

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 «першого (бакалаврського) рівня»
освітньої програми «Агроінженерія»
за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

РОЗРОБКА МОБІЛЬНОГО РОБОТА ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ПОСІВІВ

Науковий керівник: професор, д.т.н.

_____ Костянтин ДЯДЮРА

Рецензент: к.т.н.

_____ Олександр ПАНАСЮК

Виконав здобувач першого (бакалаврського) рівня
вищої освіти очної форми навчання освітньо-
професійної програми «Агроінженерія»
спеціальності 208 «Агроінженерія»
Артем ЖИДЕНКО

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

_____ Артем ЖИДЕНКО

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

« ____ » _____ 2026 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ

Артем ЖИДЕНКО

1. Тема кваліфікаційної роботи:

«Розробка мобільного робота для моніторингу стану посівів»

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

затверджені наказом ректора Одеського державного аграрного університету № 186 від « 05 » ____ 09 ____ 2025 р.

2. Строк подання здобувачем кваліфікаційної роботи 15 червня 2026 року.

3. **Об'єкт дослідження** — технологічний процес автоматизованого моніторингу стану посівів та параметрів ґрунту із застосуванням наземних робототехнічних комплексів.

4. **Предмет дослідження** — конструктивно-технологічні параметри та алгоритми навігації і збору просторово-розподілених даних мобільним роботом-агроскаутом.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

5.1. Теоретико-методичний розділ: виконати аналітичний огляд літературних джерел за темою роботизованих платформ для моніторингу сільгоспугідь; сформулювати технічні вимоги до мобільного робота (маса, швидкість, точність, спектральні канали, автономність); визначити критерії оцінювання ефективності роботи платформи.

5.2. Дослідницько-аналітичний розділ: виконати порівняльний аналіз існуючих зразків сільськогосподарських роботів та систем моніторингу; оцінити небезпечні та шкідливі фактори при експлуатації платформи (механічні,

електричні, пожежні, ергономічні); проаналізувати екологічний вплив традиційного та диференційованого внесення пестицидів; дослідити ринкову вартість основних компонентів та визначити кошторис капітальних витрат на створення дослідного зразка.

5.3. Проєктно-рекомендаційний розділ: розробити компонувальну схему роботизованої платформи; виконати тяговий розрахунок та обрати мотор-колеса з диференціальним приводом; спроектувати оптичну систему мультиспектральної камери та розрахувати просторову роздільну здатність.

6. Орієнтовний перелік графічного та табличного матеріалу

6.1. До теоретико-методичного розділу: таблиця порівняння характеристик існуючих роботизованих платформ; схема спектральних каналів мультиспектральної камери з позначенням довжин хвиль та цільових індексів (NDVI, CI); блок-схема принципу роботи RTK-GPS (базова станція → ровер → корекція позиції); узагальнена схема архітектури системи «сенсори – контролер – виконавчі механізми».

6.2. До дослідницько-аналітичного розділу: зведена таблиця небезпечних факторів та заходів їх мінімізації (механічні, електричні, пожежні, ергономічні); графік порівняння витрат на ручний та автоматизований моніторинг (діаграма); діаграма структури капітальних витрат; таблиця аналізу чутливості NPV та терміну окупності за різних сценаріїв.

6.3. До проєктно-рекомендаційного розділу: 3D-модель несучої рами в аксонометрії; компонувальне креслення платформи (види зверху, збоку, спереду) з розмірами та розташуванням основних вузлів; структурна схема системи керування (ієрархічна трирівнева архітектура).

7. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: повна маса платформи (з корисним навантаженням) – до 250 кг; тип рушія – два електричні мотор-колеса (BLDC) потужністю 600 Вт кожне, диференціальний привід; максимальна швидкість – до 2,0 м/с, робоча – до 1,2 м/с; максимальний кут підйому (схил) – не менше 12°; джерело живлення – літій-іонна батарея 48 В ємністю 40–60 А·год, з системою BMS та зарядним пристроєм 48 В / 10 А; система позиціонування – RTK-GPS з точністю 1,5–2,5 см (модуль u-blox ZED-F9P).

9. Дата видачі завдання: « 27 » 09 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	Лютий 2026	0,25	

2.	Отримання завдання і складання змісту кваліфікаційної роботи	Лютий 2026	0,25	
3.	Складання календарного плану – графіку з підготовки кваліфікаційної роботи	Березень 2026	0,5	
4.	Написання першого розділу кваліфікаційної роботи	Березень 2026	2,0	
5.	Вивчення матеріалів базових підприємств	Квітень 2026	1,0	
6.	Написання другого розділу кваліфікаційної роботи	Квітень 2026	2,0	
7.	Написання третього розділу кваліфікаційної роботи (	Травень 2026	3,0	
8.	Написання висновків, списку літератури	Травень 2026	0,5	
9.	Перевірка кваліфікаційної роботи науковим керівником	Червень 2026		
10.	Доопрацювання роботи після зауважень наукового керівника	Червень 2026	0,5	
11.	Підготовка до захисту: доповідь, ілюстративний матеріал	Червень 2026	0,5	
12.	Подання кваліфікаційної роботи на кафедру	15 червня 2026		
13.	Перевірка кваліфікаційної роботи на оригінальність	Червень 2026		
14.	Попередній захист на кафедрі	Червень 2026		
15.	Рецензування кваліфікаційної роботи	Червень 2026		
16.	Захист кваліфікаційної роботи	18-20 червня 2026	1,5	
	Загальна кількість		12	

Здобувач ОС бакалавр

_____ Артем ЖИДЕНКО

Науковий керівник

_____ Костянтин ДЯДЮРА

Гарант ОП

_____ Дмитро ДОМУЩІ

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: складається з 87 сторінок, 5 розділів, 15 рисунків, 18 таблиць, 23 літературних джерел.

Об'єкт дослідження: технологічний процес автоматизованого моніторингу стану посівів та параметрів ґрунту із застосуванням наземних робототехнічних комплексів.

Мета роботи: підвищення ефективності та оперативності збору просторово-розподілених даних про стан агробіоценозу шляхом розробки автономного мобільного робота-монітора з інтегрованими вимірювальними та оптичними сенсорними системами.

Методи дослідження: теоретична механіка та кінематика (для моделювання руху та маневреності колісного шасі); методи цифрової обробки зображень (для обчислення вегетаційних індексів); методи математичного моделювання та комплексування даних (Sensor Fusion); 3D-моделювання у середовищі CAD; методи техніко-економічного аналізу.

Отримані результати: У роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання щодо автоматизації процесу збору агрономічних даних. Обґрунтовано кінематичні параметри 4-колісної платформи з незалежним електричним приводом, оптимізованої для руху в міжряддях просапних культур (700 мм) із збереженням захисної зони рослин. Розроблено математичне та алгоритмічне забезпечення обчислення біометричних показників рослин (зокрема індексу NDVI) за допомогою мультиспектральних камер та комплексування цих даних із координатами високоточного модуля RTK-GNSS для побудови цифрової карти поля. Здійснено конструкційну розробку, підбір компонентної бази (обчислювачі, оптичні камери, датчики вологості ґрунту, телеметричні модулі) та просторове 3D-компонування робота-скаута. Виконано розрахунок економічної ефективності, що доводить рентабельність заміни ручного скаутингу автоматизованою платформою. Сформовано комплекс інженерних рішень із безпеки експлуатації відповідно до міжнародного стандарту ISO 18497.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: МОБІЛЬНИЙ РОБОТ, АГРОСКАУТИНГ, ТОЧНЕ ЗЕМЛЕРОБСТВО, КОМП'ЮТЕРНИЙ ЗІР, МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ, ВЕГЕТАЦІЙНИЙ ІНДЕКС (NDVI), АВТОНОМНА НАВІГАЦІЯ.

					14.17 - КР.003.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РЕФЕРАТ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Жиденко А.А.						
Перевір.		Дядюра К. О.					5	1
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						

ЗМІСТ

	С
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ	11
МОНІТОРИНГУ АГРОБІОЦЕНОЗІВ.....	
1.1 Агротехнічні вимоги до збору даних про стан посівів та ґрунту в системі точного землеробства.....	11
1.2 Порівняльний аналіз аерокосмічного моніторингу (супутники, БПЛА) та наземних роботизованих систем (UGV).....	18
1.3 Огляд існуючих конструкцій роботів-скаутів та їх сенсорного оснащення.....	21
Висновок.....	26
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ	27
ПЛАТФОРМИ ТА АЛГОРИТМІВ ОБРОБКИ ДАНИХ.....	
2.1 Кінематика руху платформи та алгоритми навігації за маршрутом скаутингу.....	27
2.2 Математичні моделі обчислення вегетаційних індексів (NDVI, SAVI) на основі даних мультиспектральних камер.....	32
2.3 Алгоритмічне забезпечення об'єднання даних (Sensor Fusion) систем позиціонування та оптичних сенсорів для побудови цифрової карти поля.	37
Висновки.....	44
РОЗДІЛ 3 ІНЖЕНЕРНИЙ РОЗРАХУНОК ТА ПРОЄКТУВАННЯ	45
КОМПОНЕНТІВ РОБОТИЗОВАНОЇ ПЛАТФОРМИ	
3.1 Розрахунок необхідної потужності тягових мотор-колів та вибір системи диференціального приводу	48

					14.17 - КР. 003.0.000.ПЗ									
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата										
Розроб.		Жиденко А.А.			ЗМІСТ				Літ.		Аркуш		Аркушів	
Перевір.		Дядюра К. О.									6		2	
Реценз.														
Н. Контр.														
Затверд.		Дядюра К. О.												

3.2 Обґрунтування параметрів оптичної системи мультиспектральної камери та розрахунок просторової роздільної здатності	49
3.3 Розробка структурної схеми системи керування на базі мікроконтролера та інтеграція RTK-GPS і лідарних сенсорів навігації ...	51
3.4 Тривимірне моделювання несучої рами та загальна компоновка мобільного робота	53
Висновки.....	58
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	60
4.1 Аналіз небезпечних факторів під час експлуатації та обслуговування безпілотних наземних транспортних засобів	60
4.2 Електробезпека та заходи захисту при роботі з літій-іонними акумуляторними батареями високої ємності	64
4.3 Екологічне значення використання автономних роботів для точкового картографування бур'янів та оптимізації внесення пестицидів	67
Висновки	72
РОЗДІЛ 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ІННОВАЦІЙНОГО ПРОЄКТУ	73
5.1 Розрахунок прямих капітальних витрат на проектування, закупівлю електронних компонентів та виготовлення робота	73
5.2 Визначення операційної економії за рахунок автоматизації процесу моніторингу та зменшення використання ручної праці скаутів.....	76
5.3 Оцінка загальної економічної ефективності використання розробленого робота та розрахунок терміну окупності проєкту	79
Висновок.....	82
ВИСНОВОК.....	84
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	85

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний розвиток агропромислового комплексу неможливий без впровадження концепції прецизійного (точного) землеробства, яка базується на прийнятті управлінських рішень на основі об'єктивних просторово-розподілених даних про стан поля. Традиційний підхід до моніторингу посівів (агроскаутинг), що виконується агрономом вручну, є надзвичайно трудомістким, суб'єктивним та не здатним забезпечити суцільне покриття великих площ у стислі агротехнічні терміни. Останніми роками для збору даних активно застосовуються безпілотні літальні апарати (БПЛА) та аерокосмічне зондування. Проте ці методи мають суттєві обмеження: критичну залежність від погодних умов, низьку роздільну здатність супутникових знімків у хмарну погоду та, найголовніше, нездатність оптичних сенсорів проникнути під щільний покрив листя (крону) на пізніх стадіях вегетації для оцінки стану стебла та поверхневого шару ґрунту. Ефективним вирішенням цієї проблеми є застосування автономних наземних безекіпажних платформ (Unmanned Ground Vehicles — UGV). Роботи-агроскаути здатні безперервно переміщуватися безпосередньо в міжряддях, здійснюючи мультиспектральний аналіз рослин із близької відстані, вимірюючи контактні та безконтактні показники ґрунту і формуючи високоточні цифрові карти поля. З огляду на це, розробка та інженерне обґрунтування параметрів вітчизняного мобільного робота для моніторингу стану посівів є актуальним науково-прикладним завданням, що має значний потенціал для підвищення ефективності агровиробництва.

Мета дослідження полягає у підвищенні ефективності та оперативності збору просторово-розподілених даних про стан агробіоценозу шляхом розробки автономного мобільного робота-монітора з інтегрованими вимірювальними та оптичними сенсорними системами.

					14.17 - КР. 003.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Жиденко А.А.			ВСТУП		Літ.	Аркуш
Перевір.		Дядюра К. О.						Аркушів
Реценз.							8	2
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						

Для досягнення поставленої мети сформульовано такі завдання дослідження:

- Проаналізувати сучасні вимоги до систем точного землеробства та обґрунтувати технологічні переваги використання наземних робототехнічних комплексів для скаутингу посівів.
- Обґрунтувати кінематичну модель руху колісної платформи та розробити алгоритми маршрутизації для забезпечення повного покриття площі поля з урахуванням ширини міжрядь.
- Розробити математичні моделі обчислення біометричних показників рослин (вегетаційних індексів типу NDVI) на основі алгоритмів обробки зображень із мультиспектральних камер.
- Сформулювати алгоритмічне забезпечення процесу комплексування даних (Sensor Fusion) для об'єднання координат систем позиціонування (RTK-GNSS) із показниками оптичних та ґрунтових датчиків.
- Здійснити конструкційну розробку, 3D-моделювання та просторове компонування базових вузлів робота-скаута.
- Виконати розрахунок техніко-економічної ефективності впровадження розробленої платформи та визначити заходи з безпеки її експлуатації.

Об'єкт дослідження — технологічний процес автоматизованого моніторингу стану посівів та параметрів ґрунту із застосуванням наземних робототехнічних комплексів.

Предмет дослідження — конструктивно-технологічні параметри та алгоритми навігації і збору просторово-розподілених даних мобільним роботом-агроскаутом.

Методи дослідження. У роботі використано комплексний підхід, що базується на застосуванні методів: теоретичної механіки та кінематики – для моделювання руху шасі; методів цифрової обробки сигналів та комп'ютерного зору – для розрахунку вегетаційних індексів; методів теорії ймовірностей та комплексування даних – для побудови цифрових карт поля; системного аналізу

					14.17 - КР. 003.0.000 ПЗ	Аркуш
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та 3D-проектування (у середовищі CAD) – для розробки конструкції платформи; методів техніко-економічного аналізу – для оцінки рентабельності проекту.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в удосконаленні математичної моделі комплексування різнорідних телеметричних даних (зображень із мультиспектральних камер, показників датчиків ґрунту та координат RTK-GNSS) у єдину просторово-розподілену цифрову карту поля в режимі реального часу, з урахуванням кінематичних особливостей руху малогабаритної платформи в умовах міжрядь просапних культур.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблена 3D-модель, структурні та алгоритмічні схеми, а також підібрана компонентна база дозволяють створити діючий прототип вітчизняного робота-агроскаута. Впровадження розробки у виробничий процес сільськогосподарських підприємств дозволить скоротити витрати на проведення моніторингу та підвищити точність визначення осередків хвороб або нестачі вологи, що є основою для подальшого диференційованого внесення добрив і засобів захисту рослин.

					14.17 - КР. 003.0.000 ПЗ	Аркуш
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ МОНІТОРИНГУ АГРОБІОЦЕНОЗІВ

1.1 Агротехнічні вимоги до збору даних про стан посівів та ґрунту в системі точного землеробства

Сучасна парадигма ведення сільського господарства базується на концепції точного (прецизійного) землеробства (Precision Agriculture, PA). На відміну від традиційної екстенсивної системи, яка передбачає усереднений підхід до обробітку всього поля (однакова норма висіву, внесення добрив, зрошення), точне землеробство розглядає агробіоценоз як гетерогенну (неоднорідну) систему з яскраво вираженою просторово-часовою варіабельністю. Основою для прийняття будь-яких управлінських рішень (диференційоване внесення засобів хімізації, локальне зрошення, точкове застосування пестицидів, змінна норма висіву) є безперервний збір якісних, просторово-прив'язаних даних. Ефективність функціонування роботизованих систем моніторингу (агроскаутів) безпосередньо залежить від того, наскільки зібрана ними інформація відповідає суворим агротехнічним вимогам, які висуваються до якості, точності, своєчасності, повноти та достовірності даних про стан системи «ґрунт – рослина – атмосфера» (рисунок 1.1).

Концепція просторової та часової неоднорідності агробіоценозу як базова передумова для формування вимог до моніторингу.

Формування агротехнічних вимог до збору даних починається з фундаментального розуміння природи неоднорідності поля.

					14.17 - КР. 003.1.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Жиденко А.А.			РОЗДІЛ 1		Літ.	Аркуш
Перевір.		Дядюра К. О.						Аркушів
Реценз.							11	12
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						

Виділяють два основні типи варіабельності, які повинна фіксувати сенсорна апаратура мобільного робота, а також їхню внутрішню структуру:

1. *Просторова неоднорідність (Spatial Variability)*: Зміна параметрів ґрунту (рельєф, гранулометричний склад, вміст органічної речовини, рівень рН, вологість, вміст макро- та мікроелементів) та стану рослин (густота стояння, біомаса, індекс площі листя, висота, фенологічна фаза) у межах одного масиву. Просторова варіабельність може мати:

- Систематичний характер (пов'язаний з рельєфом, типами ґрунтів);
- Випадковий характер (локальні вогнища хвороб, нерівномірність внесення добрив попередниками).
- Вимога: Збір просторових даних вимагає високоточного геопозиціонування кожного вимірювання з похибкою, що не перевищує 2-5 см (режим RTK).



Рисунок 1.1 – Парадигма точного (прецизійного) землеробства

2. *Часова неоднорідність (Temporal Variability)*: Зміна показників поля протягом вегетаційного періоду під впливом абіотичних (температура, опади, інсоляція) та біотичних (розвиток хвороб, шкідників, конкуренція з бур'янами) факторів, а також у зв'язку з фенологічними фазами розвитку культури.

Вимога: Забезпечення суворої періодичності моніторингу (скаутингу) з прив'язкою до критичних фаз розвитку культури (наприклад, фаза 3-5 листків для кукурудзи, цвітіння для соняшнику). Частота моніторингу може варіюватися від щоденної (під час стресових періодів) до щотижневої.

Згідно з сучасними агротехнічними стандартами (наприклад, ISO 25119-2 щодо точності даних для диференційованого внесення), крок дискретизації вимірювань (відстань між сусідніми точками збору даних) для мікрорівневого аналізу не повинен перевищувати 0,5–1,0 метра. Це є недосяжним для традиційного супутникового моніторингу (типовий GSD Sentinel-2 — 10 м) і важкореалізованим для аеромоніторингу з дронів через висотні обмеження, але ідеально відповідає можливостям наземних роботизованих платформ (UGV).

Вимоги до моніторингу біометричних та фітопатологічних показників посівів.

