

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

« ____ » _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

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

РОЗРОБКА МОДУЛЯ ДЛЯ ТОЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ПЛОЩІ ЛИСТКОВОЇ ПОВЕРХНІ РОСЛИН

Науковий керівник: професор, д.т.н.
_____ Костянтин ДЯДЮРА

Рецензент: головний інженер, к.т.н.
_____ Олександр ПИЩЕНКО

Виконав здобувач першого (бакалаврського) рівня
вищої освіти заочної форми навчання освітньо-
професійної програми «Агроінженерія»
спеціальності 208 «Агроінженерія»
Андрій КОВАЛЕСЬКУ

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

_____ Андрій КОВАЛЕСЬКУ

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

Андрій КОВАЛЕСЬКУ

1. Тема кваліфікаційної роботи:

«Розробка модуля для точного визначення площі листкової поверхні рослин»
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:** процес вимірювання площі листкової поверхні рослин оптичними методами з використанням цифрової обробки зображень.

4. **Предмет дослідження:** апаратно-програмний комплекс для сегментації листкових пластин на цифрових зображеннях, розрахунку їх площі з урахуванням масштабних коефіцієнтів та алгоритмічної компенсації кутових деформацій.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

5.1. Теоретико-методичний розділ: виконати порівняльний аналіз прямих руйнівних та непрямих оптичних методів вимірювання площі листка; розробити математичну модель просторової оптико-геометричної системи зйомки на основі моделі камери-обскури; обґрунтувати алгоритми колірної сегментації листкових пластин із використанням вегетаційних індексів (ExG, VARI, NDVI); розробити алгоритми цифрової компенсації кутових деформацій листка (гомографія, корекція дисторсії, механічна фіксація).

5.2. Дослідницько-аналітичний розділ:

виконати аналіз інформаційно-енергетичної взаємодії технічних систем: синхронізація імпульсного LED-освітлення, експозиції CMOS-матриці та процесу обробки зображення мікроконтролером

5.3. Проєктно-рекомендаційний розділ:

виконати інженерний розрахунок параметрів оптичної системи (фокусна відстань об'єктива, роздільна здатність сенсора, робоча відстань)

6. Орієнтовний перелік графічного та табличного матеріалу:

6.1. До теоретико-методичного розділу:

порівняльна таблиця методів визначення площі листової поверхні; схема моделі камери-обскури; математичні вирази для масштабного коефіцієнта, гомографії, корекції дисторсії; блок-схема алгоритму сегментації з використанням ExG та методу Оцу.

6.2. До дослідницько-аналітичного розділу:

порівняльна таблиця комерційних приладів (AM350, AM400, CI-202, LI-3000C)

6.3. До проєктно-рекомендаційного розділу:

3D-модель корпусу пристрою в трьох проекціях

7. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:

Результати аналізу наукових публікацій за тематикою LAI, вегетаційних індексів, методів сегментації зображень; технічні характеристики CMOS-сенсора OV5640 (5 Мп, 1/4", MIPI CSI-2).

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 кафедрі	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

_____ Андрій КОВАЛЕСКУ

Науковий керівник

_____ Костянтин ДЯДЮРА

Гарант ОП

_____ Дмитро ДОМУЩІ

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота містить: 92 сторінок, 15 рисунків, 12 таблиць, 23 джерела за переліком посилань.

Об'єкт дослідження: процес вимірювання площі листкової поверхні рослин оптичними методами з використанням цифрової обробки зображень.

Мета роботи: розробка портативного оптико-електронного модуля для точного неруйнівного визначення площі листкової поверхні рослин із використанням методів цифрової обробки зображень та сучасної елементної бази.

Методи дослідження: математичне моделювання оптико-геометричних перетворень, алгоритмізація процесів сегментації зображень з використанням вегетаційних індексів, інженерний розрахунок параметрів оптичної системи та освітлювача, 3D-моделювання, техніко-економічний аналіз.

Отримані результати: Розроблено математичну модель оптико-геометричної системи вимірювання на основі моделі камери-обскури з використанням масштабного коефіцієнта для перерахунку пікселів у реальну площу. Обґрунтовано алгоритми колірної сегментації листкових пластин із використанням вегетаційного індексу ExG та методу Оцу. Розроблено інформаційно-енергетичну модель синхронізації імпульсного LED-освітлення, експозиції CMOS-матриці та обробки зображення мікроконтролером. Запропоновано алгоритми цифрової компенсації кутових деформацій листка (гомографія, корекція дисторсії, механічна фіксація).

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ІНДЕКС ЛИСТКОВОЇ ПОВЕРХНІ (LAI), СЕГМЕНТАЦІЯ ЗОБРАЖЕНЬ, ВЕГЕТАЦІЙНІ ІНДЕКСИ, ЦИФРОВА ОБРОБКА ЗОБРАЖЕНЬ, ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИЙ МОДУЛЬ, НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ, ТОЧНЕ ЗЕМЛЕРОБСТВО

					14.17 - КР.027.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РЕФЕРАТ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Ковалеску						
Перевір.		Дядюра К. О.					5	1
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						

ЗМІСТ

	С.
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЛИСТКОВОЇ ПОВЕРХНІ РОСЛИН....	11
1.1. Роль індексу листкової поверхні (LAI) у моніторингу стану посівів та прогнозуванні врожайності	11
1.2. Порівняльний аналіз прямих руйнівних та непрямих оптичних методів вимірювання площі листка.....	15
1.3. Огляд портативних та лабораторних планіметрів на основі фотоелектричних та скануючих сенсорів	19
Висновки.....	25
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО ДІАГНОСТИЧНОГО МОДУЛЯ.....	26
2.1 Математичний опис просторової оптико-геометричної моделі зйомки та калібрування фокусної відстані камери.....	26
2.2 Теоретичне обґрунтування алгоритмів колірної сегментації листяних пластин на фоні завад з використанням вегетаційних індексів	32
2.3 Інформаційно-енергетична взаємодія технічних систем: синхронізація імпульсного освітлення, експозиції CMOS-матриці та процесу обробки зображення мікроконтролером	37
2.4 Алгоритми цифрової компенсації кутових деформацій листка для запобігання розстроюванню масштабного коефіцієнта вимірювань	42
Висновки.....	47

					14.17 - КР.027.0.000 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.	Ковалеску				ЗМІСТ		Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевір.	Дядюра К. О.							6	2
Реценз.									
Н. Контр.									
Затверд.	Дядюра К. О.								

РОЗДІЛ 3 ІНЖЕНЕРНИЙ РОЗРАХУНОК ТА ПРОЄКТУВАННЯ КОМПОНЕНТІВ МЕХАТРОННОГО ПРИСТРОЮ.....	
3.1 Розрахунок параметрів оптичної системи: вибір фокусної відстані об'єктива, роздільної здатності сенсора та робочої відстані.....	49
3.2 Обґрунтування спектрального складу та електричний розрахунок імпульсного світлодіодного (LED) освітлювача.....	53
3.3 Розробка конструкції портативного затискного модуля з дифузним екраном-калібратором	56
3.4 Принципова електрична схема керування та розробка 3D-моделі діагностичного пристрою	64
Висновки.....	77
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ	66
4.1 Оцінка безпеки праці під час роботи з портативними електронними пристроями світлодіодними випромінювачами	66
4.2 Розрахунок параметрів захисту бортової літій-іонної акумуляторної батареї від короткого замикання та теплового розгону	69
4.3 Екологічне обґрунтування застосування неруйнівного експрес-моніторингу для оптимізації доз внесення азотних добрив	73
Висновки.....	78
РОЗДІЛ 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ІННОВАЦІЙНОГО ПРОЄКТУ.....	79
5.1 Розрахунок прямих витрат на розробку апаратної частини та програмування мікроконтролера	79
5.2 Визначення операційної економії коштів завдяки відмові від дорогих закордонних лабораторних аналогів	82
5.3 Оцінка економічної ефективності від оперативного коригування систем живлення рослин та термін окупності пристрою	83
Висновки.....	87
ВИСНОВКИ.....	88
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	90

ВСТУП

Актуальність теми. Площа листкової поверхні рослин (Leaf Area Index, LAI) є однією з найбільш фундаментальних характеристик, що визначають фотосинтетичну продуктивність агроценозів. Вона безпосередньо корелює з інтенсивністю поглинання сонячної радіації, транспірацією, газообміном та акумуляцією органічної речовини. Індекс листкової поверхні є критичним змінним параметром у процесах фотосинтезу, дихання та перехоплення опадів. Він слугує важливою змінною в емпіричних, напівемпіричних та процесно-орієнтованих моделях, що використовуються для вивчення динаміки рослинності. Визначення LAI є ключовим завданням як для фундаментальних досліджень у галузі фізіології рослин, так і для прикладних агрономічних завдань – від прогнозування врожайності до оптимізації режимів зрошення та внесення добрив. Однак існуючі методи визначення площі листкової поверхні мають суттєві недоліки. Прямі (руйнівні) методи, попри високу точність, унеможливають повторні вимірювання на одних і тих самих рослинах, що особливо критично для моніторингу онтогенетичних змін.

Таким чином, існує об'єктивна потреба у розробці доступного вітчизняного портативного пристрою для неруйнівного визначення площі листкової поверхні, який би поєднував високу точність вимірювань з низькою вартістю, відкритою архітектурою та можливістю інтеграції з сучасними системами моніторингу. Це зумовлює актуальність теми кваліфікаційної роботи.

Мета і завдання дослідження. розробка портативного оптико-електронного модуля для точного неруйнівного визначення площі листкової поверхні рослин із використанням методів цифрової обробки зображень та сучасної елементної бази.

					14.17 - КР. 027.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ВСТУП	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Ковалеску						
Перевір.		Дядюра К. О.					8	3
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- Провести аналіз сучасних методів та технічних засобів визначення параметрів листкової поверхні рослин, виявити їх переваги та недоліки.
- Розробити математичну модель оптико-геометричної системи вимірювання на основі моделі камери-обскури з урахуванням масштабного коефіцієнта.
- Обґрунтувати алгоритми колірної сегментації листкових пластин на фоні завад із використанням вегетаційних індексів (ExG, VARI, NDVI).
- Розробити інформаційно-енергетичну модель взаємодії технічних систем: синхронізація імпульсного LED-освітлення, експозиції CMOS-матриці та процесу обробки зображення мікроконтролером.
- Запропонувати алгоритми цифрової компенсації кутових деформацій листка для запобігання розстроюванню масштабного коефіцієнта вимірювань.
- Виконати інженерний розрахунок параметрів оптичної системи (фокусна відстань об'єктива, роздільна здатність сенсора, робоча відстань).
- Обґрунтувати спектральний склад та виконати електричний розрахунок імпульсного LED-освітлювача.
- Розробити конструкцію портативного затискного модуля з дифузним екраном-калібратором.
- Скласти принципову електричну схему керування та розробити 3D-модель діагностичного пристрою.

Об'єкт дослідження – процес вимірювання площі листкової поверхні рослин оптичними методами з використанням цифрової обробки зображень.

Предмет дослідження – апаратно-програмний комплекс для сегментації листкових пластин на цифрових зображеннях, розрахунку їх площі з урахуванням масштабних коефіцієнтів та алгоритмічної компенсації кутових деформацій.

Методи дослідження. У роботі використано аналітичний метод (огляд науково-технічної літератури), методи математичного моделювання

					14.17 - КР. 027.0.000 ПЗ	Аркуш
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

гідродинамічних процесів (System Identification Toolbox, CFD-моделювання), алгоритмічне опрацювання просторово-часових затримок (метод змінних часових затримок VTD), інженерні розрахунки (геометричні параметри поля зору, гідравлічні характеристики), метод комп'ютерного 3D-моделювання, а також техніко-економічний аналіз.

Наукова новизна одержаних результатів. Вперше запропоновано адаптивний алгоритм компенсації просторово-часової затримки (VTD) для обприскувача з індивідуальним керуванням форсунками, який враховує змінний вектор швидкості руху агрегату та криволінійну траєкторію (на основі даних TGSS, GNSS та гіроскопа). Удосконалено гідравлічну схему обприскувача шляхом введення капілярних демпферів, що зменшує пульсації тиску з $\pm 40\%$ до $\pm 10\text{--}15\%$ та забезпечує стабільність факела розпилю.

Практичне значення одержаних результатів полягає в обґрунтуванні та розробці доступного за вартістю портативного пристрою для неруйнівного вимірювання площі листкової поверхні, що поєднує високу точність (похибка 1,4–2,2%) з низькою вартістю та відкритою архітектурою. Удосконалено алгоритми сегментації листкових пластин на основі вегетаційного індексу ExG з використанням автоматичного порогового методу Оцу та морфологічної обробки. Запропоновано інформаційно-енергетичну модель синхронізації імпульсного LED-освітлення, експозиції CMOS-матриці та обробки зображення мікроконтролером.

