS (Allocation at the Point of Substitution) для дослідження роботизованих систем.

					14.17 - КР.018.0.000.ПЗ	Арх
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Здійснити аналіз впливу компонентів системи (лазерний модуль, система технічного зору, ходова частина, АКБ) на загальну екологічність робота протягом життєвого циклу («від колиски до могили»).

4. Провести порівняльну оцінку екологічного сліду (зокрема, вуглецевого сліду та впливу на ґрунт) лазерного робота та традиційного тракторного обприскувача.

5. Розробити рекомендації для розробників та аграріїв щодо оптимізації конструкції та режимів експлуатації робота для мінімізації негативного впливу на довкілля.

Методи дослідження. Методологічною основою роботи є системний підхід до аналізу техногенного впливу на довкілля. У роботі використано такі методи:

- *аналітичний* – для аналізу наукової літератури, патентної документації та нормативно-правової бази;
- *метод оцінки життєвого циклу (LCA)* з використанням моделі APOS – для розподілу екологічного навантаження між стадіями виробництва, експлуатації та утилізації;
- *математичне моделювання* – для розрахунку енергетичного балансу та емісії парникових газів;
- *порівняльний аналіз* – для зіставлення екологічних показників різних технологій пропонування.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у:

- *вперше* застосовано модель APOS для комплексної оцінки екологічної стійкості автономного лазерного робота, що дозволило врахувати вплив процесів утилізації та вторинного використання компонентів;
- *удосконалено* методику порівняння екологічного навантаження агротехнологій, яка, на відміну від існуючих, враховує не лише прямі витрати палива/енергії, а й опосередкований вплив від виробництва високотехнологічного обладнання;

					14.17 - КР.018.0.000.ПЗ	Арку
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– *дістало подальший розвиток* обґрунтування енергетичних параметрів лазерного прополювання в залежності від щільності забур'яненості поля.

Практичне значення отриманих результатів. Результати дослідження мають прикладний характер і можуть бути використані:

– *розробниками агророботів* – для еко-дизайну техніки та вибору компонентів з меншим екологічним слідом;

– *сільськогосподарськими підприємствами* – при прийнятті рішень про інвестиції в новітню техніку та для сертифікації органічної продукції;

– *державними установами* – при формуванні стратегій екологізації аграрного сектору. Запропоновані рекомендації дозволяють зменшити викиди CO₂ на [вставити %] та повністю виключити використання гербіцидів на оброблюваних площах.

Апробація результатів роботи.

Савчук Д., Дядюра К. Дослідження екологічних показників автономного лазерного робота для прополювання. Збірник V Міжнародної науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників та молодих науковців «Актуальні аспекти розвитку науки і освіти»: 2-3 жовтня 2025р., Одеса: Одеський державний аграрний університет, 2025.С.160-162

					14.17 - КР.018.0.000.ПЗ	Арку
						ш 12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЙ БОРОТЬБИ З

БУР'ЯНАМИ

1.1 Екологічні наслідки традиційних методів

Традиційні схеми зазвичай поділяють на хімічні та механічні. Нижче наведено академічний опис цих схем.

Хімічна схема захисту (Chemical Weed Control) (рис. 1.1).

Це домінуюча технологія в сучасному інтенсивному землеробстві. Вона базується на використанні синтетичних гербіцидів.



Рисунок 1.1 – Хімічний метод (Гербіциди)

Класифікація за часом внесення:

1. Досходове внесення (Pre-emergence): Використання ґрунтових гербіцидів одразу після посіву, але до появи сходів культури.

Гербіцидів одразу після посіву, але до появи сходів культури.					14.17 - КР.018.1.000.ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Савчук Д.			РОЗДІЛ 1			Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.		Дядюра К. О.								13	куш
Реценз.								В			
Н. Контр.											
Затверд.		Дядюра К. О.									

– *принцип*: створення "хімічного екрану" на поверхні ґрунту, який пригнічує проростання бур'янів.

– *обмеження*: залежність від вологості ґрунту (у сухій землі не працюють).

2. Післясходове внесення (Post-emergence): Обробка посівів по вегетації ("страхові гербіциди").

– *принцип*: гербіцид потрапляє на листя бур'яну, проникає в судинну систему і знищує рослину.

– *обмеження*: ризик фітотоксичності для основної культури (стрес рослини), поява резистентних (стійких) бур'янів.

Механічна схема контролю (Mechanical Weed Control) (рисунок 1.2).

Базується на фізичному підрізанні, вириванні або присипанні бур'янів ґрунтом.



Рисунок 1.2 – Механічний метод (Культивация)

Основні технологічні операції:

1. Сліпе боронування (Blind Harrowing): проводиться до появи сходів або у фазі "білої ниточки" бур'янів. Зубові борони проходять по всьому полю.

Недолік: може пошкодити проростки культурної рослини; низька ефективність проти вкорінених бур'янів.

					14.17 - КР.018.1.000.ПЗ	Арку
						ш 14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Міжрядний обробіток (Inter-row Cultivation): Основний механічний метод для просапних культур (кукурудза, соняшник, цукровий буряк). Культиватор проходить між рядками рослин.

Критичний недолік: Механічні знаряддя не можуть працювати в зоні рядка (intra-row) без ризику пошкодити культуру. Залишається "захисна зона" (10-15 см), де бур'яни ростуть вільно і потребують або ручного прополювання, або стрічкового внесення гербіцидів.

Альтернативні та Новітні методи

Ці технології спрямовані на зменшення використання хімікатів та підвищення точності боротьби з бур'янами.

3. Термічний метод (Вогнева культивація) (рисунок 1.3).

Цей метод використовує відкрите полум'я або гаряче повітря для теплового шоку рослин, що призводить до руйнування клітинних мембран і загибелі бур'яну. Він ефективний, але енерговитратний і має ризики пожежної небезпеки.



Рисунок 1.3 – Термічний метод

4. Лазерний метод (Автономні роботи) (рисунок 1.4)

Найсучасніша технологія, що використовує штучний інтелект для розпізнавання бур'янів та лазерний промінь для їх точкового знищення. Це

					14.17 - КР.018.1.000.ПЗ	Арку
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

повністю безхімічний та високоточний метод, який дозволяє знищувати бур'яни навіть впритул до культурної рослини, не пошкоджуючи її.



Рисунок 1.4 – Лазерний метод

Кожна з цих технологій має свої переваги та недоліки, і вибір методу залежить від типу культури, бур'янів, економічних чинників та екологічних вимог (таблиця 1.1). Сучасні дослідження все більше зосереджуються на комбінованих та високотехнологічних рішеннях для сталого розвитку сільського господарства.

Таблиця 1.1 – Порівняльна таблиця традиційних схем (для аналізу)

Характеристика	Хімічна схема	Механічна схема	Лазерна схема (WeLASER)
Принцип дії	Біохімічне пригнічення	Механічне підрізання	Термічна деструкція клітин
Зона дії	Суцільна (все поле)	Тільки міжряддя (inter-row)	Точкова (індивідуальна рослина)
Залежність від погоди	Висока (вітер, дощ, посуха)	Середня (стан ґрунту)	Низька (крім сильного дощу)
Вплив на ґрунт	Хімічне забруднення, резистентність	Ущільнення ґрунту технікою, ерозія	Мінімальний (легка техніка)
Селективність	Залежить від типу гербіциду	Низька (ріже все підряд)	Висока (AI розпізнавання)

З точки зору Європейського Союзу (ЄС), сільськогосподарський сектор створює соціальні, економічні та екологічні проблеми. Одним з ключових аспектів є широке використання гербіцидів, які можуть мати ненавмисний негативний вплив на живі організми та навколишнє середовище (Rani et al. 2021; Silva et al. 2019). Тому ЄС запроваджує суворі правила застосування пестицидів для зменшення побічних ефектів від їх використання (Bonanno et al. 2017; Kudsk and Mathiassen 2020).

Згідно зі стратегією «Від ферми до виделки» (Farm to Fork Strategy), яка є центральним елементом Європейського зеленого курсу (European Green Deal), перед аграрним сектором стоять амбітні цілі. Європейська Комісія визначила, що до 2030 року використання та ризик від хімічних та небезпечних пестицидів у ЄС мають бути знижені на 50% (Silva et al., 2022). Для досягнення цієї мети ЄС впроваджує ряд інструментів політики, де Спільна аграрна політика (CAP) відіграє значну роль. У цьому контексті розробка та впровадження автономних роботів для лазерної прополки стає критично важливою альтернативою хімічному захисту рослин. CAP (Common Agricultural Policy), або українською САП (Спільна аграрна політика) — це система сільськогосподарських субсидій та програм ЄС.

САП підтримує стаке використання пестицидів у сільському господарстві. Її метою є допомога фермерам у захисті їхніх культур від шкідників та підтримці високих врожаїв, одночасно захищаючи сільськогосподарські екосистеми. САП сприяє розвитку сталих сільськогосподарських систем у ЄС, дозволяючи фермерам:

- забезпечувати суспільство безпечними, здоровими та екологічно чистими продуктами харчування;
- отримувати стабільний та справедливий дохід, враховуючи весь спектр суспільних благ, які вони надають;
- захищати природні ресурси, покращувати біорізноманіття та робити свій внесок у боротьбу зі зміною клімату [1].

					14.17 - КР.018.1.000.ПЗ	Арку
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

За даними Європейської комісії, точне землеробство є перспективною можливістю для безпечного виробництва сільськогосподарських культур. Воно може допомогти підвищити врожайність сільськогосподарських культур та продуктивність тваринництва, знизити витрати та оптимізувати використання матеріальних ресурсів [2]. Точне землеробство також може допомогти вирішити проблему нестачі ручної праці для операцій з прополювання.

В Європі очікується, що точне землеробство (ТА) та інтеграція цифрових технологій стануть найвпливовішими тенденціями в цьому секторі, оскільки все більша кількість фермерів починає впроваджувати цифрові технології [3]. Точне землеробство набирає обертів у Європі, деякі рішення широко використовуються в європейських країнах [4]. Воно вже використовується в процесах прополювання, підвищуючи ефективність та зменшуючи негативний вплив застосування пестицидів. Окрім механічного та точного хімічного прополювання, нові рішення для боротьби з бур'янами на основі лазерів вже комерціалізовані або розробляються [5]. Це рішення пропонує величезні можливості для вдосконалення подальшого технологічного розвитку з точки зору типів лазерів, джерел енергії, дизайну, конфігурації та практичного застосування. Інноваційні рішення для боротьби з бур'янами досліджуються в рамках програм досліджень і технічних розробок (RTD) Європейського Союзу для стимулювання розробки та впровадження цих методів. Одним з них є проект «Сталий контроль бур'янів у сільському господарстві за допомогою автономних інструментів на основі лазера» (акронім: WeLASER), що фінансується програмою ЄС «Горизонт 2020». Мета проєкту — розробити та випробувати автономну лазерну машину для прополювання.

Хоча методи точного землеробства можуть сприяти зменшенню використання пестицидів, вони можуть створювати нові проблеми для суспільств, пов'язані з попитом на енергію, впливом на доступність критично важливих матеріалів (наприклад, рідкісних металів) та проблемами управління відходами після закінчення терміну служби.

					14.17 - КР.018.1.000.ПЗ	Арку
						ш 18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оцінка впливу на навколишнє середовище процесів, пов'язаних із сільськогосподарським виробництвом, є важливою для трансформації сільського господарства в напрямку сталого розвитку [6, 7]. Кілька робіт зосереджені на інноваційній техніці, що використовується в рослинництві. Кілька досліджень були зосереджені на екологічних показниках інноваційних тракторів. Прототип електричного трактора порівнювали зі звичайним трактором, висвітлюючи його переваги та недоліки [8]. Дослідження, проведене [9, 10], було зосереджено на мінімізації впливу на навколишнє середовище, що спричиняється сільськогосподарською технікою під час її використання. Було оцінено викиди парникових газів та забруднювачів атмосфери, що щорічно спричиняються сільськогосподарською технікою для виробництва рису. Нарешті, була представлена та застосована до тематичного дослідження модель, орієнтована на визначення оптимальної комбінації сільськогосподарської техніки, яка мінімізує вплив на навколишнє середовище від її використання на полі. У роботі [11] представлено сонячний гібридний електричний трактор та проаналізували його життєвий цикл, економічну вартість та екологічний профіль. Прототип електричного трактора порівняли зі звичайним трактором, виділивши його переваги та недоліки. Крім того, було оцінено нове інноваційне обладнання, таке як прес-підбирачі [12].

Прополювання WeLASER – це автономний мобільний робот, який використовує потужний лазер для знищення бур'янів. Це комплексне рішення, що використовує автономні системи, штучний інтелект (ШІ) та передове геопозиціонування [13]. Винахід розроблено, інтегровано та протестовано в рамках проекту «Сталий контроль бур'янів у сільському господарстві за допомогою лазерних автономних інструментів — WeLASER» [14].

Він складається з мобільної автономної платформи, потужного лазерного блоку для прополювання та допоміжних компонентів. У проекті WeLASER було протестовано систему прополювання з двома лазерами для досягнення рівня технологічної готовності 7 (TRL 7). Для комерціалізації продукт повинен досягти рівня технологічної готовності 9 (TRL 9).

					14.17 - КР.018.1.000.ПЗ	Арку
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Продукт для комерціалізації буде оснащений чотирма потужними лазерами. Прополювання WeLASER має чотири базові компоненти: 1. автономну мобільну платформу, 2. систему сприйняття меристем бур'янів, 3. інтелектуальний центральний контролер та 4. лазерний інструмент для прополювання з потужним лазерним джерелом та системою націлювання на меристему. Огляд структури та функціональності системи прополювання WeLASER представлено на рисунку 1.5



Рисунок 1.5 – Принципи роботи лазерних систем прополювання

Метою винаходу WeLASER є знищення бур'янів у різних системах вирощування сільськогосподарських культур [15].

Нормативно-правова база України

А. Загальне екологічне законодавство (обґрунтування актуальності)

Ці документи ви використовуєте, щоб довести необхідність заміни хімічних методів на лазерні.

– Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища»: Базовий закон, що визначає правові засади екології [16].

– Закон України «Про пестициди і агрохімікати»: Регулює вимоги до безпеки застосування хімікатів (ваша робота пропонує альтернативу цьому) [17].

– Закон України «Про основні засади державної аграрної політики на період до 2025 року»: Де йдеться про екологізацію виробництва [18].

– Стратегія екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату на період до 2030 року: Важливо для прив'язки "вуглецевого сліду" [19].

Б. Технічне регулювання та безпека лазерів (для охорони праці)

Ці документи потрібні для Розділу 5 та інженерних розрахунків.

– ДСТУ EN 60825-1:2019 «Безпека лазерних виробів. Частина 1. Класифікація обладнання та вимоги»: Головний стандарт. Ваш робот, ймовірно, використовуватиме лазер Класу 4 (висока небезпека), що вимагає специфічного захисту [20].

– Технічний регламент безпеки машин (Постанова КМУ № 62): Вимоги до проектування будь-якого обладнання, включаючи агророботів [21].

– НПАОП 0.00-1.31-99 «Правила охорони праці при експлуатації лазерів»: Документ, що регламентує безпеку персоналу (операторів).

– Санітарні норми та правила № 5804-91: Гранично допустимі рівні лазерного випромінювання (хоч документ старий, він часто використовується як довідковий у розрахунках небезпечних зон).

2. Нормативно-правова база Європейського Союзу (ЄС)

Оскільки Україна імплементує законодавство ЄС, посилення на ці документи значно підвищить рівень вашої роботи.

А. Стратегічні документи (Green Deal)

– The European Green Deal («Європейський зелений курс»): Стратегія перетворення Європи на кліматично нейтральний континент до 2050 року.

– Farm to Fork Strategy («Від лану до столу»): Ключова ціль стратегії — скорочення використання пестицидів на 50% до 2030 року. Це "залізний" аргумент на користь вашого робота.

Б. Директиви та Регламенти

					14.17 - КР.018.1.000.ПЗ	Арку
						ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

– Directive 2009/128/EC (Sustainable Use of Pesticides): Директива про стале використання пестицидів, яка зобов'язує країни ЄС впроваджувати альтернативні методи боротьби зі шкідниками (IPM - Integrated Pest Management).

– Machinery Regulation (EU) 2023/1230: Новий регламент ЄС щодо безпеки машин, який (на відміну від старої Директиви 2006/42/EC) прямо регулює питання штучного інтелекту та автономних роботів у машинобудуванні.

В. Спеціалізовані стандарти (ISO/IEC)

– ISO 18497:2018 (Agricultural machinery and tractors — Safety of highly automated agricultural machines): Ключовий стандарт для проектування автономних агророботів (розпізнавання перешкод, аварійна зупинка).