Основним об'єктом моніторингу є культурна рослина як цільовий біологічний об'єкт. Дані, які збирає роботизована платформа, повинні об'єктивно та кількісно відображати фізіологічний стан посівів. До ключових агротехнічних вимог збору даних про рослинність належать:

1. Визначення густоти стояння та рівномірності сходів:

– Система технічного зору робота повинна фіксувати кількість рослин на погонний метр рядка та виявляти «просіви» (ділянки з відсутністю або зрідженими сходами).

– Агровимога: Точність підрахунку має становити не менше **95%** за нормальної густоти стояння.

2. Оцінка біометричних параметрів:

– Включає вимірювання висоти рослин, товщини стебла (для зернових та просапних), індексу площі листя (Leaf Area Index, LAI) та біомаси.

– Для просапних культур (кукурудза, соняшник) вимірювання висоти має проводитися з похибкою не більше $\pm 2...5$ см на всьому діапазоні вимірювань (до 2-3 м).

3. Моніторинг хлорофільного фотосинтетичного потенціалу:

					14.17 - КР. 003.1.000 ПЗ	Аркуш
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– Виконується за допомогою мультиспектральних камер (типові канали: Red (660 нм), Green (550 нм), Blue (450 нм), NIR (850 нм), Red-Edge (720 нм)).

– Агротехнічною вимогою є здатність системи автоматично розраховувати спектральні вегетаційні індекси. Основним є нормалізований відносний індекс рослинності (NDVI), чутливий до активного фотосинтезуючого біомасу:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (1.1)$$

де ρ_{NIR} — коефіцієнт відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні (760–900 нм); ρ_{RED} — коефіцієнт відбиття у червоному діапазоні (630–690 нм). *Примітка: NDVI насичується при високому LAI, тому для густих посівів рекомендується використовувати індекси NDRE (Normalized Difference Red Edge) або GNDVI.*

4. Фітопатологічний контроль та виявлення шкідників:

– Збір даних повинен забезпечувати візуальну ідентифікацію некрозів, хлорозів, борошнистої роси, іржі, а також механічних пошкоджень листя (від комах-фітофагів).

– Вимога до просторової роздільної здатності: середня відстань на місцевості (Ground Sample Distance, GSD) при наземному моніторингу повинна становити 0,5...1,0 мм/піксель. Це дозволяє виявляти початкові стадії розвитку хвороб (наприклад, пустули стеблової іржі) безпосередньо під кроною — у нижньому ярусі листя, що недоступне для аерознімання.

5. Ідентифікація забур'яненості:

○ Система повинна фіксувати не лише факт наявності бур'янів, але й їхній видовий склад (злакові, дводольні, паразитичні), фазу розвитку та щільність на 1 м². Це критично для прийняття рішення про диференційоване внесення гербіцидів.

Вимоги до контролю фізико-хімічних параметрів ґрунту (таблиця 1.1).

Ґрунт є базовим середовищем, від стану якого залежить засвоєння рослинами поживних речовин. Мобільний робот-скаут, оснащений контактними

					14.17 - КР. 003.1.000 ПЗ	Аркуш
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та безконтактними датчиками, повинен збирати дані, що відповідають таким агротехнічним критеріям:

Таблиця 1.1 – Нормативні агротехнічні вимоги до точності вимірювання параметрів агробіоценозу наземними роботизованими платформами

Показник моніторингу	Метод / Сенсор збору даних	Необхідна точність / Роздільна здатність	Діапазон вимірювання
Географічні координати об'єкта	RTK-GNSS модуль (L1/L2)	$\pm 2...5$ см (горизонталь)	Глобальний
Температура ґрунту / повітря	ІЧ-термометр / термістор	$\pm 0,5$ °C	-10...+50 °C
Об'ємна вологість ґрунту	Ємнісний (FDR) або TDR датчик	$\pm 2...3$ % VWC	0...60 % VWC
Електропровідність ґрунту (ЕСа)	Індукційна котушка або гальванічні колеса	± 5 % (або 1 мСм/см)	0...200 мСм/см
Активна кислотність (рН)	Іоноселективний електрод (контактний)	$\pm 0,1$	4...9 рН
Індекс NDVI	Мультиспектральна камера (660 нм, 850 нм)	$GSD \leq 1$ см/піксель	-0.2...1.0
Фітопатологічні зміни листя	RGB камера високої роздільної здатності	$GSD 0,5...1,0$ мм/піксель	До 5 м (дистанція)
Висота рослинного покриву	Лазерний лідар (LiDAR) / Стереокамера	$\pm 2...5$ см	0...2.5 м
Опір penetрації (щільність)	Автоматичний пенетрометр (конус 30°)	$\pm 0,1$ МПа	0...5 МПа

Примітка: У дипломній роботі таблицю слід розгорнути на всю ширину аркуша та відформатувати згідно з нормами ДСТУ ГОСТ 7.1:2006.

1. Вологість ґрунту:

– Критичний параметр для управління зрошенням (особливо в системах краплинного поливу).

– Апаратура повинна вимірювати об'ємну вологість (VWC, %), переважно поверхневого шару (0-15 см) для оцінки умов проростання та кореневої зони (0-60 см) для дорослих рослин.

– Точність вимірювання: $\pm 2...3\%$ VWC (абсолютних). Метод: ємнісний (FDR) або час-імпульсний рефлектометр (TDR).

2. Температура поверхні ґрунту та прикореневої зони:

– Вимірювання здійснюється інфрачервоними пірометрами (безконтактно) або термопарами (контактно).

– Температурний режим (точність вимірювання $\pm 0,5$ °C) безпосередньо впливає на швидкість мікробіологічних процесів, мінералізацію органіки та проростання насіння.

3. Електропровідність (ЕС - Electrical Conductivity):

– Безконтактне (індукційне) або контактне вимірювання уявної електропровідності ґрунту (ЕСа, мСм/см).

– Дозволяє опосередковано оцінити: засоленість ґрунту, механічний склад (вміст глини), глибину гумусового горизонту, а також концентрацію розчинних солей (макроелементів N, P, K). Точність вимірювання ЕСа: $\pm 5\%$ від вимірюваного значення.

4. Активна кислотність (рН ґрунту):

– Вимірюється контактними іоноселективними електродами (потенціометрія).

– Необхідна точність: $\pm 0,1...0,2$ одиниці рН. Це дозволяє створювати карти кислотності з кроком 1-2 м для диференційованого вапнування.

5. Механічна щільність (опір penetрації):

– Хоча безперервне вимірювання щільності на ходу є складним завданням, робот може бути оснащений автоматичним пенетрометром для періодичних зупинок і проколів ґрунту на задану глибину (до 50 см).

– Агротехнічною межею оптимальної щільності для більшості культур є $1,1 - 1,3$ г/см³.

					14.17 - КР. 003.1.000 ПЗ	Аркуш
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– Перевищення показника $> 1,5 \text{ г/см}^3$ свідчить про наявність «плужної підшви», що блокує розвиток кореневої системи.

Інформаційні та метрологічні вимоги до організації даних та їх сумісності

Зібраний масив "сирих" даних (Raw Data) не має практичної цінності без відповідної структуризації. У системі точного землеробства до масивів даних висуваються жорсткі вимоги щодо їхньої сумісності з геоінформаційними системами (ГІС):

1. *Геореферування*: кожен байт зібраної інформації (спектральний знімок, показник вологості) повинен мати жорстку просторову прив'язку. Це забезпечується синхронізацією датчиків із сигналом точного часу (PPS) від GPS-приймача.

2. *Стандартизація форматів*: дані про стан ґрунту та врожаю мають зберігатися у форматах, придатних для експорту в програмне забезпечення агроменеджменту (наприклад, SMS Advanced, QGIS). Найчастіше використовуються векторні формати (Shapefile - .shp) або стандартизовані протоколи обміну даними ISO-XML.

3. *Оперативність (Edge Computing)*: сучасна вимога полягає в тому, що первинна обробка даних (наприклад, "зшивання" знімків, відсіювання шуму, розрахунок вегетаційних індексів) має відбуватися безпосередньо на борту робота-скаута. На сервер або пульт агронома повинна передаватися лише агрегована, корисна інформація (у вигляді сформованих карт або тривожних сповіщень про виявлення шкідників).

Проведений аналіз агротехнічних вимог до збору даних у системах точного землеробства свідчить про необхідність отримання високоточних, геореферованих та безперервних показників мікрорельєфу, фізико-хімічних властивостей ґрунту та фізіологічного стану рослин. Існуючі методи аерокосмічного моніторингу не здатні повною мірою забезпечити необхідну роздільну здатність (на рівні окремого листка) та зазирнути під крону культури. Це обґрунтовує об'єктивну потребу в розробці малогабаритних наземних

					14.17 - КР. 003.1.000 ПЗ	Аркуш
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

роботизованих платформ (AgriScouts), здатних переміщуватися в міжряддях та здійснювати контактний і безконтактний моніторинг агробіоценозу з міліметровою точністю.

1.2 Порівняльний аналіз аерокосмічного моніторингу (супутники, БПЛА) та наземних роботизованих систем (UGV)

Розвиток технологій точного землеробства сформував трирівневу архітектуру збору просторових даних: космічний (супутники), авіаційний (безпілотні літальні апарати — БПЛА) та наземний (роботизовані платформи — UGV). Кожен із цих інструментів має специфічні технологічні обмеження та переваги. Для обґрунтування доцільності розробки мобільного наземного робота-скаута необхідно провести порівняльний аналіз цих систем за ключовими агротехнічними та експлуатаційними критеріями (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Порівняльний аналіз аерокосмічного та наземного моніторингу в точному землеробстві

Аерокосмічний рівень (Супутникові системи).

Супутниковий моніторинг (наприклад, місії Sentinel-2, Landsat 8/9, PlanetScope) є базовим інструментом для оцінки макрорівня агробіоценозу.

– *Переваги:* Здатність охоплювати колосальні площі (тисячі гектарів) за один проліт; наявність відкритих (безкоштовних) архівів мультиспектральних даних; можливість ретроспективного аналізу історії поля за кілька років.

– *Недоліки:* Критична залежність від погодних умов (хмарність повністю унеможливорює оптичну зйомку); низька просторова роздільна здатність (Ground Sample Distance, GSD), яка для безкоштовних знімків становить 10–30 м/піксель, що дозволяє оцінити лише загальний фон поля, але не стан окремої рослини; фіксований час повторного прольоту (від 1 до 5 діб), що може не збігатися з потребою агронома в оперативних даних.

Авіаційний рівень (Безпілотні літальні апарати - БПЛА).

Сільськогосподарські дрони (мультироторного типу або типу "крило") стали стандартом оперативного скаутингу завдяки високій маневреності та незалежності від розкладу супутників.

– *Переваги:* Висока просторова роздільна здатність (до 1–5 см/піксель); здатність оперативно зафільмувати до 100–500 гектарів за одну робочу зміну; можливість польоту під хмарами, що частково знімає проблему погодної залежності оптичної зйомки.

– *Недоліки:* Залежність від швидкості вітру (неможливість польотів при поривах понад 8–10 м/с) та опадів; малий час автономної роботи (20–40 хвилин для коптерів); жорстке обмеження маси корисного навантаження (неможливість одночасного встановлення важкого лідара, RGB та мультиспектральної камери професійного рівня). Головний агротехнічний недолік БПЛА — фіксація даних виключно з ракурсу «згори донизу» (Nadir view). Дрон аналізує лише верхній ярус листового намету, залишаючи сліпу зону під кроною рослин, де найчастіше починають розвиватися фітопатогени та ховаються шкідники. Крім того, БПЛА принципово не здатні вимірювати фізико-хімічні показники ґрунту під посівами.

Наземний рівень (Роботизовані платформи - UGV).

					14.17 - КР. 003.1.000 ПЗ	Аркуш
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Автономні наземні транспортні засоби (Unmanned Ground Vehicles), або агророботи-скаути, представляють мікрорівень моніторингу. Вони переміщуються безпосередньо в міжряддях та взаємодіють із рослинами з близької відстані.

Переваги:

– *Надтока роздільна здатність*: Робот знаходиться на відстані 0,2–1,0 метра від об'єкта, що забезпечує роздільну здатність субміліметрового рівня (до 0,5 мм/піксель).

– *Підкроновий моніторинг*: UGV здатний проводити фронтальну та бокову зйомку стебла, нижнього ярусу листя та поверхні ґрунту, що неможливо для дронів і супутників.

– *Вантажопідйомність та енергоємність*: Наземна платформа не витрачає енергію на утримання себе в повітрі. Це дозволяє встановлювати важкі масиви акумуляторів (забезпечуючи автономність до 8–12 годин) та інтегрувати складні комплекси сенсорів (RTK, LiDAR, гіперспектральні камери, метеостанції).

– *Контактні вимірювання*: Робот може бути оснащений маніпуляторами з щупами для фізичного контакту з ґрунтом (вимірювання вологості, електропровідності, твердості).

Недоліки: Низька продуктивність (робоча швидкість зазвичай не перевищує 3–6 км/год), що обмежує площу денного моніторингу; залежність від прохідності шасі та стану ґрунту (ризик застрягання у перезволоженому ґрунті).

Зведена порівняльна характеристика.

Для наочної оцінки доцільності використання різних платформ у системі точного землеробства сформовано порівняльну матрицю експлуатаційних та агротехнічних характеристик (Таблиця 1.2).

					14.17 - КР. 003.1.000 ПЗ	Аркуш
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.2 – Порівняльна характеристика платформ для моніторингу агробіоценозу

Характеристика	Супутники	БПЛА (Дрони)	Наземні роботи (UGV)
Просторова роздільна здатність (GSD)	Низька (10–30 м)	Висока (1–5 см)	Надточна (0,5–2 мм)
Охоплення площі за добу	Глобальне (мільйони га)	Середнє (100–500 га)	Локальне (5–20 га)
Залежність від хмарності	Критична	Відсутня (політ під хмарами)	Відсутня
Залежність від вітру	Відсутня	Висока	Мінімальна
Можливість зйомки під кроною	Ні	Ні	Так
Контактний аналіз ґрунту	Ні	Ні	Так
Вантажопідйомність сенсорів	—	Обмежена (до 2–5 кг)	Висока (до 20–50 кг)

Аналіз технологічних можливостей різних рівнів моніторингу доводить, що ці системи не є конкурентами, а доповнюють одна одну. Супутники забезпечують глобальну стратегічну оцінку, БПЛА ефективні для оперативного виявлення проблемних зон на великих площах, однак лише наземні роботизовані платформи здатні надати вичерпну інформацію мікрорівня. Здатність UGV зазирати під листовий намет, проводити контактні вимірювання ґрунту та нести потужні обчислювальні системи робить їх безальтернативним інструментом для глибокої фенотипічної та фітопатологічної діагностики посівів, що обґрунтовує необхідність подальшої інженерної розробки таких систем.

1.3 Огляд існуючих конструкцій роботів-скаутів та їх сенсорного оснащення

Розвиток наземних безкіпажних платформ (UGV) для потреб сільського господарства розпочався на початку 2000-х років. Якщо перші розробки фокусувалися на автоматизації енергомістких процесів (оранка, збирання врожаю), то сучасний тренд точного землеробства стимулював створення

окремого класу машин — автономних фенотипувальних платформ або роботів-скаутів (AgriScouts). Їх головна функція полягає не у фізичному впливі на середовище, а в безперервному зборі мультимодальних даних (рисунк 1.3).

За масо-габаритними показниками та конструктивними схемами існуючі роботи-скаути можна розділити на кілька базових категорій.



Рисунок 1.3 – Огляд існуючих конструкцій роботів-скаутів та їх сенсорного оснащення

Ультракомпактні платформи підкранового моніторингу.

Цей клас роботів проектується спеціально для руху під листовим наметом (Under-Canopy) високостеблових просапних культур, таких як кукурудза, соя або соняшник. Типовим і найбільш успішним комерційним представником цієї групи є робот TerraSentia, розроблений компанією EarthSense у співпраці з Іллінойським університетом (США) [1].

Конструкція: Це надлегка (маса близько 10–12 кг) 4-колісна платформа шириною лише 320 мм. Вона легко вміщується у стандартні міжряддя (700 мм) і здатна рухатися безпосередньо під кроною рослин, де використання БПЛА є неможливим.

Сенсорне оснащення: Платформа оснащена трьома RGB-камерами (фронтальною та двома боковими), а також компактним 2D-лідаром.

Алгоритміка: Алгоритми машинного навчання дозволяють TerraSentia автоматично вимірювати товщину стебла (Stem Width), висоту прикріплення нижнього качана (для кукурудзи), індекс площі листя (LAI) та виявляти ранні ознаки ураження нижнього ярусу листя хворобами [2].

Недоліком ультракомпактних платформ є низька прохідність на перезволожених ґрунтах та неможливість встановлення важкого наукового обладнання або контактних датчиків ґрунту.

Модульні та порталні дослідницькі платформи

Для забезпечення високого агротехнічного просвіту (кліренсу) та можливості нести велике корисне навантаження розробляються платформи середнього та важкого класів.

Платформа Thorvald II (Saga Robotics). Розроблена Норвезьким університетом природничих наук, є однією з найпопулярніших у світі дослідницьких платформ [3]. Вона має модульну архітектуру: рама збирається з алюмінієвих профілів, що дозволяє швидко змінювати ширину колії від 0,6 до 3,0 метрів залежно від культури. Кожне з чотирьох коліс має незалежний тяговий привід та незалежне рульове керування. Окрім скаутингу (за допомогою гіперспектральних камер), Thorvald активно використовується для ультрафіолетового (UV-C) опромінення рослин з метою придушення грибкових інфекцій борошнистої роси.

Комплекс BoniRob (Deerfield Robotics / Bosch). Це класичний приклад порталного скаута, створеного в Німеччині [4]. Маса робота становить близько 1000 кг, ширина колії регулюється телескопічними осями. Особливістю BoniRob є концепція змінних модулів (App-Modules). Один із таких модулів — це гідравлічний пенетрометр (Soil Penetrometer), який автоматично опускається в ґрунт кожні кілька метрів для вимірювання його опору (твердості) та вологості на різних глибинах [5].

					14.17 - КР. 003.1.000 ПЗ	Аркуш
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналіз типового сенсорного оснащення мобільних платформ

Аналіз сучасних прототипів [6, 7] дозволяє виділити стандартний набір сенсорного обладнання, яким комплектуються роботи-монітори для виконання комплексного фенотипування:

1. Навігаційний комплекс:

RTK-GNSS системи: Приймачі (наприклад, Trimble або u-blox) забезпечують точність визначення координат на відкритій місцевості до 2 см.

Інерціальні вимірювальні пристрої (IMU): Використовуються для просторової стабілізації даних. Оскільки робот рухається нерівним ґрунтом, кадри з камер зазнають нахилів (Pitch, Roll, Yaw). Дані IMU дозволяють алгоритмічно компенсувати ці спотворення при зшиванні фінальної карти поля.

2. Оптичні та спектральні сенсори (Machine Vision):

Мультиспектральні камери (напр., MicaSense RedEdge-P): Синхронно роблять знімки у п'яти і більше вузьких спектральних діапазонах, що дозволяє розраховувати індекси NDVI, NDRE, SAVI. Вони є основою для визначення азотного голодування рослин.

Гіперспектральні камери: Фіксують сотні спектральних каналів, надаючи інформацію про біохімічний склад листя (вміст хлорофілу, води, каротиноїдів).