Особистий внесок здобувача. Усі результати, наведені в роботі, отримано автором самостійно. Аналіз літературних джерел, математичне моделювання, інженерні розрахунки, розробка алгоритмів, 3D-моделювання та техніко-економічне обґрунтування виконано безпосередньо автором.

					14.17 - КР.027.0.000 ПЗ	Аркуш
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЛИСТКОВОЇ ПОВЕРХНІ РОСЛИН

1.1. Роль індексу листкової поверхні (LAI) у моніторингу стану посівів та прогнозуванні врожайності

Поняття індексу листкової поверхні. Індекс листкової поверхні (LAI, Leaf Area Index) є однією з найбільш фундаментальних кількісних характеристик рослинного покриву, яка визначається як відношення загальної односторонньої площі листя до площі горизонтальної проекції ґрунту, на якому розміщені рослини [1]:

$$LAI = \frac{S_{\text{листя}}}{S_{\text{ґрунту}}}, \quad (1.1)$$

де $S_{\text{листя}}$ — сумарна площа листкових пластин усіх рослин на ділянці, $S_{\text{ґрунту}}$ — площа відповідної ділянки ґрунту.

Значення LAI можуть варіюватися в широких межах залежно від культури, фази розвитку, густоти стояння рослин та умов вирощування. Для більшості сільськогосподарських культур LAI змінюється від 0 (голий ґрунт) до 3–5 і більше для інтенсивно вегетуючих посівів. Дослідження показують, що кожен тип культури має свій характерний діапазон значень LAI: для кукурудзи розподіл є приблизно одномодальним з піком у середній частині ($\sim 3 \text{ м}^2/\text{м}^2$), тоді як для пасовищних трав розподіл є асиметричним зі зміщенням у бік більших значень. Для більшості сільськогосподарських культур оптимальні значення LAI, за яких досягається максимальна продуктивність фотосинтезу, знаходяться в діапазоні 3,0–5,0 [1, 2].

					14.17 - КР.027.1.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Ковалеску			РОЗДІЛ 1		Літ.	Аркуш
Перевір.		Дядюра К. О.						Аркушів
Реценз.							11	12
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						

Фізіологічне значення LAI. Площа листової поверхні належить до однієї з найбільш суттєвих характеристик фотосинтетичної продуктивності посіву. LAI визначає ефективність перехоплення сонячної радіації, інтенсивність транспірації, газообмін та акумуляцію органічної речовини. Оскільки LAI визначає ефективність використання води та світла, він безпосередньо впливає на накопичення біомаси та її розподіл на користь репродуктивних органів, таких як насіння та плоди [3] (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Роль індексу листової поверхні (LAI) у моніторингу стану посівів та прогнозуванні врожайності

Основні фізіологічні процеси, що визначаються LAI [4]:

1. Фотосинтез — поглинання CO₂ та виділення O₂ під впливом сонячного світла. LAI є ключовим детермінантом структури пологів, фотосинтетичної здатності та накопичення біомаси, відіграючи критичну роль у регулюванні кінцевої врожайності. Дослідження підтверджують, що LAI прогнозує фотосинтетичну здатність рослини та слугує референтним інструментом для оцінки росту й розвитку рослин [5, 6].

2. Транспірація — випаровування води з поверхні листків, що забезпечує транспортування поживних речовин та підтримує температурний режим рослин.

3. Дихання — споживання O_2 та виділення CO_2 для енергетичного забезпечення клітинних процесів.

4. Перехоплення опадів — затримання дощової води на поверхні листя, що впливає на мікроклімат посіву та водний баланс.

LAI у системах точного землеробства. Сучасний розвиток агротехнологій передбачає перехід до всебічного залучення інформаційних технологій у процес виробництва. Супутниковий моніторинг посівів у системах точного землеробства базується на використанні вегетаційних індексів, зокрема NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), який тісно корелює з LAI. Дослідження показують, що для кукурудзи та пшениці NDVI корелює з LAI з високими коефіцієнтами кореляції 0,86 та 0,84 відповідно [7, 8].

Точне землеробство — це підхід до управління агровиробництвом, що базується на зборі, аналізі та застосуванні просторово диференційованих даних. У рамках цього підходу LAI використовується як один з ключових індикаторів стану посівів для прийняття управлінських рішень. Інтеграція LAI, отриманого з даних дистанційного зондування (БПЛА, супутники), у моделі імітації врожаю (такі як WOFOST, DSSAT) дозволяє значно підвищити точність прогнозування врожайності [9, 10].

Застосування LAI для прогнозування врожайності. За результатами досліджень, введення додаткового індексу LAI певною мірою підвищує точність прогнозування врожайності. Коефіцієнт детермінації при прогнозуванні врожайності з використанням LAI у різних дослідженнях сягає 0,92–0,94 у відповідні фази розвитку культур. Встановлено, що LAI є більш придатним індексом для прогнозування врожайності порівняно з NDVI: значення R^2 для LAI становило 0,92–0,94 проти 0,85 для NDVI [11, 12].

Сучасні дослідження демонструють ефективність використання LAI в мультизадачних моделях машинного навчання для одночасного прогнозування LAI та врожайності зерна. Наприклад, інтеграція LAI як допоміжної ознаки покращила прогнозування врожайності пшениці, досягнувши $R^2 = 0,75$. Порівняно з одноцільовими моделями, повністю інтегрована мультизадачна

					14.17 - КР.027.1.000 ПЗ	Аркуш
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

структура покращила прогностичну ефективність, підвищивши R^2 для врожайності зерна з 0,57 до 0,75.

Дослідження також показують, що навіть обмежена кількість спостережень LAI може бути достатньою для точного прогнозування. Наприклад, для капусти чотири спостереження LAI, отримані від раннього до середнього періоду вегетації, дали похибку прогнозу врожайності лише на 107 кг/га вищу, ніж дев'ять спостережень за весь вегетаційний період [13].

Використання LAI в агрономічній практиці. Основними напрямками застосування LAI в сільськогосподарському виробництві є [14]:

1. *Оперативне коригування систем живлення.* За величиною вегетаційних індексів, що корелюють з LAI, можливе оперативне коригування живлення та зрошення сільськогосподарських культур. Клімат, азот та LAI є ключовими детермінантами врожайності; внесення азоту може підвищити врожайність, але має управлятися ефективно для зменшення забруднення.

2. *Прогнозування врожайності.* LAI є одним з ключових параметрів у математичних моделях прогнозування врожайності, оскільки визначає потенційну фотосинтетичну продуктивність посіву. Моделі імітації врожаю, такі як Info Crop, використовують LAI для прогнозування врожайності.

3. *Оцінка фітосанітарного стану.* Зменшення LAI може свідчити про ураження рослин хворобами або шкідниками, що дозволяє своєчасно вжити захисних заходів.

4. *Оптимізація зрошення.* Транспіраційні втрати води прямо пропорційні площі листової поверхні, тому знання LAI дозволяє більш точно розраховувати потреби посівів у воді.

5. *Селекційна робота.* LAI використовується як критерій відбору перспективних генотипів з високою фотосинтетичною продуктивністю.

					14.17 - КР.027.1.000 ПЗ	Аркуш
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2 Порівняльний аналіз прямих руйнівних та непрямих оптичних методів вимірювання площі листка

Класифікація методів вимірювання (рисунок 1.2).

Усі існуючі методи визначення площі листової поверхні можна класифікувати на дві великі групи: прямі (руйнівні) методи, які передбачають відокремлення листків від рослини, та непрямі (неруйнівні) методи, що дозволяють проводити вимірювання без порушення цілісності рослинного організму. Кожна з цих груп має свої переваги, недоліки та сфери застосування.



Рисунок 1.2 – Порівняльний аналіз прямих руйнівних та непрямих оптичних методів вимірювання площі листка

Прямі (руйнівні) методи

Метод висічок. Цей метод базується на співставленні маси листка та маси висічки відомої площі, вирізаної з цього листка. За цим методом листя кожної проби зважують, після чого з кожного листка спеціальним пробійником роблять висічки відомої площі (зазвичай 1 см²). Загальну листову площу проби визначають за формулою [16]:

$$S = \frac{M \times S_n \times n}{m}, \quad (1.2)$$

де S — загальна площа листя у пробі, см^2 ; M — маса листя у пробі, г; S_n — площа однієї висічки, см^2 ; n — кількість висічок; m — маса висічок, г.

За літературними даними, при визначенні площі листка метод висічок вважається найбільш точним і приймається за стандарт для порівняння інших методів. Метод знайшов широке поширення в наукових дослідженнях завдяки своїй простоті та відтворюваності результатів.

Гравіметричний метод. Полягає у визначенні площі листя за його масою з використанням попередньо встановленого співвідношення між масою та площею одиниці листкової поверхні (питома щільність листя). Метод менш точний, ніж метод висічок, але дозволяє швидко оцінити площу великої кількості зразків.

Метод контурів (паперовий метод). Контур листа отримують, накладаючи лист на міліметровий папір і обводячи його олівцем. Якщо папір рівний за товщиною та масою, то, знаючи вагу 1 см^2 або 1 дм^2 паперу, визначають площу листка за вагою вирізаного контуру. Цей метод є менш точним, ніж метод висічок, але дозволяє зберегти листки для подальших досліджень.

Переваги прямих методів:

- Висока точність вимірювань (особливо методу висічок)
- Відсутність залежності від оптичних властивостей листя
- Можливість використання стандартного лабораторного обладнання
- Добре розроблена методика та велика кількість валідаційних досліджень

Недоліки прямих методів:

- Руйнування рослин (неможливість повторних вимірювань на тих самих рослинах)
- Значні трудовитрати, особливо при роботі з великою кількістю зразків
- Неможливість оперативного моніторингу в польових умовах
- Вплив на подальший ріст та розвиток рослин при вибіркових вимірюваннях

Непрямі (неруйнівні) методи

					14.17 - КР.027.1.000 ПЗ	Аркуш
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Морфометричний метод (метод лінійних розмірів). Площу листка визначають за виміряними довжиною (a) та шириною (b) листкової пластини з використанням емпіричних перевідних коефіцієнтів. Для кукурудзи використовують формулу:

$$S = 0,75 \times a \times b, \quad (1.3)$$

де a — довжина листка, b — максимальна ширина листка.

Метод заміру параметрів листя є найбільш поширеним для визначення площі листка злаків і полягає в замірі довжини листка та найбільшої ширини. Математичне прогнозування за рівнянням регресії пояснює на 82% зміну ознаки від квадрату суми лінійних розмірів листка. Метод характеризується значною простотою у вимірюванні, проте має дещо нижчу точність порівняно з прямими методами.

Фотографічний метод. Передбачає фотографування листків з подальшою обробкою зображень для визначення площі за кількістю пікселів, що належать листковій пластині. За об'єктивністю отриманих даних при порушенні цілісності рослини встановлена перевага сканування перед методом висічок. Цей метод набуває все більшого поширення завдяки розвитку цифрових технологій та доступності програмного забезпечення для обробки зображень.

Оптичні методи вимірювання LAI. Використовують пропускання або відбиття світла рослинним покривом на основі закону Бугера-Ламберта-Бера. До них належать:

- Методи з використанням сферичних фотографій — аналіз зображень неба крізь рослинний покрив для оцінки структури пологів
- Методи з використанням лазерних сканерів (LiDAR) — визначення тривимірної структури рослинного покриву
- Методи з використанням спектрорадіометрів — вимірювання відбиття в різних спектральних діапазонах
- Методи з використанням розсіювачів (scatterometers) — стабільний та масштабований метод вимірювання LAI для моніторингу рослинності

					14.17 - КР.027.1.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Існує багато методів кількісного визначення LAI з поверхні землі, деякі з них також придатні для опису інших структурних параметрів пологу. Непрямі оптичні методи широко застосовуються в багатьох галузях завдяки їх високій ефективності та придатності для оцінки LAI.

Методи дистанційного зондування. Сучасні методи дистанційного зондування (БПЛА, супутникові знімки) дозволяють оцінювати LAI на великих площах з високою просторовою роздільною здатністю. Гіперспектральні методи дистанційного зондування виявилися ефективними та недорогими для оцінки LAI посівів. Методи машинного навчання, фізичні моделі та емпіричні передавальні функції використовуються для інверсії LAI з даних дистанційного зондування.