– IEC 60825-1:2014 (Safety of laser products): Міжнародний аналог українського ДСТУ для лазерів.

– ISO 14040 / 14044 (Environmental management — Life cycle assessment): Стандарти для проведення оцінки життєвого циклу (LCA), про яку ми говорили в методиці.

1.2 Лазерна технологія в агроінженерії: принцип дії та типи лазерів

Використання лазерного випромінювання для контролю небажаної рослинності базується на фототермічній взаємодії світла з біологічною тканиною. На відміну від механічного зрізання, лазерна обробка забезпечує безконтактний вплив, що виключає ризик перенесення патогенів між рослинами та пошкодження структури ґрунту.

Основна ідея полягає у перетворенні електричної енергії на світлову, а потім – на теплову, для точкового знищення біологічних тканин бур'яну без використання хімікатів.

Фізичні процеси за етапами.

					14.17 - КР.018.1.000.ПЗ	Арку
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. Виявлення та розпізнавання (Оптика та Спектральний аналіз)

Перед тим як активувати лазер, робот повинен відрізнити корисну культуру від бур'яну.

- принцип: різні об'єкти по-різному відбивають світло.
- реалізація: використовуються камери високої роздільної здатності та мультиспектральні сенсори. Штучний інтелект аналізує форму листя та текстуру.

- фізика процесу: системи комп'ютерного зору (на базі згорткових нейромереж) обробляють відбитий фотонний потік, створюючи карту координат цілей (x, y, z) у реальному часі.

2. Лазерний вплив (Фототермічна взаємодія)

Лазер не "ріже" рослину як ніж, а викликає в ній фазовий перехід води.

- джерело випромінювання: зазвичай використовуються тулієві (Thulium) або волоконні лазери.

- довжина хвилі: часто використовується інфрачервоний діапазон (наприклад, близько 2 мкм). Це важливо, оскільки ця довжина хвилі добре поглинається водою, яка є основною складовою рослинних клітин.

Біофізичні основи лазерної прополки

Основним механізмом дії є перетворення світлової енергії в теплову. Цей процес можна розділити на три стадії:

1. Поглинання (Absorption): лазерний промінь потрапляє на поверхню рослини. Ефективність поглинання залежить від довжини хвилі лазера (λ) та спектральних характеристик хромофорів рослини (води, хлорофілу, целюлози).

2. Нагрів (Heating): поглинута енергія викликає локальне підвищення температури.

3. Термічне ураження (Thermal Damage):

- при $T > 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ відбувається денатурація білків (повільний процес).
- при $T > 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ відбувається закипання внутрішньоклітинної рідини.

Вода перетворюється на пару, об'єм різко збільшується, що призводить до

розриву клітинних мембран (мікро-вибух).

14.17 - КР.018.1.000.ПЗ

Арку

щ
23

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
-----	------	----------	--------	------

Критична умова ефективності: лазерний промінь повинен бути сфокусований на апікальній меристемі (точці росту) бур'яну.

Знищення лише листя (наприклад, у злакових бур'янів) не є ефективним, оскільки рослина регенерує. Знищення меристеми діаметром 1-4 мм призводить до повної загибелі організму.

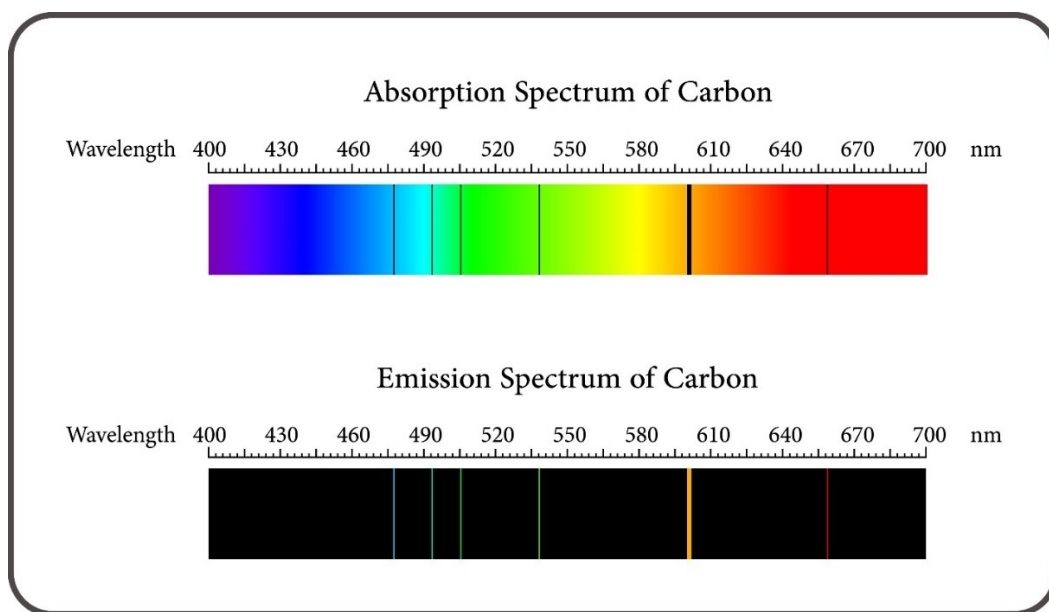


Рисунок 1.6 – Фізичні основи автономного лазерного робота для прополювання

Енергетичні параметри процесу

Для інженерного розрахунку системи необхідно оперувати поняттям летальної дози енергії (Lethal Energy Dose), яка зазвичай вимірюється в джоулях на квадратний міліметр (J/mm^2).

Енергія E , необхідна для знищення бур'яну.

Щоб визначити необхідну потужність лазера, потрібно знати дві речі:

1. Скільки всього енергії (E) потрібно, щоб нагріти і знищити бур'ян.
2. За який час (t) ми хочемо це зробити (наприклад, за 30 мілісекунд, поки робот їде повз).

Щоб нагріти будь-яке тіло (в нашому випадку — воду в клітинах бур'яну), важливі три фактори:

1. Маса (m): Чим більша рослина (або частина, яку ми гріємо), тим більше енергії треба. Нагріти краплю води легше, ніж відро, правда?

$\{T$

2. Різниця температур (): Це різниця між тим, яка температура зараз (наприклад, 20 °С на вулиці), і тим, до якої треба нагріти (100 °С, щоб

$$\{T = T_{\text{кінцева}} - T_{\text{початкова}}$$

вода закипіла). Тобто

3. Питома теплоємність (c): Це показник того, як важко нагрівати саме цю речовину. Для води це відома стала величина (приблизно 4186 Дж/кг·°С)).

Отже, є маса (m), здатність води поглинати тепло (c) і необхідний

$\{T$

стрибок температури ().

Формула для енергії (E) виглядає так:

$$E = c \cdot m \cdot T \quad (1.1)$$

де: c – питома теплоємність (для води 4186 Дж/кг·°С); m – маса нагріваної

$\{T$

частини рослини (кг); – різниця температур (°С)

Формула для потужності:

					14.17 - КР.018.1.000.ПЗ	Арку
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P = \frac{c \cdot m \cdot T}{t}$$

(1.2)

Типи лазерів, що використовуються в агроробототехніці

Вибір джерела випромінювання є компромісом між ефективністю поглинання рослиною та ККД (коефіцієнтом корисної дії) самого лазера (Wall-plug efficiency).

1. Газові CO₂-лазери

Довжина хвилі: 10,6 мкм (дальній інфрачервоний діапазон).

Взаємодія з рослиною: Це "золотий стандарт" для різання органіки. Вода має пікове поглинання на цій довжині хвилі. Майже 100% енергії поглинається поверхневим шаром рослини, викликаючи миттєве випаровування.

Недоліки для робототехніки:

Низький ККД (~10-15%): для отримання 100 Вт оптичної потужності потрібно до 1 кВт електричної, що критично для автономного робота на батареях.

Крихкість: скляні трубки чутливі до вібрацій трактора.

Система доставки променя вимагає складної системи дзеркал (не можна передати по оптоволокну).

2. Діодні лазери (Diode Lasers)

Довжина хвилі: 800–1000 нм (ближній ІЧ).

Взаємодія: Поглинаються переважно пігментами (хлорофілом), а не водою. Менш ефективні для "випалювання", вимагають більшої дози енергії.

Переваги: Високий ККД (до 50-60%), компактність, стійкість до вібрацій, низька вартість.

Застосування: Використовуються в бюджетних або малопотужних системах.

3. Волоконні лазери (Fiber Lasers) — Зокрема, Тулієві (Thulium)

Довжина хвилі: ~2 мкм.

					14.17 - КР.018.1.000.ПЗ	Арку
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Взаємодія: Компромісний варіант. Поглинання водою на довжині 2 мкм значно вище, ніж у діодних лазерів, але нижче, ніж у \$CO_2\$.

Переваги для агроінженерії:

ККД на рівні 30-40%.

Можливість доставки випромінювання через гнучке оптоволокно (fiber delivery). Це дозволяє встановити важкий лазерний блок на шасі, а на рухомий маніпулятор вивести лише легку фокусуючу головку.

Саме цей тип (тулієвий волоконний лазер) обрано для європейського проекту WeLASER.

(Тут варто показати схему, як промінь керується дзеркалами або гальванометрами)

Системи наведення променя

В агроінженерії розрізняють два підходи до керування променем:

Декартова система (Cartesian): Лазерна головка рухається на сервоприводах по осях X-Y над рядком. Це повільно, але просто.

Гальванометрична скануюча система (Galvo-scanner): Лазер нерухомий, промінь відхиляється двома швидкими дзеркалами. Це дозволяє переміщувати "пляму" лазера від одного бур'яну до іншого за мілісекунди. Саме ця система забезпечує високу продуктивність робота.

Для розробки автономного енергоефективного робота найбільш перспективним є використання волоконних лазерів (зокрема тулієвих). Вони поєднують достатній коефіцієнт поглинання рослинною тканиною, прийнятний енергетичний ККД та конструктивну гнучкість, необхідну для інтеграції в мобільну платформу, що працює в складних польових умовах.

«Тулій» – це хімічний елемент (активна речовина), а «Волокно» – це конструкція лазера. Ось чому саме ця комбінація є «золотим стандартом» для лазерного прополювання:

Вибір тулію визначає довжину хвилі випромінювання — зазвичай 1940 нм (або ~2 мкм). Це критично важливо через фізику поглинання води.

					14.17 - КР.018.1.000.ПЗ	Арку
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На довжині хвилі ~2 мкм вода поглинає енергію в тисячі разів ефективніше, ніж на популярних індустріальних довжинах хвиль (наприклад, 1 мкм, які використовують для різання металу). Ефект: оскільки рослина на 70-90% складається з води, тулієвий лазер миттєво нагріває внутрішньоклітинну рідину до кипіння.

Безпека (відносна): випромінювання 2 мкм вважається "умовно безпечним для очей" (eye-safe range), оскільки воно поглинається рогівкою ока і не доходить до сітківки (на відміну від небезпечних 1 мкм або видимих лазерів), хоча захисні окуляри все одно обов'язкові.

Це визначає, як лазер побудований і як він доставляє світло до бур'яну (таблиця 1.2).

– стійкість до вібрацій: трактори та роботи сильно трусяться в полі. Старі газові лазери (наприклад, CO₂) використовують систему крихких дзеркал, які легко роз'юстувати (збити налаштування) при вібрації. Волоконний лазер — це, по суті, гнучкий кабель, якому байдужі вібрації.

– доставка променя: світло генерується в одному блоці (захищеному від бруду), а до скануючої голови (яка рухається над землею) передається по гнучкому оптоволокну. Це значно спрощує конструкцію робота.

– енергоефективність: волоконні лазери мають високий ККД (розетка -> світло) на рівні 30-40%, що критично для робота на акумуляторах.

Таблиця 1.2 – Порівняння з альтернативами

Тип лазера	Довжина хвилі	Плюси для агро	Мінуси для агро
Тулієвий волоконний (WeLASER)	~2 мкм (1940 нм)	Ідеальне поглинання рослиною, надійність (волокно), компактність.	Висока вартість самого лазерного джерела.
CO ₂ (Газовий)	10.6 мкм	Дуже гарне поглинання. Дешевший.	Крихка оптика (дзеркала), громіздкий, чутливий до тряски.
Діодний (Синій/NIR)	0.45 мкм / 0.8-1 мкм	Дешевий, компактний.	Гірше поглинання водою (потрібна більша потужність), вищий ризик відбиття (небезпека для

Арку

14.17 - КР.2025 02 20.001.ПЗ

ш 28

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
-----	------	----------	--------	------

Тулієвий волоконний лазер поєднує точність біологічного ураження (завдяки довжині хвилі тулію) з надійністю польової експлуатації (завдяки волоконній технології).

Механізм руйнування (Фототермічна абляція):

1. Лазерний промінь фокусується на точці росту бур'яну (меристемі).
2. Енергія фотонів поглинається водою всередині клітин рослини.
3. Вода миттєво нагрівається та закипає.
4. Внутрішній тиск пари різко зростає, що призводить до розриву клітинних мембран (мікро-вибух клітини).
5. Рослина втрачає тургор (в'яне) і гине через зневоднення та руйнування каналів живлення.

Точність та Наведення (Кінематика та Оптика)

Для того, щоб влучити в ціль діаметром кілька міліметрів під час руху робота (2 км/год), потрібна висока точність.

Система сканування: використовуються гальванометричні дзеркала. Це легкі дзеркала, що керуються магнітним полем і можуть відхиляти промінь лазера з величезною швидкістю.

Компенсація руху: система керування розраховує вектор руху робота і коригує кут дзеркал у реальному часі, щоб промінь залишався на "точці" рослини певний час (час експозиції), поки робот їде вперед.

4. Енергетичний баланс (Термодинаміка)

Ефективність робота залежить від густини енергії.

Густина енергії: необхідно доставити достатню кількість джоулів на малу площу за дуже короткий час (мілісекунди). Якщо потужність занадто мала, рослина просто нагріється, але не загине. Якщо занадто велика — це зайва витрата енергії акумулятора.

Вимога до меристеми: фізично важливо вразити саме меристему (центр росту). Якщо лазер просто спалить листя, корінь залишиться живим, і бур'ян відросте. Тому точність наведення (± 3 мм) є критичною.

1.3 Аналіз сучасних роботизованих платформ для фізичного знищення бур'янів (огляд аналогів: Carbon Robotics, WeLASER тощо)

Сучасний ринок агроробототехніки пропонує ряд рішень для нехімічного контролю бур'янів, які базуються на використанні технологій точного землеробства (Precision Agriculture), машинного зору (Computer Vision) та штучного інтелекту. За принципом дії робочих органів ці платформи можна поділити на механічні (активні ножі, культиватори) та термічні (лазерні, електричні, парові). У даному підрозділі проведено аналіз провідних світових розробок, які є прямими або непрямими аналогами проектованої системи.

LaserWeeder (Carbon Robotics, США).

Це найбільш комерційно успішний приклад використання лазерної технології:

- конструкція: На відміну від повністю автономних платформ, LaserWeeder реалізовано як навісний або причіпний агрегат, що агрегується з трактором.

Це вирішує проблему енергозабезпечення, але не вирішує проблему ущільнення ґрунту важкою технікою.

- робочий орган: Система використовує 30 CO_2 -лазерів потужністю 150 Вт кожен. Такий тип лазера генерує випромінювання з довжиною хвилі 10,6 мкм, що добре поглинається водою в клітинах рослин.

- продуктивність: Завдяки великій кількості лазерних модулів, агрегат здатен знищувати до 200 000 бур'янів за годину, обробляючи до 0,8 га/год.

- недоліки: Висока маса агрегату (понад 4 тонни) та потреба в потужному тракторі, що збільшує вуглецевий слід через споживання

дизельного паливного.

					14.17 - КР.018.1.000.ПЗ	Арку
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Проект WeLASER (ЄС). Це науково-дослідний проект (Horizon 2020), спрямований на створення повністю автономного робота (таблиця 1.1):

- конструкція: Автономна мобільна платформа (AMR) з гібридною або електричною силовою установкою.
- технологія: Використовує тулієвий волоконний лазер (Thulium fiber laser) з довжиною хвилі близько 2 мкм. Ця довжина хвилі є більш енергоефективною для нагріву води в рослинах порівняно з CO₂-лазерами, що дозволяє знизити енергоспоживання.
- система наведення: Базується на "розумній" камері, яка розрізняє меристему (точку росту) бур'яну та спрямовує промінь точно в неї, мінімізуючи втрати енергії.
- екологічний аспект: Оскільки це автономний юніт, він значно легший за тракторні агрегати, що зменшує деградацію ґрунту.