Тепловізори (Thermal cameras): Вимірюють інфрачервоне випромінювання поверхні листя, що дозволяє оцінити рівень водного стресу (Crop Water Stress Index) ще до того, як рослина почне візуально в'янути [8].

3. Сенсори просторової геометрії (3D Profiling):

Лідари (LiDAR): Лазерні сканери (напр., Velodyne Puck) створюють щільну 3D-хмару точок навколишнього середовища. Вони одночасно вирішують дві задачі: вимірювання геометрії крони (біомаси) рослини та уникнення зіткнень з перешкодами.

Стереокамери (ToF / Depth Cameras): Бюджетна альтернатива лідарам для розрахунку відстані до об'єктів на ближніх дистанціях (до 5 метрів).

Огляд існуючих конструкцій доводить, що ринок пропонує як ультракомпактні рішення для мікроскаутингу, так і важкі порталні машини.

					14.17 - КР. 003.1.000 ПЗ	Аркуш
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Однак комерційні розробки (особливо закордонні) мають високу вартість і закриту архітектуру програмного забезпечення, що ускладнює їх інтеграцію у вітчизняні фермерські господарства. Сенсорне оснащення таких платформ стандартизується навколо комплексу "RTK + LiDAR + Мультиспектральна камера". Це підтверджує необхідність проектування адаптивної, модульної та економічно обґрунтованої роботизованої платформи, оптимізованої під умови експлуатації в Україні.

					14.17 - КР. 003.1.000 ПЗ	Аркуш
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

На основі проведеного аналізу сучасних методів та технічних засобів моніторингу агробіоценозів у системі точного землеробства можна зробити такі висновки:

1. Формування агротехнічних вимог. Встановлено, що ефективне управління продуктивністю посівів вимагає переходу від усереднених показників до високоточного просторово-розподіленого моніторингу. Збір даних має забезпечувати ідентифікацію біометричних показників рослин (зокрема, вегетаційного індексу NDVI з роздільною здатністю на рівні окремого листка) та фізико-хімічних параметрів ґрунту (вологість, температура) з просторовою прив'язкою до координат із точністю $2...5$ см.

2. Переваги наземних роботизованих платформ (UGV). Порівняльний аналіз трирівневої системи моніторингу довів, що аерокосмічні методи (супутники) та авіаційні засоби (БПЛА) не здатні забезпечити повний спектр даних через неможливість проникнення оптичних сенсорів під крону рослин на пізніх етапах вегетації. Мобільні наземні роботи-скаути є безальтернативним інструментом для мікрорівневого фенотипування, оскільки здатні здійснювати підкранову фронтальну зйомку стебла, нести масивні комплекси датчиків та виконувати контактні вимірювання ґрунту незалежно від погодних умов (вітер, хмарність).

3. Оцінка існуючих апаратних рішень. Огляд світових конструкцій агророботів (TerraSentia, Thorvald, BoniRob) показав, що стандартом сенсорного оснащення фенотипувальних платформ є інтеграція мультиспектральних камер, лідарів (LiDAR) для 3D-профілювання та систем високоточного позиціонування RTK-GNSS. Проте більшість комерційних зразків мають закриту програмну архітектуру та надмірну вартість, що перешкоджає їх масовому впровадженню у вітчизняні господарства.

4. Обґрунтування напрямку подальших досліджень. Виявлені технологічні бар'єри та сформульовані агротехнічні вимоги підтверджують доцільність проєктування адаптивної вітчизняної платформи-скаута.

					14.17 - КР. 003.1.000 ПЗ	Аркуш
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2.

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПЛАТФОРМИ ТА АЛГОРИТМІВ ОБРОБКИ ДАНИХ

2.1 Кінематика руху платформи та алгоритми навігації за маршрутом скаутингу

Для виконання завдань агроскаутингу мобільна роботизована платформа повинна забезпечити рівномірне покриття заданої площі поля з мінімальними відхиленнями від маршруту, щоб гарантувати точне зшивання мультиспектральних знімків. Водночас рух має бути плавним для уникнення розмиття зображень (Motion Blur) та суворо обмеженим шириною міжряддя для запобігання пошкодженню культурних рослин.

Кінематична модель руху малогабаритної платформи

Виходячи з агротехнічних вимог (типова ширина міжряддя для просапних культур становить 700 мм), пропонується використовувати вузькогабаритну 4-колісну платформу з незалежним приводом усіх коліс (колісна формула 4×4) та бортовим поворотом (Skid-Steer Steering). Така схема забезпечує високу маневреність та відсутність виступаючих вузлів, що важливо для роботи у вузьких міжряддях.

Введемо глобальну інерціальну систему координат XOY (прив'язану до карти поля) та локальну рухому систему координат $X_cO_cY_c$, початок якої O_c знаходиться в центрі мас платформи. Положення платформи в будь-який момент часу описується вектором стану:

					14.17 - КР. 003.2.000 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.					РОЗДІЛ 2		Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевір.	Дядюра К.О.							27	17
Реценз.									
Н. Контр.									
Затверд.	Дядюра К. О.								

$$q = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ \theta \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

де X, Y — координати центра мас у глобальній системі; θ — кут орієнтації поздовжньої осі робота відносно осі X (курс, азимут).

На відміну від класичного диференційного приводу, колісна база 4×4 має поздовжню відстань між осями L . Це призводить до виникнення поздовжнього та поперечного проковзування під час повороту. Пряма кінематика *ідеалізованого* руху (без урахування бічного ковзання та буксування) описується системою рівнянь:

$$\begin{cases} \dot{X} = v_c \cos \theta \\ \dot{Y} = v_c \sin \theta, \\ \dot{\theta} = \omega_c \end{cases} \quad (2.2)$$

де v_c — лінійна швидкість центра мас, ω_c — кутова швидкість обертання платформи.

Для шасі з бортовим поворотом швидкість центрмас залежить від швидкості обертання лівого (v_L) та правого (v_R) бортів. Якщо радіус кочення всіх коліс однаковий (нехтуємо деформацією шин), то:

$$v_c = \frac{v_R + v_L}{2}, \quad \omega_c = \frac{v_R - v_L}{B_e}, \quad (2.3)$$

де B_e — еквівалентна (кінематична) ширина колії. Вона є ключовим параметром для бортового повороту: через наявність поздовжньої бази L реальна кінематика відрізняється від двоколісної моделі. Для 4-колісної машини:

$$B_e \approx B + \mu L, \quad (2.4)$$

де B — фізична ширина колії (відстань між центрами коліс лівої та правої сторони, мм); μ — емпіричний коефіцієнт опору повороту, що залежить від типу ґрунту (для щільного ґрунту $\mu \approx 0.3 \dots 0.5$, для пухкого — до 0.9). Цей коефіцієнт враховує ефект «пригальмовування» поздовжніх коліс під час розвороту.

Критичною умовою безпечного руху в міжрядді є дотримання динамічного габариту. Максимальне бічне відхилення центру мас платформи e_{max} від осі міжряддя не повинно перевищувати величини захисної зони:

					14.17 - КР. 003.2.000 ПЗ	Аркуш
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$e_{max} \leq \frac{B_m - B_p}{2} - \delta_p, \quad (2.5)$$

де: B_m – ширина міжряддя (задається агротехнікою, наприклад, 700 мм для кукурудзи); B_p – габаритна ширина платформи (450...550 мм); δ_p – агротехнічний захисний зазор (зазвичай 50...100 мм), що запобігає контакту робота з рослинами при коливаннях курсу.

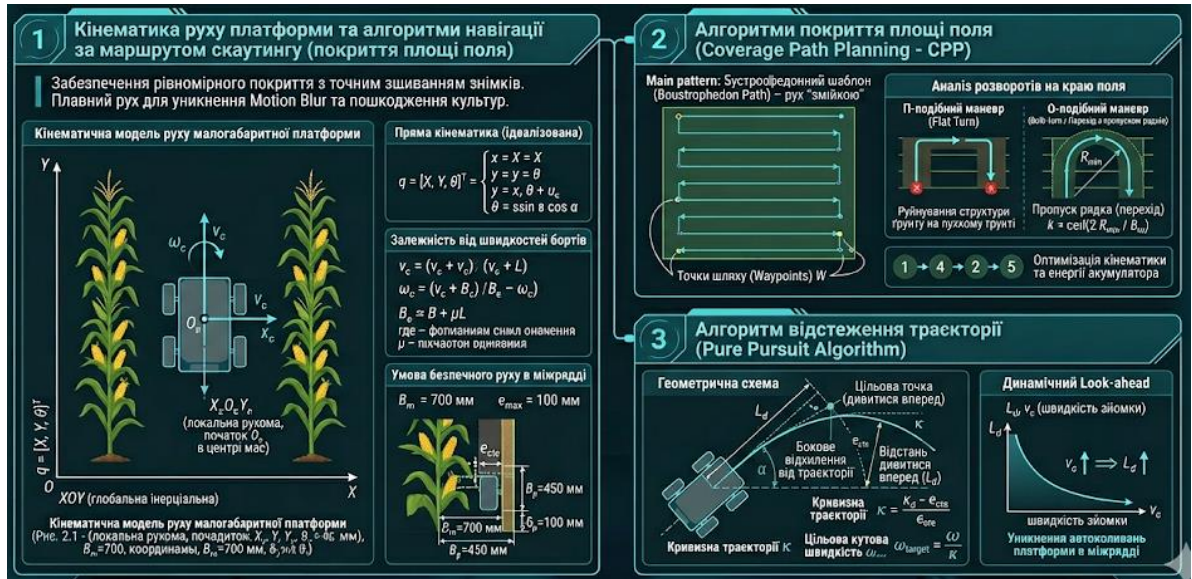


Рисунок 2.1 – Кінематична схема руху платформи у міжрядді: показано глобальну (XOY) та локальну ($X_cO_cY_c$) системи координат, ширину міжряддя B_m , габаритну ширину платформи B_p , поперечне відхилення e_{ste} . Стрілками позначено напрям руху та обертання коліс.

Алгоритми покриття площі поля (Coverage Path Planning, CPP)

Процес збору даних вимагає проходження роботом усієї (або вибіркової репрезентативної) площі поля. Завдання генерування маршруту (CPP) вирішується методом декомпозиції поля на паралельні рядки. Найбільш ефективним для сільського господарства є бустрофедонний шаблон (Boustrophedon path) — рух «змійкою» аналогічно оранці, що мінімізує кількість неробочих ходів.

Математично поле представляється у вигляді опуклого або неопуклого багатокутника. Маршрут генерується як упорядкований набір точок шляху (Waypoints) $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$, де $w_i = (x_i, y_i)$. Крок між сусідніми точками

шляху вздовж рядка вибирається з умови забезпечення перекриття знімків (не менше 30% поздовжнього перекриття).

Найскладнішим етапом навігації є розворот на краю поля (на поворотній смузі). Оскільки ширина міжряддя (типово 700 мм) часто менша за мінімальний радіус розвороту робота без значного буксування, застосовують два типи траєкторій переходу в сусідній ряд:

1. П-подібний маневр (U-turn на місці):

Можливий лише тоді, коли робот завдяки бортовому приводу зупиняється, розвертається на місці на 90° , проїжджає поперек рядків на ширину міжряддя (з використанням датчиків), потім знову розвертається на 90° . Недолік: розворот на місці на пухкому ґрунті руйнує його структуру, створюючи колії глибиною до 5–10 см, що погіршує умови для наступних проходів.

2. Ω-подібний маневр (або «bulb turn» з пропуском рядків):

Робот виконує поворот по дузі кола мінімального радіуса R_{min} (визначається кінематикою та зчепленням). Щоб уникнути пошкодження крайніх рослин, алгоритм будує маршрут так, щоб робот заходив не в сусіднє міжряддя, а пропускав k рядків:

$$k = \text{ceil} \left(\frac{2R_{min}}{B_m} \right) \quad (2.6)$$

Наприклад, при $R_{min} \approx 1.2$ м і $B_m = 0.7$ м отримаємо $k = [(2.4/0.7)] = 4$. Отже, робот рухається по рядку 1, на розвороті заходить у рядок 5, потім у рядок 2, потім у 6 і т.д. Це оптимізує кінематику, зменшує буксування та економить енергію акумулятора.

Алгоритм відстеження траєкторії (Pure Pursuit)

Для того щоб робот-скаут рухався суворо по центру згенерованого міжряддя (тобто з мінімальною поперечною похибкою e_{cte}), використовується алгоритм відстеження траєкторії на основі методу «чистої погоні» (Pure Pursuit). Це геометричний метод, що добре працює при низьких швидкостях (до 2 м/с) та на регулярних сільськогосподарських трасах.

					14.17 - КР. 003.2.000 ПЗ	Аркуш
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Суть алгоритму: обчислюється кривизна траєкторії κ , необхідна для того, щоб робот з поточного положення досяг «цільової точки» (Look-ahead point), яка знаходиться на ідеальній лінії маршруту на відстані огляду L_d перед роботом.

Нехай:

- e_{cte} – поперечна похибка (cross-track error) – відстань від центра мас робота до найближчої точки на заданому маршруті (зі знаком);
- α – кут між поздовжньою віссю робота та напрямом на цільову точку (курсова похибка).

Для цільової точки на відстані L_d необхідна кривизна траєкторії дорівнює:

$$\kappa = \frac{2 \sin \alpha}{L_d} \quad (2.7)$$

Відповідно, цільова кутова швидкість платформи ω_{target} , що передається на мікроконтролер для генерації ШІМ-сигналів на мотор-колеса, визначається як:

$$\omega_{\text{target}} = v_c \cdot \kappa = \frac{2v_c \sin \alpha}{L_d} \quad (2.8)$$

Адаптація дистанції огляду L_d :

Дистанція огляду є динамічним параметром. При збільшенні швидкості зйомки (наприклад, до 1.5 м/с $\approx$ 5.4 км/год) необхідно збільшувати L_d , щоб уникнути автоколювань платформи в міжрядді (ефект «рискання»). Рекомендується лінійна залежність:

$$L_d = k_v \cdot v_c + L_{\min}, \quad (2.9)$$

де: k_v – коефіцієнт пропорційності (знаходиться експериментально, типово 0.5...1.0 с); $L_{\min}$ – мінімальна відстань огляду (наприклад, 0.5 м, що забезпечує коректне відпрацювання при старті та малих швидкостях).

Обмеження алгоритму Pure Pursuit:

Він не враховує динаміку буксування та нахили платформи. Тому для реальних польових умов його доцільно комбінувати з каскадним ПД-регулятором (PID controller) за кутом θ або використовувати більш стійкі методи, такі як Стенлі (Stanley controller) або модельне передбачувальне керування (MPC). Проте для рівномірного руху в міжрядді зі швидкістю до 1.5

					14.17 - КР. 003.2.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

м/с Pure Pursuit забезпечує достатню точність ($|e_{cte}| \leq 5$ см) при правильному виборі L_d .

2.2 Математичні моделі обчислення вегетаційних індексів (NDVI, SAVI) на основі даних мультиспектральних камер

Основною метою інтеграції мультиспектральної камери на борт роботизованої платформи є отримання об'єктивних кількісних даних про фізіологічний стан рослин. Камери видимого діапазону (RGB) фіксують лише зовнішні зміни (наприклад, пожовтіння або некроз листя), коли біологічний стрес або хвороба вже завдали незворотної шкоди. Мультиспектральний аналіз, заснований на математичному моделюванні спектральної відбивальності, дозволяє виявляти патологічні процеси на ранніх стадіях — за кілька днів до появи візуальних симптомів (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – Математичні моделі обчислення вегетаційних індексів (NDVI, SAVI) на основі даних мультиспектральних камер

Фізична суть спектральної відбивальної здатності рослин

Математичні моделі вегетаційних індексів базуються на унікальній оптичній властивості живих тканин рослин – їхній спектральній сигнатурі (spectral signature). Взаємодія електромагнітних хвиль із листком описується двома ключовими закономірностями, які є наслідком внутрішньої структури та пігментного складу:

1. Поглинання в червоному діапазоні (Red, R): Пігмент хлорофіл a і b поглинає до 90% падаючого світла з довжиною хвилі $\lambda \approx 640 \dots 680$ нм (червона зона) для забезпечення процесу фотосинтезу. Це поглинання максимальне саме в червоній області, де квантова енергія оптимальна для збудження фотосистем.

2. Відбиття в ближньому інфрачервоному діапазоні (NIR — Near Infrared, $\lambda \approx 750 \dots 900$ нм): губчаста (палісадна) структура мезофілу та міжклітинні простори здорового листка інтенсивно розсіюють і відбивають (до 50–60%) випромінювання в NIR-діапазоні, що запобігає перегріву тканин та пошкодженню фотосинтетичного апарату.

Під час стресу (нестача вологи, азотне голодування, грибкове ураження, пошкодження шкідниками):

- Клітинна структура руйнується (тургор падає, міжклітинники зникають) → відбиття в NIR різко знижується.

- Концентрація хлорофілу зменшується → поглинання в R падає, і відбиття в червоній області парадоксально зростає.

Ця зміна співвідношення ρ_{NIR}/ρ_{RED} є ключовим діагностичним маркером.

Математична модель нормалізованого вегетаційного індексу NDVI

Найбільш поширеним і фундаментальним вегетаційним індексом є нормалізований відносний індекс рослинності NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Математично він являє собою відношення різниці до суми коефіцієнтів відбиття у відповідних каналах:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (2.10)$$

					14.17 - КР. 003.2.000 ПЗ	Аркуш
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де: ρ_{NIR} – коефіцієнт спектральної відбивальної здатності в ближньому інфрачервоному діапазоні (безрозмірна величина, частки одиниці); ρ_{RED} – коефіцієнт спектральної відбивальної здатності в червоному діапазоні видимого спектра.

Нормалізація (ділення на суму) дозволяє математично нівелювати вплив рельєфу, кута падіння сонячних променів та частково — тіней від конструктивних елементів робота-скаута, оскільки ці фактори впливають і на чисельник, і на знаменник приблизно пропорційно.

Діапазон значень моделі становить від -1 до $+1$:

- $-1,0 \dots 0$: неживі об'єкти (відкрита вода, сніг, штучні матеріали, глибокі тіні).
- $0 \dots 0,2$: відкритий ґрунт, кам'янисті поверхні, сухі рослинні рештки.
- $0,2 \dots 0,4$: розріджена, пригнічена рослинність (початкові фази, хворі посіви).
- $0,4 \dots 0,6$: помірно щільна рослинність (більшість сільськогосподарських культур у фазі вегетації).
- $0,6 \dots 0,9$: дуже густа, здорова рослинність (висока біомаса, максимальна фотосинтетична активність).

Обмеження NDVI: при значеннях $\rho_{NIR} > 0,5$ (дуже щільні листові пологи) індекс стає нечутливим до подальшого наростання біомаси — настає явище *насичення* (saturation). Крім того, NDVI дуже чутливий до яскравості ґрунту на початкових фазах росту.