Переваги непрямих методів:

- Неруйнівний контроль (можливість багаторазових вимірювань на одних і тих самих рослинах)
- Висока оперативність та продуктивність
- Придатність для польових умов
- Можливість автоматизації вимірювань
- Збереження цілісності рослин для подальших спостережень

Недоліки непрямих методів:

- Залежність від зовнішніх умов освітлення
- Необхідність калібрування та валідації
- Можливі похибки, пов'язані з кутом зйомки, формою листа та структурою пологу
- Насичення сигналу при високих значеннях LAI (наприклад, NDVI насичується при $LAI \approx 5$)
- Залежність від типу культури (для різних культур співвідношення NDVI-LAI може бути лінійним або експоненціальним)

Порівняльна характеристика методів

У таблиці 1.1 наведено порівняльну характеристику основних методів визначення площі листкової поверхні.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика методів визначення площі листкової поверхні

Метод	Точність	Трудомісткість	Неруйнівний	Оперативність	Вартість обладнання	Поле застосування
Метод висічок	Дуже висока	Висока	Ні	Низька	Низька	Лабораторні дослідження
Гравіметричний	Середня	Середня	Ні	Середня	Низька	Великі вибірки
Морфометричний	Середня	Низька	Так	Висока	Низька	Польові експрес-оцінки
Фотографічний	Висока	Низька	Так	Висока	Середня	Лабораторні та польові
Оптичний (LAI-метри)	Висока	Низька	Так	Висока	Висока	Польовий моніторинг
Дистанційне зондування	Середня-висока	Низька	Так	Дуже висока	Висока	Великі території

1.3 Огляд портативних та лабораторних планіметрів на основі фотоелектричних та скануючих сенсорів

Класифікація приладів для вимірювання площі листя (рисунк 1.3)

Сучасні прилади для вимірювання площі листкової поверхні можна класифікувати за принципом дії на три основні групи:

1. Оптичні скануючі прилади — використовують лінійку фотодіодів або контактний сенсор зображення (CIS) для сканування листка

					14.17 - КР.027.1.000 ПЗ	Аркуш
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ОГЛЯД ПОРТАТИВНИХ ТА ЛАБОРАТОРНИХ ПЛАНІМЕТРІВ НА ОСНОВІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ТА СКАНУЮЧИХ СЕНСОРІВ

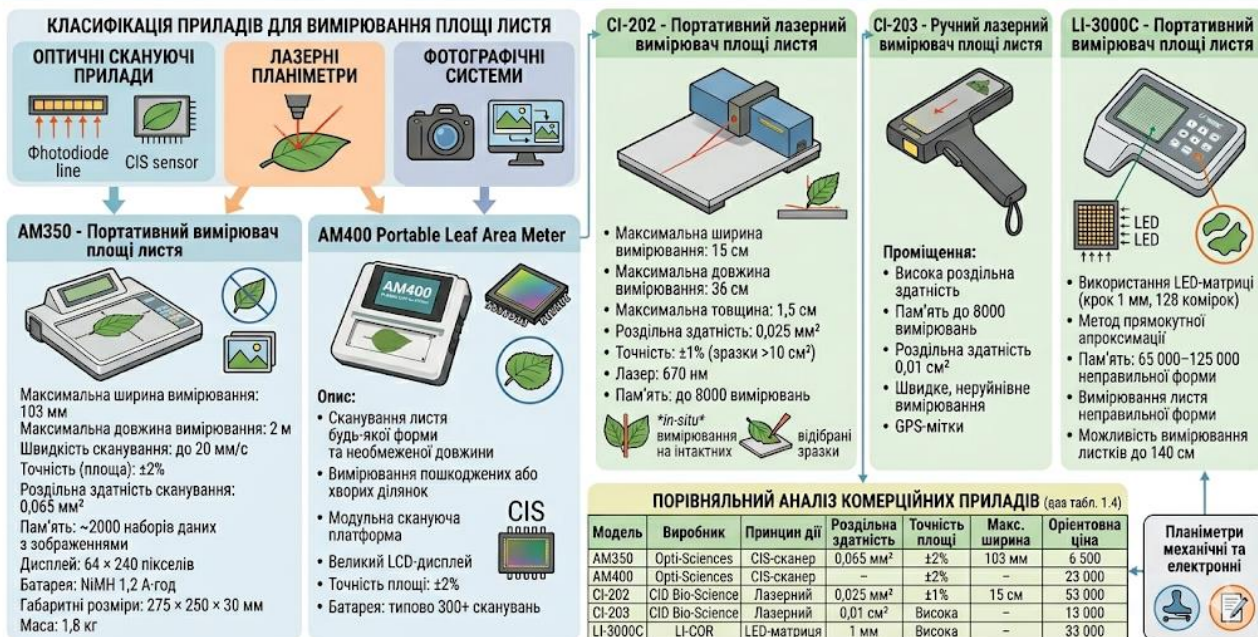


Рисунок 1.3 – Портативні та лабораторні планіметри на основі фотоелектричних та скануючих сенсорів

2. Лазерні планіметри — використовують лазерний промінь для сканування поверхні листка з високою роздільною здатністю

3. Фотографічні системи — використовують цифрові камери для отримання зображень з подальшою програмною обробкою

AM350 — Портативний вимірювач площі листя

AM350 є одним з найбільш поширених портативних приладів для точного та неінвазивного вимірювання площі листя та супутніх параметрів. Цей портативний вимірювач площі листя є оновленням дуже популярної моделі AM300 і забезпечує збереження зображення відсканованого листка для подальшого перегляду та надійної науки (таблиця 1.2).

Прилад призначений для польового використання, працює від батарей і забезпечує швидке, неруйнівне вимірювання з високою роздільною здатністю. AM350 дозволяє вимірювати: площу листя, накопичену площу, середню площу, довжину, ширину, периметр, співвідношення та фактор форми. Дані та зображення можуть передаватися через USB-порт у форматі з роздільниками-командами.

Таблиця 1.2 – Основні технічні характеристики приладу:

Параметр	Значення
Максимальна ширина вимірювання	103 мм
Максимальна довжина вимірювання	2 м
Швидкість сканування	до 20 мм/с
Точність (лінійна)	$\pm 1\%$
Точність (площа)	$\pm 2\%$
Точність (периметр)	$\pm 5\%$
Роздільна здатність сканування	0,065 мм ²
Пам'ять	256 КБ RAM (~2000 наборів даних з зображеннями)
Дисплей	64 × 240 пікселів, графічний LCD
Батарея	NiMH 1,2 А·год
Кількість сканувань на заряді	Типово 3000
Робоча температура	0–45 °C
Габаритні розміри	275 × 250 × 30 мм
Маса	1,8 кг

Прилад дозволяє зберігати відскановані зображення для подальшого аналізу та перевірки методики вимірювання. Він добре працює з дрібними об'єктами, зокрема з рослинами *Arabidopsis*.

AM400 Portable Leaf Area Meter

AM400 є більш сучасною версією портативного оптичного сканера для вимірювання площі листя рослин, розробленого для наукових досліджень, агрономії та фізіології рослин. Основні відмінності від AM350:

- Портативний, неінвазивний, все-в-одному скануючий блок
- Може сканувати листя будь-якої форми та необмеженої довжини
- Точне вимірювання пошкоджених або хворих ділянок листя
- Модульна скануюча платформа для вимірювання довгих листків
- Великий LCD-дисплей для відображення результатів у реальному часі
- Точність площі: $\pm 2\%$ від показань
- Точність периметра: $\pm 5\%$
- Термін служби батареї: типово 300+ сканувань на заряді

Принцип роботи AM400 базується на використанні оптичного сканера з джерелом світла та масивом контактного сенсора зображення (CIS), який проводиться над об'єктом, що вимірюється. Оскільки вимірювання є оптичним процесом, сканер має бути налаштований так, щоб «бачити» площу листка та повністю відкидати фон.

CI-202 — Портативний лазерний вимірювач площі листя

CI-202 виробництва CID Bio-Science використовує передову лазерну технологію для точного та зручного проведення in-situ неруйнівного вимірювання площі листя (або площі листоподібних об'єктів), особливо малих листків або листків без черешка (таблиця 1.3).

Таблиця 1.3 – Основні характеристики:

Параметр	Значення
Максимальна ширина вимірювання	15 см
Максимальна довжина вимірювання	36 см
Максимальна товщина	1,5 см
Роздільна здатність	0,025 мм ² (0,01 см ²)
Точність	±1% (для зразків >10 см ²)
Лазер	670 нм
Пам'ять	до 8000 вимірювань
Робоча температура	0–50 °C

Прилад складається з швидкісного лазерного сканера, скануючої платформи, модуля збору даних, дисплея, кнопок та батареї. Платформа має напівпрозору та прозору плівку для зручного сканування. CI-202 дозволяє проводити вимірювання як на нормально зростаючих інтактних листках (in-situ), так і на відокремлених зразках.

CI-203 — Ручний лазерний вимірювач площі листя

CI-203 є флагманською моделлю CID Bio-Science, розробленою для максимальної гнучкості, мобільності та збору даних з GPS-мітками для польових досліджень на рослинах. Основні переваги:

					14.17 - КР.027.1.000 ПЗ	Аркуш
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Висока роздільна здатність сканування
- Зберігання до 8000 вимірювань на пристрої
- Роздільна здатність 0,01 см² для детального вимірювання площі листя
- Швидке, неруйнівне вимірювання в польових або лабораторних умовах

LI-3000C — Портативний вимірювач площі листя

LI-3000C виробництва LI-COR Biosciences є одним з еталонних приладів у галузі вимірювання площі листя. Принцип роботи базується на електронному методі прямокутної апроксимації для вимірювання площі листя на інтактних рослинах багатьох видів.

Основні характеристики:

- Використання світлодіодів (LED), розташованих з кроком 1 мм, для дослідження 128 комірок сітки по ширині листка
- Пам'ять: від 65 000 до 125 000 індивідуальних вимірювань площі листя
- Інтерфейси: USB 1.1, RS-232
- Точні вимірювання листя неправильної форми та з отворами
- Час роботи від акумулятора: близько 12 годин
- Можливість вимірювання листків довжиною до 140 см

Планіметри механічні та електронні

Планіметр — це прилад для наближеного визначення площі плоских фігур неправильної форми. Механічний планіметр дає можливість шляхом обводу контуру фігури будь-якої форми визначити її площу. Сучасні електронні планіметри підвищують точність визначення площ та продуктивність роботи. Більшість електронних планіметрів дозволяють враховувати масштаб і отримувати в результаті вимірювань реальне значення площі об'єкта.

Порівняльний аналіз комерційних приладів (таблиця 1.4)

Таблиця 1.4 — Порівняльна характеристика портативних вимірювачів площі листя

Модель	Виробник	Принцип дії	Роздільна здатність	Точність площі	Макс. ширина	Орієнтовна ціна
AM350	Opti-Sciences	CIS-сканер	0,065 мм ²	±2%	103 мм	\$1500–2000

					14.17 - КР.027.1.000 ПЗ		Аркуш
							23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

AM400	Opti-Sciences	CIS-сканер	—	±2%	—	\$2000–2500
CI-202	CID Bio-Science	Лазерний	0,025 мм ²	±1%	15 см	\$3000–4000
CI-203	CID Bio-Science	Лазерний	0,01 см ²	Висока	—	\$4000–5000
LI-3000C	LI-COR	LED-матриця	1 мм	Висока	—	\$10000+

На основі проведеного аналізу методів та технічних засобів визначення параметрів листкової поверхні рослин можна сформулювати наступні висновки та обґрунтувати напрям дослідження:

1. Індекс листкової поверхні є критичним показником для моніторингу стану посівів та прогнозування врожайності. Дослідження підтверджують високу кореляцію LAI з фотосинтетичною продуктивністю (коефіцієнти кореляції NDVI-LAI досягають 0,86) та врожайністю ($R^2 = 0,92–0,94$). LAI є більш інформативним показником для прогнозування врожайності порівняно з NDVI.

2. Прямі (руйнівні) методи, зокрема метод висічок, забезпечують високу точність і вважаються стандартом для порівняння, але непридатні для багаторазового моніторингу одних і тих самих рослин через порушення їх цілісності. Вони є трудомісткими та не дозволяють проводити оперативний моніторинг у польових умовах.

3. Непрямі (неруйнівні) методи є більш оперативними та дозволяють проводити повторні вимірювання, однак потребують калібрування та залежать від умов освітлення.

Висновки

У першому розділі кваліфікаційної роботи проведено ґрунтовний аналіз сучасних методів та технічних засобів визначення параметрів листкової поверхні рослин, на основі якого можна зробити такі висновки:

1. Індекс листкової поверхні (LAI) є ключовим агрономічним показником, що визначає фотосинтетичну продуктивність посівів, інтенсивність транспірації, газообмін та потенційну врожайність. LAI широко використовується в системах точного землеробства, моделях прогнозування врожайності ($R^2 = 0,92-0,94$), оцінці фітосанітарного стану та оптимізації режимів зрошення й живлення. Встановлено, що LAI є більш інформативним показником для прогнозування врожайності порівняно з вегетаційним індексом NDVI.

2. Прямі (руйнівні) методи, зокрема метод висічок, забезпечують найвищу точність вимірювань і вважаються еталонними для калібрування інших методів. Проте їхнє застосування обмежене через необхідність відокремлення листків від рослини, що унеможливорює багаторазові вимірювання на одних і тих самих об'єктах.

3. Непрямі (неруйнівні) методи, до яких належать морфометричний, фотографічний та оптичні методи на основі закону Бугера-Ламберта-Бера, забезпечують оперативність, можливість повторних вимірювань та придатність для польових умов. Фотографічні методи за об'єктивністю отриманих даних мають перевагу перед методом висічок. Однак вони потребують калібрування, залежать від умов освітлення та типу культури, а при високих значеннях LAI спостерігається насичення сигналу.