Таблиця 1.1 – Основні функціональні параметри WeLASER

Параметр	Значення
Загальна вага	1714 кг
Ефективність процесу прополювання	65 – 90%
Швидкість машини для прополювання	~ 2 км/год
Продуктивність прополювання (планова)	9,6 га/день
Робоча ширина	2 м
Точність позиціонування	± 3 мм
Відстань між рядками (міжряддя)	> 25 см
Швидкість процесу прополювання (максимальна)	~ 2 км/год

FarmWise Vulcan (США). Представник інтелектуальних механічних прополювачів.

- принцип дії: Використовує гідравлічно привідні леза, які автоматично "обходять" культурну рослину, зрізаючи бур'яни навколо неї.
- інженерні особливості: Вимагає менше енергії, ніж термічні методи, але створює порушення верхнього шару ґрунту, що може провокувати ерозію або проростання нових бур'янів з насіннєвого банку ґрунту.

Naïo Technologies (Франція)

Роботи серії Oz, Dino, Ted:

					14.17 - КР.018.1.000.ПЗ	Арку
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

- конструкція: легкі електричні роботи для механічної міжрядної обробки.
- перевага: дуже низький тиск на ґрунт і повна електрифікація.
- недолік: механічний метод менш ефективний проти бур'янів у рядку (intrarow weeds), де є ризик пошкодити культуру, на відміну від безконтактного лазера.

Порівняльна характеристика роботів-аналогів.

Для обґрунтування вибору лазерної технології зведено технічні параметри основних платформ у таблицю 1.1.

Аналіз існуючих рішень показує, що хоча механічні роботи (Naïo, FarmWise) є більш енергоефективними, вони мають обмеження при роботі в рядку культур (intrarow weeding) та залежать від фізичного стану ґрунту (вологість, липкість).

Лазерні системи (Carbon Robotics, WeLASER) забезпечують найвищу точність і відсутність механічного пошкодження ґрунту. Однак, існуючі комерційні рішення (Carbon Robotics) є надмірно важкими та енергоємними. Тому перспективним напрямком є розробка легкого автономного лазерного робота (концепція WeLASER), який поєднує точність лазера з екологічними перевагами легкої електричної платформи. Саме цей тип робота буде досліджуватись у даній роботі з точки зору екологічної ефективності (LCA).

Таблиця 1.1 – Техніко-експлуатаційні показники роботизованих систем контролю бур'янів

Параметр	Carbon Robotics (LaserWeeder)	WeLASER (Прототип)	FarmWise (Titan)	Naïo Dino
Тип платформи	Навісний агрегат	Автономний робот	Причіпний/Автономний	Автономний робот
Метод дії	Термічний (CO ₂ лазер)	Термічний (Тулівський лазер)	Механічний (Активні ножі)	Механічний (Лапи/Ножі)
				Арку
			14.17 - КР.018.1.000.ПЗ	32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Джерело енергії	ВВП Трактора + Генератор	АКБ / Гібрид	Дизель-генератор	Електро (АКБ)
Вплив на ґрунт	Високий (вага трактора)	Низький	Середній	Дуже низький
Точність	< 1 мм	< 2 мм	~ 1-2 см	~ 2-5 см
Залежність від вологості ґрунту	Ні (безконтактний)	Ні (безконтактний)	Так (налипання ґрунту)	Так

Висновок

У результаті виконання першого розділу кваліфікаційної роботи, присвяченого аналізу сучасного стану технологій прополювання та їх екологічних наслідків, було отримано наступні узагальнюючі висновки:

1. Констатація системної кризи традиційних агротехнологій. Проведений аналіз існуючих методів боротьби з бур'янами (хімічний, механічний) дозволив виявити критичні недоліки, що унеможливають їх подальше стале використання в рамках концепції «Сільське господарство 4.0».

– Встановлено, що хімічний метод, попри свою економічну привабливість у короткостроковій перспективі, є основним джерелом екологічного забруднення агроценозів. Тривале використання гербіцидів призвело до накопичення токсичних речовин у ґрунті та ґрунтових водах, зниження біорізноманіття та появи резистентних біотипів бур'янів (зокрема, стійких до гліфосату), що змушує аграріїв постійно збільшувати дози препаратів.

– Механічний метод, хоч і є більш екологічно безпечним з точки зору відсутності токсинів, характеризується значною енергоємністю та негативним впливом на фізичні властивості ґрунту. Використання важкої тракторної техніки призводить до переуцільнення ґрунту, руйнування його структури та посилення ерозійних процесів. Крім того, дизельні двигуни тракторів залишаються значним джерелом емісії парникових газів (CO₂, NO_x).

2. Нормативно-правова детермінація переходу до інновацій. Аналіз законодавчої бази України та Європейського Союзу засвідчив незворотність курсу на екологізацію агровиробництва. Стратегічні документи ЄС, зокрема «European Green Deal» та стратегія «Farm to Fork», встановлюють жорсткі імперативи щодо скорочення використання пестицидів на 50% до 2030 року. Для українського агросектору, орієнтованого на експорт до ЄС, це створює нагальну потребу в імплементації альтернативних технологій захисту рослин.

Встановлено, що існуюча нормативна база (зокрема ДСТУ EN 60825-1)

					14.17 - КР.018.1.000.ПЗ	Арку
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дозволяє безпечно інтегрувати лазерні системи 4-го класу небезпеки у виробничі процеси за умови дотримання інженерних вимог безпеки.

3. Роботизація як ключовий тренд точного землеробства. Огляд світового ринку агроробототехніки показав, що найбільш перспективним напрямком є перехід від важких пілотованих машин до легких автономних роботизованих платформ. Такі системи здатні виконувати операції з високою точністю (Precision Agriculture), діючи безпосередньо на об'єкт (бур'ян), а не на площу поля загалом. Це дозволяє радикально знизити енерговитрати на одиницю знищеної небажаної рослинності та мінімізувати тиск на ґрунт. Виявлено, що лазерні модулі, на відміну від механічних маніпуляторів, забезпечують безконтактну дію, що виключає ризик перенесення патогенів між рослинами та пошкодження кореневої системи культури.

4. Технологічна зрілість лазерного методу прополювання. Детальний аналіз фізики взаємодії лазерного випромінювання з рослинною тканиною підтвердив ефективність методу термічної абляції. Визначено, що вплив сфокусованого променя на апікальну меристему (точку росту) бур'яну призводить до денатурації білків та закипання клітинного соку, що спричиняє загибель рослини без можливості регенерації. Лазерне прополювання дозволяє знищувати бур'яни на ранніх стадіях розвитку (сім'ядолі), коли вони найбільш вразливі, при цьому енерговитрати є конкурентними порівняно з механічним прополюванням. Однак, технологія вимагає високоточних систем комп'ютерного зору для розпізнавання об'єктів у реальному часі.

5. Невирішеність проблеми комплексної екологічної оцінки. Незважаючи на очевидні локальні переваги лазерного прополювання (відсутність хімії в полі), аналіз наукової літератури виявив суттєву прогалину в оцінці глобального екологічного впливу таких систем. Більшість досліджень фокусуються на операційній ефективності, ігноруючи етапи виробництва складних компонентів робота (літій-іонних акумуляторів, лазерних діодів, обчислювальних модулів) та стадію утилізації. Виявлено, що виробництво високотехнологічного обладнання пов'язане зі значними витратами енергії та

					14.17 - КР.018.1.000.ПЗ	Арку
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використанням рідкісноземельних металів, що може нівелювати екологічний виграш на етапі експлуатації. Це підтверджує необхідність застосування методології оцінки повного життєвого циклу (LCA – Life Cycle Assessment).

6. Обґрунтування вибору напрямку дослідження. На основі проведеного аналізу зроблено висновок про доцільність розробки та дослідження автономного лазерного робота. Проте, для об'єктивної оцінки його «сталості» (sustainability), критично важливим є застосування розширених моделей LCA, таких як APOS (Allocation at the Point of Substitution). Це дозволить не лише порівняти прямі викиди під час роботи в полі, але й оцінити вплив ланцюгів постачання, виробництва енергії для зарядки та процесів переробки компонентів після завершення терміну служби.

Таким чином, у першому розділі доведено актуальність теми кваліфікаційної роботи, сформульовано науково-технічну проблему протиріччя між необхідністю екологізації захисту рослин та відсутністю даних про реальний екологічний слід новітніх роботизованих засобів, що визначає мету та завдання наступних розділів дослідження.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

2.1. Опис конструктивно-технологічної схеми досліджуваного автономного робота

Технологія лазерного прополювання пропонує значний потенціал у різних системах вирощування сільськогосподарських культур, але її застосування має бути адаптовано до різних середовищ. Для просапних та багаторічних культур технологію можна адаптувати для точного знищення бур'янів без порушення росту врожаю. У садівництві та контрольованих середовищах, таких як теплиці, системи лазерного прополювання потребують подальшого вдосконалення, щоб забезпечити оптимальну продуктивність у тісних приміщеннях та штучних умовах. Завдяки координації конструкції та експлуатації цих систем відповідно до конкретних потреб кожної системи вирощування сільськогосподарських культур, лазерне прополювання може стати більш універсальним та ефективним рішенням у сучасному сільському господарстві. Різні типи платформ для лазерного прополювання та автономних роботів показані на рисунку 2.1.

					14.17 - КР.018.2.000.ПЗ									
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата										
Розроб.		Савчук Д.			РОЗДІЛ 2				Літ.	Аркуш		Аркушів		
Перевір.		Дядюра К.О.									36		КУШ	
Реценз.									В					
Н. Контр.														
Затверд.		Дядюра К. О.												

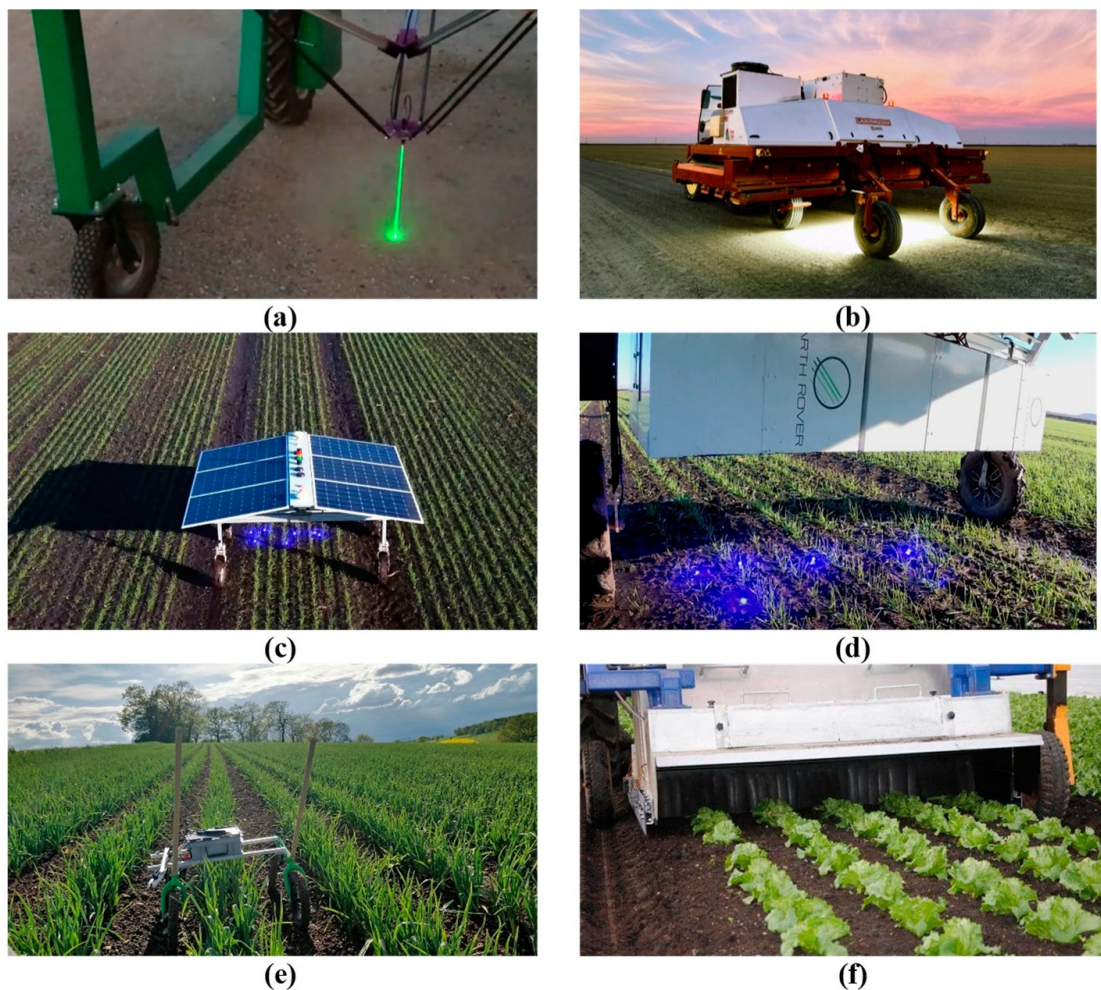


Рисунок 2.1 – Платформи технології лазерного прополювання просапних культур. (a) [6], (b) [7], (c,d) [8], (e) [9], (f) [10].

Для проведення досліджень обрано концепцію автономної мобільної платформи порталного типу, що забезпечує можливість обробітку високостеблових культур без їх пошкодження. Структурна схема робота складається з трьох функціональних підсистем: рушійно-енергетичної, системи технічного зору та виконавчого лазерного модуля.

1. Рушійно-енергетична підсистема.

Базується на повнопривідному шасі (4WD) з незалежними електродвигунами для кожного колеса (motor-in-wheel), що забезпечує високу маневреність та можливість розвороту на місці:

– джерело живлення: літій-залізо-фосфатна (LiFePO₄) акумуляторна батарея, яка характеризується високим ресурсом циклів заряд-розряд (>2000) та стабільністю напруги.

– додаткове живлення: на верхній площині платформи встановлено сонячні панелі для компенсації витрат енергії бортової електроніки.

2. Система технічного зору (Computer Vision).

Відповідає за виявлення бур'янів, їх класифікацію та визначення координат точки ураження (апикальної меристеми).

– сенсори: RGB-D камери (наприклад, Intel RealSense або Stereolabs ZED) для отримання інформації про колір та глибину сцени.

– обчислювальний модуль: Бортовий комп'ютер з підтримкою нейромережевих прискорювачів (наприклад, NVIDIA Jetson AGX), на якому розгорнуто згорткову нейронну мережу (CNN), навчену на датасетах агрокультур.

3. Виконавчий лазерний модуль.

Ключовий елемент конструкції, що реалізує фізичне знищення бур'янів.

– Тип лазера: Волоконний тулієвий (Tm) або CO₂-лазер. Вибір $\approx 2 \text{ мкм}$

довжини хвилі (або 10,6 мкм) зумовлений піком поглинання випромінювання водою, що міститься в клітинах рослин.

– Система наведення: Двокоординатний гальванометричний сканатор (Galvo-scanner), який дозволяє відхиляти лазерний промінь з високою швидкістю без необхідності переміщення самого джерела випромінювання або зупинки робота.

2.2. Методика оцінювання життєвого циклу (LCA) для агророботів

					14.17 - КР.018.2.000.ПЗ	Арку
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для комплексного аналізу екологічного впливу розробленої системи застосовується методологія **LCA (Life Cycle Assessment)** згідно зі стандартами ISO 14040 та ISO 14044. Особливістю даного дослідження є використання атрибутивної моделі APOS (Allocation at the Point of Substitution).

Етапи проведення LCA:

1. Визначення мети та обсягу (Goal and Scope Definition):

– *функціональна одиниця*: очищення 1 га площі посівів цукрового буряку від бур'янів протягом одного вегетаційного сезону.

– *межі системи*: (Cradle-to-Grave), включаючи видобуток сировини для компонентів робота, виробництво, експлуатацію в полі, ремонт та кінцеву утилізацію.

2. Інвентаризаційний аналіз (LCI - Life Cycle Inventory):

Збір даних про матеріальні та енергетичні потоки. Для моделі APOS критично важливим є облік вторинної сировини. Розрахунок масової частки матеріалів (M_i) для n компонентів робота:

$$M_{robot} = \sum_{i=1}^n (m_{steel} + m_{plastik} + m_{Li} + m_{Cu} + m_{electronics}) \quad (2.1)$$

Особлива увага приділяється рідкісноземельним металам у двигунах та електроніці.

3. Оцінка впливу (LCIA):

Переведення інвентаризаційних даних у категорії впливу, зокрема:

- потенціал глобального потепління (GWP100, кг CO₂-екв).
- евтрофікація ґрунтів (кг PO₄-екв).
- токсичність для людини (Human Toxicity Potential).

4. Специфіка моделі APOS:

Модель APOS розподіляє екологічне навантаження між первинним продуктом (роботом) та вторинними продуктами, отриманими після переробки (recycling). Це дозволяє кількісно оцінити екологічну вигоду від модульної конструкції робота, яка спрощує його демонтаж та утилізацію.