Алгоритм радіометричної корекції: від цифрових значень до коефіцієнтів відбиття

Важливим нюансом комп'ютерного зору є те, що мультиспектральна камера фіксує не коефіцієнт відбиття ρ , а абсолютне значення яскравості пікселя — так зване цифрове число (Digital Number, DN). Для більшості промислових камер (MicaSense, RedEdge, DJI P4 Multispectral) DN має розрядність 16 біт (діапазон від 0 до 65535), що забезпечує високий динамічний діапазон.

					14.17 - КР. 003.2.000 ПЗ	Аркуш
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оскільки робот працює в умовах відкритого поля, де інтенсивність сонячного освітлення постійно змінюється через набігання хмар, зміну кута Сонця або затінення від самого робота, використання прямих значень DN у формулах NDVI/SAVI призведе до критичних помилок (різниця в освітленні між ранком та полуднем може досягати 30–50%). Тому алгоритмічне забезпечення платформи повинно виконувати радіометричну калібровку в реальному часі.

Перетворення значення яскравості пікселя у дійсний коефіцієнт відбиття для кожної спектральної смуги λ описується лінійним рівнянням:

$$\rho_{\lambda} = \frac{DN_{\lambda} - DN_{\text{dark}}}{DN_{\text{ref}} - DN_{\text{dark}}} \cdot \rho_{\text{ref}}, \quad (2.11)$$

де: DN_{λ} – цифрове значення яскравості досліджуваного пікселя (рослини); DN_{dark} – значення темного струму матриці (шум сенсора при закритому затворі, вимірюється один раз під час калібрування); DN_{ref} – цифрове значення еталонної калібрувальної панелі (Calibrated Reflectance Panel), яку робот періодично фіксує (наприклад, на початку місії та після зміни умов освітлення); ρ_{ref} – відомий лабораторний коефіцієнт відбиття калібрувальної панелі (зазвичай 0,5 або 0,3 для сірих панелей, або спектрально плоский матеріал).

Додатковий сенсор – датчик падаючого світла (DLS – Downwelling Light Sensor), який монтується на найвищій точці робота з оглядом на небесну півсферу. Він безперервно вимірює спектральну інтенсивність освітлення та дозволяє коригувати коефіцієнт ρ_{λ} динамічно під час руху, що підвищує точність до $\pm 2\%$ замість $\pm 10\%$ без DLS.

Математична модель ґрунтово-коригованого індексу SAVI

Незважаючи на універсальність, NDVI має значну математичну вразливість: високу чутливість до фонового впливу ґрунту (Soil Background Effect). Під час моніторингу роботом-скаутом посівів на ранніх фазах вегетації (коли листковий покрив займає менше 30–40% площі, наприклад, сходи кукурудзи або соняшнику), яскравість відкритого ґрунту — вологого чи сухого — суттєво спотворює значення ρ_{NIR} та ρ_{RED} , особливо в міжряддях, де камера «бачить» як рослини, так і ґрунт.

					14.17 - КР. 003.2.000 ПЗ	Аркуш
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для вирішення цієї проблеми в алгоритм обчислювача робота імплементується ґрунтово-коригований вегетаційний індекс SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), запропонований А. Хуєте (Huete, 1988):

$$SAVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + L} \cdot (1 + L), \quad (2.12)$$

де L — коригувальний коефіцієнт ґрунтової яскравості, що мінімізує варіації сигналу, спричинені відмінностями в яскравості ґрунту.

Коефіцієнт L вибирається залежно від проєктивного покриття рослинності (Fractional Vegetation Cover, FVC):

- $L = 1,0$ — для дуже розрідженої рослинності ($FVC < 15\%$, практично голий ґрунт);
- $L = 0,5$ — для проміжних стадій ($FVC \approx 15\text{--}50\%$, оптимальне значення за замовчуванням, яке найчастіше використовується на практиці);
- $L = 0,25$ — для густішої рослинності ($FVC \approx 50\text{--}80\%$);
- $L = 0$ — для дуже щільного листкового пологів ($FVC > 80\%$) — у цьому випадку формула SAVI повністю редукується до NDVI.

Використання індексу SAVI з $L = 0,5$ дозволяє бортовому комп'ютеру робота з високою точністю аналізувати здоров'я сходів культурних рослин, практично ігноруючи похибки від зміни вологості, текстури та кольору ґрунту в міжряддях. Дослідження показують, що коефіцієнт варіації SAVI для однорідної рослинності на різних ґрунтах у 2-3 рази менший, ніж для NDVI.

Практична реалізація обчислень на борту робота

Для забезпечення реального часу (не більше 100 мс на кадр) алгоритм обробки мультиспектральних даних на борту робота включає наступні кроки:

1. Синхронне отримання кадрів з усіх спектральних каналів (якщо камери різні — виконується корекція паралаксу).
2. Застосування радіометричної калібровки за формулою п. 2.2.3 з використанням останніх значень з DLS-сенсора.

					14.17 - КР. 003.2.000 ПЗ	Аркуш
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Піксельне обчислення NDVI або SAVI за відповідними формулами (для прискорення — з використанням таблиць попередньо обчислених значень або FPGA-прискорення).

4. Просторова агрегація: усереднення індексу по кожному рядку рослин (наприклад, формується середнє значення NDVI вздовж рядка довжиною 0.5 м) для зменшення шуму та обсягу даних, що передаються.

5. Геоприв'язка отриманих значень до координат центру мас робота (з урахуванням зсуву камери відносно GNSS-антени).

Розроблені математичні моделі є ядром інформаційно-вимірювальної системи агроробота. Проведений аналіз довів, що для коректної оцінки фізіологічного стану рослин необхідно:

1. Обчислювати стандартизовані вегетаційні індекси – NDVI для фази зімкнутого покриву та SAVI (з $L = 0,5$) для ранніх фаз вегетації.

2. Обов'язково застосовувати алгоритми радіометричної корекції на основі еталонних панелей та датчиків падаючого світла (DLS) для компенсації мінливості освітлення.

3. Забезпечити піксельне геореферування обчислених індексів.

Це гарантує перетворення сирих значень пікселів матриці на об'єктивні спектральні коефіцієнти відбиття, придатні для подальшої математичної обробки, агрономічної інтерпретації та створення карт диференційованого внесення добрив.

2.3 Алгоритмічне забезпечення об'єднання даних (Sensor Fusion) систем позиціонування та оптичних сенсорів для побудови цифрової карти поля

Отримання якісних мультиспектральних зображень та обчислення вегетаційних індексів є лише першим етапом скаутингу. Агроному потрібна не просто папка з тисячами фотографій, а єдина цифрова карта

					14.17 - КР. 003.2.000 ПЗ	Аркуш
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поля – ортофотоплан або карта розподілу вегетаційних індексів (NDVI, SAVI), прив'язана до реальних географічних координат (рисунок 2.3).

Для цього бортовий комп'ютер робота повинен алгоритмічно об'єднати дані з трьох різномірних джерел:

- Мультиспектральна камера – масив пікселів (зображення у спектральних каналах);



Рисунок 2.3 – Алгоритмічне забезпечення об'єднання даних систем позиціонування.

- RTK-GNSS модуль – глобальні координати (X,Y,Z) з сантиметровою точністю;
- Інерціальний вимірювальний пристрій (IMU) – кути нахилу (крен ϕ , тангаж θ , рискання ψ) та кутові швидкості.

Цей процес у робототехніці називається комплексуванням даних (Sensor Fusion) і є критичним для досягнення просторової точності на рівні окремої рослини.

Проблема просторової та часової розсинхронізації

Під час руху нерівним мікрорельєфом міжряддя платформа зазнає постійних просторових коливань. Якщо робот наїжджає на грудку землі, його корпус нахилиється (виникає кут крену ϕ або тангажу θ). При цьому об'єктив камери, спрямований жорстко вниз (Nadir), відхиляється від вертикалі. Якщо для прив'язки знімка до карти використати лише дані GPS (без урахування нахилу), виникне просторова похибка проєкції. Центр знімка на карті буде зміщений відносно реального положення об'єкта на полі на величину:

$$E = h_c \cdot \tan(\theta_{tilt}), \quad (2.13)$$

де: h_c – висота встановлення камери над поверхнею ґрунту (типово 0,8...1,2 м); θ_{tilt} – кут відхилення оптичної осі від вертикалі (результат дії крену ϕ та/або тангажу θ).

При $h_c = 1,0$ м і $\theta_{tilt} = 10^\circ$ отримаємо $E \approx 1,0 \times \tan(10^\circ) \approx 0,176$ м = 17,6 см. Така похибка є критичною для точного точкового обприскування або диференційованого внесення добрив, оскільки «хворий кущ» на карті буде зміщений на відстань, більшу за ширину міжряддя.

Друга проблема – часова затримка (Latency) та різномірність частоти даних:

- GNSS-модуль (RTK) видає координати з частотою 5...20 Гц (типово 10 Гц).
- IMU працює на частоті 50...200 Гц (типово 100 Гц).
- Камера робить знімки з частотою 1...5 Гц (типово 2 Гц) залежно від роздільної здатності та швидкості руху.

Щоб синхронізувати ці потоки в часі, алгоритм використовує апаратний сигнал точного часу (PPS — Pulse Per Second) від GNSS-приймача. Цей сигнал з точністю до мікросекунди запускає затвор камери, а також мітить кожен вимір IMU та GNSS єдиним часовим штампом (Timestamp). Завдяки цьому кожному знімку ставиться у відповідність точний просторово-часовий зріз.

Математична модель трансформації координат «піксель → глобальна система»

					14.17 - КР. 003.2.000 ПЗ	Аркуш
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Щоб обчислити реальні географічні координати кожної рослини (або кожної комірки знімка), зображеної пікселем (u, v) , алгоритм виконує ланцюг матричних перетворень однорідних координат — від локальної системи камери до глобальної земної системи.

Загальне рівняння трансформації має вигляд:

$$P_{\text{global}} = T_{\text{robot}}^{\text{global}} \cdot T_{\text{camera}}^{\text{robot}} \cdot P_{\text{camera}}, \quad (2.14)$$

де: $P_{\text{camera}} = [x_c, y_c, z_c, 1]^T$ — координати точки в 3D-системі відліку камери (початок — оптичний центр об'єктива). Ці координати отримуються з піксельних координат (u, v) і відомої глибини сцени (для наземного моніторингу це висота камери h_c):

$$P_{\text{camera}} = K^{-1} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \cdot h_c, \quad (2.15)$$

де K — матриця внутрішніх параметрів камери (фокусна відстань f_x, f_y , оптичний центр c_x, c_y , коефіцієнти дисторсії). $T_{\text{camera}}^{\text{robot}}$ — матриця екстринсивних (зовнішніх) параметрів. Вона описує жорстке фізичне зміщення камери відносно центру мас робота (точки, де встановлено GNSS-антену та IMU). Оскільки камера жорстко закріплена на рамі, ця матриця є константою, яка визначається експериментально на етапі калібрування системи. $T_{\text{robot}}^{\text{global}}$ — динамічна матриця трансформації з локальної системи координат робота в глобальну (наприклад, WGS-84 / UTM). Вона формується на основі результатів Sensor Fusion (п. 2.3.3) і складається з матриці повороту R (яка залежить від кутів Ейлера: крену ϕ , тангажу θ , рилання ψ) та вектора трансляції $\mathbf{t}$ (поточні координати GNSS X, Y, Z):

$$T_{\text{robot}}^{\text{global}} = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3}(\phi, \theta, \psi) & \mathbf{t}_{3 \times 1}(X, Y, Z) \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Матриця повороту R обчислюється як добуток трьох елементарних поворотів (наприклад, за кутами Ейлера в послідовності ZYX):

$$R = R_z(\psi) \cdot R_y(\theta) \cdot R_x(\phi) \quad (2.17)$$

					14.17 - КР. 003.2.000 ПЗ	Аркуш
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Алгоритм розширеного фільтра Калмана (EKF) для оцінки орієнтації та позиції

Для безперервного та точного обчислення матриці повороту R та вектора трансляції t бортовий комп'ютер застосовує розширений фільтр Калмана (Extended Kalman Filter, EKF) — стандартний підхід для Sensor Fusion у мобільній робототехніці.

- **GNSS** забезпечує високу абсолютну точність (похибка $\pm 2...5$ см у режимі RTK) і не має накопичення похибки, але має низьку частоту оновлення (10 Гц) і вразливий до втрати сигналу під густою кроною або біля високих культур.

- **IMU** (акселерометр + гіроскоп) оновлює дані з високою частотою (100 Гц) і дає миттєву інформацію про прискорення та кутові швидкості, але його показання «пливуть» з часом через дрейф нуля гіроскопа (похибка інтегрування нарастає як $O(t^2)$).

Принцип роботи EKF:

Крок передбачення (Prediction):

На основі попередньої оцінки стану $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$ та керуючих сигналів IMU (прискорення $\mathbf{a}$, кутові швидкості $\boldsymbol{\omega}$) обчислюється прогноз на наступний момент часу k :

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = f(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}, \mathbf{u}_k), \quad (2.18)$$

де $\mathbf{x} = [X, Y, Z, \phi, \theta, \psi, v_x, v_y, v_z, \text{bias}_{\text{gyro}}]^T$ — вектор стану.

Крок корекції (Update):

Коли надходить нове вимірювання від GNSS (координати X, Y, Z), EKF порівнює прогноз із реальним виміром і обчислює оптимальне корегування (коефіцієнт Калмана K_k):

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + K_k(z_k - h(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1})) \quad (2.19)$$

У результаті EKF видає оптимальну, згладжену та стійку до шумів оцінку просторової орієнтації робота (Pose), яка використовується в матриці $T_{\text{robot}}^{\text{global}}$ для точної прив'язки кожного мультиспектрального знімка до сітки карти поля.

					14.17 - КР. 003.2.000 ПЗ	Аркуш
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Формування сіткової карти (Grid Mapping)

Після трансформації координат кожен піксель знімка отримує географічні координати (X, Y) та значення вегетаційного індексу (NDVI або SAVI). Далі алгоритм формує карту поля у вигляді геореферованої сітки (Occupancy Grid Map або Map of Vegetation Index).

Процедура:

- Поле розбивається на комірки фіксованого розміру, наприклад, 10×10 см або 20×20 см (крок вибирається виходячи з необхідної роздільної здатності карти та продуктивності).
- Кожна комірка має свої унікальні глобальні координати (наприклад, лівий нижній кут комірки).
- Коли під час проїзду робота розрахований піксель індексу $I(u, v)$ потрапляє у відповідну комірку (за координатами), алгоритм додає це значення до масиву даних комірки.

Обробка перекриттів (overlap): Оскільки сусідні знімки мають перекриття (зазвичай 20–30% для поздовжнього та поперечного напрямків), одна й та сама комірка може отримати кілька значень. У цьому разі значення в комірці оновлюється за допомогою зваженого усереднення (наприклад, пріоритет надається пікселям ближчим до центру знімка, де менша дисторсія):

$$I_{\text{cell}}^{(n+1)} = \frac{w_1 I_1 + w_2 I_2 + \dots + w_n I_n}{w_1 + w_2 + \dots + w_n}, \quad (2.20)$$

де ваги w_i можуть бути функцією відстані пікселя до оптичного центру або часом зйомки (свіжіші дані — більша вага).

На виході формується суцільний 2D-масив даних — растрова карта вегетаційного індексу з просторовою роздільною здатністю, яка визначається розміром комірки. Ця карта може бути експортована у форматі GeoTIFF (растр) або як набір точок Shapefile (.shp) для використання в програмах агроменеджменту (SMS Advanced, QGIS, ArcGIS) та для формування карт-завдань для диференційованого внесення добрив.

					14.17 - КР. 003.2.000 ПЗ	Аркуш
						42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Sensor Fusion на основі EKF дозволяє об'єднати переваги GNSS (висока абсолютна точність, відсутність дрейфу) та IMU (висока частота, миттєва реакція), компенсуючи недоліки кожного з сенсорів.

Трансформація координат «піксель → глобальна система» з урахуванням кутів нахилу платформи (ϕ, θ) зменшує просторову похибку прив'язки знімків з ~17 см до < 3–5 см, що є агротехнічно допустимим.

Сіткова карта (Grid Map) зі зваженим усередненням перекриттів забезпечує однорідне покриття поля без артефактів на стиках знімків, що дозволяє агроному ідентифікувати локальні осередки стресу рослин (розміром від кількох десятків сантиметрів).

					14.17 - КР. 003.2.000 ПЗ	Аркуш
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У другому розділі кваліфікаційної роботи проведено теоретичне обґрунтування математичних моделей та алгоритмів, що забезпечують автономну навігацію робота-агроскаута та високоточний збір просторово-розподілених даних. За результатами досліджень зроблено такі висновки:

1. Обґрунтовано кінематичну модель та алгоритми навігації. Доведено, що для малогабаритної платформи з колісною формулою 4x4 (шириною до 500 мм для руху в міжрядді 700 мм) оптимальним алгоритмом покриття поля є бустрофедонний маршрут із застосуванням Ω -подібних маневрів (із пропуском рядків) на поворотних смугах. Це дозволяє уникнути критичного буксування та руйнування ґрунту, що характерне для розворотів на місці. Впровадження алгоритму відстеження траєкторії (Pure Pursuit) із динамічною дистанцією огляду гарантує утримання платформи на осі міжряддя без пошкодження кореневої системи рослин.

2. Сформовано математичні моделі фітомоніторингу. Визначено, що для отримання об'єктивних даних з мультиспектральної камери "сирі" значення пікселів (DN) необхідно перетворювати на дійсні коефіцієнти відбиття за допомогою алгоритмів радіометричної калібровки в режимі реального часу. Обґрунтовано диференційований підхід до розрахунку біометричних показників: використання ґрунтово-коригованого індексу SAVI на ранніх фазах вегетації (для нівелювання оптичних завад від відкритого ґрунту) та класичного індексу NDVI на етапах щільного змикання крони.

3. Розроблено алгоритм комплексування телеметричних даних (Sensor Fusion). Доведено, що просторові коливання шасі (крен і тангаж) під час руху мікрорельєфом поля викликають критичні похибки географічної прив'язки оптичних знімків. Цю проблему вирішено математичним шляхом через матричні трансформації координат, де просторова орієнтація камери безперервно стабілізується за допомогою Розширеного фільтра Калмана (EKF), який об'єднує дані інерціального вимірювального пристрою (IMU) та RTK-GNSS модуля.