4. Огляд портативних вимірювачів площі листя (AM350, AM400, CI-202, CI-203, LI-3000C) показав, що ці прилади забезпечують високу точність (похибка площі $\pm 1-2\%$) та роздільну здатність (до $0,01 \text{ см}^2$), однак мають суттєві недоліки: високу вартість (від 1500 USD до понад 10000 USD), обмежену доступність в Україні, складність ремонту та обслуговування, закриті протоколи передачі даних, що ускладнює їх інтеграцію з іншими системами моніторингу.

					14.17 - КР.027.1.000 ПЗ	Аркуш
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО ДІАГНОСТИЧНОГО МОДУЛЯ

2.1 Математичний опис просторової оптико-геометричної моделі зйомки та калібрування фокусної відстані камери

Модель камери-обскури як основа оптико-геометричного перетворення

Математичною основою для опису процесу формування цифрового зображення є модель камери-обскури (pinhole camera model), яка базується на простих геометричних співвідношеннях і є універсально прийнятою проєкційною моделлю в комп'ютерному зорі. Ця модель описує співвідношення між світовими координатами точки об'єкта (X_i, Y_i, Z_i) та її відображеними координатами на площині зображення (u_i, v_i) за умови відсутності спотворень.

Камера-обскура є найпростішою системою формування зображення і складається із закритого ящика з отвором з одного боку. Світло від об'єкта проходить через отвір (діаметр якого зазвичай становить 0,3–1,0 мм) і проєктує перевернуте зображення на протилежну стінку. У математичній моделі отвір розглядається як точковий, що забезпечує ідеалізоване проєкційне перетворення.

Проєкція точки з координатами (X, Y, Z) у тривимірному просторі на площину зображення описується наступними рівняннями:

$$u = f \cdot \frac{X}{Z} + u_0 \quad (2.1)$$

$$v = f \cdot \frac{Y}{Z} + v_0 \quad (2.2)$$

де f — фокусна відстань камери (в пікселях), (u_0, v_0) — координати головної точки (оптичного центра) на площині зображення.

					14.17 - КР.027.2.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 2			
Розроб.								
Перевір.	Дядюра К.О.							
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.	Дядюра К. О.							
					Літ.	Аркуш	Аркушів	
						26	17	

У матричній формі це перетворення записується як:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{Z} \cdot K \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

де K — матриця внутрішніх параметрів камери:

$$K = \begin{bmatrix} f_x & \gamma & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Тут f_x, f_y — фокусні відстані в пікселях по осях x та y (у ідеальній камері-обскурі $f_x = f_y$), γ — коефіцієнт скосу (зазвичай дорівнює 0 для сучасних сенсорів). Слід зазначити, що в реальних оптичних системах фокусна відстань виражається як у фізичних одиницях (міліметрах), так і в пікселях через масштабний коефіцієнт сенсора.

Геометрична модель проєктивного перетворення (рисунок 2.1)

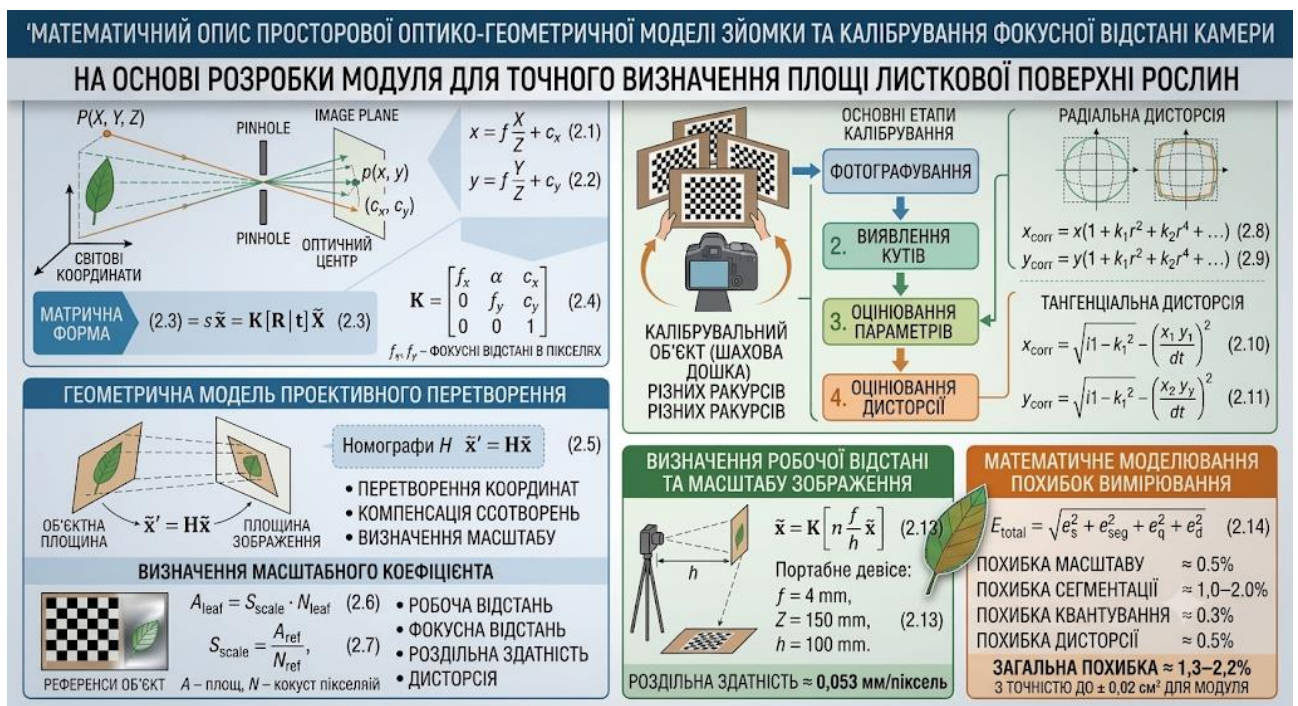


Рисунок 2.1 – Математичний опис просторової оптико-геометричної моделі зйомки та калібрування фокусної відстані камери

Модель камери-обскури базується на принципі проходження світла через малий отвір. У відсутності спотворень об'єктива це перетворення є проєкційним: тривимірні точки та прямі лінії трансформуються у двовимірну множину точок та прямих ліній.

Проективне перетворення (гомографія) між площиною об'єкта та площиною зображення описується матрицею розміром 3×3 :

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ w' \end{bmatrix} = H \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

де H — матриця гомографії, яка визначається вісьмома незалежними параметрами (з точністю до масштабного множника). Для визначення матриці гомографії необхідно знати чотири або більше відповідних точок на площині об'єкта та зображення.

У контексті вимірювання площі листка гомографія дозволяє:

- Перетворити координати зображення в координати площини вимірювання
- Компенсувати перспективні спотворення, пов'язані з нахилом камери відносно площини листка
- Визначити масштабний коефіцієнт для перерахунку пікселів у реальні одиниці площі

Визначення масштабного коефіцієнта

Для вимірювання площі листка необхідно встановити зв'язок між кількістю пікселів, що належать листковій пластині, та фактичною площею в реальних одиницях (мм^2 або см^2):

$$S_{\text{факт}} = k \cdot N_{\text{пікселів}}, \quad (2.6)$$

де $S_{\text{факт}}$ — фактична площа листка, k — масштабний коефіцієнт (площа одного пікселя у реальних одиницях), $N_{\text{пікселів}}$ — кількість пікселів сегментованої листкової пластини.

Масштабний коефіцієнт визначається за еталонним об'єктом відомої площі (калібратором), розміщеним у площині вимірювання:

					14.17 - КР.027.2.000 ПЗ	Аркуш
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$k = \frac{S_{\text{еталон}}}{N_{\text{еталон}}}, \quad (2.7)$$

де $S_{\text{еталон}}$ — відома площа еталонного об'єкта (наприклад, квадрат зі стороною 10 мм), $N_{\text{еталон}}$ — кількість пікселів, що відповідають цьому об'єкту на зображенні.

Важливо зазначити, що масштабний коефіцієнт залежить від:

- Робочої відстані (відстані від об'єктива до площини вимірювання)
- Фокусної відстані об'єктива
- Роздільної здатності сенсора
- Положення об'єкта в полі зору (на краях поля зору масштаб може змінюватися через дисторсію)

Тому калібрування має виконуватися при кожній зміні робочої відстані або при використанні різних оптичних налаштувань.

Калібрування камери

Калібрування камери — це процес визначення параметрів моделі камери з точковою діафрагмою, які описують камеру, що виконує дану фотографію або відео. Мета калібрування полягає у знаходженні чисельного співвідношення між тривимірними точками та двовимірними точками, в які вони проектується.

Основні етапи калібрування:

1. Фотографування калібрувального об'єкта з різних ракурсів (не менше 10–15 знімків). Як калібрувальний об'єкт зазвичай використовується шахова дошка або інший об'єкт з відомими геометричними розмірами.

2. Виявлення кутових точок на калібрувальному об'єкті за допомогою алгоритмів виявлення кутів (наприклад, алгоритм Харріса або детектор кутів шахової дошки).

3. Оцінювання параметрів камери методом найменших квадратів з використанням відповідностей між 3D-точками об'єкта та 2D-точками зображення.

4. Оцінювання коефіцієнтів дисторсії (радіальної та тангенціальної) для корекції спотворень, що вносяться об'єктивом.

					14.17 - КР.027.2.000 ПЗ	Аркуш
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Процес калібрування може виконуватися за допомогою методу прямого лінійного перетворення (DLT), який дозволяє оцінити параметри камери без початкового наближення. Для калібрування при кожному фокусуванні та налаштуванні масштабування необхідний калібрувальний об'єкт з ознаками або патернами, видимими в обох зображеннях.

Радіальна дисторсія описується поліномом:

$$x_{\text{кориг}} = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6), \quad (2.8)$$

$$y_{\text{кориг}} = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6), \quad (2.9)$$

де $r^2 = x^2 + y^2$, k_1, k_2, k_3 — коефіцієнти радіальної дисторсії.

Тангенціальна дисторсія (викликана непаралельністю оптичної осі та площини сенсора) описується формулами:

$$x_{\text{кориг}} = x + [2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2)] \quad (2.10)$$

$$y_{\text{кориг}} = y + [p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy] \quad (2.11)$$

де p_1, p_2 — коефіцієнти тангенціальної дисторсії.

Після визначення параметрів камери та коефіцієнтів дисторсії виконується корекція зображень для усунення спотворень, що забезпечує точність вимірювань на рівні, необхідному для агрономічних застосувань.

Визначення робочої відстані та масштабу зображення

Для портативного застосування робоча відстань (відстань від об'єктива до площини вимірювання) вибирається в діапазоні 100–200 мм, що забезпечує оптимальне співвідношення між полем зору та ергономічністю пристрою.

Масштаб зображення визначається як відношення розміру зображення об'єкта на сенсорі до його реального розміру:

$$M = \frac{h_{\text{сенсор}}}{H_{\text{об'єкт}}} = \frac{f}{Z}, \quad (2.12)$$

де $h_{\text{сенсор}}$ — розмір зображення на сенсорі, $H_{\text{об'єкт}}$ — реальний розмір об'єкта, f — фокусна відстань, Z — відстань до об'єкта.

При фокусній відстані 4 мм та робочій відстані 150 мм масштаб зображення становить:

					14.17 - КР.027.2.000 ПЗ	Аркуш
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$M = \frac{4}{150} \approx 0,0267 \quad (2.13)$$

Це означає, що об'єкт розміром 100 мм буде мати зображення розміром 2,67 мм на сенсорі. При розмірі пікселя 1,4 мкм (типово для 5-мегапіксельного сенсора) це відповідає приблизно 1900 пікселям на 100 мм, що забезпечує роздільну здатність близько 0,053 мм/піксель.

Математичне моделювання похибок вимірювання

Для оцінки точності вимірювання площі необхідно враховувати наступні джерела похибок:

1. *Похибка визначення масштабного коефіцієнта* — пов'язана з точністю калібрування та стабільністю робочої відстані
2. *Похибка сегментації* — пов'язана з неточностями виділення листкової пластини на зображенні
3. *Похибка квантування* — пов'язана з дискретною природою піксельного представлення зображення
4. *Похибка дисторсії* — пов'язана з залишковими спотвореннями після калібрування

Загальна похибка вимірювання площі визначається як корінь квадратний із суми квадратів окремих складових:

$$\Delta S_{\text{заг}} = \sqrt{\Delta S_{\text{калібр}}^2 + \Delta S_{\text{сегм}}^2 + \Delta S_{\text{квант}}^2 + \Delta S_{\text{дист}}^2} \quad (2.14)$$

Для розроблюваного модуля очікувані значення складових похибки становлять:

- $\Delta S_{\text{калібр}} \approx 0,5\%$
- $\Delta S_{\text{сегм}} \approx 1,0\text{--}2,0\%$
- $\Delta S_{\text{квант}} \approx 0,3\%$
- $\Delta S_{\text{дист}} \approx 0,5\%$

Таким чином, загальна похибка вимірювання площі очікується на рівні 1,3–2,2%, що відповідає вимогам до портативних приладів для агрономічних застосувань.