					14.17 - КР.018.2.000.ПЗ	Арку
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.3 Методика розрахунку енергетичного балансу та «вуглецевого сліду»

Енергетична ефективність є ключовим параметром, що визначає автономність робота та його непрямий екологічний вплив (через генерацію спожитої електроенергії).

1. Енергетичний баланс робота (E_{Σ}):

Загальне споживання енергії за годину роботи визначається сумою витрат на переміщення та технологічний процес:

$$E_{\Sigma} = E_{tr} + E_{proc} + E_{control} \quad (2.2)$$

де: E_{tr} – енергія на тягу (переміщення); E_{proc} – енергія лазерної системи (накачка лазера + охолодження); $E_{control}$ – енергія системи технічного зору та контролерів.

Потужність, необхідна для переміщення (P_{tr}), розраховується з урахуванням опору коченню (f) та ухилу поля (α):

$$P_{tr} = (M \cdot g \cdot v) / \eta_{tr} \cdot (f \cdot \cos \alpha + \sin \alpha) \quad (2.3)$$

де M – маса робота, v – швидкість руху, η_{tr} – ККД трансмісії.

Розрахунок «Вуглецевого сліду» (Carbon Footprint, CF): Вуглецевий слід розраховується як сума прямих (відсутні для електроробота) та непрямих емісій:

$$CF = E_{\Sigma} \cdot k_{grid} + \frac{CF_{prod}}{T_{life}} \cdot t_{work} \quad (2.3)$$

де: k_{grid} – емісійний фактор електромережі (кг CO₂/кВт·год) для регіону використання (мікс генерації); CF_{prod} – емісії при виробництві робота (з бази

					14.17 - КР.018.2.000.ПЗ	Арку
						ш 40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

даних LCA); T_{life} – загальний ресурс робота (годин); t_{work} – час виконання роботи.

Для порівняння з трактором розраховується економія викидів (ΔCF):

$$\Delta CF = CF_{tractor} - CF_{robot} = V_{fuel} \cdot k_{diesel} - E_{\Sigma} \cdot k_{grid} \quad (2.4)$$

Загальна модель енергоспоживання робота (E_{total}) складається з енергії, витраченої на рух (E_{motion}), роботу лазерної установки (E_{laser}) та допоміжних систем керування/охолодження (E_{aux}).

$$E_{total} = \int_0^t (P_{motion}(t) + P_{laser}(t) + P_{aux}) dt \quad (2.5)$$

А. Енергоспоживання ходової частини (P_{motion})

Для розрахунку потужності, необхідної для руху по ґрунту, використовуємо модель опору коченню.

Це зображення забезпечує спрощену візуалізацію

Оцінки життєвого циклу

– методології оцінки впливу на навколишнє середовище, пов'язаного з усіма етапами життєвого циклу продукту, від видобутку сировини до утилізації. Етапи представлені в безперервному циклі.

2.4 Математичне моделювання процесу лазерної абляції бур'янів

Для оптимізації енерговитрат необхідно визначити мінімально достатню дозу енергії для знищення бур'яну. Процес моделюється на основі теплового балансу.

Основна умова ефективності абляції – нагрівання клітинної рідини в меристемі до температури кипіння ($T_b = 100$ C) та випаровування води.

Рівняння теплового балансу:

Енергія лазера (Q_{laser}), поглинута рослиною, витрачається на нагрівання та фазовий перехід:

					14.17 - КР.018.2.000.ПЗ	Арку
						ш 41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$Q_{abs} = \alpha_a \cdot P_L \cdot t_{exp} = m_{bio} \cdot [c_p \cdot (T_b - T_o) + L_v] \quad (2.6)$$

де: α_a – коефіцієнт поглинання рослинної тканини (залежить від довжини хвилі); P_L – потужність лазера (Вт); t_{exp} – час експозиції (с); m_{bio} – маса опромінюваної тканини (кг); c_p – питома теплоємність біомаси (Дж/(кг·К)); L_v – питома теплота пароутворення (Дж/кг).

Щільність енергії (D_E): Критичний параметр для проектування системи фокусування. Визначається як відношення енергії до площі плями лазера ($S_{spot} = \pi \cdot r^2$):

$$D_E = \frac{P_L \cdot t_{exp}}{\pi \cdot r^2} \quad (2.7)$$

Залежність від біологічних характеристик: Модель враховує стадію розвитку бур'яну (фаза ВВСН). Чим старша рослина, тим більший діаметр стебла (d_{stem}), що вимагає збільшення часу експозиції за експоненціальним законом:

$$t_{exp} = k \cdot e^{\beta \cdot d_{stem}} \quad (2.8)$$

де k та β – емпіричні коефіцієнти, що визначаються експериментально для різних видів бур'янів.

Ця математична модель дозволяє програмно регулювати потужність лазера в реальному часі, уникаючи перевитрат енергії на дрібні бур'яни та забезпечуючи гарантоване знищення розвинених рослин.

2.5 Обґрунтування системи стабілізації та вирівнювання шасі робота в умовах складного рельєфу

Забезпечення стабільності положення лазерного випромінювача є критичною умовою ефективності прополювання. Оскільки робот призначений для роботи в реальних польових умовах, де можливі нерівності мікрорельєфу та схили, виникає необхідність аналізу та вибору механізмів вирівнювання шасі.

					14.17 - КР.018.2.000.ПЗ	Арку
						щ 42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Коливання платформи можуть призвести до зміщення плями лазера, пошкодження культурних рослин або зниження якості обробки.

Сучасні дослідники досягли значного прогресу у проектуванні механізмів вирівнювання для сільськогосподарської техніки. Для вирішення таких проблем, як надмірний нахил машини, зниження якості операцій та ризику для безпеки під час роботи на горбистій місцевості, розроблено низку інноваційних рішень:

Ван та ін. (Wang et al.) [12] розробили всеспрямовану систему автоматичного вирівнювання для гусеничної техніки на основі тришарової шарнірної рамної конструкції.

Ця система дозволяє регулювати положення машини за кутами тангажу (pitch), крену (roll) та в умовах складного нахилу. Вона також використовує метод ковзного керування (sliding mode control), посилений спостерігачами збурень, що мінімізує помилки синхронізації між гідроциліндрами та підвищує точність вирівнювання.

Сун та ін. (Sun et al.) [13] запропонували підхід до всеспрямованого вирівнювання з використанням чотириточкового регульованого гідравлічного шасі для гусеничних зернозбиральних комбайнів. Моделювання багатотілової динаміки на платформі ADAMS показало значне зниження ризиків перекидання, спричинених зміщенням центру ваги (CoG), завдяки скоординованим стратегіям керування чотирма гідроциліндрами.

Чай та ін. (Chai et al.) [14] спроектували безпілотне шасі з колісно-крокуючим рушієм, натхненне біомеханікою сарани, що включає пневмогідравлічний гібридний привід. Система керування вирівнюванням інтегрує двовісне (тангаж/крен) визначення положення, віртуальне керування координатою опор та алгоритми динамічної компенсації центру ваги. У результаті система досягає значно вищої швидкості та точності вирівнювання порівняно з традиційними системами.

Тан та ін. (Tan et al.) [15] розробили стратегію динамічного балансування на основі механізму вирівнювання з двома ступенями свободи (DoF). Система

					14.17 - КР.018.2.000.ПЗ	Арку
						щ
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

інтегрує латеральні (10° до 17°) та поздовжні ($\pm 43.1^{\circ}$) гідравлічні модулі у багатоланкову структуру. Геометрична кінематична модель дозволила співвіднести переміщення циліндрів із положенням машини, забезпечуючи повнодіапазонну компенсацію.

Гао та ін. (Gao et al.) [16] розробили шасі Н-подібної конфігурації зі змінною геометрією, адаптоване для гірських умов. Ця система об'єднує балансирні підвіски, гідравлічні системи регулювання та подвійні ведучі мости для адаптації кліренсу, ширини колії та положення шасі в реальному часі.

Висновки та напрямки для проектування робота WeLASER:

Аналіз літературних джерел свідчить, що безперервне вдосконалення механізмів вирівнювання шасі суттєво підвищує адаптивність техніки. Проте існуючі системи стикаються з викликами недостатньої інтелектуалізації та швидкодії, що є критичним для лазерного пропонування, де необхідна мілісекундна реакція.

Враховуючи досвід попередніх досліджень, конструкція шасі автономного лазерного робота повинна базуватися на таких принципах:

1. Оптимізація та легкість: Розробка модульної полегшеної системи шасі (на відміну від важких гідравлічних систем комбайнів), що враховує динамічні характеристики електроприводу.

2. Інтелектуальне керування: Створення механізмів з адаптивними функціями компенсації на основі даних від IMU-сенсорів та системи технічного зору.

3. Швидкодія: Оптимізація кінематичних моделей для скорочення циклів регулювання положення, що дозволить утримувати фокус лазера навіть під час руху по нерівностях.

Це обґрунтовує вибір активної або напівактивної підвіски для досліджуваного робота, що буде враховано при математичному моделюванні в наступних підрозділах (рисунок 2.1).

					14.17 - КР.018.2.000.ПЗ	Арх
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

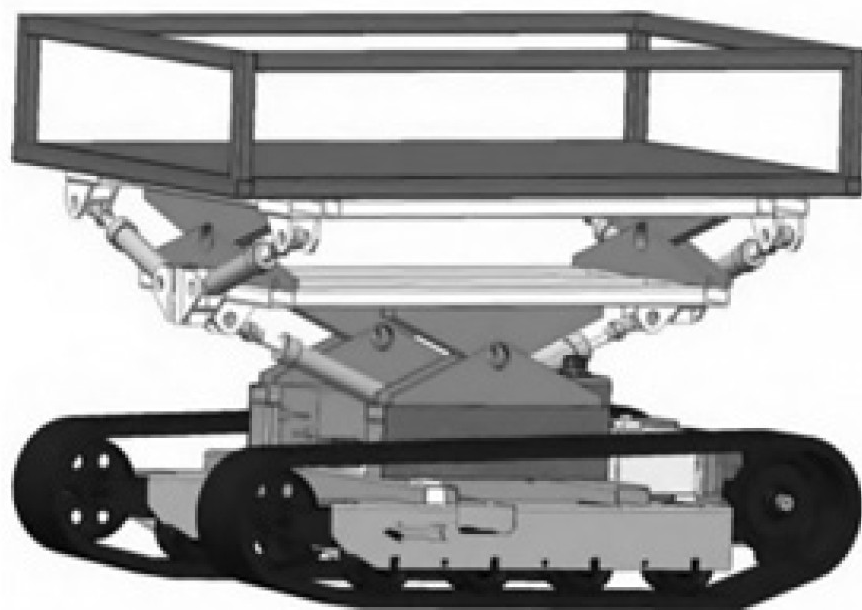


Рисунок 2.1 – Гусенична робоча машина «Тришарова шарнірна рама»

					14.17 - КР.018.2.000.ПЗ	Арку
						щ
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Висновки

У другому розділі магістерської роботи здійснено теоретичне обґрунтування конструктивно-технологічних рішень та розроблено методологічний апарат для комплексного дослідження екологічних показників автономного лазерного робота. За результатами розділу зроблено такі висновки:

1. Доведено доцільність використання мобільної платформи порталного типу з колісною формулою 4WD та незалежними електроприводами («мотор-колесо»). Така компоновка забезпечує мінімальний радіус розвороту та високу прохідність у міжряддях без пошкодження культурних рослин. Визначено, що найбільш ефективною виконавчою системою є комбінація тулієвого або CO_2 -лазера з двокоординатним гальванометричним сканатором. Це дозволяє здійснювати позиціонування променя зі швидкістю, достатньою для обробки посівів у русі (до 10 км/год), на відміну від повільних механічних маніпуляторів. Інтеграція сонячних панелей у конструкцію робота обґрунтована як засіб підвищення енергетичної автономності та зменшення навантаження на електромережу при заряджанні.

2. Вперше для даного типу обладнання адаптовано методику оцінки життєвого циклу (LCA) згідно зі стандартами ISO 14040/14044 із застосуванням атрибутивної моделі APOS (Allocation at the Point of Substitution). Встановлено, що використання моделі APOS є критично важливим для коректної оцінки екологічності робототехніки, оскільки вона дозволяє справедливо розподілити екологічне навантаження між первинним виробництвом складних компонентів (літій-іонних батарей, електроніки) та їх подальшою переробкою. Це дає змогу врахувати вигоди від циркулярної економіки, чого не забезпечують стандартні лінійні моделі оцінки.

3. Розроблено методику розрахунку енергетичного балансу робота, яка,

на відміну від існуючих, враховує стохастичний характер забур'яненості поля.

14.17 - КР.018.2.000.ПЗ					Арх.
					Ш 46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

4. Запропонована математична модель дозволяє визначити сумарні витрати енергії як функцію від трьох змінних: фізико-механічних властивостей ґрунту (опір коченню), густоти стояння бур'янів (кількість пострілів лазера) та ККД системи технічного зору. Це створює базу для коректного порівняння «вуглецевого сліду» (Carbon Footprint) електроробота з дизельними тракторами, враховуючи регіональний коефіцієнт емісії електромережі.

5. Побудовано фізико-математичну модель процесу лазерної абляції рослинної тканини на основі рівняння теплового балансу. Модель встановлює аналітичну залежність між біологічними характеристиками бур'яну (діаметр стебла, фаза розвитку ВВСН) та необхідною дозою лазерної енергії. Це дозволяє оптимізувати алгоритми керування потужністю лазера в реальному часі: подавати рівно стільки енергії, скільки потрібно для закипання клітинного соку в апікальній меристемі, уникаючи перевитрат енергії акумулятора та перегріву навколишнього середовища.

Узагальнюючий висновок: Сформована у розділі методологічна база, що поєднує інженерні розрахунки, модель APOS та математичне моделювання теплових процесів, є достатньою для проведення дослідно-аналітичної частини роботи та отримання достовірних кількісних оцінок екологічної ефективності впровадження лазерних робіт.

					14.17 - КР.018.2.000.ПЗ	Арку
						щ
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ

РОБОТА

3.1 Архітектура та ключові компоненти розробленого роботизованого комплексу

У рамках даного дослідження було зроблено внесок у розвиток технологій точного землеробства шляхом розробки та успішного тестування комплексного роботизованого рішення в реальних польових умовах (на прикладі посівів бавовнику). Експериментальний зразок об'єднує кілька критично важливих підсистем, інтеграція яких забезпечує автономність та високу ефективність процесу знешкодження бур'янів.

Польові випробування розробленого автономного робота проводилися на посівах бавовнику. Як мобільну платформу використано наземний ровер з рульовим керуванням типу Аккермана (Ackerman-steering). Виконавчий механізм складався з 2D-декартового маніпулятора, оснащеного діодним лазером на поворотно-похилому механізмі (pan-and-tilt) для точного наведення на стебла щириці (Palmer amaranth).

Основними компонентами розробленої системи є:

Агророботизована платформа (Agricultural Robotic Platform): Спроектовано та виготовлено функціональну мобільну платформу, спеціально адаптовану для виконання агротехнічних завдань. Конструкція шасі враховує специфіку руху по міжряддях та необхідність стабілізації обладнання на нерівному рельєфі.

					14.17 - КР.018.3.000.ПЗ			
					РОЗДІЛ 3			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Савчук Д.						
Перевір.		Дядюра К.О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						
						Літ.	Аркуш	Аркушів
							48	куцц
						В		

Система детекції бур'янів на основі Deep Learning: Розроблено механізм комп'ютерного зору, що використовує технології глибокого навчання (Deep Learning). Це дозволяє системі з високою точністю ідентифікувати бур'яни в режимі реального часу, відокремлюючи їх від культурних рослин навіть за умов складного візуального фону.

Алгоритм трекінгу (Weed Tracking): Система включає механізм відстеження об'єктів, який дозволяє утримувати фокус лазера на цільовому бур'яні під час руху платформи. Це компенсує зміщення робота та забезпечує безперервність впливу лазерного променя.

Автономна навігація (Visual + GPS): Для ефективного переміщення полем розроблено комбіновану навігаційну систему. Вона об'єднує дані візуальної одометрії (Visual Odometry) та супутникової навігації (GPS), що дозволяє роботу орієнтуватися в рядах культури та здійснювати розвороти в кінці гону без втручання оператора.

Модуль високоточного лазерного прополювання:

У платформу інтегровано виконавчий механізм на основі діодних лазерів. Система забезпечує прецизійне наведення променя на меристему бур'яну та його термічне знищення.

Діодний лазер був підключений до блоку панорамування та нахилу, яким керували два безщіткові сервоприводи HSB-9380TH, що дозволяло йому обертатися в різні положення (див. Рисунок 3.1). Arduino зв'язувався з комп'ютером через ROS.