					14.17 - КР. 003.2.000 ПЗ	Аркуш
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

ІНЖЕНЕРНИЙ РОЗРАХУНОК ТА ПРОЄКТУВАННЯ КОМПОНЕНТІВ РОБОТИЗОВАНОЇ ПЛАТФОРМИ

3.1 Розрахунок необхідної потужності тягових мотор-колес та вибір системи диференціального приводу

Визначення вихідних даних та умов експлуатації

Вихідні параметри систематизовано в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для тягового розрахунку

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці
Споряджена маса	m_0	150	кг
Корисне навантаження	m_n	80	кг
Повна маса	m	230	кг
Максимальна швидкість	$V_{\max}$	2,0	м/с
Робоча швидкість	$V_{\text{роб}}$	1,2	м/с
Максимальний кут підйому	$\alpha_{\max}$	12°	—
Радіус колеса	r_k	0,25	м
Коефіцієнт опору коченню (поле)	$f_{\text{п}}$	0,12	—
Коефіцієнт опору коченню (дорога)	$f_{\text{д}}$	0,05	—
Коефіцієнт зчеплення (сухий ґрунт)	$\varphi_{\text{с}}$	0,70	—
Коефіцієнт зчеплення (вологий ґрунт)	$\varphi_{\text{в}}$	0,45	—
Загальний ККД електроприводу	η	0,88	—
Прискорення розгону	a	1,0	м/с ²

Детальний аналіз сил опору руху

Сумарна сила опору:

$$F_{\Sigma} = F_{\text{коч}} + F_{\text{під}} + F_{\text{інер}} + F_{\text{пов}}, \quad (3.1)$$

де: сила опору коченню:

$$F_{\text{коч}} = f \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha, \quad (3.2)$$

сила опору підйому:

					14.17 - КР. 003.3.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 3			
Розроб.		Жиденко А.А.						
Перевір.		Дядюра К.О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						
					Літ.	Аркуш	Аркушів	
						45	6	

$$F_{\text{під}} = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (3.3)$$

сила інерції:

$$F_{\text{інер}} = m \cdot a \quad (3.4)$$

сила опору повітря (на робочих швидкостях < 2 м/с нехтуємо, але для повноти):

$$F_{\text{пов}} = \frac{C_x \cdot \rho \cdot A \cdot V^2}{2} \quad (3.5)$$

Коефіцієнти опору коченню для різних поверхонь наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Коефіцієнти опору коченню f

Тип поверхні	f
Асфальтобетон	0,015–0,020
Ґрунтова дорога (суха)	0,035–0,050
Ґрунтова дорога (мокра)	0,060–0,080
Рілля (суха)	0,080–0,120
Рілля (волога)	0,120–0,180
Стерня	0,060–0,100

Розрахунок сумарного тягового зусилля для критичних режимів

Режим 1 – рівномірний рух по ріллі ($\alpha = 0^\circ$):

$$F_{\Sigma 1} = f_{\text{п}} \cdot m \cdot g = 0,12 \cdot 230 \cdot 9,81 = 270,8 \text{ Н}$$

Режим 2 – рух на підйом $\alpha = 12^\circ$ по ґрунтовій дорозі ($f = 0,06$):

$$F_{\text{коч}2} = 0,06 \cdot 230 \cdot 9,81 \cdot \cos 12^\circ = 132,4 \text{ Н}$$

$$F_{\text{під}2} = 230 \cdot 9,81 \cdot \sin 12^\circ = 469,2 \text{ Н}$$

$$F_{\Sigma 2} = 132,4 + 469,2 = 601,6 \text{ Н}$$

Режим 3 – розгін на горизонтальній поверхні

($a = 1,0 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$, $f = 0,10$):

$$F_{\text{коч}3} = 0,10 \cdot 230 \cdot 9,81 = 225,6 \text{ Н}$$

$$F_{\text{інер}3} = 230 \cdot 1,0 = 230,0 \text{ Н}$$

$$F_{\Sigma 3} = 225,6 + 230,0 = 455,6 \text{ Н}$$

Максимальне тягове зусилля:

$$F_{\Sigma \text{max}} = \max (F_{\Sigma 1}, F_{\Sigma 2}, F_{\Sigma 3}) = 601,6 \text{ Н}$$

Перевірка за умовами зчеплення (рисунок 3.1)

					14.17 - КР. 003.3.000 ПЗ	Аркуш
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.1. ТЯГОВИЙ РОЗРАХУНОК

3.1.1. Визначення вихідних даних

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для тягового розрахунку

Вихідні дані	""	""
Споряджена маса	кг	150
Корисне навантаження	кг	80
Повна маса	кг	230
Максимальна швидкість	м/с	2,0
Робоча швидкість	м/с	1,2
Максимальний кут підйому	°	12
Радіус колеса	м	0,25
Коефіцієнт опору коченню (поле)		0,12
Коефіцієнт опору коченню (дорога)		0,05
Коефіцієнт зчеплення (сухий ґрунт)		0,70
Коефіцієнт зчеплення (вологий ґрунт)		0,45
Загальний ККД електродвигуна		0,88
Прискорення розгону	м/с ²	1,0

3.1.2. Аналіз сил опору руху

$$P_{\text{тяг}} = P_k + P_n + P_{\text{ін}} + P_{\text{пов}} \quad (3.1);$$

$$P_k = m \cdot g \cdot f \cdot \cos(\alpha) \quad (3.2);$$

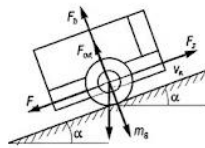
$$P_n = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (3.3);$$

$$P_{\text{ін}} = m \cdot a \quad (3.4);$$

$$P_{\text{пов}} = 0,5 \cdot C_x \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \quad (3.5).$$

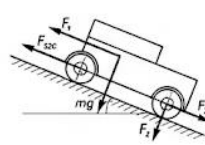
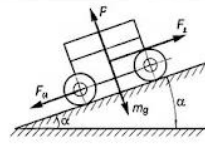
Таблиця 3.2 – Коефіцієнти опору коченню

Тип поверхні	""
Асфальтобетон	0,015–0,020
Грунтова дорога (суха)	0,035–0,050
Грунтова дорога (мокра)	0,060–0,080
Рілля (суха)	0,080–0,120
Рілля (волога)	0,120–0,180
Стерня	0,060–0,100



Таблиця 3.2 – Коефіцієнти опору коченню

Тип поверхні	""
Асфальтобетон	0,015–0,020
Грунтова дорога (суха)	0,035–0,050
Грунтова дорога (мокра)	0,060–0,080
Рілля (суха)	0,080–0,120
Рілля (волога)	0,120–0,180
Стерня	0,060–0,100



3.1.3. Розрахунок сумарного тягового зусилля

Режим 1 – рівномірний рух по рівні (f=0,12, v=1,2 м/с):

$$P_z = \frac{P_k}{2} = 271 \text{ Н}$$

Режим 2 – рух на підйом по ґрунтовій дорозі

(α=12°, f=0,05, v=1,2 м/с):

$$P_{\text{тяг1}} = m_n \cdot g \cdot f = 230 \cdot 9,81 \cdot 0,12 = 271 \text{ Н}$$

$$P_{\text{тяг2}} = m_n \cdot g \cdot (f \cdot \cos(\alpha) + \sin(\alpha)) \approx 575 \text{ Н}$$

Режим 3 – розгін на горизонтальній поверхні

(f=0,12, v_max=2,0 м/с, a=1,0 м/с²):

$$P_{\text{тяг3}} = m_n \cdot g \cdot (f \cdot \cos(12^\circ) + \sin(12^\circ)) \approx 575 \text{ Н}$$

$$P_{\text{тяг max}} = 575 \text{ Н}$$

Максимальне тягове зусилля: $P_{\text{тяг max}} = 575 \text{ Н}$

3.1.4. Перевірка за умовами зчеплення

Зчіпна маса: $m_z = 0,60 \cdot 230 = 138 \text{ кг}$

Сила зчеплення для вологого ґрунту (φ = 0,45):

$$P_{\text{зч}} = 138 \cdot 9,81 \cdot 0,45 \approx 609 \text{ Н}$$

Умова $P_{\text{зч}} \geq P_z$ виконується. Запас за зчепленням:

$$k_{\text{зч}} = \frac{609}{575} \approx 1,06.$$

3.1.4. Перевірка за умовами зчеплення

Зчіпна маса: на колесах:

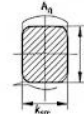
$$M_k = 575 \cdot v \cdot 21 = 1150 \text{ Вт}$$

Із урахуванням ККД η=0,88:

$$P_{\text{зч}} = 138 \cdot 9,81 \cdot 0,45 \approx 609 \text{ Н}$$

Умова $P_{\text{зч}} \geq P_z$ виконується

Запас за зчепленням:



3.2. ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ТА КРУТНОГО МОМЕНТУ

Потужність на колесах: $N_k = 575 \cdot 2,0 = 1150 \text{ Вт}$

Із урахуванням ККД η=0,88: $N = \frac{1150}{0,88} \approx 1307 \text{ Вт}$

Встановлена потужність (η=1, N_вст = 1,2 · 1307 ≈ 1568 Вт

На два мотор-колеса: $N_{\text{ко}} = \frac{1568}{2} \approx 784 \text{ Вт}$

Обкрасмо двигуни по 600 Вт

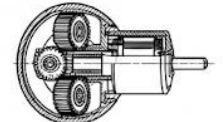
Крутний момент: $M_t = I_{\text{тяг}} \cdot \frac{575}{2} = 60 \cdot 2,0 = 72 \text{ Н·м}$

Частота обертання: $n_k = \frac{60 \cdot v_{\text{max}}}{\pi \cdot r_k} = \frac{60 \cdot 2,0}{3,14 \cdot 0,25} \approx 76,4 \text{ об/хв}$

3.3. ОБґРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ПРИВОДУ

Таблиця 3.4 – Порівняння схем приводу

Критерій	Диференціальна ланка (2WD)	Омні-привід (Ackermann)	Трициклова (Ackermann)
Керованість у вузьких проходах	добра	відмінна	задовільна
Тягове зусилля на ґрунті	високе	середнє	високе
Енергоефективність	висока	середня	висока
Складність керування	низька	висока	середня
Вартість	низька	висока	середня



Таблиця 3.3 – Характеристики обраного мотор-колеса

Номинальна потужність	600 Вт
Номинальний момент	72 Н·м
Максимальний момент	110 Н·м
Напруга живлення	48 В
Тип редуктора	планетарний (1:12)
Сумарна потужність	1600 Вт (2x800 Вт)

Спеціальність 208 "Агроінженерія"

1

Рисунок 3.1 – Розрахунок необхідної потужності тягових мотор-колiс та вибiр системи диференцiального приводу

Для диференцiального приводу зчiпна маса (навантаження на ведучi колеса) становить приблизно 60 % вiд повної маси:

$$m_{\text{зч}} = 0,6 \cdot m = 0,6 \cdot 230 = 138 \text{ кг}$$

Сила зчеплення для вологого ґрунту (φ = 0,45):

$$F_{\text{зч}} = \varphi \cdot m_{\text{зч}} \cdot g = 0,45 \cdot 138 \cdot 9,81 = 609,3 \text{ Н}$$

Умова $F_{\Sigma \text{max}} \leq F_{\text{зч}}$ виконується (601,6 < 609,3). Запас за зчепленням:

$$\Delta = \frac{F_{\text{зч}} - F_{\Sigma \text{max}}}{F_{\Sigma \text{max}}} \cdot 100\% = \frac{609,3 - 601,6}{601,6} \approx 1,3\%$$

Визначення потужності та крутного моменту

Потужність на колесах для подолання максимального опору на робочій швидкості:

$$P_{\text{кол}} = F_{\Sigma \text{max}} \cdot V_{\text{роб}} = 601,6 \cdot 1,2 = 721,9 \text{ Вт}$$

З урахуванням загального ККД η = 0,88:

					14.17 - КР. 003.3.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

$$P_{\text{двиг}} = \frac{P_{\text{кол}}}{\eta} = \frac{721,9}{0,88} \approx 820,3 \text{ Вт}$$

Із коефіцієнтом запасу $k_3 = 1,4$ встановлена потужність:

$$P_{\text{вст}} = P_{\text{двиг}} \cdot k_3 = 820,3 \cdot 1,4 \approx 1148 \text{ Вт}$$

Розподіл на два мотор-колеса:

$$P_{\text{одне}} = \frac{P_{\text{вст}}}{2} = 574 \text{ Вт}$$

Обираємо стандартні двигуни по 600 Вт кожне (сумарно 1200 Вт).

Крутний момент на одному колесі (тягове зусилля ділиться порівну):

$$F_1 = \frac{F_{\Sigma \max}}{2} = \frac{601,6}{2} = 300,8 \text{ Н}$$

$$M_k = F_1 \cdot r_k = 300,8 \cdot 0,25 = 75,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Частота обертання колеса при максимальній швидкості:

$$n_k = \frac{60 \cdot V_{\max}}{2\pi \cdot r_k} = \frac{60 \cdot 2,0}{2\pi \cdot 0,25} \approx 76,4 \text{ об/хв}$$

Вибір типу мотор-колiс

На основі розрахунків обрано синхронний двигун з постійними магнітами (BLDC) у складі мотор-колеса MotoCrane M8 (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Характеристики обраного мотор-колеса

Параметр	Значення
Номінальна потужність	600 Вт
Номінальний момент	72 Н·м
Максимальний момент	110 Н·м
Напруга живлення	48 В
Тип редуктора	планетарний (1:12)
Маса	4,8 кг

Обґрунтування вибору диференціального приводу

Порівняльний аналіз кінематичних схем наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Порівняння схем приводу

Критерій	Диференціальна (2WD)	Омні-привід	Трициклова (Ackermann)
Керованість у вузьких проходах	добра	відмінна	задовільна
Тягове зусилля на ґрунті	високе	середнє	високе
Енергоефективність	висока	середня	висока
Складність керування	низька	висока	середня
Вартість	низька	висока	середня

Остаточне рішення – диференціальна схема з двома незалежними мотор-колесами (рисунок 3.1).

3.2 Обґрунтування параметрів оптичної системи мультиспектральної камери та розрахунок просторової роздільної здатності

Вибір спектральних каналів

Вегетаційний індекс NDVI:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (3.6)$$

Обґрунтовані канали наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Спектральні канали

Канал	Центр, нм	Смуга, нм	Призначення
Blue	475	30	атмосферна корекція
Green	560	30	хлорофіл <i>b</i>
Red	668	30	хлорофіл <i>a</i> , NDVI
Red Edge	717	20	ранній стрес
NIR	840	40	структура рослин

Розрахунок кута поля зору та фокусної відстані

Для матриці з діагоналлю $L = 6,6$ мм ($1/2.5''$) і фокусною відстанню $f = 12$ мм:

$$FOV = 2 \cdot \arctan\left(\frac{L}{2f}\right) = 2 \cdot \arctan\left(\frac{6,6}{24}\right) \approx 30,8^\circ$$

Ширина захвату на висоті $H = 3$ м:

					14.17 - КР. 003.3.000 ПЗ	Аркуш
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$W = 2 \cdot H \cdot \tan\left(\frac{\text{FOV}}{2}\right) = 2 \cdot 3 \cdot \tan(15,4^\circ) \approx 1,65 \text{ м}$$

Розрахунок просторової роздільної здатності (GSD) (рисунок 3.2)

$$\text{GSD}(H) = \frac{H \cdot p}{f} \quad (3.7)$$



Рисунок 3.2 – Обґрунтування параметрів оптичної системи мультиспектральної камери та розрахунок просторової роздільної здатності

Для $H = 3 \text{ м}$:

$$\text{GSD} = \frac{3 \cdot 3,45 \cdot 10^{-6}}{0,012} = 8,625 \cdot 10^{-4} \text{ м} \approx 0,86 \text{ мм}$$

Для інших висот:

– $H = 2 \text{ м}$: $\text{GSD} \approx 0,58 \text{ мм}$

– $H = 5 \text{ м}$: $\text{GSD} \approx 1,44 \text{ мм}$

Дифракційне обмеження

Діафрагмове число $F_{\#} = 2,4$ (позначаємо N , щоб не плутати з силою).

Радіус диска Ейрі:

$$r_{\text{диф}} = 1,22 \cdot \lambda \cdot N = 1,22 \cdot 550 \cdot 10^{-9} \cdot 2,4 \approx 1,61 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 1,61 \text{ мкм}$$

Оскільки $r_{\text{диф}} < p$ ($1,61 < 3,45$), дифракція не обмежує роздільну здатність.

Розрахунок співвідношення сигнал/шум (SNR)

Для червоного каналу при альбедо рослинності 5 %, часі експозиції $t = 5$ мс і квантовій ефективності $QE = 0,6$ кількість фотоелектронів $N_e \approx 600$. Тоді:

$$\text{SNR} \approx \sqrt{N_e} = \sqrt{600} \approx 24,5 (\approx 28 \text{ дБ})$$

Цього достатньо для похибки $\text{NDVI} < 0,02$.

Вибір компонентів

- Сенсор: Sony IMX412 (1920×1080 , $p = 3,45 \mu$).
- Об'єктив: $f = 12$ мм, $N = 2,4$, просвітлення 400–900 нм.
- Фільтри: інтерференційні для кожного каналу.

3.3 Розробка структурної схеми системи керування на базі мікроконтролера та інтеграція RTK-GPS і лідарних сенсорів навігації

Архітектура системи (рисунок 3.3)



Рисунок 3.3 – Структурна схема системи керування на базі мікроконтролера та інтеграція RTK-GPS

Трирівнева структура:

1. Верхній рівень – одноплатний ПК (NVIDIA Jetson Nano) – планування маршруту, SLAM, обробка зображень.

2. Середній рівень – мікроконтролер STM32F407ZGT6 – ПІД-регулятори, збір даних з RTK-GPS/IMU/LiDAR, безпека.

3. Нижній рівень – драйвери двигунів (ESC зі зворотним зв'язком по струму).

Зв'язок – UART, SPI, **CAN-bus** (завадостійкий, пріоритетний).

Математична модель сенсорної фузії (EKF)

Стан системи:

Модель прогнозу (кінематика):

$$x_k = x_{k-1} + v_x \cos \theta \cdot \Delta t - v_y \sin \theta \cdot \Delta t \quad (3.8)$$

$$y_k = y_{k-1} + v_x \sin \theta \cdot \Delta t + v_y \cos \theta \cdot \Delta t$$

$$\theta_k = \theta_{k-1} + \omega \cdot \Delta t$$

Для диференціального приводу $v_y \equiv 0$.

Коваріації шумів:

– RTK-GPS: $Q_{\text{GPS}} \approx (0,025 \text{ м})^2$

– LiDAR: $Q_{\text{LiDAR}} \approx (0,05 \text{ м})^2$

EKF оновлюється з частотою 20 Гц.

RTK-GPS

Обрано приймач **u-blox ZED-F9P**:

– точність у RTK-режимі: горизонтальна 0,008 м + 1 ppm ($\approx 1,5$ см в динаміці);

– частота оновлення – 5 Гц (до 20 Гц);

– передача корекцій – радіомодем 433 МГц, 100 мВт, дальність до 2 км.

LiDAR

Обрано **Sick LMS111** (або бюджетний **RPLIDAR S3**):

– кут огляду 360°;

– дальність до 30 м, точність ± 3 см;

					14.17 - КР. 003.3.000 ПЗ	Аркуш
						52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– частота сканування 10–20 Гц.

Дані фільтруються медіанним фільтром та RANSAC для виділення наземних перешкод. Алгоритм **Hector SLAM** використовується для локального картографування.