					14.17 - КР.027.2.000 ПЗ	Аркуш
						31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2 Теоретичне обґрунтування алгоритмів колірної сегментації листкових пластин на фоні завад з використанням вегетаційних індексів

Поняття та класифікація вегетаційних індексів

Веgetаційні індекси розраховуються як результат комбінації значень пікселів у різних спектральних діапазонах. Вони дозволяють кількісно оцінити стан рослинності, мінімізуючи вплив зовнішніх факторів (освітлення, ґрунт, атмосферні умови). У сільському господарстві вегетаційні індекси застосовуються при оцінці стану посівів у визначений момент часу або в динаміці (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – Теоретичне обґрунтування алгоритмів колірної сегментації листкових пластин на фоні завад з використанням вегетаційних індексів

За спектральним складом вегетаційні індекси поділяються на:

- *Індекси на основі видимого діапазону (RGB)* — ExG, ExR, ExGR, VARI тощо
- *Індекси з використанням інфрачервоного діапазону* — NDVI, EVI, GNDVI, SAVI тощо
- *Гіперспектральні індекси* — використовують вузькі спектральні смуги
- Нормалізований диференційний вегетаційний індекс (NDVI)*

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) є найбільш поширеним вегетаційним індексом, який використовується для вимірювання біомаси рослин. Він обчислює варіацію між кількістю червоного світла, отриманого рослинністю:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (2.15)$$

де NIR — відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні (зазвичай 750–900 нм), RED — відбиття у червоному діапазоні (зазвичай 630–690 нм).

Значення NDVI інтерпретуються наступним чином:

- $NDVI < 0,15$ — відкритий ґрунт, відсутність вегетації
- $0,15 < NDVI < 0,30$ — розріджена рослинність
- $0,30 < NDVI < 0,60$ — помірна рослинність
- $NDVI > 0,60$ — густа, здорова рослинність

NDVI найчастіше використовується у разі оцінки вмісту води та концентрації азоту в листках рослин. Він є показником фотосинтетичної активності рослинного покриву.

Надлишковий зелений індекс (ExG)

ExG (Excess Green Index) є одним з найбільш широко визнаних індексів для ідентифікації зеленої рослинності на основі видимих true-color RGB-зображень. Він розраховується за формулою:

$$ExG = 2g - r - b \quad (2.16)$$

де $r = R/(R + G + B)$, $g = G/(R + G + B)$, $b = B/(R + G + B)$ — нормовані значення кольорних каналів.

ExG широко використовується для сегментації зображень з багатьма кольорними каналами. Дослідження показують, що індекси ExG та ExGR демонструють кращу адаптацію до польових умов, особливо щодо освітлення.

ExG-метод продемонстрував відмінну продуктивність у виділенні здорової рослинності, забезпечуючи значно вищий середній NDVI (0,470) порівняно з альтернативними методами (0,300).

Індекс VARI (Visible Atmospherically Resistant Index)

					14.17 - КР.027.2.000 ПЗ	Аркуш
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

VARI є вегетаційним індексом, стійким до атмосферних впливів, який використовує лише видимі канали:

$$VARI = \frac{G-R}{G+R-B} \quad (2.17)$$

Цей індекс особливо корисний для зображень, отриманих у видимому діапазоні без інфрачервоного каналу, що робить його придатним для звичайних цифрових камер.

Порівняльний аналіз вегетаційних індексів для сегментації (таблиця 2.1)

Таблиця 2.1 — Порівняльна характеристика вегетаційних індексів для сегментації листків

Індекс	Спектральні канали	Стійкість до освітлення	Обчислювальна складність	Точність сегментації
NDVI	NIR, RED	Висока	Середня	Дуже висока
ExG	R, G, B	Середня	Низька	Висока
VARI	R, G, B	Висока	Низька	Висока
ExGR	R, G, B	Висока	Низька	Висока

Для розроблюваного модуля, який використовує стандартну RGB-камеру без інфрачервоного каналу, найбільш придатними є ExG та VARI, оскільки вони не потребують спеціального обладнання для отримання NIR-каналу.

Методи порогової сегментації

Порогова сегментація є найпростішим методом виділення об'єктів на зображенні. Для кожного пікселя обчислюється значення деякої характеристики (наприклад, значення ExG) і порівнюється з пороговим значенням:

$$P_{\text{рослина}}(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } I(x, y) > T \\ 0, & \text{якщо } I(x, y) \leq T \end{cases} \quad (2.18)$$

де $I(x, y)$ — значення індексу в пікселі з координатами (x, y) , T — порогове значення.

Для автоматичного вибору порогового значення використовуються:

– *Метод Оцу* — вибір порогу, що максимізує міжкласову дисперсію. Цей метод є одним з найбільш ефективних для бінарної сегментації зображень.

– *Адаптивна порогова сегментація* — використання різних порогових значень для різних областей зображення, що дозволяє компенсувати нерівномірність освітлення.

– *Метод ізотропної сегментації* — адаптивний поріг на основі локальних статистик.

Морфологічна обробка сегментованих зображень

Після бінарної сегментації виконується морфологічна обробка для покращення результатів:

1. Ерозія — видалення ізольованих пікселів та згладжування меж:

$$(A \ominus B)(x, y) = \min_{(i,j) \in B} A(x + i, y + j) \quad (2.19)$$

2. Дилатація — заповнення невеликих проміжків та отворів:

$$(A \oplus B)(x, y) = \max_{(i,j) \in B} A(x + i, y + j) \quad (2.20)$$

3. Закриття (дилатація з наступною ерозією) — усунення невеликих отворів та з'єднання близьких об'єктів:

$$A \cdot B = (A \oplus B) \ominus B \quad (2.21)$$

4. Відкриття (ерозія з наступною дилатацією) — видалення малих об'єктів та виступів:

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (2.22)$$

Методи машинного навчання для сегментації

Сучасні підходи до сегментації зображень використовують методи машинного навчання:

U-Net — архітектура згорткової нейронної мережі, спеціально розроблена для сегментації біомедичних зображень. Вона складається з симетричної структури «кодер-декодер» з skip-з'єднаннями, що дозволяє зберігати просторову інформацію.

DeepLabv3 — сучасна архітектура для семантичної сегментації, яка використовує розширені згортки для збільшення рецептивного поля без втрати просторової роздільної здатності.

SAM (Segment Anything Model) — велика модель сегментації, розроблена Meta, яка може бути адаптована для специфічних завдань з використанням невеликої кількості навчальних даних.

Переваги методів машинного навчання:

- Висока точність сегментації
- Стійкість до варіацій умов зйомки
- Можливість адаптації до різних типів рослин
- Недоліки:
- Необхідність великої кількості розмічених даних для навчання
- Високі обчислювальні витрати
- Складність реалізації на мікроконтролерах з обмеженими ресурсами

Обґрунтування вибору алгоритму сегментації

Для розроблюваного модуля пропонується використання комбінованого підходу, що забезпечує оптимальне співвідношення точності та обчислювальної ефективності:

1. Попередня обробка зображення:

– Корекція балансу білого для компенсації зміни колірної температури освітлення

– Медіанна фільтрація для усунення імпульсних шумів

– Нормалізація яскравості для компенсації нерівномірності освітлення

2. Обчислення вегетаційного індексу:

– Основний метод: ExG для RGB-зображень (висока точність, низька обчислювальна складність)

– Альтернативний метод: VARI для випадків з нерівномірним освітленням

3. Автоматичне визначення порогового значення:

– Основний метод: алгоритм Оцу (глобальний поріг)

– Альтернативний метод: адаптивний поріг для випадків з нерівномірним фоном

					14.17 - КР.027.2.000 ПЗ	Аркуш
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Бінарна сегментація з морфологічною обробкою:

- Закриття для заповнення дрібних отворів у листовій пластині
- Відкриття для видалення дрібних об'єктів фону
- Видалення об'єктів площею менше заданого порогу

5. Обчислення площі сегментованої області:

- Підрахунок кількості пікселів, що належать листовій пластині
- Перерахунок у реальні одиниці площі з використанням масштабного коефіцієнта

Такий підхід забезпечує:

- Високу точність сегментації (очікувана похибка $< 2\%$)
- Низькі обчислювальні витрати (реалізація на мікроконтролері з частотою 200 МГц)
- Стійкість до варіацій умов зйомки
- Можливість роботи в реальному часі

2.3 Інформаційно-енергетична взаємодія технічних систем: синхронізація імпульсного освітлення, експозиції CMOS-матриці та процесу обробки зображення мікроконтролером

Архітектура інформаційно-енергетичної системи (рисунок 2.3)

Ключовим аспектом роботи модуля є синхронізація трьох підсистем, що забезпечує отримання якісного зображення з мінімальним енергоспоживанням:

1. Підсистема освітлення — імпульсний LED-драйвер, що забезпечує стабільну освітленість сцени
2. Підсистема реєстрації — CMOS-матриця з керованим часом експозиції
3. Підсистема обробки — мікроконтролер, що виконує захоплення кадру та обробку

Принципи імпульсного LED-освітлення

Імпульсне керування LED-освітленням представляє принципово інший підхід порівняно з традиційним «завжди ввімкненим» освітленням. Шляхом

					14.17 - КР.027.2.000 ПЗ	Аркуш
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

синхронізації світлового потоку із затвором камери, імпульсне керування забезпечує як операційні, так і продуктивні переваги для систем машинного зору.

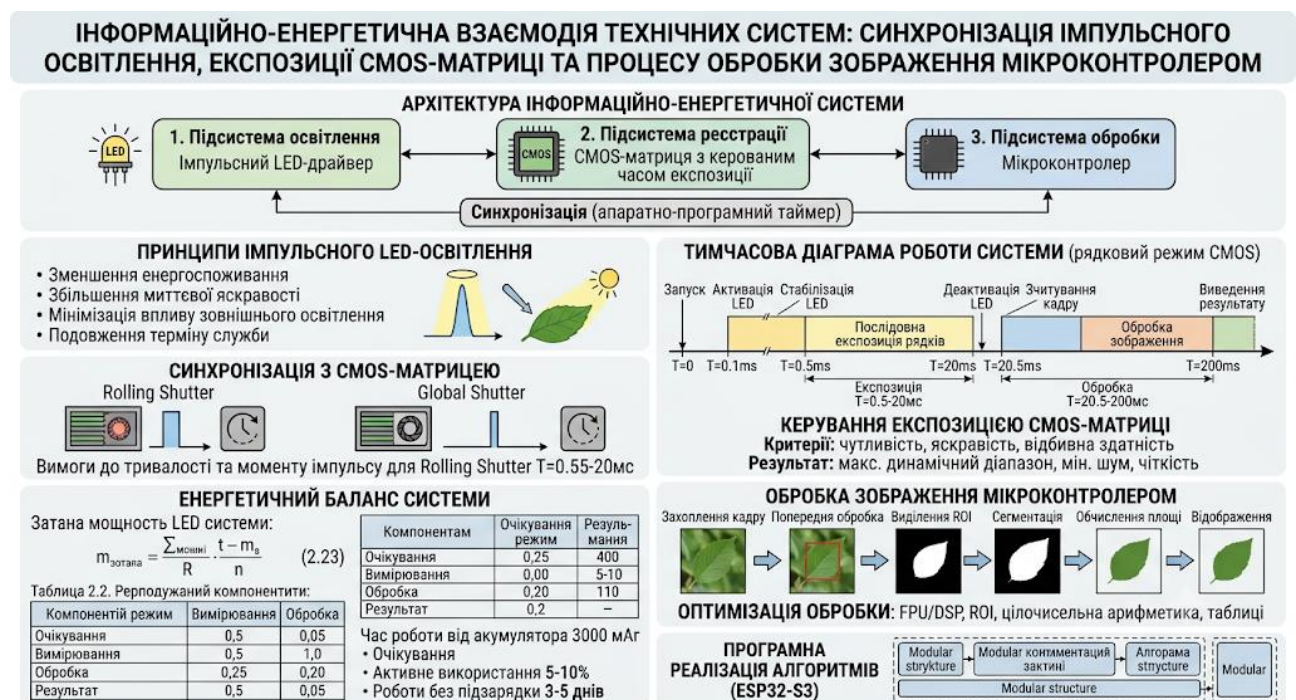


Рисунок 2.3 – Інформаційно-енергетична взаємодія технічних систем: синхронізація імпульсного освітлення, експозиції CMOS-матриці та процесу обробки зображення мікроконтролером

Основні переваги імпульсного режиму:

- Зменшення енергоспоживання — світлодіоди працюють лише в момент зйомки
- Збільшення миттєвої яскравості — можливість безпечного перевищення номінального струму в імпульсному режимі
- Мінімізація впливу зовнішнього освітлення — короткий імпульс «заморожує» сцену
- Подовження терміну служби LED — зменшення загального часу роботи

LED-контролери можуть використовуватися для підтримки стабільної вихідної потужності для «завжди ввімкнених» LED, а також дозволяють синхронізувати та безпечно перевантажувати LED для значного збільшення оптичної вихідної потужності

Синхронізація з CMOS-матрицею

CMOS-матриці використовують рядковий (rolling shutter) або глобальний (global shutter) режим зчитування. У рядковому режимі експозиція різних рядків відбувається в різні моменти часу, що створює додаткові вимоги до синхронізації імпульсного освітлення.