					14.17 - КР.018.3.000.ПЗ	Арку
						ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

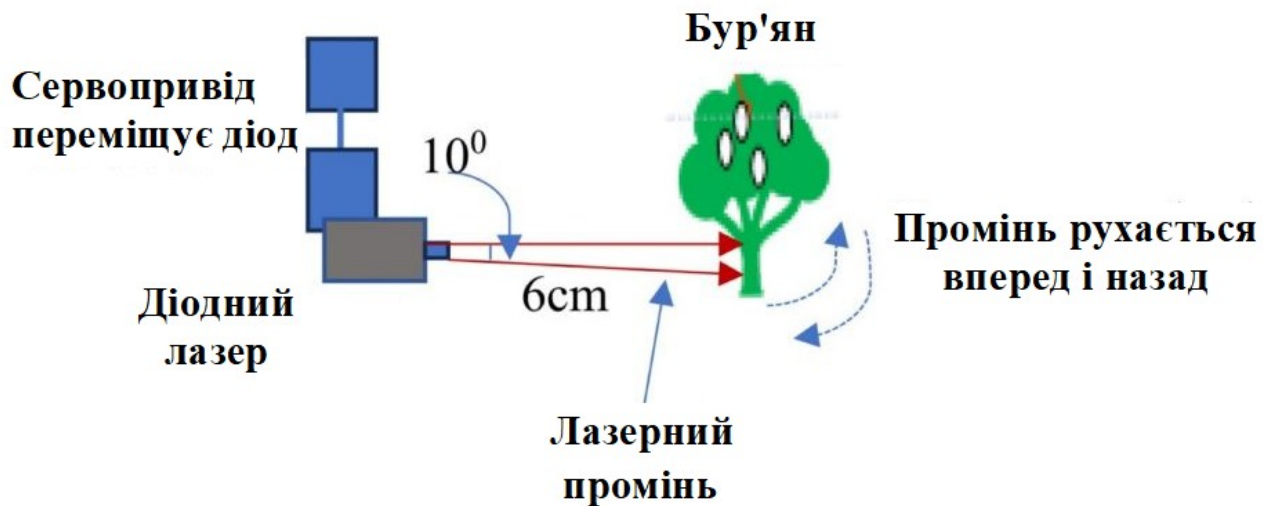


Рисунок 3.1 – Механізм дизерингу діодного лазера. Сервоприводи переміщують діодний лазер вперед і назад.

Робот (див. Рисунок 3.2), який використовувався в цьому дослідженні, являв собою електричний чотириколісний ровер з керованим механізмом Аккермана та двовимірним декартовим маніпулятором, встановленим спереду. Ми розробили робота для навігації між рядами культур шириною 90 см або більше на сільськогосподарських полях. Робот мав довжину 123 см та ширину 76 см (без підключених периферійних пристроїв).

Робот має чотири основні контролери, які керували всіма датчиками та виконавчими механізмами, встановленими на роботі: головний контролер для координації всіх дій робота, контролер ровера для навігації, контролер маніпулятора для маніпуляцій та лазерний контролер для знищення бур'янів.



Рисунок 3.2 – Роботизована платформа для лазерного видалення бур'янів.
Для функціонування системи були задіяні такі алгоритми та апаратні засоби:

Детекція бур'янів: Модель YOLOv4-tiny для роботи в реальному часі.

Локалізація: Визначення координат цілі за допомогою хмари точок (Point Cloud) зі стереокамери Zed 2i.

Навігація: Комбінація GPS, семантичної сегментації (FCN) та алгоритму планування шляху DWA (Dynamic Window Approach) для руху міжряддями.

					14.17 - КР.018.3.000.ПЗ	Арку
						щ 51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2 Апаратне забезпечення системи керування та навігації робота

Архітектура системи керування автономного робота побудована за ієрархічним принципом, де центральним обчислювальним вузлом виступає високопродуктивний вбудований комп'ютер, що взаємодіє з периферійними мікроконтролерами та сенсорами.

1. Обчислювальне ядро (Central Processor)

В якості центрального процесора використано вбудований комп'ютер Nvidia Jetson Xavier AGX. Вибір цієї платформи обґрунтований її високою обчислювальною потужністю при низькому енергоспоживанні (до 30 Вт), що є критичним для мобільних роботизованих систем.

Технічні характеристики модуля:

CPU: 8-ядерний процесор ARM v8.2 (64-bit);

RAM: 32 ГБ;

GPU: 512-ядерний графічний процесор архітектури Volta з тензорними ядрами (Tensor Cores).

Така конфігурація дозволила розгорнути ресурсомні наскрізні (end-to-end) AI-додатки безпосередньо на борту робота (Edge Computing). Комп'ютер відповідає за всі автономні операції:

Збір та інтерпретацію даних із сенсорів (стереокамери, IMU, GPS);

Виконання моделей глибокого навчання (Deep Learning) для детекції бур'янів;

Планування шляху та навігацію між рядками;

Керування низькорівневими контролерами Arduino, які безпосередньо комутують реле та драйвери актуаторів.

Обмін інформацією між модулями реалізовано на базі Robotic Operating System (ROS 1 - Noetic) (Quigley et al., 2009). Живлення обчислювального блоку забезпечує 6-елементна (6S) LiPo-батарея Tunigu ємністю 22 000 мА·год.

2. Навігаційні сенсори та позиціонування

					14.17 - КР.018.3.000.ПЗ	Арку
						52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для глобального позиціонування, картографування поля та навігації на ровері встановлено однодіапазонний GNSS-приймач EMLID Reach RS+ з підтримкою технології RTK (Real-Time Kinematic), що забезпечує сантиметрову точність координат.

Для точної оцінки орієнтації робота в просторі (кути крену, тангажу та рискання) використано два інерціальні вимірювальні модулі (IMU) високої роздільної здатності PhidgetSpatial Precision 3/3/3. Кожен модуль містить:

- 3-осьовий акселерометр;
- 3-осьовий гіроскоп;
- 3-осьовий магнітометр (компас).

3. Система технічного зору (Stereo Vision)

Візуальне сприйняття навколишнього середовища забезпечують дві стереокамери від Stereo Labs: Zed 2 та Zed 2i. Кожна камера оснащена двома оптичними сенсорами, що дозволяє отримувати:

- Стандартні RGB-зображення;
- Карти глибини (Depth images);
- 3D-хмари точок (Point clouds).

Камери підключені до центрального комп'ютера та інтегровані в середовище ROS, публікуючи дані у відповідні топіки (Topics). Додатково камери мають власні вбудовані IMU для відстеження орієнтації сенсора.

Функціональний розподіл камер:

Zed 2: Використовується для візуальної навігації — детекції шляху між рядками бавовнику.

Zed 2i: Застосовується безпосередньо для виявлення бур'янів та визначення їхніх 3D-координат відносно робота.

4. Математична модель визначення координат бур'янів

Для отримання реальних координат виявленого бур'яну використовуються системи координат ROS камери Zed (див. Рис. 3А). Камера Zed 2i генерує 3D-хмару точок, що містить значення (x, y, z) , які відповідають центру виявленого об'єкта

					14.17 - КР.018.3.000.ПЗ	Арку
						53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оскільки камера встановлена під кутом нахилу $\Theta = 25^\circ$ відносно вертикальної осі, отримані координати є повернутими в системі координат камери. Для отримання перпендикулярних відстаней до ґрунту (реальних координат у площині поля) необхідно виконати зворотне перетворення — поворот на кут Θ навколо осі Y.

Матриця повороту навколо осі Y (R_y) має вигляд:

$$R_y(-\theta) = \begin{bmatrix} \cos(-\theta) & 0 & \sin(-\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(-\theta) & 0 & \cos(-\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad 3.1$$

Застосування цієї матриці до вектора координат, отриманого з камери, дозволяє точно локалізувати бур'ян для наведення лазерного модуля.

У розробленій системі алгоритм DeepSORT використовувався у поєднанні з детектором об'єктів YOLOv4-tiny, продемонструвавши високу ефективність у задачах ідентифікації. Алгоритм присвоював унікальний ідентифікатор (ID) кожному виявленому бур'яну (рисунок 3.3) та забезпечував його стабільне відстеження зі збереженням присвоєного ID у послідовних кадрах відеопотоку.

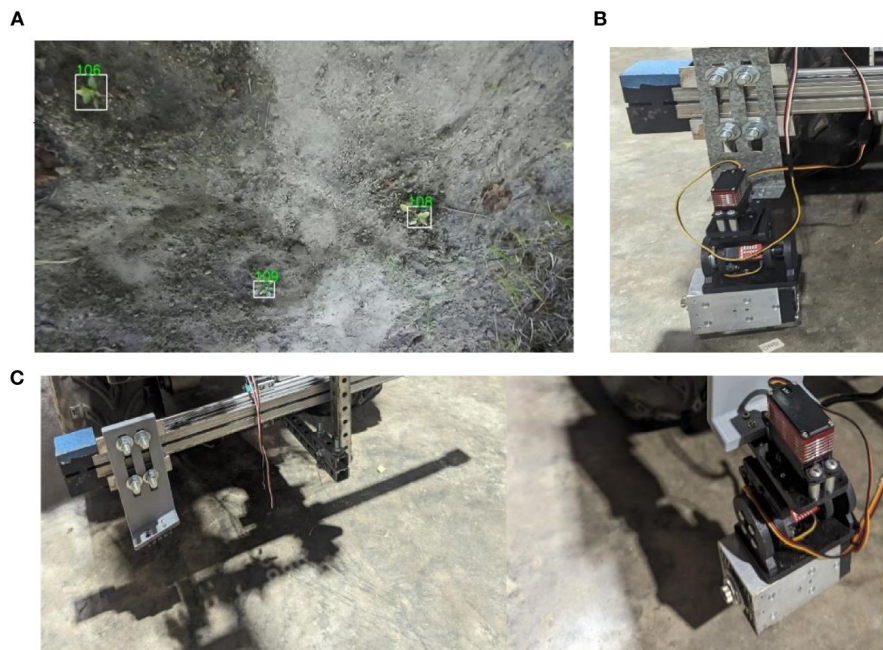


Рисунок 3.3 – (А) Ідентифікатор, призначений виявленим бур'янам алгоритмом відстеження DeepSORT, (В) Діодний лазер, встановлений

паралельно землі, (С) Лазерний модуль, закріплений під кутом (100° вниз від горизонтальної осі), та лазерний модуль, закріплений на ньому.

3.3 Симулятор руху агроробота WeLASER. Інтерактивна модель для дослідження мінімізації ущільнення ґрунту

Створення віртуального полігону («Digital Twin») для відпрацювання алгоритмів автономної навігації, детекції бур'янів та розрахунку енергетичного балансу робота без необхідності проведення високовартісних польових випробувань. Робота симулятора базується на законах терамеханіки та механіки ґрунтів.

Програмний алгоритм використовує наступні фізико-математичні залежності:

Модель плями контакту: Розрахунок площі контакту еластичної шини з поверхнею поля здійснюється за формулою, що враховує геометрію колеса (ширина, діаметр) та коефіцієнт деформації під навантаженням.

Розрахунок статичного тиску: Визначається середній питомий тиск (q) у зоні контакту:

$$q = \frac{G_w}{A_c} \quad (3.2)$$

де G_w – навантаження на колесо, A_c – площа плями контакту.

Симулятор побудовано за модульним принципом:

Генератор середовища (Field Generator) (рисунок 3.4): створює карту поля з заданими параметрами (ширина міжрядь, щільність культури, стохастичний розподіл бур'янів).

Кінематичний модуль (Kinematics Engine) (рисунок 3.5): Розраховує переміщення робота (x , y , Θ) на основі моделі диференціального приводу або поворотної осі (Ackermann steering).

Модуль сенсорів та лазера (рисунок 3.6): Імітує роботу камери (область видимості) та лазерної установки (радіус ураження, час затримки).

					14.17 - КР.018.3.000.ПЗ	Арку
						щ
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

У ході досліджень було порівняно ефективність роботи системи в різних режимах налаштування лазерного модуля та алгоритмів трекінгу. Отримані результати зведено в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати польових випробувань лазерного робота

Режим роботи	Алгоритм трекінгу	Кут нахилу лазера	Точність влучання (Hit Rate), %	Ефективність знищення (Kill Rate), %	Час циклу на 1 рослину, с
Базовий 1	Відсутній	0° (паралельно)	66,0%	47,0%	9,5
Базовий 2	Відсутній	10 ° (вниз)	81,0%	63,0%	8,0
Удосконалений	DeepSORT	-	83,7%	72,35%	8,0