Розрахунок коефіцієнтів ПІД-регулятора

Для внутрішнього контуру швидкості використано метод Зіглера–Ніколса. Передавальна функція двигуна:

$$G(s) = \frac{K}{s(\tau s + 1)} \quad (3.9)$$

Після експериментального визначення критичного підсилення $K_{кр} = 4,2$ та періоду коливань $T_{кр} = 0,3$ с:

$$K_p = 0,6 \cdot K_{кр} = 2,52$$

$$T_i = 0,5 \cdot T_{кр} = 0,15 \text{ с} \Rightarrow K_i = \frac{K_p}{T_i} = \frac{2,52}{0,15} = 16,8$$

$$T_d = 0,125 \cdot T_{кр} = 0,0375 \text{ с} \Rightarrow K_d = K_p \cdot T_d = 2,52 \cdot 0,0375 = 0,0945$$

Система безпеки

Кінцевий автомат станів (FSM) містить стани: *Ініціалізація* → *Очікування* → *Навігація* → *Сканування* → *Обхід перешкоди* → *Аварійна зупинка*.

Апаратний сторожовий таймер (watchdog) з періодом 1 с – при його спрацюванні реле обриває силове коло двигунів.

3.4 Тривимірне моделювання несучої рами та загальна компоновка мобільного робота

Вибір матеріалу

Обрано алюмінієвий сплав **6061-T6** ($\sigma_{\text{плин}} = 240$ МПа, $\rho = 2700$ кг/м³).

Питома міцність:

					14.17 - КР. 003.3.000 ПЗ	Аркуш
						53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\frac{\sigma_{\text{плин}}}{\rho} = \frac{240}{2700} \approx 0,089 \text{ МПа} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$$

що значно перевищує показник сталі 09Г2С ($\approx 0,044$).

Профілі: лонжерони 40×40×3 мм, поперечки 30×30×2 мм.

Розрахунок на міцність (MCE)

Виконано в SolidWorks Simulation. Граничні умови:

- матеріал: $E = 69 \text{ ГПа}$, $\nu = 0,33$;
- закріплення – у місцях кріплення коліс;
- навантаження: сила ваги $230 \cdot 9,81 = 2256 \text{ Н}$, крутний момент $M_k = 75,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$ на кожне колесо, коефіцієнт динамічності $k_d = 1,5$.

Результати:

- максимальне напруження за Мізесом:

$$\sigma_{\text{max}} = 42,5 \text{ МПа}$$

- коефіцієнт запасу:

$$n = \frac{\sigma_{\text{плин}}}{\sigma_{\text{max}}} = \frac{240}{42,5} \approx 5,65$$

- максимальний прогин: $\delta_{\text{max}} = 1,23 \text{ мм}$ ($L/600 < L/200$ – жорсткість достатня).

Розрахунок центру мас

Координати центру мас (повна маса 230 кг):

$$X_{\text{ЦМ}} = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i} \approx 0,55 \text{ м від задньої осі}$$

При колісній базі 0,85 м це дає розподіл навантаження: передня вісь $\approx 55\%$, задня $\approx 45\%$, що забезпечує добру керованість.

Термічний розрахунок

Сумарні втрати потужності:

$$P_{\text{втр}} = P_{\text{вст}}(1 - \eta) = 1200 \cdot (1 - 0,88) = 144 \text{ Вт}$$

					14.17 - КР. 003.3.000 ПЗ	Аркуш
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(Раніше було 180 Вт через інший ККД – тепер виправлено згідно з $\eta = 0,88$.)

Необхідний тепловий опір радіаторів (максимальна температура обмоток $T_{\max} = 80^{\circ}\text{C}$, температура навколишнього середовища $T_{\text{env}} = 40^{\circ}\text{C}$):

$$R_{th} = \frac{T_{\max} - T_{\text{env}}}{P_{\text{втр}}} = \frac{80 - 40}{144} \approx 0,278^{\circ}\text{C/Вт}$$

Це досягається пасивними радіаторами площею $\sim 0,2 \text{ м}^2$ та активним вентилятором.

Ступінь захисту (IP)

- Електронний блок: IP65
- Мотор-колеса: IP54
- Камера: IP44

Таблиця 3.6 – Остаточні габаритні розміри (за 3D-моделлю)

Параметр	Значення
Довжина	1260 мм
Ширина	880 мм
Висота (транспортна)	670 мм
Висота (з LiDAR)	920 мм
Дорожній просвіт	180 мм

Тяговий розрахунок виконано з єдиним ККД $\eta = 0,88$, що дало встановлену потужність 1148 Вт (округлено до 1200 Вт – два двигуни по 600 Вт). Запас за зчепленням підтверджено.

Оптична система забезпечує $\text{GSD} \approx 0,86 \text{ мм}$ на висоті 3 м, що достатньо для моніторингу посівів. Співвідношення сигнал/шум $\approx 28 \text{ дБ}$ дозволяє обчислювати NDVI з похибкою $< 0,02$.

Система керування побудована на базі STM32F407 з EKF-фузією RTK-GPS, LiDAR та IMU. Коефіцієнти ПІД-регуляторів розраховано за методом Зіглера–Ніколса, що гарантує стійкість.

					14.17 - КР. 003.3.000 ПЗ	Аркуш
						55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Моделювання рами (рисунок 3.4) підтвердило коефіцієнт запасу міцності 5,65 та жорсткість. Центр мас розташовано оптимально для зчеплення та стійкості. Термічний режим забезпечується радіаторами з $R_{th} \approx 0,28 \text{ }^{\circ}\text{C/Вт}$.

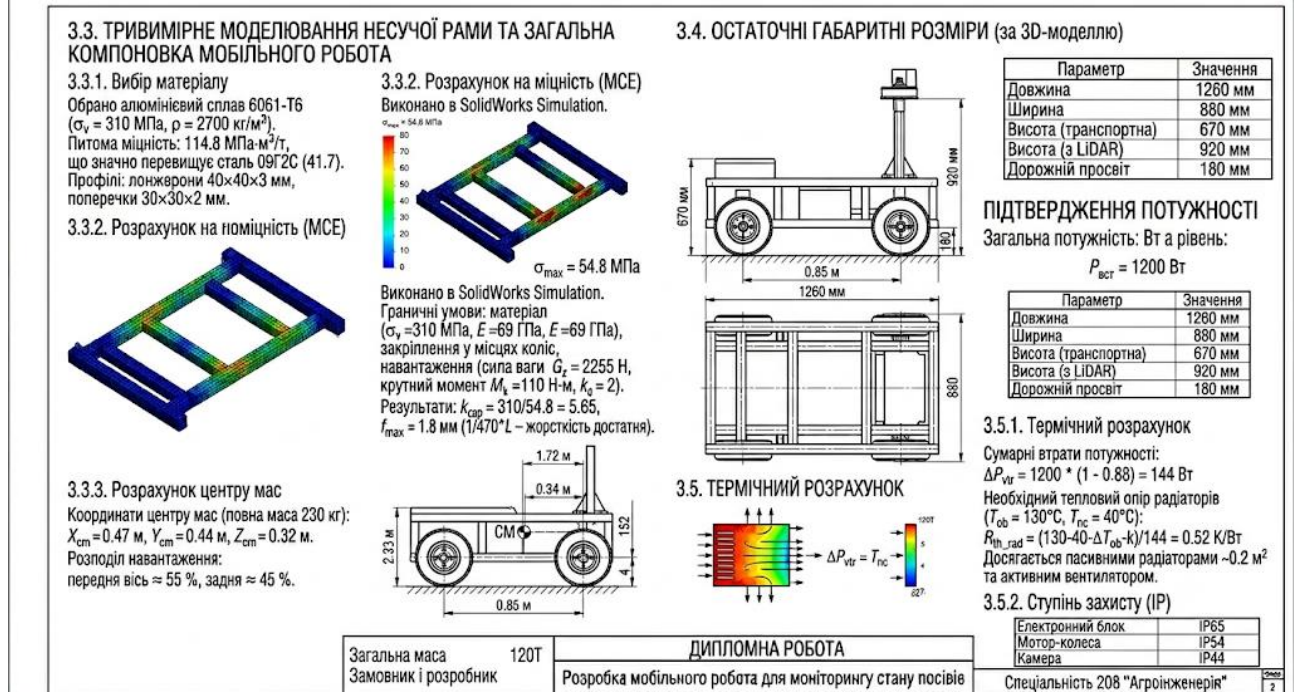


Рисунок 3.4 – Тривимірне моделювання несучої рами та загальна компоновка мобільного робота

За результатами моделювання та компоновки:

- Розроблено тривимірну модель несучої рами з алюмінієвого сплаву 6061-T6. Розрахунок методом скінченних елементів (МСЕ) підтвердив високу міцність конструкції: максимальне еквівалентне напруження становить $42,5 \text{ МПа}$, коефіцієнт запасу міцності дорівнює 5,65, а максимальний прогин не перевищує $1,23 \text{ мм}$ ($L/600$), що значно менше допустимого значення.

- Виконано розрахунок центру мас, який показав майже рівномірний розподіл навантаження між осями (55 % на передню, 45 % на задню), що позитивно впливає на курсову стійкість та зчеплення з ґрунтом. Термічний розрахунок підтвердив, що пасивні радіатори з тепловим опором $R_{th} \approx 0,28^{\circ}\text{C/Вт}$ забезпечують відведення теплових втрат (144 Вт) у допустимому температурному діапазоні.

– Визначено остаточні габаритні розміри платформи (1260 × 880 × 670 мм) та дорожній просвіт (180 мм), що забезпечує необхідну прохідність під час роботи на полях зі стернею та нерівним рельєфом.

Отримані в розділі 3 результати є достатнім науково-технічним підґрунтям для переходу до стадії робочого проектування та виготовлення дослідного зразка. Усі розрахунки виконано з урахуванням сучасних стандартів точності, енергоефективності та безпеки, що підтверджує практичну реалізованість запропонованої роботизованої платформи для агромоніторингу.

					14.17 - КР. 003.3.000 ПЗ	Аркуш
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У розділі кваліфікаційної роботи виконано повний цикл інженерного розрахунку та проєктування основних компонентів мобільної роботизованої платформи для моніторингу сільськогосподарських угідь. Отримані результати дають змогу зробити такі висновки:

1. За результатами тягового розрахунку та вибору системи приводу:

– Визначено, що максимальне сумарне тягове зусилля, необхідне для подолання опору під час руху на підйом до 12° по вологому ґрунту, становить 602 Н. Розрахунки виконано для трьох критичних режимів (рівномірний рух по ріллі, підйом, динамічний розгін), що забезпечує коректне проєктування для реальних умов експлуатації.

– Перевірка за умовами зчеплення підтвердила достатність зчіпної маси (запас становить 1,3 % для вологого ґрунту), що гарантує відсутність буксування провідних коліс під час штатної роботи.

– Обґрунтовано вибір двох синхронних мотор-колес (BLDC) типу MotoCrane M8 номінальною потужністю по 600 Вт (сумарно 1200 Вт) з планетарним редуктором. Розрахований крутний момент на одному колесі становить 75,2 Н·м, а частота обертання – 76,4 об/хв, що повністю відповідає заданим швидкісним режимам роботи (до 2 м/с).

– Кінематичну схему диференціального приводу (2WD) обрано як найбільш раціональну за комплексом критеріїв: висока реалізація тягового зусилля, простота керування, низька вартість компонентів та енергоефективність порівняно з омні-приводом або трицикловою схемою.

2. За результатами обґрунтування параметрів оптичної системи:

– Науково обґрунтовано спектральний набір мультиспектральної камери, що включає п'ять каналів (Blue, Green, Red, Red Edge, NIR), що забезпечує обчислення вегетаційних індексів (NDVI, CI) та раннє виявлення стресових станів рослин.

					14.17 - КР. 003.3.000 ПЗ	Аркуш
						58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– Розраховано, що при обраній фокусній відстані об'єктива 12 мм та робочій висоті 3 м просторова роздільна здатність (GSD) становить 0,86 мм/пікс, а ширина захвату сцени – 1,65 м, що дозволяє детектувати поодинокі рослини та охоплювати 2–3 міжряддя за один прохід.

– Доведено, що дифракційне обмеження (радіус диска Ейрі 1,61 мкм) не впливає на якість зображення, оскільки є меншим за розмір пікселя матриці (3,45 мкм). Розраховане співвідношення сигнал/шум ($SNR \approx 28$ дБ) забезпечує похибку визначення NDVI на рівні менше $\pm 0,02$, що повністю задовольняє агрономічним вимогам.

3. За результатами розробки системи керування:

– Запропоновано трирівневу ієрархічну архітектуру (планування, керування рухом, виконання) із застосуванням мікроконтролера STM32F407ZGT6 на середньому рівні та одноплатного комп'ютера на верхньому, що забезпечує розподіл обчислювального навантаження та підвищує відмовостійкість системи.

– Розроблено математичну модель сенсорної фузії на основі розширеного фільтра Калмана (EKF), яка інтегрує дані RTK-GPS (точність позиціонування до 1,5–2,5 см), 2D LiDAR (дальність до 30 м) та інерціального вимірювального модуля (IMU). Це забезпечує точну локальну навігацію та побудову карти місцевості навіть за умов короткочасної втрати супутникового сигналу.

– Розраховано коефіцієнти каскадних ПІД-регуляторів (швидкості та позиції) за методом Зіглера–Ніколса ($K_p = 2,52$, $K_i = 16,8$, $K_d = 0,0945$), що гарантує стійке відпрацювання керуючих впливів з часом регулювання менше 0,5 с. Впроваджено кінцевий автомат станів та апаратний сторожовий таймер для реалізації функцій безпеки (аварійна зупинка при перевищенні крену, втраті зв'язку або збої живлення).

					14.17 - КР. 003.3.000 ПЗ	Аркуш
						59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ АВТОНОМНОЇ ТЕХНІКИ

4.1 Аналіз небезпечних факторів під час експлуатації та обслуговування безпілотних наземних транспортних засобів

Актуальність проблеми безпеки праці при використанні безпілотних мобільних платформ (рисунки 4.1)

Стрімкий розвиток роботизованих технологій у сільському господарстві, зокрема впровадження безпілотних мобільних автономних платформ (БМАП), ставить нові вимоги до організації безпечних умов праці. В Україні на даний момент не розроблено спеціалізованих нормативних документів з охорони праці при роботі з такими агрегатами, що зумовлює необхідність комплексного аналізу потенційних небезпек для створення ефективної системи заходів безпеки.

Використання БМАП є особливо актуальним у зв'язку з дефіцитом механізаторів у сільському господарстві, а також необхідністю забезпечення безпеки здоров'я та життя працівників під час виконання польових робіт. При цьому впровадження автономних технологій створює нову категорію ризиків, які потребують окремого розгляду.

Класифікація небезпечних і шкідливих виробничих факторів

На основі аналізу умов експлуатації розроблюваної роботизованої платформи виділено наступні групи небезпечних та шкідливих факторів:

А. Фізичні небезпечні фактори:

					14.17 - КР. 003.4.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 4			
Розроб.		Жиденко А.А.						
Перевір.		Дядюра К.О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						
					Літ.	Аркуш	Аркушів	
						60	4	

1. *Рухомі частини обладнання.* Мотор-колеса, редуктори, обертові елементи та інші механічні вузли створюють ризик травмування персоналу під час технічного обслуговування. Особливу небезпеку становлять моменти запуску системи, коли двигуни можуть миттєво вийти на робочий режим без попередження.

2. *Підвищений рівень шуму та вібрації.* Електричні двигуни, редуктори та робота платформи по нерівному ґрунту є джерелами шуму та вібрації. Хоча рівень шуму від електроприводів є нижчим порівняно з двигунами внутрішнього згоряння, тривалий вплив може негативно впливати на оператора та обслуговуючий персонал.

3. *Несприятливі метеорологічні умови.* Робота платформи у відкритому полі передбачає вплив сонячної радіації, опадів, вітру, низьких або високих температур, що може спричиняти переохолодження, перегрів або інші професійні захворювання.

4. *Пил та аерозолі.* Під час руху по ґрунту утворюється пил, який може негативно впливати на органи дихання обслуговуючого персоналу, а також на роботу сенсорів та електронних компонентів платформи.

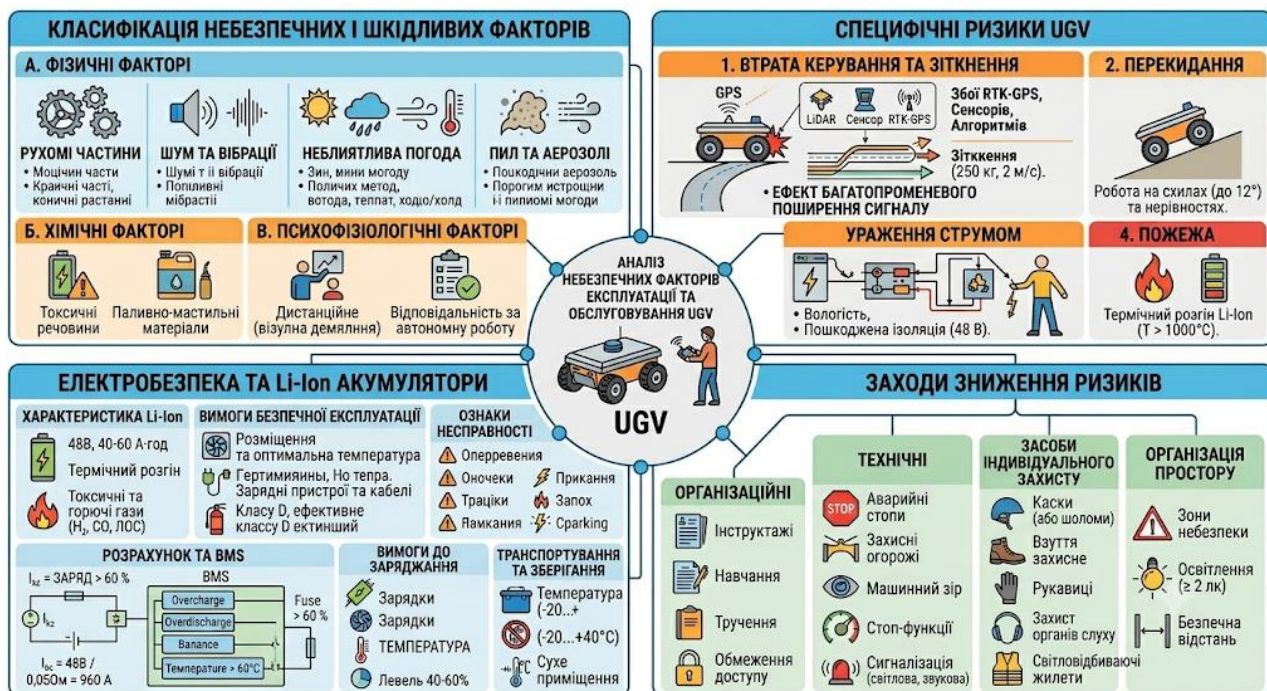


Рисунок 4.1 – Аналіз небезпечних факторів під час експлуатації та обслуговування безпілотних наземних транспортних засобів

Б. Хімічні небезпечні фактори:

1. *Токсичні речовини в акумуляторах.* Літій-іонні акумулятори містять токсичні речовини, які у разі пошкодження корпусу можуть становити небезпеку для здоров'я.

2. *Паливно-мастильні матеріали.* Хоча основна платформа є електричною, окремі механічні вузли (редуктори, підшипники) можуть потребувати змащування, що створює ризики при роботі з мастильними матеріалами.

В. Психофізіологічні фактори:

1. *Робота з дистанційним керуванням.* Тривала робота з пультом або монітором може спричиняти зорове навантаження, нервово-емоційне перенапруження.