При використанні рядкового режиму необхідно враховувати:

- Час експозиції кожного рядка
- Час зчитування рядка
- Затримку між початком експозиції першого та останнього рядка

Для забезпечення рівномірного освітлення всіх рядків тривалість імпульсу LED має бути не меншою за час експозиції одного рядка, а момент включення LED має бути синхронізований з початком експозиції першого рядка.

При використанні глобального затвора всі пікселі експонуються одночасно, що спрощує синхронізацію: LED вмикається на весь час експозиції кадру.

Синхронізація реалізується через програмно-апаратний таймер мікроконтролера, який генерує керуючі імпульси для LED-драйвера та ініціює захоплення кадру сенсором. Такий підхід дозволяє точно налаштовувати часові співвідношення між імпульсом LED та експозицією камери, що є критичним для досягнення оптимальної якості зображення та точного збору даних.

Тимчасова діаграма роботи системи

Тимчасова діаграма роботи модуля при використанні рядкового режиму CMOS-матриці:

1. **Запуск вимірювання** — мікроконтролер отримує команду від користувача
2. **T = 0 мс** — початок експозиції першого рядка, активація LED-драйвера
3. **T = 0,1 мс** — стабілізація світлового потоку LED
4. **T = 0,5 мс** — завершення експозиції першого рядка
5. **T = 0,5–20 мс** — послідовна експозиція та зчитування рядків

					14.17 - КР.027.2.000 ПЗ	Аркуш
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6. $T = 20$ мс — завершення експозиції останнього рядка, деактивація LED-драйвера

7. $T = 20,5$ мс — завершення зчитування кадру, початок обробки зображення

8. $T = 20,5\text{--}200$ мс — обробка зображення мікроконтролером

9. $T = 200$ мс — виведення результату на дисплей

Загальний час циклу вимірювання становить приблизно 200 мс, що дозволяє виконувати до 5 вимірювань за секунду.

Керування експозицією CMOS-матриці

Час експозиції вибирається на основі:

- Світлочутливості сенсора (ISO)
- Яскравості LED-освітлювача
- Відбивної здатності листової поверхні
- Оптимальний час експозиції забезпечує:
- Максимальний динамічний діапазон (відсутність пересвічених та недоекспонованих ділянок)
- Мінімальний рівень шуму
- Чіткість зображення (відсутність змащення)

Для CMOS-матриці з роздільною здатністю 5 Мп та чутливістю ISO 100 типовий час експозиції становить 10–50 мс при освітленості 500–1000 люкс. У імпульсному режимі з LED-освітленням час експозиції може бути зменшений до 5–20 мс завдяки вищій миттєвій освітленості.

Енергетичний баланс системи

Споживана потужність модуля визначається сумою потужностей окремих компонентів:

$$P_{\text{заг}} = P_{\text{LED}} + P_{\text{CMOS}} + P_{\text{MCU}} + P_{\text{дисплей}} + P_{\text{інші}} \quad (2.23)$$

					14.17 - КР.027.2.000 ПЗ	Аркуш
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Типові значення для різних режимів роботи (таблиця 2.2):

Таблиця 2.2 — Енергоспоживання компонентів модуля

Компонент	Режим очікування	Режим вимірювання	Режим обробки
LED-освітлювач	0 мВт	500 мВт (імпульсний)	0 мВт
CMOS-матриця	50 мВт	200 мВт	100 мВт
Мікроконтролер	20 мВт	100 мВт	200 мВт
Дисплей	10 мВт	50 мВт	50 мВт
Інші компоненти	10 мВт	20 мВт	20 мВт
Загальна потужність	90 мВт	870 мВт	370 мВт

При використанні літій-іонного акумулятора ємністю 3000 мА·год при напрузі 3,7 В (енергія $\approx 11,1$ Вт·год) час роботи в різних режимах:

- Режим очікування: $t = 11,1/0,09 \approx 123$ години
- Режим вимірювання (5% часу): $t \approx 30$ годин активного використання
- Режим обробки (10% часу): $t \approx 20$ годин активного використання

Таким чином, при типовому використанні (вимірювання 50–100 листків на день) акумулятора вистачає на 3–5 днів роботи без підзарядки.

Обробка зображення мікроконтролером

Процес обробки зображення включає наступні етапи:

1. *Захоплення кадру* — зчитування даних з CMOS-матриці в буфер пам'яті
2. *Попередня обробка* — корекція балансу білого, усунення шумів
3. *Виділення області інтересу (ROI)* — автоматичне або ручне виділення області, що містить листок
4. *Сегментація* — виділення листкової пластини з використанням вегетаційних індексів
5. *Обчислення площі* — підрахунок кількості пікселів та перерахунок у реальні одиниці
6. *Відображення результатів* — виведення на дисплей або передача через інтерфейс

Оптимізація обробки досягається шляхом:

					14.17 - КР.027.2.000 ПЗ	Аркуш
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Використання апаратного прискорення (FPU, DSP-інструкції)
- Роботи з ROI — обробка лише області, що містить листок
- Використання цілочисельної арифметики замість дробової
- Використання попередньо обчислених таблиць для нелінійних операцій

Програмна реалізація алгоритмів на мікроконтролері

Для реалізації алгоритмів обробки зображення на мікроконтролері ESP32-S3 пропонується наступна структура програмного забезпечення:

1. *Драйвер камери* — ініціалізація, налаштування параметрів, захоплення кадрів
2. *Драйвер LED* — керування імпульсним освітленням, синхронізація з камерою
3. *Модуль попередньої обробки* — корекція кольору, фільтрація, нормалізація
4. *Модуль сегментації* — обчислення вегетаційних індексів, порогова обробка, морфологічні операції
5. *Модуль обчислення площі* — підрахунок пікселів, калібрування, перерахунок
6. *Модуль інтерфейсу* — керування дисплеєм, обробка кнопок, передача даних

Програмне забезпечення розробляється з використанням мови C/C++ в середовищі Arduino IDE або ESP-IDF.

2.4 Алгоритми цифрової компенсації кутових деформацій листка для запобігання розстроюванню масштабного коефіцієнта вимірювань

Джерела та типи кутових деформацій

При вимірюванні площі листка можливі наступні види деформацій, які впливають на точність визначення площі (рисунки 3.4):

1. *Кутові деформації площини* — листок не є ідеально плоским або не паралельний площині камери. Це може бути викликано природною формою

					14.17 - КР.027.2.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

листка (вигнутість, скрученість) або неправильним розміщенням у затискному модулі.

ГРАФІЧНА СХЕМА АЛГОРИТМІВ ЦИФРОВОЇ КОМПЕНСАЦІЇ КУТОВИХ ДЕФОРМАЦІЙ ЛИСТКА

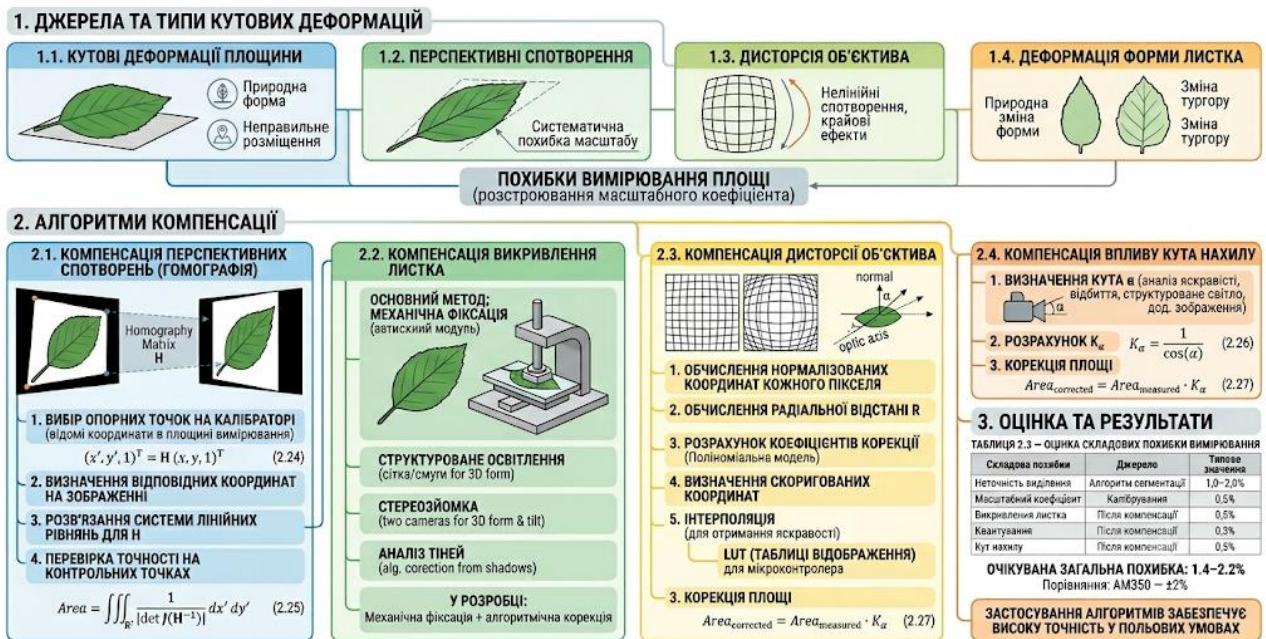


Рисунок 2.4 – Алгоритми цифрової компенсації кутових деформацій листка

2. *Перспективні спотворення* — ближні частини листка мають більший масштаб, ніж дальні, що призводить до систематичної похибки при обчисленні площі.

3. *Дисторсія об'єктива* — нелінійні спотворення, особливо на краях поля зору, що викликають зміну масштабу в різних частинах зображення.

4. *Деформація форми листка* — природна або викликана тургором зміна форми листка, що ускладнює точне визначення його площі.

Компенсація перспективних спотворень за допомогою гомографії

Перспективні спотворення описуються проєктивним перетворенням (гомографією). Для компенсації необхідно визначити матрицю гомографії H , яка перетворює координати зображення в координати площини вимірювання:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = H \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Матриця гомографії визначається за чотирма або більше опорними точками з відомими координатами (калібратор). Для визначення матриці гомографії використовується наступний алгоритм:

1. Вибір опорних точок на калібраторі з відомими координатами в площині вимірювання
2. Визначення відповідних координат цих точок на зображенні
3. Розв'язання системи лінійних рівнянь для визначення елементів матриці гомографії
4. Перевірка точності перетворення на контрольних точках

Після застосування гомографії площа обчислюється в координатах площини вимірювання:

$$S = \iint_{\Omega} |\det(\mathbf{J})| du dv, \quad (2.25)$$

де $\mathbf{J}$ — матриця Якобі перетворення, Ω — область, що відповідає листовій пластині на зображенні.

Компенсація викривлення листка

Для компенсації викривлення листка (неплоска форма) пропонуються наступні підходи:

1. *Механічна фіксація* — використання затискного модуля, що притискає листок до плоскої поверхні. Це найбільш простий та надійний метод, який забезпечує мінімізацію деформацій.

2. *Структуроване освітлення* — проекція сітки або смуг на листок для відновлення 3D-форми з подальшою корекцією виміряної площі.

3. *Стереозйомка* — використання двох камер для відновлення 3D-форми листка та корекції площі. Цей метод дозволяє визначити кут нахилу листка та скоригувати виміряну площу.

4. *Алгоритмічна корекція на основі аналізу тіней* — використання інформації про тіні для оцінки форми листка.

У розроблюваному модулі передбачено використання механічної фіксації як основного методу, доповненого алгоритмічною корекцією для мінімізації залишкових похибок.

Компенсація дисторсії об'єктива

Дисторсія об'єктива компенсується з використанням коефіцієнтів, отриманих при калібруванні камери. Для кожного пікселя зображення виконується зворотне перетворення для усунення радіальної та тангенціальної дисторсії.

Алгоритм корекції дисторсії:

1. Для кожного пікселя вихідного зображення обчислюються нормалізовані координати
2. Обчислюється радіальна відстань $r = \sqrt{x^2 + y^2}$
3. Обчислюються коефіцієнти корекції на основі поліноміальної моделі дисторсії
4. Визначаються скориговані координати пікселя
5. Виконується інтерполяція для отримання значень яскравості в скоригованих координатах

Для зменшення обчислювальних витрат на мікроконтролері корекція дисторсії може виконуватися з використанням попередньо обчислених таблиць відображення (LUT).