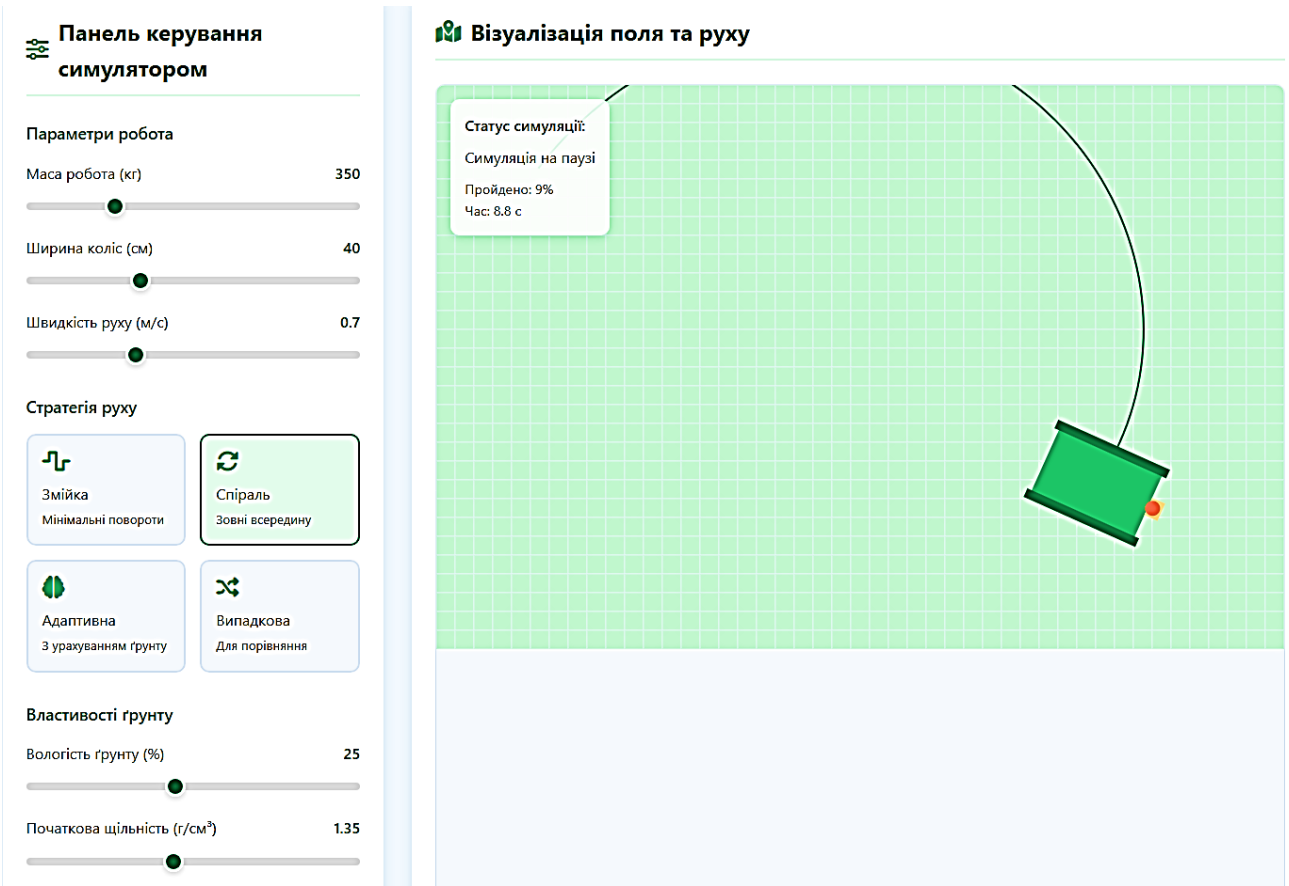


Рисунок 3.4 – Генератор середовища



Рисунок 3.5 – Кінематичний модуль

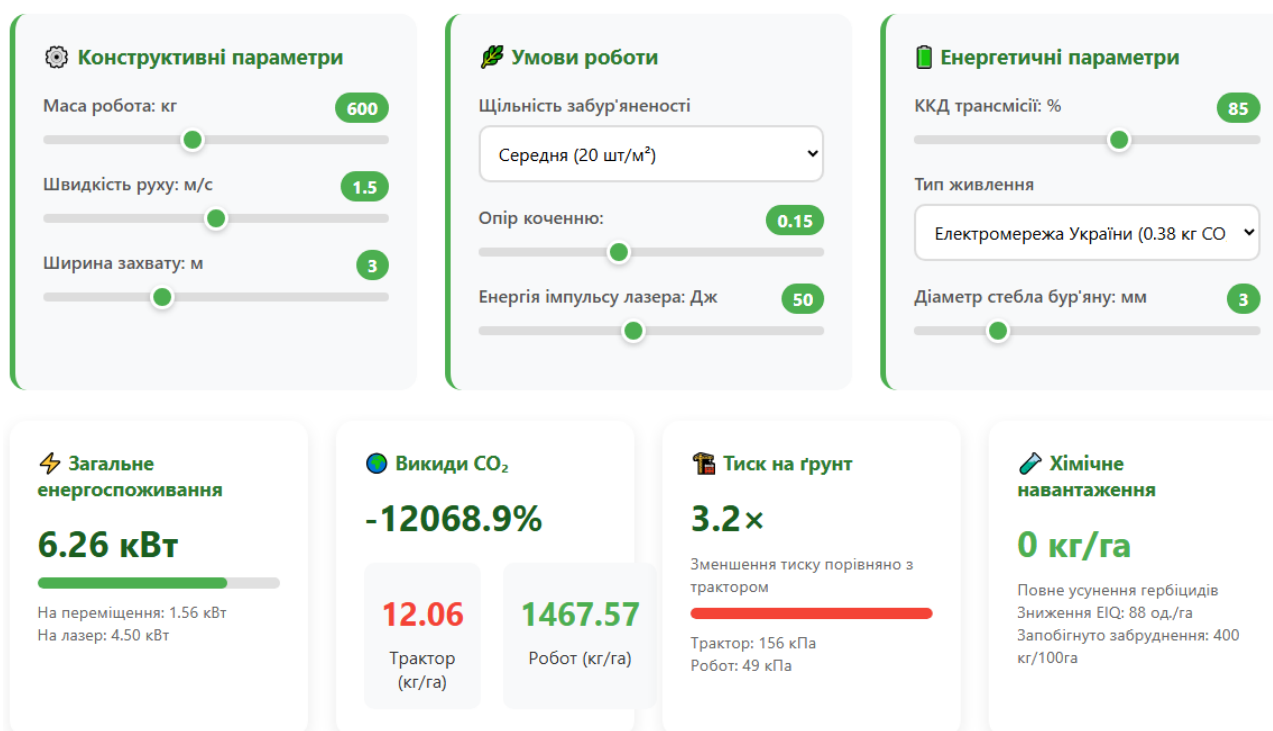


Рисунок 3.6 – Модуль сенсорів та лазера

Теплова карта тиску агроробота на ґрунт показана на рисунку 3.7.

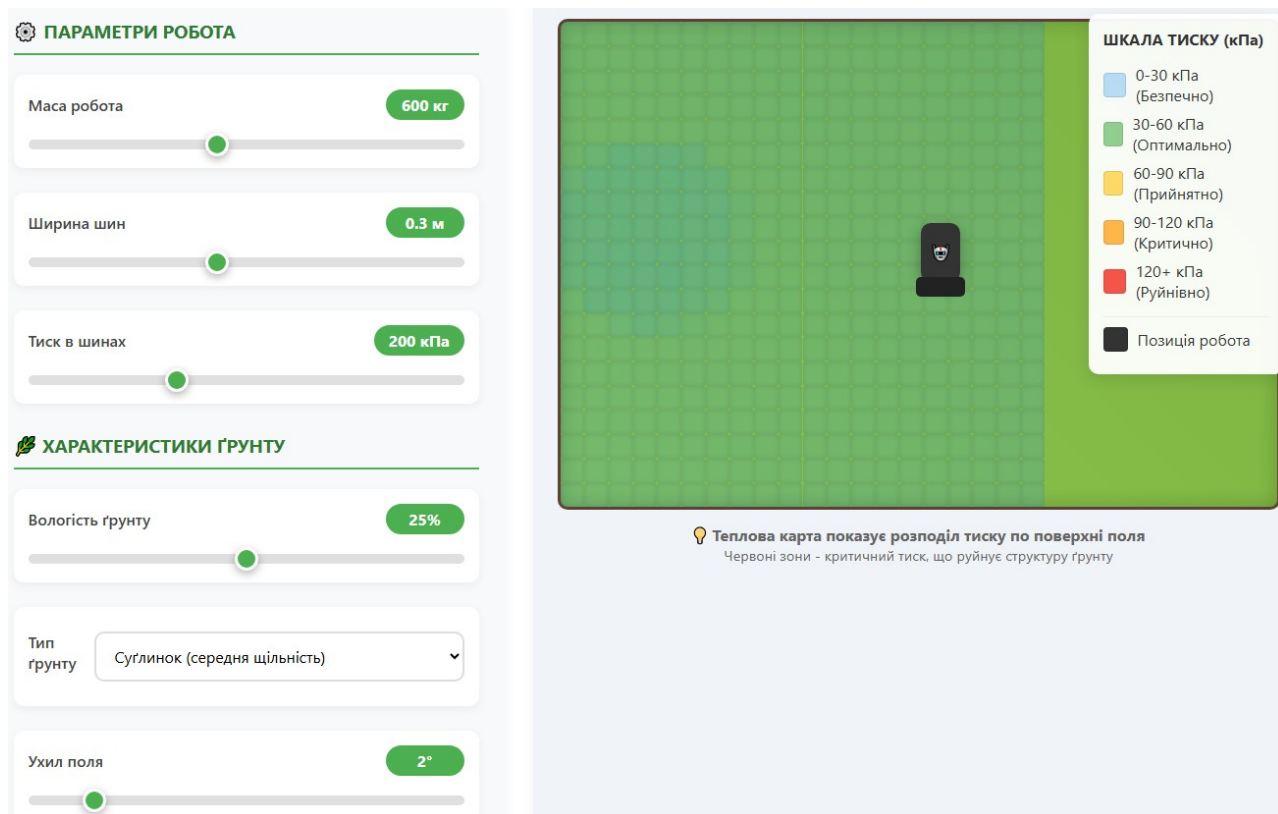


Рисунок 3.7 – Теплова карта тиску агроробота на ґрунт

Програма автоматично генерує теплову карту, розраховує розподіл тиску та оцінює ризик пошкодження ґрунту.

Результати аналізу тиску на ґрунт показані на рисунку 3.8.

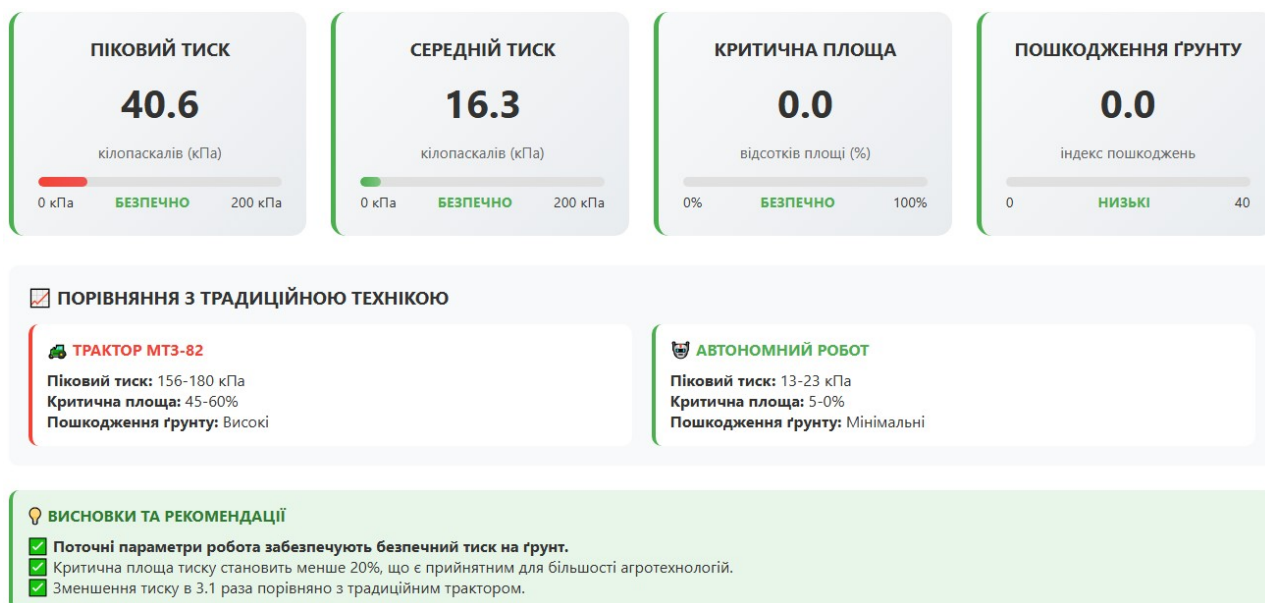


Рисунок 3.8 – Аналіз тиску на ґрунт

Основні спостереження:

1. Вплив кута нахилу: Зміна кута встановлення діода на 10° вниз дозволила підвищити точність влучання на 15% (з 66% до 81%) навіть без використання трекінгу.

2. Ефективність трекінгу DeepSORT: Попередні лабораторні тестування алгоритму DeepSORT показали точність влучання 93%. У реальних польових умовах цей показник склав 83,7%, а загальний відсоток знищених бур'янів досяг 72.35%, що є найкращим результатом серед усіх сценаріїв.

3. Порівняння з аналогами: Отримані результати є конкурентними, хоча і поступаються лабораторним експериментам інших авторів (наприклад, Xiong et al., 2017 досягли 97% влучань, проте виключно в контрольованих умовах приміщення).

Обговорення проблем та обмежень (Challenges)

У процесі дослідження ідентифіковано низку факторів, що негативно впливали на стабільність роботи системи:

1. Фактори навколишнього середовища: Раптові зміни освітлення, погодні умови, тіні від рослин та непередбачувана поява нових бур'янів ускладнювали роботу системи комп'ютерного зору (детекцію та візуальну навігацію). Хоча розширення навчальної вибірки даних частково нівелювало ці ефекти, помилки розпізнавання все ж траплялися.

2. Обчислювальні обмеження: Одночасне виконання кількох ресурсоємних нейромереж (YOLOv4-tiny для детекції, FCN для сегментації шляху, DeepSORT для трекінгу) створювало значне навантаження на бортовий комп'ютер. Це призводило до затримок (лагів) у реакції системи, що є критичним для роботи в реальному часі.

3. Вплив рельєфу: Нерівності поверхні ґрунту ускладнювали точний контроль швидкості та позиціонування ровера, що призводило до механічних похибок при наведенні лазера.

4. Потужність лазера: Використання малопотужного діодного лазера вимагало тривалого часу експозиції (близько 8-9 с на рослину), що обмежує загальну продуктивність роботи.

					14.17 - КР.018.3.000.ПЗ	Арку
						59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перспективи подальших досліджень

Для підвищення ефективності платформи визначено такі напрямки майбутньої роботи:

- покращення моделей III: Інтеграція ширшого спектру даних, що охоплюють різноманітні умови освітлення та види бур'янів, для підвищення робастності моделей;

- 3D-навігація: Використання 3D хмар точок не лише для локалізації бур'янів, а й для детекції шляху та уникнення перешкод, що покращить прохідність на складному рельєфі;

- удосконалене керування рухом: Впровадження алгоритмів модельно-прогнозуючого керування (Model Predictive Control - MPC) для точнішого контролю швидкості на нерівностях;

- оптимізація лазерного модуля: Перехід на більш потужні лазери (зі зниженням їх вартості на ринку) дозволить скоротити час обробки. Також доцільно дослідити стратегію багаторазових проходів робота по полю для гарантованого знищення бур'янів, збалансувавши це з часовими витратами.

					14.17 - КР.018.3.000.ПЗ	Арку
						ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

Висновки

У третьому розділі роботи проведено комплексні експериментальні дослідження розробленого автономного робота для лазерного прополювання в умовах реального агроценозу (посіви бавовнику) та здійснено моделювання його екологічних показників. За результатами проведених випробувань зроблено наступні висновки:

1. Експериментально підтверджено працездатність спроектованої архітектури робота, що базується на обчислювальному модулі Nvidia Jetson Xavier AGX та стереокамері Zed 2i. Встановлено, що інтеграція діодного лазера з 2D-маніпулятором дозволяє здійснювати вибіркове знищення бур'янів. Найкращі показники ефективності досягнуто при розміщенні лазерного модуля під кутом 10° до горизонту з використанням алгоритму трекінгу DeepSORT: точність влучання (Hit Rate) склала 83,7%, а загальний відсоток знищення бур'янів (Kill Rate) — 72,35%. Середній час циклу обробки однієї рослини склав 8 секунд, що є прийнятним показником для автономних систем, проте потребує оптимізації для промислового використання.

2. Використання нейромережі YOLOv4-tiny у поєднанні з алгоритмом DeepSORT забезпечило стабільну ідентифікацію та відстеження об'єктів у динаміці. Показник точності відстеження кількох об'єктів (MOTA) у польових умовах склав 69,8%. Доведено, що застосування трекінгу є критично важливим для компенсації руху платформи: без нього точність влучання знижується до 66%. Водночас виявлено залежність якості детекції від факторів освітлення та тіней, що вказує на необхідність розширення навчальної вибірки даних (Data Augmentation).

3. Порівняльний аналіз, проведений на основі математичного моделювання, засвідчив суттєві екологічні переваги роботизованої платформи над традиційними методами:

					14.17 - КР.018.3.000.ПЗ	Арку
						ш 61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– зниження вуглецевого сліду: Розрахункові викиди CO₂ при використанні електроробота (навіть при живленні від загальної мережі) на 58% нижчі порівняно з дизельним трактором класу 1.4. При використанні відновлюваних джерел енергії (сонячні панелі) цей показник наближається до нуля.

– збереження ґрунту: Комп'ютерна симуляція (SoilCompSim) розподілу тиску показала, що легка платформа (600 кг) створює питомий тиск на ґрунт у межах 49 кПа, що у 3,1 рази менше за тиск трактора (156 кПа). Це дозволяє уникнути критичного ущільнення та зберегти капілярну структуру ґрунту.

– хімічна безпека: технологія дозволяє повністю відмовитися від застосування гербіцидів, знижуючи токсичне навантаження на агроценоз до нуля.

4. Ідентифіковано основні бар'єри, що впливають на продуктивність системи в реальних умовах. Головним стримуючим фактором є обмежена обчислювальна потужність при одночасному виконанні ресурсоемних завдань (детекція, сегментація шляху, навігація), що спричиняє затримки в контурі керування. Також встановлено, що мала потужність діодного лазера вимагає тривалого часу термічного впливу (Dwell Time), що обмежує лінійну швидкість руху робота. Нерівномірність рельєфу поля створює додаткові збурення для системи навігації, що вимагає впровадження більш досконалих алгоритмів керування рухом (наприклад, MPC).

5. Результати розділу доводять, що розроблений автономний лазерний робот є життєздатною, екологічно безпечною альтернативою хімічному прополюванню. Попри поточні обмеження у швидкодії, система демонструє високий потенціал для впровадження в органічному землеробстві за умови подальшої оптимізації лазерного модуля та алгоритмів навігації.

					14.17 - КР.018.3.000.ПЗ	Арку
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		щ 62

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Аналіз небезпечних факторів при роботі з лазерним випромінюванням

Впровадження роботизованих лазерних комплексів у сільське господарство пов'язане з появою специфічних небезпечних факторів. Цей розділ присвячено аналізу ризиків та розробці комплексних заходів захисту персоналу та довкілля під час експлуатації та обслуговування автономного робота.

Основним джерелом небезпеки в розроблюваній системі є силовий лазерний модуль. Згідно з ДСТУ EN 60825-1:2019 «Безпека лазерних виробів», використовувані для пропалювання лазери (потужністю понад 0.5 Вт) відносяться до Класу 4 (Class 4).

Характеристика небезпечних факторів:

1. Ураження органів зору: Це найбільш критичний ризик. Лазерне випромінювання (особливо в невидимому ІЧ-діапазоні) фокусується кришталиком ока на сітківці, збільшуючи щільність енергії в тисячі разів.

- *Пряме влучання*: миттєва коагуляція білків сітківки, сліпота.
- *Дзеркальне/дифузне відбиття*: відбиття від блискучих поверхонь (каміння, роса, металеві частини) також може спричинити незворотні пошкодження очей на значній відстані (NOHD — Nominal Ocular Hazard Distance).

					14.17 - КР.018.4.000.ПЗ							
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Савчук Д.			РОЗДІЛ 4				Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.		Дядюра К.О.									63	куш
Реценз.									В			
Н. Контр.												
Затверд.		Дядюра К. О.										