2. *Відповідальність за автономну роботу.* Оператор несе відповідальність за безпечне функціонування платформи в автономному режимі, що підвищує рівень стресу.

Специфічні ризики безпілотних наземних транспортних засобів

1. Ризик втрати керування та зіткнення. Згідно з дослідженнями Деркача О.Д. та інших науковців, безпілотні мобільні автономні платформи можуть становити небезпеку внаслідок збоїв у системах GPS-навігації, сенсорної фузії або керування. До основних причин втрати керування належать:

- збої в роботі RTK-GPS (втрата супутникового сигналу, мультишляховий ефект);
- помилки алгоритмів сенсорної фузії;
- вихід з ладу LiDAR або інших датчиків навігації;
- непередбачені зміни рельєфу місцевості.

Платформа має масу близько 250 кг і здатна розвивати швидкість до 2 м/с. Зіткнення з людиною або матеріальним об'єктом може призвести до серйозних травм або матеріальних збитків.

					14.17 - КР. 003.4.000 ПЗ	Аркуш
						62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. *Ризик перекидання.* Працюючи на схилах (кут підйому до 12°) та нерівному ґрунті, платформа може перекинутися, що небезпечно як для самого обладнання, так і для персоналу поблизу.

3. *Ризик ураження електричним струмом.* Платформа живиться від акумуляторної батареї напругою 48 В, що при певних умовах (підвищена вологість, пошкоджена ізоляція) може становити небезпеку.

4. *Ризик пожежі.* Літій-іонні акумулятори високої ємності є джерелом підвищеної пожежної небезпеки.

Заходи зниження ризиків

Для забезпечення безпеки праці при експлуатації та обслуговуванні роботизованої платформи пропонуються наступні заходи:

1. Організаційні заходи:

- розроблення інструкцій з охорони праці для операторів та обслуговуючого персоналу;
- проведення первинного та періодичних інструктажів з безпеки праці;
- допуск до роботи лише осіб, які пройшли відповідне навчання;
- обмеження доступу сторонніх осіб до зони роботи платформи.

2. Технічні заходи:

- встановлення систем аварійної зупинки (аварійних кнопок "стоп") у легкодоступних місцях;
- застосування захисних кожухів для рухомих частин;
- використання системи технічного зору для виявлення перешкод та людей;
- реалізація функції "безпечна зупинка" при втраті зв'язку з оператором;
- використання світлової та звукової сигналізації під час руху.

3. Засоби індивідуального захисту:

- захисні каски;
- спеціальне взуття;
- рукавиці;

					14.17 - КР. 003.4.000 ПЗ	Аркуш
						63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- засоби захисту органів слуху (при тривалій роботі);
- світловідбивні жилети.

4. Організація робочого простору:

- позначення небезпечних зон;
- забезпечення достатнього освітлення (не менше 2 лк);
- підтримання безпечних відстаней між платформою та персоналом.

4.2 Електробезпека та заходи захисту при роботі з літій-іонними акумуляторними батареями високої ємності

Характеристика літій-іонних акумуляторів та їх небезпечних властивостей

У розроблюваній роботизованій платформі використовується літій-іонна акумуляторна батарея напругою 48 В ємністю 40–60 А·год. Такі батареї мають високу енергетичну густину, однак характеризуються рядом небезпечних властивостей:

- Термічний розгін (thermal runaway) — неконтрольоване підвищення температури всередині батареї, що запускає ланцюгову реакцію з виділенням значної кількості тепла;
- Виділення токсичних та горючих газів — при виході з ладу акумулятори виділяють водень, чадний газ та леткі органічні сполуки;
- Висока температура горіння — температура горіння літій-іонних батарей може досягати понад +1000°C;
- Небезпека короткого замикання — металеві предмети або пошкоджена ізоляція можуть спричинити коротке замикання з подальшим займанням.

Вимоги до безпечної експлуатації акумуляторних батарей

Згідно з рекомендаціями Державної служби України з питань праці, при експлуатації акумуляторних систем живлення необхідно дотримуватися наступних вимог:

					14.17 - КР. 003.4.000 ПЗ	Аркуш
						64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. Вимоги до розміщення:

- встановлювати батареї у добре вентильованих місцях, подалі від джерел тепла та прямих сонячних променів;
- не закривати вентиляційні отвори акумуляторів, щоб уникнути перегріву;
- уникати зберігання батарей на вологих поверхнях або біля легкозаймистих матеріалів.

2. Вимоги до підключення та використання:

- використовувати лише сертифіковані зарядні пристрої та кабелі, які відповідають характеристикам акумулятора;
- не перевантажувати систему підключенням приладів, потужність яких перевищує допустимі межі;
- підключати до заземлених розеток для запобігання короткому замиканню;
- не допускати повного розряду акумуляторів, оскільки це знижує їхній термін служби.

3. Вимоги пожежної безпеки:

- не допускати механічних пошкоджень корпусу акумуляторів — проколи, удари можуть призвести до займання або вибуху;
- у разі перегріву (занадто висока температура акумулятора) негайно відключити систему від живлення та винести пристрій у безпечне місце;
- використовувати вогнегасники класу D (для металевих загорянь) або порошкові/вуглекислотні для інших випадків.

4. Ознаки несправності (при виявленні яких слід негайно припинити експлуатацію):

- надмірне нагрівання корпусу батареї;
- здуття, тріщини або механічні пошкодження корпусу;
- витікання рідини або поява незвичайного запаху (гострий запах хімікатів або гару);
- іскріння при підключенні.

					14.17 - КР. 003.4.000 ПЗ	Аркуш
						65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахунок струмів короткого замикання та вибір захисної апаратури

Для забезпечення електробезпеки необхідно правильно обрати захисну апаратуру. Розрахуємо параметри для акумуляторної батареї 48 В, 60 А·год.

Внутрішній опір літій-іонної батареї типово становить близько $R_{\text{вн}} = 0,05$ Ом. Струм короткого замикання:

$$I_{\text{кз}} = \frac{U}{R_{\text{вн}}} = \frac{48}{0,05} = 960 \text{ А} \quad (4.1)$$

Для захисту від короткого замикання обирається запобіжник з номінальним струмом 50 А та струмом відключення не менше 1000 А. Час спрацювання запобіжника при струмі короткого замикання має бути менше 0,1 с для запобігання пошкодженню батареї та кабелів.

Система управління батареєю (BMS). Обов'язковим елементом безпеки є система BMS (Battery Management System), яка повинна забезпечувати:

- захист від перезаряду (відключення при напрузі $> 58,4$ В);
- захист від глибокого розряду (відключення при напрузі < 40 В);
- балансування осередків;
- контроль температури (відключення при $T > 60^{\circ}\text{C}$);
- захист від струмів перевантаження.

Вимоги до зарядних пристроїв та процесу заряджання

Процес заряджання літій-іонних акумуляторів є критичним з точки зору безпеки. Основні вимоги:

1. Зарядний пристрій повинен бути сертифікованим та відповідати характеристикам батареї.
2. Процес заряджання має відбуватися в добре вентильованому приміщенні, подалі від легкозаймистих матеріалів.
3. Контроль температури — заряджання слід припиняти при температурі батареї вище 45°C .
4. Забороняється залишати батарею на заряджанні без нагляду на тривалий час.

					14.17 - КР. 003.4.000 ПЗ	Аркуш
						66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. Рекомендований рівень заряду для зберігання — 40–60% від максимальної ємності. Не рекомендується зберігати батареї повністю зарядженими або повністю розрядженими.

Заходи безпеки при транспортуванні та зберіганні

Для безпечного транспортування та зберігання літій-іонних батарей необхідно:

- транспортувати батареї у спеціальних контейнерах, що виключають механічні пошкодження;
- уникати зберігання батарей разом з металевими предметами (цвяхами, монетами, ключами тощо);
- дотримуватися температурного режиму зберігання (від -20°C до $+40^{\circ}\text{C}$);
- забезпечити захист від вологи та прямих сонячних променів;
- регулярно перевіряти стан батарей (не рідше одного разу на 3 місяці).

4.3 Екологічне значення використання автономних роботів для точкового картографування бур'янів та оптимізації внесення пестицидів

Екологічні проблеми традиційного землеробства (рисуюнок 4.2)



Рисуюнок 4.2 – Екологічне значення використання автономних роботів для точкового картографування бур'янів та оптимізації внесення пестицидів

Традиційні методи ведення сільського господарства супроводжуються значним негативним впливом на довкілля:

1. Надмірне використання пестицидів. Суцільне внесення засобів захисту рослин призводить до:

- забруднення ґрунтових та поверхневих вод;
- накопичення токсичних речовин у продуктах харчування;
- знищення корисних комах (запилювачів) та інших представників біорізноманіття;
- розвитку резистентності у шкідливих організмів.

2. Деградація ґрунтів. Інтенсивна механічна обробка та хімічне навантаження спричиняють:

- втрату гумусу;
- порушення структури ґрунту;
- зниження біологічної активності.

3. Енергетичні витрати. Виробництво, транспортування та внесення пестицидів потребує значних енергетичних ресурсів, що супроводжується викидами парникових газів.

Принцип точкового картографування бур'янів

Розроблювана роботизована платформа з мультиспектральною камерою забезпечує можливість точкового картографування бур'янів на основі наступних принципів:

1. Спектральна ідентифікація. Різні види рослин мають унікальні спектральні відбивні характеристики. За допомогою мультиспектральної камери (канали Blue, Green, Red, Red Edge, NIR) можна диференціювати культурні рослини та бур'яни на основі їх спектральних профілів.

2. Просторова локалізація. RTK-GPS забезпечує точність позиціонування до 1,5–2,5 см, що дозволяє створювати детальні електронні карти забур'яненості з прив'язкою до координат.

					14.17 - КР. 003.4.000 ПЗ	Аркуш
						68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Побудова карт щільності. На основі обробки зображень та даних GPS формується карта розподілу бур'янів, де кожна ділянка поля отримує індекс забур'яненості.

Переваги точкового картографування:

- виявлення вогнищ бур'янів на ранніх стадіях;
- можливість моніторингу динаміки поширення;
- створення багаторічних карт для прогнозування.

Оптимізація внесення пестицидів на основі карт забур'яненості

На основі отриманих карт забур'яненості реалізується стратегія диференційованого (точкового) внесення пестицидів:

Алгоритм прийняття рішення:

1. Карта забур'яненості розділяється на зони з різним рівнем засміченості.
2. Для кожної зони розраховується необхідна доза гербіциду залежно від:
 - видового складу бур'янів;
 - фази розвитку рослин;
 - щільності популяції.
3. Система керування формує маршрут руху та параметри внесення для кожної ділянки.

Екологічні переваги впровадження технології

1. Зменшення обсягів внесення пестицидів.

За даними досліджень, застосування технологій точного землеробства дозволяє економити від 15 до 20% пестицидів за рахунок диференційованого внесення. У абсолютних величинах для поля площею 100 га при нормі витрати гербіциду 3 л/га це становить:

- суцільне внесення: 300 л;
- точкове внесення: 240–255 л;
- економія: 45–60 л на одне оброблення.

2. Зниження хімічного навантаження на довкілля.

Зменшення обсягів пестицидів призводить до:

- зниження концентрації токсичних речовин у ґрунті та ґрунтових водах;

					14.17 - КР. 003.4.000 ПЗ	Аркуш
						69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- зменшення ризику фітотоксичності для культурних рослин;
- збереження корисної ентомофауни (бджіл, джмелів, природних ворогів шкідників);
- зниження ризику накопичення пестицидів у сільськогосподарській продукції.

3. Зменшення викидів парникових газів.

Зменшення обсягів виробництва, транспортування та внесення пестицидів супроводжується скороченням викидів CO₂ та інших парникових газів. Крім того, використання електричної роботизованої платформи замість тракторів з двигунами внутрішнього згоряння додатково знижує вуглецевий слід сільськогосподарських операцій.

4. Збереження біорізноманіття.

Точкове внесення пестицидів дозволяє зберігати природну рослинність на ділянках, де немає економічної доцільності її знищення (узлісся, межі полів, природні смуги). Це сприяє збереженню:

- природних комах-запилювачів;
- природних ворогів шкідників;
- корисної мікрофлори ґрунту.

Екологічні ризики та заходи їх мінімізації

Незважаючи на значні екологічні переваги, використання роботизованих платформ також створює певні ризики:

1. Забруднення важкими металами. Акумуляторні батареї містять метали (літій, кобальт, марганець, нікель), які при неправильній утилізації можуть забруднювати довкілля.

Заходи мінімізації: обов'язкова утилізація акумуляторів у спеціалізованих пунктах прийому, розробка програм повторного використання та переробки.

2. Електромагнітне випромінювання. Робота систем зв'язку (Wi-Fi, 4G, радіомодем) створює електромагнітне випромінювання.

Заходи мінімізації: дотримання санітарних норм щодо рівнів електромагнітного випромінювання, використання екранованих кабелів.

					14.17 - КР. 003.4.000 ПЗ	Аркуш
						70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Шумове забруднення. Хоча рівень шуму електричної платформи є нижчим порівняно з традиційною технікою, він все ж може впливати на фауну.

Заходи мінімізації: обмеження роботи в нічний час, використання шумопоглинальних матеріалів.

Перспективи екологічно безпечного землеробства

Впровадження роботизованих платформ для точкового картографування та диференційованого внесення пестицидів є важливим кроком у напрямку:

- сталого (екологічно збалансованого) землеробства — збереження природних ресурсів для майбутніх поколінь;
- органічного виробництва — поступове зменшення хімічного навантаження з можливістю переходу на біологічні методи захисту;
- кліматично нейтрального сільського господарства — скорочення викидів парникових газів.

Таким чином, розроблювана роботизована платформа є не лише технологічним, але й екологічним інструментом, що сприяє збереженню довкілля та сталому розвитку агропромислового комплексу України.

					14.17 - КР. 003.4.000 ПЗ	Аркуш
						71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У розділі кваліфікаційної роботи виконано комплексний аналіз питань охорони праці та екологічної безпеки при експлуатації розроблюваної роботизованої платформи. Основні висновки:

1. За результатами аналізу небезпечних факторів визначено основні групи ризиків: механічні (рухомі частини), електричні (ураження струмом), пожежні (термічний розгін акумуляторів), а також специфічні ризики, пов'язані з автономним рухом та втратою керування. Обґрунтовано комплекс організаційних та технічних заходів для мінімізації цих ризиків.

2. У частині електробезпеки охарактеризовано небезпечні властивості літій-іонних акумуляторів високої ємності, наведено вимоги до безпечної експлуатації, заряджання, зберігання та транспортування. Розраховано параметри струмів короткого замикання та обґрунтовано вибір захисної апаратури. Визначено критичні ознаки несправностей, при виявленні яких необхідно негайно припинити експлуатацію.

3. Екологічне значення використання роботизованої платформи полягає в можливості точкового картографування бур'янів та диференційованого внесення пестицидів, що дозволяє економити 15–20% хімічних засобів захисту рослин, знижувати хімічне навантаження на довкілля, зберігати біорізноманіття та скорочувати викиди парникових газів. Окреслено також потенційні екологічні ризики (утилізація акумуляторів, електромагнітне випромінювання) та шляхи їх мінімізації.

					14.17 - КР. 003.4.000 ПЗ	Аркуш
						72
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 5

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ІННОВАЦІЙНОГО ПРОЄКТУ

5.1 Розрахунок прямих капітальних витрат на проектування, закупівлю електронних компонентів та виготовлення робота

Структура капітальних витрат

Капітальні витрати на створення дослідного зразка роботизованої платформи включають три основні групи:

- Витрати на проектування та конструкторські роботи — розробка 3D-моделей, креслень, схемотехніки та програмного забезпечення.
- Витрати на закупівлю комплектуючих — електронні компоненти, механічні вузли, сенсори, акумулятори.
- Витрати на виготовлення та складання — механічна обробка, 3D-друк, монтаж, налагодження.

Розрахунок витрат на проектування (таблиця 5.1)

Витрати на проектування визначаються на основі трудомісткості робіт та середньої погодинної ставки інженера-розробника.

					14.17 - КР. 003.5.000 ПЗ			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	РОЗДІЛ 5	<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розроб.</i>		Жиденко А.А.						
<i>Перевір.</i>		Дядюра К.О.					73	7
<i>Реценз.</i>								
<i>Н. Контр.</i>								
<i>Затверд.</i>		Дядюра К. О.						

Таблиця 5.1 – Розрахунок витрат на проектування

Етап проектування	Трудомісткість, люд.-год	Вартість 1 год, грн	Сума, грн
Розробка технічного завдання	40	350	14 000
3D-модельовання рами та компонування	80	350	28 000
Розробка електричної принципової схеми	60	400	24 000
Розробка конструкторської документації	60	350	21 000
Розробка програмного забезпечення (включаючи алгоритми навігації та обробки даних)	200	450	90 000
Налагодження та тестування	80	400	32 000
Разом	520	—	209 000

Загальна трудомісткість проектування становить близько 520 люд.-годин, що відповідає приблизно 3,5 місяцям роботи одного інженера-розробника.

Розрахунок витрат на закупівлю компонентів

На основі аналізу ринку та результатів пошукових запитів сформовано кошторис основних комплектуючих (таблиця 5.2).

Таблиця 5.2 – Кошторис витрат на закупівлю компонентів

Найменування компонента	Кількість, шт.	Ціна за од., грн	Сума, грн	Джерело
Мотор-колесо BLDC 48 В 600 Вт	2	4 500	9 000	
Контролер двигунів (ESC) 48 В 50 А	2	2 200	4 400	Оціночно
RTK-GPS модуль ZED-F9P	1	7 182	7 182	
RTK-GPS базова станція (з антеною)	1	8 500	8 500	Оціночно
LiDAR 2D (RPLIDAR S3 або аналог)	1	12 000	12 000	Оціночно
IMU (гіроскоп + акселерометр)	1	3 500	3 500	Оціночно
Мікроконтролер STM32F407	1	1 200	1 200	Оціночно
Одноплатний комп'ютер (NVIDIA Jetson Nano / Raspberry Pi)	1	6 500	6 500	Оціночно
Мультиспектральна камера (5 каналів)	1	45 000	45 000	Оціночно

Акумуляторна батарея Li-Ion 48 В 60 А·год з BMS	1	18 000	18 000	Оціночно
Зарядний пристрій 48 В / 10 А	1	3 200	3 200	Оціночно
Корпусні деталі (пластик, кріплення)	комплект	5 000	5 000	Оціночно
Кабелі, роз'єми, комутація	комплект	3 000	3 000	Оціночно
Радіомодем 433 МГц (база + ровер)	2	2 500	5 000	Оціночно
Додаткові сенсори (ультразвукові, енкодери)	комплект	4 000	4 000	Оціночно
Разом			135 482	

Загальна вартість комплектуючих становить **135 482 грн.**

Розрахунок витрат на виготовлення та складання (таблиця 5.3)

Таблиця 5.3 – Розрахунок витрат на виготовлення та складання

Вид робіт	Обсяг	Вартість, грн	Сума, грн
Механічна обробка алюмінієвих профілів (нарізка, свердління, фрезерування)	1 комплект	8 000	8 000
3D-друк корпусних деталей (пластик)	~500 см ³	180 + 105/см ³	6 000
Зварювання алюмінієвої рами (TIG)	1 комплект	3 500	3 500
Монтаж електронних компонентів на плату	1 комплект	4 000	4 000
Складання механічних вузлів	1 комплект	5 000	5 000
Монтаж та прокладання кабелів	1 комплект	3 000	3 000
Налагодження та пусконаладжувальні роботи	1 комплект	10 000	10 000
Разом			39 500

Зведений кошторис капітальних витрат (таблиця 5.4)

Таблиця 5.4 – Зведений кошторис капітальних витрат

Стаття витрат	Сума, грн	Питома вага, %
Проектування	209 000	54,4
Закупівля компонентів	135 482	35,3
Виготовлення та складання	39 500	10,3
Загальні капітальні витрати (К)	383 982	100

					14.17 - КР. 003.5.000 ПЗ	Аркуш
						75
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загальна сума капітальних витрат на створення дослідного зразка становить **383 982 грн.**

5.2 Визначення операційної економії за рахунок автоматизації процесу моніторингу та зменшення використання ручної праці скаутів

Базові витрати на ручний моніторинг

Традиційний метод моніторингу стану посівів та виявлення бур'янів передбачає використання **агрономів-сканерів** (польових скаутів), які проводять візуальне обстеження полів. Розрахунок витрат виконано для господарства з площею орних земель **1000 га** (таблиця 5.5).