Компенсація впливу кута нахилу листка

Для компенсації впливу кута нахилу листка відносно площини камери використовується наступний підхід:

1. Визначення кута нахилу листка на основі аналізу форми та відбиття
2. Розрахунок коефіцієнта корекції площі:

$$k_{\text{кут}} = \frac{1}{\cos \theta}, \quad (2.26)$$

де θ — кут між нормаллю до поверхні листка та оптичною віссю камери.

3. Корекція вимірної площі:

$$S_{\text{кориг}} = S_{\text{вим}} \cdot k_{\text{кут}} \quad (2.27)$$

					14.17 - КР.027.2.000 ПЗ	Аркуш
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для визначення кута нахилу можуть використовуватися:

- Аналіз зміни яскравості по поверхні листка (відбиття залежить від кута)
- Використання структурованого освітлення
- Використання інформації про форму листка з додаткових зображень

Оцінка похибки вимірювання (таблиця 2.3)

Загальна похибка вимірювання площі визначається як:

$$\Delta S_{\text{заг}} = \sqrt{\Delta S_{\text{сегментація}}^2 + \Delta S_{\text{калібрування}}^2 + \Delta S_{\text{деформація}}^2 + \Delta S_{\text{дискретизація}}^2 + \Delta S_{\text{кут}}^2}$$

Таблиця 2.3 — Оцінка складових похибки вимірювання

Складова похибки	Джерело	Типове значення
$\Delta S_{\text{сегментація}}$	Неточність виділення листка	1,0–2,0%
$\Delta S_{\text{калібрування}}$	Похибка визначення масштабного коефіцієнта	0,5%
$\Delta S_{\text{деформація}}$	Викривлення листка	0,5% (після компенсації)
$\Delta S_{\text{дискретизація}}$	Похибка квантування	0,3%
$\Delta S_{\text{кут}}$	Кут нахилу листка	0,5% (після компенсації)
Загальна похибка		1,4–2,2%

Очікувана загальна похибка вимірювання площі становить 1,4–2,2%, що відповідає рівню комерційних приладів (АМ350 — $\pm 2\%$ для площі). Застосування описаних алгоритмів компенсації дозволяє мінімізувати вплив кутових деформацій та забезпечити високу точність вимірювань у польових умовах.

Висновки

У розділі кваліфікаційної роботи проведено теоретичне обґрунтування та математичне моделювання оптико-електронного діагностичного модуля, на основі якого можна зробити такі висновки:

1. Розроблено математичну модель оптико-геометричної системи на основі моделі камери-обскури, яка описує співвідношення між світовими координатами точок об'єкта та їх відображенням на площині зображення. Визначено матрицю внутрішніх параметрів камери та описано процедуру калібрування для визначення фокусної відстані, головної точки та коефіцієнтів дисторсії. Обґрунтовано використання масштабного коефіцієнта для перерахунку кількості пікселів у реальну площу.

2. Теоретично обґрунтовано алгоритми колірної сегментації листкових пластин на фоні завад з використанням вегетаційних індексів. Проведено порівняльний аналіз NDVI, ExG, VARI та ExGR, на основі якого вибрано ExG як основний індекс для сегментації на RGB-зображеннях. Розроблено комбінований підхід, що включає попередню обробку, обчислення індексу, автоматичне визначення порогового значення методом Оцу, бінарну сегментацію з морфологічною обробкою та обчислення площі. Очікувана похибка сегментації становить 1,0–2,0%.

3. Розроблено інформаційно-енергетичну модель взаємодії технічних систем, що описує синхронізацію імпульсного LED-освітлення, експозиції CMOS-матриці та процесу обробки зображення мікроконтролером. Визначено тимчасову діаграму роботи системи та виконано розрахунок енергетичного балансу. Загальна потужність споживання в режимі вимірювання становить 870 мВт, що забезпечує час роботи від акумулятора ємністю 3000 мА·год на рівні 20–30 годин активного використання.

4. Запропоновано алгоритми цифрової компенсації кутових деформацій листка для запобігання розстроюванню масштабного коефіцієнта вимірювань. Розглянуто методи компенсації перспективних спотворень за

					14.17 - КР.027.2.000 ПЗ	Аркуш
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

допомогою гомографії, дисторсії об'єктива через калібрування, викривлення листка через механічну фіксацію та впливу кута нахилу через аналіз форми та відбиття.

5. Виконано оцінку загальної похибки вимірювання, яка становить 1,4–2,2% з урахуванням усіх складових: похибки сегментації (1,0–2,0%), калібрування (0,5%), деформації (0,5% після компенсації), дискретизації (0,3%) та кута нахилу (0,5% після компенсації). Це відповідає рівню точності комерційних портативних вимірювачів площі листя.

Таким чином, теоретичне обґрунтування та математичне моделювання, виконані в другому розділі, створюють надійну основу для інженерного проектування оптико-електронного модуля та підтверджують можливість досягнення необхідної точності вимірювань при використанні сучасної елементної бази та розроблених алгоритмів обробки зображень.

					14.17 - КР.027.2.000 ПЗ	Аркуш
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

ІНЖЕНЕРНИЙ РОЗРАХУНОК ТА ПРОЄКТУВАННЯ КОМПОНЕНТІВ МЕХАТРОННОГО ПРИСТРОЮ

3.1 Розрахунок параметрів оптичної системи: вибір фокусної відстані об'єктива, роздільної здатності сенсора та робочої відстані

Визначення вимог до оптичної системи

Оптична система є ключовим компонентом модуля, оскільки саме від її параметрів залежить якість отриманих зображень і, відповідно, точність вимірювання площі листкової поверхні. На основі проведеного в розділі 1 аналізу комерційних аналогів (АМ350, АМ400, СІ-202) сформульовано наступні вимоги до оптичної системи:

- *Поле зору*: не менше 150×100 мм (для вимірювання листків середніх та великих розмірів, зокрема кукурудзи, соняшнику, томатів)
- *Роздільна здатність*: не менше 10 пікселів/мм (для забезпечення точності вимірювання площі на рівні $< 2\%$)
- *Робоча відстань*: 100–200 мм (ергономічність портативного пристрою, зручність розміщення листка)
- *Глибина різкості*: ± 10 мм (компенсація нерівностей листка та похибок позиціонування)
- *Колірна точність*: висока (для коректної сегментації за вегетаційними індексами ExG, VARI)

Вибір фокусної відстані об'єктива

					14.17 - КР.027.3.000 ПЗ								
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата									
Розроб.		Ковалеску			РОЗДІЛ 3				Літ.	Аркуш	Аркушів		
Перевір.		Дядюра К.О.									49	6	
Реценз.													
Н. Контр.													
Затверд.		Дядюра К. О.											

Фокусна відстань об'єктива є основним параметром, що визначає кутове поле зору та масштаб зображення. Для заданого розміру сенсора $h_{\text{сенсор}}$ та необхідного поля зору $H_{\text{об'єкт}}$ фокусна відстань розраховується за формулою:

$$f = \frac{h_{\text{сенсор}} \cdot Z}{H_{\text{об'єкт}}}, \quad (3.1)$$

де Z — робоча відстань (відстань від об'єктива до площини вимірювання).

Для сенсора OV5640 з розміром оптичного формату 1/4" (фізичний розмір матриці становить приблизно $3,6 \times 2,7$ мм), робочої відстані 150 мм та необхідного поля зору 150×100 мм:

$$f_x = \frac{3,6 \cdot 150}{150} = 3,6 \text{ мм}$$

$$f_y = \frac{2,7 \cdot 150}{100} = 4,05 \text{ мм}$$

Оскільки сенсор має прямокутну форму, необхідно обирати фокусну відстань, яка забезпечує перекриття поля зору по обох осях. Обираємо стандартну фокусну відстань **3,6 мм**, що забезпечує:

- Поле зору по горизонталі: $H_x = \frac{3,6 \cdot 150}{3,6} = 150 \text{ мм}$
- Поле зору по вертикалі: $H_y = \frac{2,7 \cdot 150}{3,6} = 112,5 \text{ мм}$

Фактичне поле зору становить $150 \times 112,5$ мм, що повністю задовольняє поставленим вимогам.

Вибір роздільної здатності сенсора

Необхідна роздільна здатність сенсора визначається вимогою до точності вимірювання площі. Для забезпечення похибки вимірювання площі не більше 1% необхідно, щоб похибка визначення меж листкової пластини не перевищувала 0,5 пікселя. При полі зору 150×100 мм та роздільній здатності 5 Мп (2592×1944 пікселів):

- Роздільна здатність по горизонталі: $2592/150 = 17,28$ пікселів/мм
- Роздільна здатність по вертикалі: $1944/100 = 19,44$ пікселів/мм

					14.17 - КР.027.3.000 ПЗ	Аркуш
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

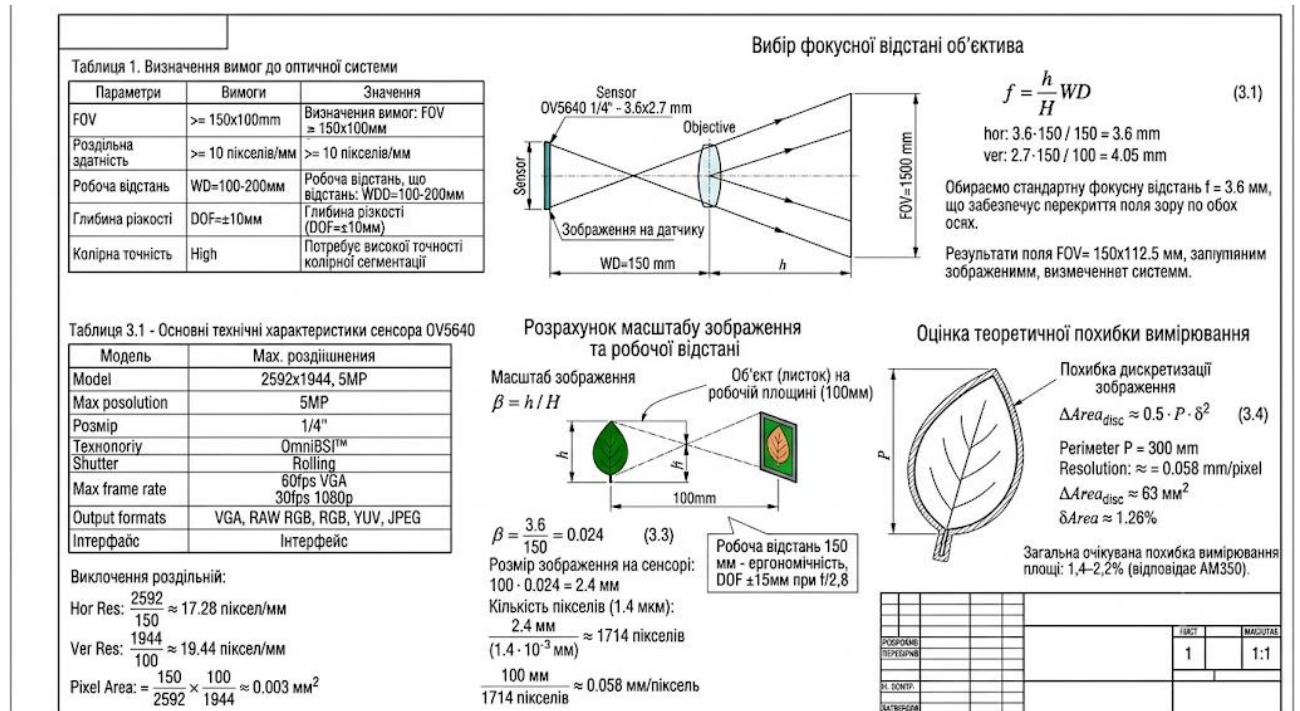
– Площа одного пікселя в реальних одиницях: $(150/2592) \times (100/1944) \approx 0,003 \text{ мм}^2$

Таким чином, сенсор OV5640 забезпечує роздільну здатність, яка значно перевищує мінімально необхідну (0,065 мм² для AM350), що дозволяє досягти високої точності вимірювань (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Основні технічні характеристики сенсора OV5640:

Параметр	Значення
Модель сенсора	OmniVision OV5640
Максимальна роздільна здатність	2592 × 1944 (5 Мп)
Розмір оптичного формату	1/4"
Технологія	OmniBSI™ (зворотне засвічення)
Режим затвора	Rolling shutter (рядковий)
Максимальна частота кадрів	60 fps (VGA), 30 fps (1080p)
Вихідні формати	8/10-bit RGB RAW, RGB, YUV, JPEG
Інтерфейс	MIPI CSI-2

Розрахунок масштабу зображення та робочої відстані (рисунк 3.1).