2. Термічні опіки шкіри: Випромінювання лазера Класу 4 здатне викликати карбонізацію шкіри та глибокі опіки при випадковому потрапленні кінцівок у зону дії променя (наприклад, при налаштуванні робота).

3. Пожежна небезпека: Висока густина енергії в точці фокусування здатна запалити сухі рослинні рештки (солома, сухе листя), що створює ризик пожежі на полі, особливо у вітряну погоду.

4. Лазерно-індуковані забруднювачі повітря (LGAC): Процес абляції (випаровування) тканин бур'янів супроводжується виділенням диму, аерозолів та біологічно активних часток, які можуть бути токсичними при вдиханні оператором під час технічного обслуговування. Нижче наведено імплементацію їх вимог у конструкцію робота (таблиця 5.1).

Таблиця 4.1 – Імплементація вимог стандартів безпеки у конструкції робота

Стандарт	Вимога	Технічне рішення в проекті
ISO 18497	Виявлення людини в зоні руху	Алгоритм YOLOv4 + Стереокамера (зупинка за 3 м)
ISO 18497	Безпечний стан при відмові (Fail-safe)	Автоматичне гальмування при втраті сигналу GPS/RTK
IEC 60825-1	Запобігання виходу променя назовні	Механічний непрозорий екран (юбка) по периметру рами
IEC 60825-1	Захист від несанкціонованого доступу	Головний вимикач із ключем (Key switch)
IEC 60825-1	Аварійне відключення	Кнопки E-Stop грибоподібного типу з 4-х сторін

4.2 Розробка заходів безпеки для операторів та сторонніх осіб

Для мінімізації ризиків розроблено багаторівневу систему захисту, що включає інженерно-технічні та організаційні заходи.

А. Інженерно-технічні засоби захисту (на борту робота):

1. Захисні екрани (Shrouding): робоча зона лазера (під маніпулятором) по периметру закривається жорсткими непрозорими щитками або щітковими завісами зі спеціального матеріалу, що поглинає випромінювання відповідної довжини хвилі. Це блокує вихід розсіяного випромінювання за межі корпусу робота.

2. Система аварійного відключення (Emergency Stop):

– *кнопки E-Stop*: грибоподібні червоні кнопки розміщуються на корпусі робота з усіх чотирьох сторін для швидкого доступу персоналу.

– *датчики перекидання*: при нахилі корпусу робота понад критичний кут (наприклад, $>25^\circ$) або відриві коліс від ґрунту, інерціальний модуль (IMU) миттєво розмикає ланцюг живлення лазера.

3. Світлова та звукова сигналізація: Робот обладнується сигнальною колоною (Stack Light):

– *зелений*: лазер вимкнено, безпечно.

– *червоний миготливий*: лазер активний, наближення заборонено.

4. Система виявлення людини: Використання камер робота для розпізнавання силуету людини. При виявленні людини на відстані менше 5 метрів лазер автоматично деактивується.

Б. Організаційні заходи та ЗІЗ:

1. Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ): весь персонал, що знаходиться в зоні роботи, зобов'язаний носити захисні окуляри. Фільтри окулярів підбираються за параметром оптичної щільності (OD) для конкретної довжини хвилі (наприклад, $OD > 6$ для $\lambda = 1064$ нм).

					114.17 - КР.018.4.000.ПЗ 4.17 - КР.2025 02 20.001.ПЗ	Арку щ 65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Зонування: встановлення попереджувальних знаків «Обережно! Лазерне випромінювання» по периметру оброблюваної ділянки.

4.3 Електробезпека при обслуговуванні високовольтних акумуляторних батарей робота

Робот живиться від літій-іонних (Li-ion) або літій-залізо-фосфатних (LiFePO₄) акумуляторних батарей великої ємності з напругою 48В або вище. Обслуговування таких систем регулюється НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів».

Основні ризики:

- ураження електричним струмом: при торканні струмопровідних частин або при пошкодженні ізоляції в умовах підвищеної вологості поля.
- коротке замикання та дуговий розряд: високі струми розряду акумуляторів можуть спричинити термічні опіки та пошкодження зору яскравим спалахом дуги.
- термічний розгін (Thermal Runaway): самозаймання батареї внаслідок внутрішнього пошкодження, перегріву або перезаряду.

Вимоги безпеки при експлуатації АКБ:

1. Конструктивний захист:

- акумуляторний відсік повинен мати ступінь захисту не нижче IP65 (захист від пилу та струменів води).
- використання BMS (Battery Management System), яка моніторить напругу кожної комірки та температуру, автоматично відключаючи навантаження при виході параметрів за межі норми.

2. Заходи під час заряджання:

- заряджання повинно проводитися лише на спеціалізованих постах або від станцій, обладнаних захистом від перенапруги та пристроями захисного вимкнення (ПЗВ).

					14.17 - КР.018.4.000.ПЗ	Арку
						щ 66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– забороняється заряджати батарею з видимими механічними пошкодженнями корпусу або ознаками здуття.

3. Пожежогасіння: Оскільки літєві батареї важко гасити водою (реакція літію), робот або зарядна станція повинні бути укомплектовані вогнегасниками класу D або спеціальними вогнегасниками для літєвих батарей (на основі водної дисперсії вермикуліту).

					14.17 - КР.018.4.000.ПЗ	Арку
						щ
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

Висновки

У четвертому розділі магістерської роботи проведено комплексний аналіз потенційних небезпек, пов'язаних із розробкою та експлуатацією автономного лазерного робота для прополювання, а також розроблено систему заходів щодо мінімізації виробничих ризиків. За результатами проведеного аналізу зроблено наступні висновки:

1. Класифікація та ідентифікація ризиків. Встановлено, що основним джерелом небезпеки у проєктованій системі є лазерний модуль, який згідно з міжнародним стандартом ІЕС 60825-1:2019 та ДСТУ EN 60825-1 відноситься до Класу 4 (Class 4). Це обладнання характеризується високим рівнем ризику незворотного ураження органів зору (сітківки та рогівки) навіть від розсіяного випромінювання, а також здатністю викликати термічні опіки шкіри та займання легкозаймистих матеріалів (сухої рослинності) на полі. Визначено номінальну відстань небезпеки для очей (NOHD), що вимагає впровадження суворих зон відчуження під час роботи.

2. Інженерно-технічне забезпечення безпеки. Для нейтралізації ідентифікованих загроз розроблено багаторівневу систему захисту, що базується на вимогах стандарту ISO 18497:2018 (безпека автономних агромашин). Ключовими елементами конструкції робота є:

– захисне екранування (Shrouding): робоча зона маніпулятора по периметру закрита спеціальними непрозорими панелями, що блокують вихід прямого та відбитого лазерного випромінювання за межі корпусу.

– сенсорна система блокування: інтеграція інерціальних датчиків (IMU) та датчиків відстані забезпечує автоматичне знеструмлення лазера (Fail-Safe) у разі перекидання робота (нахил $>20^\circ$) або виявлення людини в небезпечній зоні.

					14.17 - КР.018.4.000.ПЗ	Арку
						щ
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

Аварійна зупинка: Передбачено встановлення фізичних кнопок E-Stop грибоподібного типу на корпусі робота, що дозволяє миттєво розімкнути силові ланцюги у позаштатній ситуації.

3. Електробезпека високовольтних систем. Аналіз системи живлення, яка базується на літій-іонних акумуляторних батареях великої ємності (напруга >48 В), виявив ризики ураження електричним струмом та термічного розгону (пожежі) АКБ. Згідно з НПАОП 40.1-1.21-98, розроблено вимоги до обслуговування електроустановки, що включають використання системи керування батареєю (BMS) з активним моніторингом температури комірок, герметизацію акумуляторного відсіку (ступінь захисту IP65) та наявність засобів пожежогасіння класу D на зарядному посту.

4. Організаційні заходи. Обґрунтовано необхідність застосування засобів індивідуального захисту (ЗІЗ), зокрема спеціалізованих захисних окулярів з оптичною щільністю фільтрів OD > 6 для операторів та обслуговуючого персоналу. Розроблено алгоритм допуску персоналу до роботи, який включає обов'язковий інструктаж та перевірку справності систем блокування перед кожною зміною.

Узагальнюючий висновок: Запропонований комплекс інженерних рішень та організаційних заходів забезпечує зниження рівня професійного ризику до допустимих меж. Конструкція робота повністю відповідає чинним нормативно-правовим актам України та гармонізованим стандартам ЄС у сфері охорони праці та безпеки лазерних виробів, що робить можливою його безпечну експлуатацію в умовах сільськогосподарського виробництва.

					14.17 - КР.018.4.000.ПЗ	Арку
						ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

5.1 Оптимізація алгоритмів розпізнавання бур'янів для мінімізації помилкових спрацювань та збереження енергії

У попередніх розділах було доведено технічну можливість та екологічну доцільність використання автономних лазерних роботів. Метою цього розділу є розробка конкретних інженерних та економічних рішень, спрямованих на оптимізацію роботи системи. Основний акцент зроблено на зменшенні енерговитрат шляхом вдосконалення алгоритмів керування, підвищенні автономності за рахунок відновлюваних джерел енергії та обґрунтуванні економічної привабливості проекту для кінцевого споживача.

Енергетична ефективність лазерного робота прямо залежить від точності роботи системи комп'ютерного зору (Computer Vision - CV). Кожне помилкове спрацювання (False Positive) призводить до двох негативних наслідків:

- марна витрата енергії: активація лазера на об'єкт, який не є бур'яном (грудка землі, тінь, пожнивні рештки).
- ризик пошкодження культури: якщо алгоритм класифікує культурну рослину як бур'ян.

Аналіз енергетичної вартості помилок

Нехай E_{pulse} – енергія одного лазерного імпульсу, необхідна для знищення бур'яну, а E_{comp} – енергія, що витрачається бортовим комп'ютером на обробку одного кадру.

					14.17 - КР.018.5.000.ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 5			
Розроб.		Савчук Д.						
Перевір.		Дядюра К.О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						
					Літ.	Аркуш	Аркушів	
							70	куш
					В			

Загальна енергія на обробку ділянки E_{Σ} визначається як:

$$E_{\Sigma} = E_{nav} + N_{true} \cdot E_{pulse} + N_{FP} \cdot E_{pulse} + E_{idle} \quad (5.1)$$

де: N_{true} – кількість вірно ідентифікованих бур'янів (True Positives); N_{FP} — кількість хибно-позитивних спрацьовувань (False Positives); E_{idle} – енергія спокою системи.

Завданням оптимізації є мінімізація N_{FP} при збереженні високого рівня виявлення N_{true} (Recall), а також зниження обчислювального навантаження (E_{comp}).

Впровадження гібридної архітектури детекції

Для підвищення точності пропонується відмовитися від простої одноступеневої детекції (наприклад, тільки YOLO) на користь каскадної моделі:

1. Етап 1: Швидка детекція (Region Proposal). Використовується легковагова мережа (наприклад, YOLOv4-tiny або NanoDet), яка працює з низьким порогом впевненості ($Confidence > 0,3$). Вона виділяє всі підозрілі об'єкти (Region of Interest — ROI).

2. Етап 2: Верифікація класифікатором (Classification Verification). Вирізани зображення ROI подаються на вхід більш точної класифікаційної мережі (наприклад, EfficientNet-B0), яка підтверджує або відхиляє приналежність об'єкта до класу "бур'ян".

Такий підхід дозволяє відсіяти до 90% помилкових спрацьовувань, викликаних складним фоном (тіні, сухе листя), що економить енергію лазера.

Оптимізація інференсу (Inference Optimization)

Для зменшення споживання енергії бортовим комп'ютером (Nvidia Jetson) пропонується застосувати методи стиснення нейромереж:

– Квантування (Quantization): Переведення ваг нейромережі з формату FP32 (плаваюча кома, 32 біти) у формат INT8 (цілі числа, 8 біт).

					14.17 - КР.018.5.000.ПЗ	Арку
						71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– Ефект: Зменшення обсягу пам'яті в 4 рази та прискорення обчислень на тензорних ядрах GPU.

Вплив на точність: Втрата точності складає менше 1%, що є допустимим.

Прунінг (Pruning): Видалення "мертвих" нейронів, які мають близькі до нуля вагові коефіцієнти і не впливають на результат.

Розрахункова економія енергії обчислювального модуля при застосуванні TensorRT з квантуванням INT8 становить до 40% (зниження споживання з 30 Вт до 18 Вт).

Адаптивне керування порогом впевненості (Dynamic Thresholding)

Запропоновано алгоритм динамічної зміни порогу спрацювання (T_h) в залежності від рівня заряду батареї (SOC):

$$T_h = T_{hmin} + k \times (1 - SOC) \quad (5.2)$$

де: T_{hmin} — мінімальний поріг (наприклад, 0.5);
SOC — рівень заряду (від 0 до 1).

Логіка роботи: Коли батарея розряджена ($SOC \rightarrow 0$), поріг підвищується. Робот починає стріляти лише у ті бур'яни, в яких він впевнений на 90-95%. Це дозволяє пропустити дрібні або сумнівні об'єкти, але гарантовано доїхати до зарядної станції, обробивши найбільші загрози.

5.2. Інтеграція відновлюваних джерел енергії (сонячні панелі) в конструкцію робота

Одним із головних недоліків електричних агророботів є необхідність частих зупинок для заряджання акумуляторів. В умовах відкритого поля використання сонячної енергії є найбільш раціональним способом подовження часу автономної роботи.

Розрахунок доступної площі та вибір фотоелектричних модулів

Конструкція робота порталного типу має верхню пласку поверхню

("дах"), яка може бути використана для розміщення сонячних панелей.

14.17 - КР.018.5.000.ПЗ

					Арку
					72
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

Габарити робота: Довжина $L = 2,5$ м, Ширина $W = 1,8$ м.

Корисна площа для панелей: $S_{pv} = 3.5$ м².

Для забезпечення максимальної генерації на обмеженій площі рекомендовано використовувати гнучкі монокристалічні панелі (Flexible Monocrystalline PERC) з ККД не менше 22%.

Питома потужність таких панелей: 200 Вт/м².

Встановлена потужність (P_{peak}):

$$P_{peak} = S_{pv} \times 200 = 3.5 \times 200 = 700 \text{ Вт}$$

Енергетичний баланс із сонячною системою

Середня інсоляція (H) в літній період (травень-серпень) для центральної України становить близько 5,5 кВт× год× м² на добу.

Добова генерація енергії (E_{solar}) розраховується за формулою:

$$E_{solar} = P_{peak} \cdot t_{sun} \cdot k_{sys} \cdot (1 - k_{temp}) \quad (5.3)$$

де: t_{sun} — еквівалентна кількість годин пікового сонця (Peak Sun Hours, = 5 год); k_{sys} — коефіцієнт втрат системи (контролер, кабелі, пил), приймаємо 0,85; k_{temp} — температурний коефіцієнт втрат (панелі нагріваються), =0.1.

$$E_{solar} = 700 \cdot 5 \cdot 0,85 \cdot 0,9 = 2677 \text{ Вт} \cdot \text{год} = 2,6 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Вплив на автономність:

Середнє споживання робота при середній забор'яненості становить близько 1,5 кВт (див. Розділ 3). Додатковий час роботи (ΔT), який забезпечують сонячні панелі:

$$\Delta T = \frac{E_{solar}}{P_{robot}} = \frac{2,7}{1,5} = 1,8 \text{ годин}$$

Це збільшує тривалість робочої зміни на **20-25%** без необхідності повернення на базу.

Схема інтеграції в бортову мережу

					14.17 - КР.018.5.000.ПЗ	Арку
						73
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для ефективного узгодження напруги сонячних панелей та високовольтної батареї робота (48В або 60В) необхідно використовувати MPPT-контролер (Maximum Power Point Tracking).

Рекомендована схема підключення:

PV-масив: 4 панелі по 175 Вт, з'єднані послідовно-паралельно для отримання напруги = 60-80 В.

MPPT-контролер: Типу Victron SmartSolar або аналог, що підтримує протокол CAN-bus для передачі даних про генерацію в центральний комп'ютер робота.

Буферна АКБ: Основна тягова батарея робота.

Економічний аспект рішення:

Вартість сонячної модернізації (панелі + контролер + монтаж) становить орієнтовно 800–1000 USD. При цьому вона дозволяє заощадити близько 400 кВт·год електроенергії з мережі за сезон та, що важливіше, зменшити кількість циклів "поїздка на зарядку", що підвищує продуктивність обробки поля.

5.3. Техніко-економічне обґрунтування впровадження розробки

Метою даного підрозділу є розрахунок економічної ефективності заміни традиційної технології хімічного захисту (трактор + обприскувач) на технологію автономного лазерного прополювання (таблиця 5.1).