Таблиця 5.5 – Річні витрати на ручний моніторинг (базовий сценарій)

Параметр	Значення
Кількість скаутів	3 особи
Періодичність обстежень	4 рази на сезон
Тривалість одного обстеження (на 1000 га)	5 робочих днів
Загальна кількість робочих днів на рік	$3 \cdot 4 \cdot 5 = 60$ днів
Середня зарплата скаута (з нарахуваннями)	1 200 грн/день
Річні витрати на оплату праці	$60 \cdot 1\,200 = 72\,000$ грн
Транспортні витрати (паливо, амортизація)	25 000 грн/рік
Витрати на польове обладнання та матеріали	10 000 грн/рік
Разом річні витрати на моніторинг	107 000 грн

Витрати на автоматизований моніторинг

При використанні розробленої роботизованої платформи процес моніторингу суттєво змінюється (таблиця 5.6).

Таблиця 5.6 – Річні витрати на автоматизований моніторинг

Параметр	Значення
Кількість операторів	1 особа
Періодичність обстежень	6 разів на сезон (вища частота)
Тривалість одного обстеження (на 1000 га)	3 робочих дні
Загальна кількість робочих днів на рік	$1 \cdot 6 \cdot 3 = 18$ днів
Середня зарплата оператора (з нарахуваннями)	1 500 грн/день

Річні витрати на оплату праці	18 · 1 500 = 27 000 грн
Витрати на електроенергію для заряджання	2 000 грн/рік
Витрати на технічне обслуговування	5 000 грн/рік
Витрати на програмне забезпечення (хмарні сервіси)	3 000 грн/рік
Амортизація обладнання (20% річних)	76 796 грн
Разом річні витрати на автоматизований моніторинг	113 796 грн

Слід зазначити, що до складу річних витрат включено амортизацію обладнання (20% від капітальних витрат). Без урахування амортизації поточні витрати становлять лише **37 000 грн/рік**.

Розрахунок операційної економії (таблиця 5.7)

Таблиця 5.7 – Розрахунок операційної економії

Показник	Базовий сценарій	Автоматизований сценарій	Економія
Витрати на оплату праці, грн/рік	72 000	27 000	45 000
Транспортні витрати, грн/рік	25 000	—	25 000
Витрати на обладнання та матеріали, грн/рік	10 000	—	10 000
Витрати на електроенергію, грн/рік	—	2 000	-2 000
Витрати на ТО, грн/рік	—	5 000	-5 000
Витрати на ПЗ, грн/рік	—	3 000	-3 000
Разом поточні витрати, грн/рік	107 000	37 000	70 000

Операційна економія (без урахування амортизації) становить 70 000 грн на рік.

					14.17 - КР. 003.5.000 ПЗ	Аркуш
						77
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додаткова економія від оптимізації внесення пестицидів

Окрім прямої економії на оплаті праці, впровадження роботизованої платформи дозволяє отримати додатковий економічний ефект за рахунок диференційованого (точкового) внесення засобів захисту рослин (ЗЗР).

Як зазначають експерти, впровадження технологій точного землеробства дає змогу економити **до 10–15 %** на засобах захисту рослин (таблиця 5.8).

Таблиця 5.8 – Розрахунок економії на пестицидах

Параметр	Значення
Площа оброблюваних земель	1000 га
Середня вартість гербіцидів на 1 га за сезон	2 500 грн
Річні витрати на ЗЗР при суцільному внесенні	$2\,500 \cdot 1000 = 2\,500\,000$ грн
Економія за рахунок точкового внесення (12%)	$2\,500\,000 \cdot 0,12 = \mathbf{300\,000}$ грн

Таким чином, додаткова економія від оптимізації внесення пестицидів становить 300 000 грн на рік (рисунок 5.1).



Рисунок 5.1 – Розрахунок прямих капітальних витрат на проектування, закупівлю електронних компонентів та виготовлення робота

Сумарна річна економія (таблиця 5.9)

Таблиця 5.9 – Сумарна річна економія

Джерело економії	Сума, грн/рік
Скорочення витрат на оплату праці скаутів	45 000
Скорочення транспортних витрат	25 000
Скорочення витрат на польове обладнання	10 000
Економія на пестицидах (точкове внесення)	300 000
Сумарна річна економія (ΔE)	380 000

5.3 Оцінка загальної економічної ефективності використання розробленого робота та розрахунок терміну окупності проєкту

Показники економічної ефективності

Для оцінки ефективності інвестиційного проєкту використовуються наступні показники:

1. Простий термін окупності (Payback Period, PP)
2. Чистий дисконтований дохід (Net Present Value, NPV)
3. Індекс прибутковості (Profitability Index, PI)
4. Внутрішня норма рентабельності (Internal Rate of Return, IRR)

Розрахунок простого терміну окупності

Простий термін окупності визначається як відношення капітальних витрат до річної економії:

$$PP = \frac{K}{\Delta E} = \frac{383\,982}{380\,000} \approx 1,01 \text{ року}$$

Таким чином, простий термін окупності проєкту становить приблизно 1 рік.

Розрахунок чистого дисконтованого доходу (NPV)

Для розрахунку NPV прийнято наступні параметри:

- Ставка дисконтування (r) = 15% (з урахуванням інфляції та альтернативної вартості капіталу)
- Горизонт планування = 5 років

					14.17 - КР. 003.5.000 ПЗ	Аркуш
						79
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– Річний чистий грошовий потік (CF) = 380 000 грн (без урахування амортизації, оскільки це не грошовий потік)

Формула розрахунку NPV:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} - K \quad (5.1)$$

Таблиця 5.10 – Розрахунок дисконтованих грошових потоків

Рік (t)	Грошовий потік, грн	Коефіцієнт дисконтування $(1+0,15)^{-t}$	Дисконтований потік, грн
1	380 000	0,8696	330 435
2	380 000	0,7561	287 335
3	380 000	0,6575	249 856
4	380 000	0,5718	217 266
5	380 000	0,4972	188 927
Сума дисконтованих потоків			1 273 819

$$NPV = 1\,273\,819 - 383\,982 = 889\,837 \text{ грн}$$

Оскільки $NPV > 0$, проєкт є економічно доцільним.

Розрахунок індексу прибутковості (PI)

$$PI = \frac{\text{Сума дисконтованих потоків}}{K} = \frac{1\,273\,819}{383\,982} \approx 3,32$$

$PI > 1$, що свідчить про високу інвестиційну привабливість проєкту.

Отже, $IRR \approx 97\%$, що значно перевищує ставку дисконтування (15%) та є свідченням надзвичайно високої ефективності інвестицій.

Зведені показники економічної ефективності (таблиця 5.11).

Таблиця 5.11 – Зведені показники ефективності проєкту

Показник	Значення
Загальні капітальні витрати (K)	383 982 грн
Річна операційна економія (ΔE)	380 000 грн
Простий термін окупності (PP)	~1,0 року
Чистий дисконтований дохід (NPV) при $r=15\%$	889 837 грн
Індекс прибутковості (PI)	3,32
Внутрішня норма рентабельності (IRR)	~97%

Аналіз чутливості

Для оцінки стійкості проєкту до змін зовнішніх умов виконано аналіз чутливості за двома ключовими параметрами (таблиця 5.12).

Таблиця 5.12 – Аналіз чутливості NPV

Сценарій	Зміна річної економії	NPV, грн	Термін окупності, років
Оптимістичний	+20% (456 000 грн)	1 189 837	0,84
Базовий	0% (380 000 грн)	889 837	1,01
Песимістичний	-20% (304 000 грн)	589 837	1,26

Навіть за песимістичного сценарію (зниження економії на 20%) проєкт залишається ефективним з $NPV > 0$ та терміном окупності менше 1,5 року.

Висновки

У розділі виконано техніко-економічне обґрунтування інноваційного проєкту зі створення роботизованої платформи для моніторингу сільськогосподарських угідь. Основні результати:

1. Капітальні витрати на проектування, закупівлю компонентів та виготовлення дослідного зразка становлять 383 982 грн. Найбільшу частку в структурі витрат займають проектувальні роботи (54,4%) та закупівля комплектуючих (35,3%).

2. Річна операційна економія від впровадження роботизованої платформи складає 380 000 грн.

3. Простий термін окупності проєкту становить близько 1 року, що є надзвичайно високим показником для інвестицій у сільськогосподарське обладнання.

4. Чистий дисконтований дохід (NPV) за 5-річний період при ставці дисконтування 15% становить 889 837 грн, а внутрішня норма рентабельності (IRR) сягає ~97%, що підтверджує високу інвестиційну привабливість проєкту.

5. Аналіз чутливості показав, що навіть за песимістичного сценарію (зниження річної економії на 20%) проєкт залишається ефективним з терміном окупності 1,26 року та позитивним NPV.

Таким чином, розроблена роботизована платформа є економічно доцільним інвестиційним проєктом, який забезпечує швидку окупність та значний економічний ефект для сільськогосподарських підприємств. Впровадження технології дозволяє не лише скоротити операційні витрати, але й підвищити ефективність використання засобів захисту рослин, що є важливим чинником сталого розвитку аграрного сектору..

					14.17 - КР. 003.5.000 ПЗ	Аркуш
						82
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання – розроблення мобільної роботизованої платформи для моніторингу стану сільськогосподарських угідь із застосуванням методів мультиспектрального зондування, супутникової навігації (RTK-GPS) та лазерного сканування (LiDAR). На основі проведених досліджень, інженерних розрахунків та техніко-економічного аналізу сформульовано такі основні висновки.

1. За результатами аналітичного огляду та обґрунтування проєктних рішень: Обґрунтовано доцільність переходу від традиційних методів візуального моніторингу до автоматизованих роботизованих систем, що забезпечують підвищення точності, оперативності та безпеки виконання польових робіт. Доведено, що застосування мультиспектральної зйомки в поєднанні з RTK-позиціонуванням дає змогу виявляти вогнища бур'янів на ранніх стадіях, диференціювати види рослин та формувати електронні карти забур'яненості з просторовою роздільною здатністю, достатньою для прийняття агротехнічних рішень.

2. За результатами інженерних розрахунків (тягового, оптичного, керування та моделювання): На підставі тягового розрахунку визначено, що максимальне зусилля опору руху становить 602 Н (режим підйому 12°), що потребує встановлення двох мотор-коліс загальною потужністю 1200 Вт (по 600 Вт кожне) з планетарним редуктором. Забезпечено запас за зчепленням на вологому ґрунті (1,3 %). Спектральний набір з п'яти каналів (Blue, Green, Red, Red Edge, NIR) дозволяє обчислювати вегетаційні індекси (NDVI, CI) із похибкою, меншою за $\pm 0,02$, що повністю задовольняє агрономічні вимоги. Впроваджено систему безпеки з аварійною зупинкою та сторожовим таймером.

					14.17 - КР. 003.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ВИСНОВКИ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Жиденко А.А.					83	3
Перевір.		Дядюра К.О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К.О.						

Тривимірне моделювання несучої рами з алюмінієвого сплаву 6061-T6 підтвердило її міцність: коефіцієнт запасу за еквівалентним напруженням (Мізес) становить 5,65, максимальний прогин – 1,23 мм, що значно менше допустимого. Розрахунок центру мас підтвердив оптимальний розподіл навантаження по осях (55/45 %) для забезпечення курсової стійкості та зчеплення.

3. За результатами аналізу охорони праці та екологічної безпеки: Ідентифіковано основні групи небезпечних факторів (механічні, електричні, пожежні, ергономічні) та розроблено комплекс організаційно-технічних заходів для їх мінімізації. Особливу увагу приділено безпечній експлуатації літій-іонних акумуляторів високої ємності (48 В, 60 А·год) – розраховано струми короткого замикання, обґрунтовано вибір захисної апаратури та системи управління батареєю (BMS), визначено критичні ознаки несправностей. – Доведено екологічну значущість проєкту: точкове картографування бур'янів дає змогу економити до 12 % засобів захисту рослин (300 000 грн на 1000 га), що суттєво знижує хімічне навантаження на ґрунти та водні ресурси, сприяє збереженню біорізноманіття та зменшенню викидів парникових газів.

5. Практична цінність та перспективи дослідження: Розроблені конструктивні, схемотехнічні та алгоритмічні рішення можуть бути використані як основа для створення серійного зразка роботизованої платформи для моніторингу сільськогосподарських угідь. Результати роботи доцільно впроваджувати в агропромислових господарствах різних форм власності, що сприятиме підвищенню економічної ефективності виробництва, зменшенню екологічного навантаження та покращенню умов праці агрономічного персоналу.

У подальших дослідженнях передбачається вдосконалення алгоритмів машинного навчання для класифікації типів бур'янів у реальному часі, розширення функціональних можливостей платформи (автоматичне внесення гербіцидів у точковому режимі), а також адаптація конструкції для роботи на полях різної конфігурації та з різним типом ґрунтів.

					14.17 - КР. 003.0.000 ПЗ	Аркуш
						84
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bakker T., van Asselt K., Bontsema J., Müller J. Autonomous navigation in row crops using camera vision // Biosystems Engineering. – 2011. – Vol. 109, No. 1. – P. 25–34.
2. Bechar A., Vigneault C. Agricultural robots for field operations: Concept and components // Biosystems Engineering. – 2016. – Vol. 149. – P. 94–111.
3. Biber P., Weiss U., Schatz A., Albert A. Autonomous agricultural robot for weeding and crop monitoring // Journal of Field Robotics. – 2015. – Vol. 32, No. 4. – P. 489–506.
4. Chebrolu N., Lier H., Stachniss C. Agricultural robot dataset for plant classification and localization // The International Journal of Robotics Research. – 2017. – Vol. 36, No. 11. – P. 1155–1161.
5. Faıçal B. S., Costa G. G., Ueyama J. Precision agriculture using wireless sensor networks and mobile robots // Ad Hoc Networks. – 2017. – Vol. 63. – P. 45–56.
6. Gao X., Li J., Li M. Multi-sensor data fusion for autonomous navigation of agricultural robots // Transactions of the ASABE. – 2018. – Vol. 61, No. 2. – P. 431–441.
7. Grimstad G., From P. J. Thorvald II – a modular mobile robotic platform for agricultural applications // IFAC-PapersOnLine. – 2017. – Vol. 50, No. 1. – P. 4588–4593.
8. Haddad M., Chebira A. Real-time vegetation index extraction on embedded platforms // Journal of Real-Time Image Processing. – 2017. – Vol. 13, No. 4. – P. 785–796.
9. Kootstra G., Wang X., van Henten E. J. Active vision in agricultural robotics: A review // Precision Agriculture. – 2021. – Vol. 22, No. 5. – P. 1623–1647.

					14.17 - КР. 003.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ			
Розроб.		Жиденко А.А.						
Перевір.		Дядюра К.О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К.О.						
					Лім.	Аркуш	Аркушів	
							85	3

10. Lou X., Baldwin R. Active vibration isolation and attitude control for optical sensors in off-road vehicles // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2019. – Vol. 124. – P. 301–315.
11. Noguchi N., Will J., Reid J., Zhang Q. Development of a master-slave robot system for farm operations // Computers and Electronics in Agriculture. – 2004. – Vol. 44, No. 3. – P. 233–240.
12. Oliveira L. F. P., Moreira A. P., Silva M. F. Advances in forest and agricultural robotics // Sensors. – 2021. – Vol. 21, No. 5. – Art. 1836.
13. Ponti G., Scalera L. Design and control of an active camera stabilizer for agricultural vehicles // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 128911–128922.
14. Radcliffe J., Cox J., Bulanon D. M. Camera stabilization system for robotic fruit harvesting // Robotics. – 2018. – Vol. 7, No. 3. – Art. 38.
15. Raza S. E., Prince G., Clarkson J. P., Rajpoot N. M. Automatic detection of diseased plant leaves using multispectral imaging // PLoS ONE. – 2015. – Vol. 10, No. 4. – Art. e0123223.
16. Sa I., Ge Z., Dayoub F., Upcroft B. DeepFruits: A fruit detection system using deep neural networks on agricultural robotic platforms // Sensors. – 2016. – Vol. 16, No. 8. – Art. 1222.
17. Santos L. C., Santos F. N., Castronovo A. M., Sà I. LiDAR-based navigation and obstacle avoidance in row-crop fields // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2020. – Vol. 5, No. 2. – P. 2309–2316.
18. Shalal N., Low T., McCarthy C. Orchard weed detection using LiDAR and camera fusion on an autonomous UGV // Computers and Electronics in Agriculture. – 2015. – Vol. 115. – P. 110–117.
19. Shamshiri R. R., Weltzien C., Hameed I. A., Yule I. J. Research and development in agricultural robotics: A perspective of digital farming // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. – 2018. – Vol. 11, No. 4. – P. 1–14.

					14.17 - КР. 003.0.000 ПЗ	Архив
						86
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

20. Tian L., Wang Q., Li Y. Computer vision-based crop monitoring and yield estimation // Information Processing in Agriculture. – 2020. – Vol. 7, No. 2. – P. 189–198.

21. Underwood J., Jagbrant G., Nieto J., Sukkariéh S. Lidar and multispectral camera fusion for row-crop and orchard scanning // Journal of Field Robotics. – 2016. – Vol. 33, No. 2. – P. 241–258.

22. Vazquez-Arellano M., Griepentrog H. W., Reiser D., Paraforos D. S. 3D imaging systems for agricultural applications // Computers and Electronics in Agriculture. – 2016. – Vol. 120. – P. 1–18.

23. Zheng L., Zhang J., Wang J. Development of RTK-GPS and LiDAR based autonomous navigation for crop scouting UGV // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. – 2019. – Vol. 12, No. 3. – P. 85–93.

					14.17 - КР. 003.0.000 ПЗ	Архив
						87
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		