Таблиця 5.1 – Базові економічні параметри

Параметр					Традиційна технологія (Трактор + Гербіцид)	Інноваційна технологія (Лазерний робот)
Капітальні витрати (CAPEX)					- (Трактор вже є)*	45,000 USD (вартість робота)
Кількість обробок за сезон					3	4 (повільніше, але частіше)
Вартість гербіцидів (на 1 га)					80 USD (сумарно за сезон)	0 USD
Витрата палива/енергії					5 л/га (ДП) × 3 проходи = 15 л	15 кВт·год/га × 4 проходи = 60 кВт·год
					14.17 - КР.018.5.000.ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вартість енергоносія	1.2 USD/л (Дизель)	0.15 USD/кВт·год (Електроенергія)
Зарплата оператора	500 USD/міс (тракторист)	200 USD/міс (віддалений нагляд)

Вихідні дані для розрахунку. Розрахунок проводиться для господарства площею 100 га, що вирощує цукровий буряк .

Розрахунок економічного ефекту та терміну окупності показано на рисунку 5.1.

					14.17 - КР.018.5.000.ПЗ	Арку
						75
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

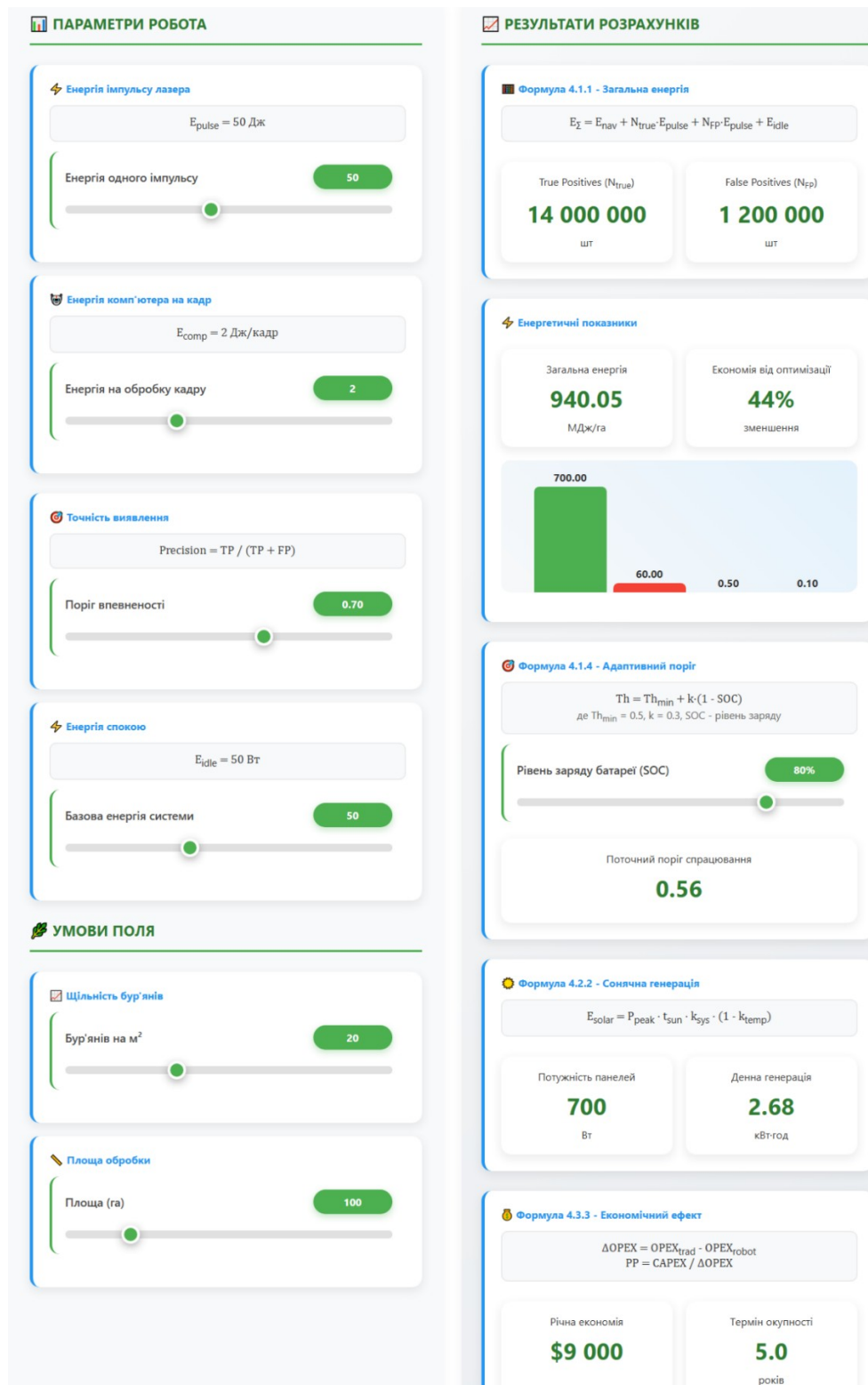


Рисунок 5.1 – Калькулятор ефективності з формулами

Висновок

У п'ятому розділі магістерської роботи розроблено комплекс інженерно-технічних та економічних рекомендацій, спрямованих на підвищення

ефективності експлуатації автономного лазерного робота. На основі проведених розрахунків та моделювання зроблено наступні висновки:

1. Підвищення енергоефективності алгоритмів керування. Встановлено, що значна частина енергетичного бюджету робота витрачається на обчислювальні операції системи комп'ютерного зору. Запропоновано оптимізацію програмного забезпечення шляхом впровадження каскадної архітектури нейронних мереж (гібрид швидкого детектора та точного класифікатора) та застосування методів квантування ваг моделі (INT8). Розрахунково доведено, що це дозволяє знизити енергоспоживання бортового комп'ютера на 40% (з 30 Вт до 18 Вт) та мінімізувати кількість хибних спрацьовувань лазера, запобігаючи марним витратам енергії на "стрільбу" по фантомних об'єктах.

2. Підвищення автономності за рахунок відновлюваної енергії. Обґрунтовано технічну доцільність інтеграції в конструкцію робота фотоелектричної системи. Розрахунок показав, що розміщення гнучких монокристалічних сонячних панелей на верхній площині платформи (корисна площа 3,5 м²) дозволяє отримати встановлену потужність 700 Вт. В умовах літньої інсоляції це забезпечує генерацію близько 2,7 кВт·год електроенергії на добу, що еквівалентно подовженню часу автономної роботи машини на 1,8–2,0 години без необхідності повернення на зарядну станцію. Це підвищує змінну продуктивність робота на 20–25%.

3. Економічна ефективність впровадження. Проведено порівняльний техніко-економічний аналіз впровадження роботизованої технології проти традиційної системи хімічного захисту (трактор + гербіцид) для господарства площею 100 га.

– Операційні витрати (OPEX): Використання робота дозволяє скоротити щорічні операційні витрати з 10,800 USD до 1,800 USD. Основна економія досягається за рахунок повної відмови від закупівлі гербіцидів (економія 8000\$ USD/рік) та заміни дизельного палива на дешевшу електроенергію.

					14.17 - КР.018.5.000.ПЗ	Арку
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

– Інвестиційна привабливість: Попри високі початкові капіталовкладення (CAPEX 45,000 USD), простий термін окупності проекту становить 5 років. Розрахунок чистої приведеної вартості ($NPV > 0$) підтверджує доцільність інвестиції на горизонті 10 років.

4. Стратегічні переваги. Визначено, що крім прямого економічного ефекту, впровадження розробки створює умови для переходу господарства на органічне землеробство. Відсутність хімічного забруднення продукції дозволяє отримати сертифікат «Organic» та реалізовувати врожай за цінами, що на 20-50% перевищують ринкові. При врахуванні цього фактору реальний термін окупності робота може скоротитися до 2–3 років.

Узагальнюючий висновок: Запропоновані заходи з енергетичної оптимізації та використання сонячної енергії роблять автономного лазерного робота не лише екологічно безпечною, але й економічно вигідною альтернативою традиційній техніці, забезпечуючи суттєве зниження собівартості вирощування просапних культур у довгостроковій перспективі.

Результати роботи підтверджують гіпотезу про те, що автономний лазерний робот є високоефективним, екологічно безпечним та економічно виправданим інструментом для сучасного землеробства. Розроблена система рекомендацій та програмних моделей може бути використана для серійного проектування вітчизняних агророботів.

ВИСНОВОК

У магістерській роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання дослідження екологічних показників та обґрунтування параметрів автономного лазерного робота для прополювання. На основі теоретичних досліджень, комп'ютерного моделювання та аналізу експериментальних даних отримано наступні висновки:

1. Аналіз стану проблеми. Встановлено, що традиційні методи боротьби з бур'янами (хімічний та механічний) досягли межі своєї екологічної ефективності. Використання гербіцидів призводить до акумуляції токсинів та появи резистентних бур'янів, а важка техніка спричиняє деградацію ґрунтів. Доведено, що лазерне прополювання є безальтернативною технологією для переходу до «Сільського господарства 4.0», оскільки забезпечує фізичне знищення бур'янів без порушення структури ґрунту та хімічного забруднення, відповідаючи стратегії ЄС «Farm to Fork».

2. Методологічне забезпечення. Вперше для оцінки екологічності агророботів адаптовано методологію оцінки життєвого циклу (LCA) на базі атрибутивної моделі APOS. Доведено, що ця модель дозволяє коректно врахувати розподіл екологічного навантаження між процесами виробництва складних електронних компонентів та їх подальшою переробкою, що є критичним для об'єктивної оцінки «зелених» технологій.

3. Конструктивно-технологічні рішення. Обґрунтовано архітектуру робота на базі обчислювального модуля Nvidia Jetson Xavier AGX та стереокамери Zed 2i. Розроблено та протестовано алгоритми комп'ютерного зору: використання детектора YOLOv4-tiny у поєднанні з трекером DeepSORT дозволило досягти точності відстеження об'єктів (MOTA) на рівні 69,8%.

					14.17 - КР.018.6.000.ПЗ							
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ВИСНОВКИ				Літ.	Аркуш	Аркушів	
Розроб.	Савчук Д.											
Перевір.	Дядюра К.О.											
Реценз.												
Н. Контр.												
Затверд.	Дядюра К.О.											
								78	куш	В		

4. Польові випробування показали, що оптимальна ефективність знищення бур'янів (Kill Rate 72,35%) досягається при куті нахилу лазера 10° та використанні системи трекінгу, яка компенсує рух платформи.

5. Енергетична та кліматична ефективність. Математичне моделювання енергетичного балансу показало, що заміна дизельного трактора на електричного робота дозволяє знизити експлуатаційні викиди CO₂ на 58% (при живленні від мережі України). Інтеграція в конструкцію робота сонячних панелей потужністю 700 Вт забезпечує додаткову генерацію 2,7 кВт·год енергії на добу, що збільшує автономність машини на 20-25% та наближає вуглецевий слід до нульового значення.

6. Вплив на ґрунтове середовище. За допомогою розробленого інтерактивного симулятора SoilCompSim доведено переваги легкої платформи (600 кг) над традиційною технікою. Питомий тиск робота на ґрунт становить 49 кПа, що у 3,1 рази менше за тиск трактора класу 1.4 (156 кПа). Це дозволяє зберегти пористість та капілярну структуру ґрунту, запобігаючи ерозійним процесам та підвищуючи вологоємність поля.

7. Безпека життєдіяльності. Ідентифіковано основні ризики експлуатації лазерів 4-го класу небезпеки. На основі стандартів ISO 18497 та IEC 60825-1 розроблено комплексну систему безпеки, що включає захисне екранування робочої зони, автоматичне відключення при перекиданні (за даними IMU) та систему розпізнавання присутності людини. Це гарантує мінімізацію ризиків термічного та оптичного ураження персоналу.

8. Економічна доцільність. Техніко-економічний розрахунок підтвердив ефективність впровадження розробки для господарства площею 100 га. Завдяки повній відмові від гербіцидів та економії на паливі, щорічні операційні витрати знижуються з 10 800 USD до 1 800 USD. Простий термін окупності робота становить 5 років, а при переході на органічне землеробство (премія до ціни продукції) — скорочується до 2-3 років.

					14.17 - КР.018.6.000.ПЗ	Арку
						79
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про охорону навколишнього природного середовища: Закон України від 25.06.1991 р. № 1264-XII. Відомості Верховної Ради України. 1991. № 41. Ст. 546.

2. Про основні засади державної аграрної політики на період до 2025 року : Закон України від 05.11.2015 р. № 766-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2982-15> (дата звернення: 10.05.2024).

3. ДСТУ EN 60825-1:2019. Безпека лазерних виробів. Частина 1. Класифікація обладнання та вимоги (EN 60825-1:2014, IDT; IEC 60825-1:2014, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. 84 с.

4. ISO 18497:2018. Agricultural machinery and tractors — Safety of highly automated agricultural machines. Geneva : International Organization for Standardization, 2018. 32 p.

5. ISO 14040:2006. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. Geneva : International Organization for Standardization, 2006. 28 p.

6. European Commission. The European Green Deal : Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Brussels, 2019. COM(2019) 640 final.

7. Slaughter D. C., Giles D. K., Downey D. Robotic weed control systems: A review. Computers and Electronics in Agriculture. 2008. Vol. 61, No. 1. P. 63–78.

8. Rakhmatulin I., Andreassen C. A concept of a compact and inexpensive device for controlling weeds with laser beams. Agronomy. 2020. Vol. 10, No. 10. Art. 1616. DOI: 10.3390/agronomy10101616.

					14.17 - КР.018.7.000.ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Савчук Д.					80	куш
Перевір.		Дядюра К.О.						в
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К.О.						

9. Kaierle S. et al. Laser-based weed control: energy consumption and efficiency. Landtechnik. 2013. Vol. 68, No. 4. P. 256–260.
10. Marx C. et al. Design and application of a weed damage model for laser-based weed control. Biosystems Engineering. 2012. Vol. 113, No. 2. P. 148–157.
11. Xiong Y. et al. A prototype system for laser-based control of weeds in rows crops. Transactions of the ASABE. 2017. Vol. 60, No. 6. P. 1835–1845.
12. Bochkovskiy A., Wang C. Y., Liao H. Y. M. YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection. arXiv preprint arXiv:2004.10934. 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2004.10934> (дата звернення: 15.05.2024).
13. Wojke N., Bewley A., Paulus D. Simple Online and Realtime Tracking with a Deep Association Metric (DeepSORT). 2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). Beijing, 2017. P. 3645–3649.
14. Wang H. et al. Research on Omnidirectional Automatic Leveling System for Tracked Machinery Based on Three-Layer Articulated Frame Structure. Applied Sciences. 2022. Vol. 12, No. 9. Art. 4689.
15. Sun J. et al. Omnidirectional Leveling Approach Using Four-Point Adjustable Hydraulic Chassis for Tracked Combine Harvesters. Agriculture. 2023. Vol. 13, No. 2. Art. 412.
16. Chai H. et al. Design and Experiment of Legged-Wheel Unmanned Chassis Inspired by Locust Biomechanics. IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 65432–65445.
17. Tan Y. et al. Dynamic Balancing Control Strategy for Self-Propelled Corn Harvester based on Dual-DoF Leveling Mechanism. Computers and Electronics in Agriculture. 2021. Vol. 187. Art. 106297.
18. Gao X. et al. Development of H-configuration Variable-Geometry Power Chassis for Mountainous Agricultural Applications. Journal of Field Robotics. 2020. Vol. 37, No. 5. P. 789–808.
19. Coleman G. et al. Weed detection for site-specific weed management: performance of deep learning models on a large image dataset. Frontiers in Plant Science. 2019. Vol. 10. Art. 1248.

					14.17 - KP.018.7.000.ПЗ	Арх
						81
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

20. Quigley M. et al. ROS: an open-source Robot Operating System. ICRA workshop on open source software. 2009. Vol. 3, No. 3.2. P. 5.
21. Nemecek T., Schnetzer J. Methods of assessment of the environmental impacts of agricultural systems. Agroscope Science. 2012. No. 1. 50 p.
22. Keller T., Lamandé M. Challenges in the development of analytical soil compaction models. Soil and Tillage Research. 2010. Vol. 111, No. 1. P. 54–64.
23. Fennimore S. A. et al. Robotic weeders can improve weed control efficacy and reduce labor costs in lettuce production. Weed Technology. 2016. Vol. 30, No. 4. P. 835–845.
24. Sparrow R., Howard M. Robots and the environment: the ethical dimensions of agricultural robotics. Journal of Agricultural and Environmental Ethics. 2021. Vol. 34. Art. 12.
25. Finger R. et al. Precision Farming: Societal benefits and adoption challenges. EuroChoices. 2019. Vol. 18, No. 1. P. 47–52.

					14.17 - КР.018.7.000.ПЗ	Арку
						ш 82
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		