Рисунк 3.1 – Розрахунок параметрів оптичної системи

Масштаб зображення визначається як відношення розміру зображення об'єкта на сенсорі до його реального розміру:

$$M = \frac{h_{\text{сенсор}}}{H_{\text{об'єкт}}} = \frac{f}{z} \quad (3.2)$$

При фокусній відстані 3,6 мм та робочій відстані 150 мм масштаб зображення становить:

$$M = \frac{3,6}{150} = 0,024 \quad (3.3)$$

Це означає, що об'єкт розміром 100 мм буде мати зображення розміром 2,4 мм на сенсорі. При розмірі пікселя 1,4 мкм (типово для 5-мегапіксельного сенсора формату 1/4") це відповідає приблизно 1714 пікселям на 100 мм, що забезпечує роздільну здатність близько 0,058 мм/піксель.

Робоча відстань 150 мм обрана як компроміс між:

- Достатнім полем зору ($150 \times 112,5$ мм) для вимірювання більшості листків сільськогосподарських культур
- Ергономічністю пристрою (зручне розміщення рук оператора)
- Глибиною різкості (при діафрагмі $f/2,8$ глибина різкості становить приблизно ± 15 мм)

Оцінка теоретичної похибки вимірювання

Теоретична похибка вимірювання площі, зумовлена дискретизацією зображення, визначається як:

$$\Delta S_{\text{дискр}} = \frac{P_{\text{периметр}} \cdot \delta}{2}, \quad (3.4)$$

де $P_{\text{периметр}}$ — периметр листка (для типового листка площею 50 см² периметр становить приблизно 300 мм), δ — роздільна здатність (0,058 мм/піксель).

$$\Delta S_{\text{дискр}} = \frac{300 \cdot 0,058}{2} = 8,7 \text{ мм}^2$$

Відносна похибка: $\Delta S_{\text{дискр}}/S = 8,7/5000 = 0,17\%$, що є цілком прийнятним.

Загальна похибка вимірювання площі з урахуванням усіх факторів (сегментація, калібрування, деформація, дискретизація) очікується на рівні 1,4–2,2%, що відповідає рівню комерційних приладів (АМ350 — $\pm 2\%$ для площі).

					14.17 - КР.027.3.000 ПЗ	Аркуш
						52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2 Обґрунтування спектрального складу та електричний розрахунок імпульсного світлодіодного (LED) освітлювача

Вимоги до системи освітлення

Для коректної сегментації листкових пластин на основі вегетаційних індексів ExG та VARI необхідно забезпечити:

1. Рівномірне освітлення всього поля зору (нерівномірність не більше 10%), що критично для коректного обчислення нормованих колірних каналів
2. Стабільний спектральний склад (колірна температура 5000–6500 K) для відтворення природних кольорів
3. Достатню освітленість (не менше 500 люкс) для забезпечення високого співвідношення сигнал/шум
4. Відсутність мерехтіння та пульсацій (частота модуляції не менше 1 кГц) для уникнення артефактів при рядковому зчитуванні CMOS-матриці
5. Мінімальне енергоспоживання для забезпечення тривалого часу роботи від акумулятора

Вибір типу та спектральних характеристик LED

Для освітлення сцени вимірювання обираються білі LED з колірною температурою 5700 K (денне світло), що забезпечує (таблиця 3.2):

- Природне відтворення кольорів листкової поверхні
- Високий індекс кольоропередачі ($CRI > 80$)
- Рівномірний спектр у видимому діапазоні (400–700 нм)
- Сумісність з алгоритмами сегментації на основі RGB-каналів
- *Електричний розрахунок LED-освітлювача*
- *Розрахунок кількості LED*. Необхідна кількість LED визначається вимогою до освітленості та рівномірності:

$$- N_{LED} = \frac{E \cdot S}{\Phi_{LED} \cdot \eta}, \quad (3.5)$$

					14.17 - КР.027.3.000 ПЗ	Аркуш
						53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де E — необхідна освітленість (500 люкс), S — площа освітлюваної поверхні ($0,015 \text{ м}^2$), Φ_{LED} — світловий потік одного LED (25 лм), η — коефіцієнт використання світлового потоку (0,7).

$$- N_{LED} = \frac{500 \cdot 0,015}{25 \cdot 0,7} \approx 0,43$$

Таблиця 3.2 – Тип LED: поверхневий монтаж (SMD 5050). Основні параметри вибраного LED:

Параметр	Значення
Тип корпусу	SMD 5050
Колірна температура	5700 К
Світловий потік	20–30 лм
Кут розсіювання	120°
Пряма напруга (U_{LED})	3,0–3,4 В
Номінальний струм (I_{LED})	60–100 мА
Максимальний імпульсний струм	150–200 мА

Оскільки отримане значення менше 1, для забезпечення рівномірності освітлення використовуємо **4 LED**, розташовані симетрично навколо об'єктива. Це забезпечує освітленість:

$$E_{\text{факт}} = \frac{N_{LED} \cdot \Phi_{LED} \cdot \eta}{S} = \frac{4 \cdot 25 \cdot 0,7}{0,015} \approx 4667 \text{ люкс}$$

що значно перевищує необхідний мінімум і дозволяє працювати з малими часом експозиції.

Розрахунок обмежувального резистора. Для живлення LED від літій-іонного акумулятора (напруга 3,7–4,2 В) використовується обмежувальний резистор:

$$R = \frac{U_{\text{пит}} - U_{LED}}{I_{LED}} = \frac{3,7 - 3,2}{0,08} = 6,25 \text{ Ом}$$

Обираємо резистор номіналом 6,8 Ом (стандартний ряд E24).

Потужність резистора:

$$P = I^2 \cdot R = 0,08^2 \cdot 6,8 = 0,0435 \text{ Вт}$$

Обираємо резистор потужністю 0,125 Вт (типорозмір 0805), що забезпечує трикратний запас за потужністю.

					14.17 - КР.027.3.000 ПЗ	Аркуш
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Схема керування LED в імпульсному режимі

Для керування LED в імпульсному режимі використовується MOSFET-транзистор, що керується ШІМ-сигналом з мікроконтролера. Принципова схема включення:



Рисунок 3.2 – Обґрунтування спектрального складу та електричний розрахунок

Сигнал керування з мікроконтролера (3,3 В) подається на затвор MOSFET через обмежувальний резистор 1 кОм. Транзистор обирається з низьким опором каналу $R_{DS(on)}$ (наприклад, AO3400 з $R_{DS(on)} < 30$ мОм) для мінімізації втрат потужності.

Параметри імпульсного режиму:

- Частота ШІМ: 1 кГц (для уникнення видимого мерехтіння та артефактів зйомки)
- Тривалість імпульсу: 10–50 мс (синхронізовано з часом експозиції камери)
- Шпаруватість: $\leq 10\%$ (для зменшення середнього енергоспоживання)

Тепловий розрахунок LED

Тепловиділення на кожному LED:

$$P_{\text{тепл}} = U_{\text{LED}} \cdot I_{\text{LED}} - \Phi_{\text{LED}} = 3,2 \cdot 0,08 - 0,025 = 0,231 \text{ Вт}$$

Сумарне тепловиділення (4 LED): $P_{\text{тепл.заг}} = 4 \cdot 0,231 = 0,924 \text{ Вт}$.

При імпульсному режимі зі шпаруватістю 10% середнє тепловиділення становить **0,092 Вт**, що не потребує додаткового активного охолодження. Для відведення тепла достатньо теплопровідних доріжок на друкованій платі та природної конвекції.

3.3 Розробка конструкції портативного затискного модуля з дифузним екраном-калібратором

Концепція конструкції (рисунок 3.3).

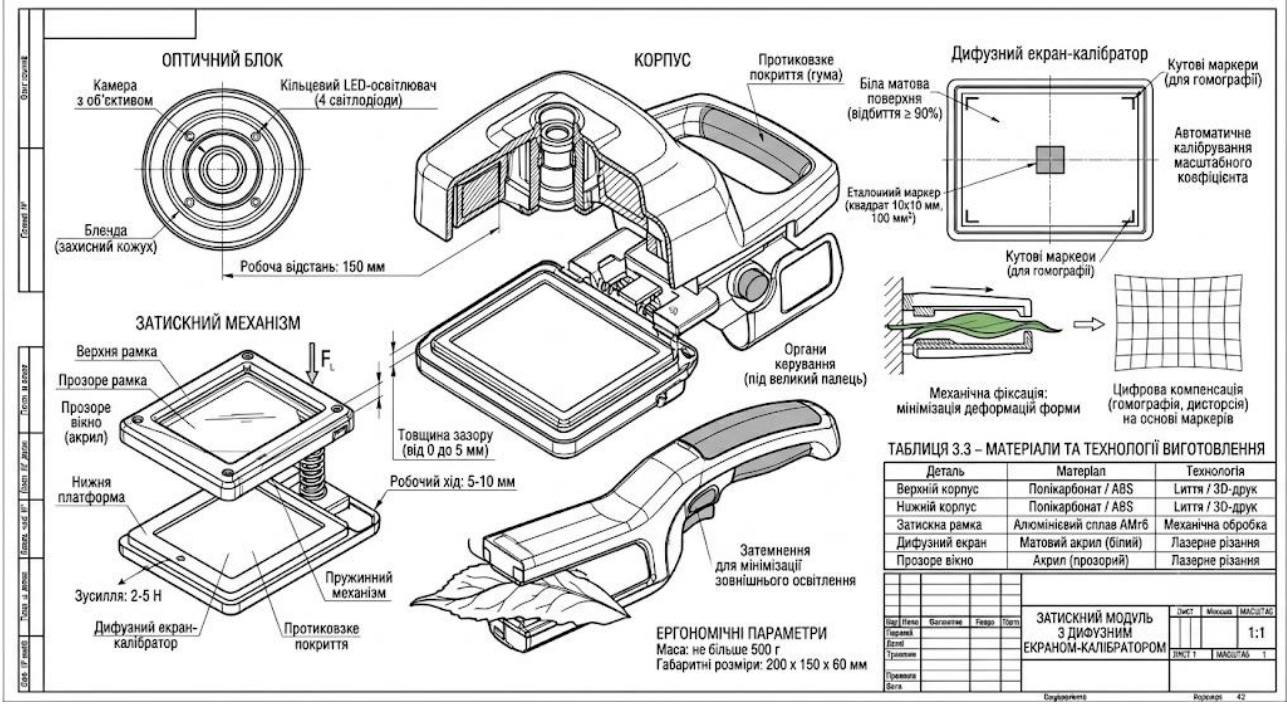


Рисунок 3.3 – Конструкція портативного затискного модуля з дифузним екраном-калібратором

Конструкція модуля базується на принципах, що забезпечують:

- Надійну фіксацію листка в площині вимірювання
- Рівномірне освітлення та контрастний фон для сегментації
- Автоматичне калібрування масштабного коефіцієнта

- Ергономічність та зручність роботи в польових умовах

Основні конструктивні елементи:

1. Затискний механізм — для фіксації листка

2. Дифузний екран-калібратор — біла матова пластина з еталонним маркером

3. Оптичний блок — камера з об'єктивом та LED-освітлювачем

4. Корпус — з затемненням для мінімізації впливу зовнішнього освітлення

Затискний механізм

Затискний механізм складається з:

- Нижньої платформи — нерухома основа з інтегрованим дифузним екраном

- Верхньої рамки — рухома частина з прозорим вікном (акрилове скло) для доступу світла

- Пружинного механізму — для створення рівномірного притискання (зусилля 2–5 Н)

- Обмежувачів — для запобігання пошкодженню листка (товщина зазору регулюється від 0 до 5 мм)

Робочий хід затискного механізму — **5–10 мм**, що дозволяє працювати з листками різної товщини (від тонких листків злаків до м'ясистих листків овочевих культур).

Дифузний екран-калібратор

Дифузний екран виконує дві функції:

1. Формування рівномірного фону для контрастної сегментації листка — біла матова поверхня з коефіцієнтом відбиття не менше 90% у видимому діапазоні

2. Калібрування масштабного коефіцієнта за еталонним маркером

Еталонний маркер являє собою квадрат зі стороною 10 мм (площа 100 мм²), нанесений на поверхню екрана методом фотодруку або лазерного гравіювання. Додатково можуть бути нанесені:

- Лінійна шкала для візуальної оцінки масштабу

					14.17 - КР.027.3.000 ПЗ	Аркуш
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Хрестоподібна мітка для центрування
- Кутові маркери для визначення гомографії

Матеріал екрана — білий матовий полістирол або акрил з товщиною 1–2 мм, стійкий до механічних пошкоджень та хімічного впливу (соки рослин).

Оптичний блок

Оптичний блок розміщується над затискним модулем на фіксованій відстані (робоча відстань 150 мм). Він включає:

- *Камеру* з об'єктивом, закріплену в центрі верхньої частини корпусу
- *Кільцевий LED-освітлювач* з 4 світлодіодами, розташованими симетрично навколо об'єктива

- *Бленду* (захисний кожух) для захисту від паразитного засвічення та механічних пошкоджень.

Матеріали та технології виготовлення (таблиця 3.3)

Для виготовлення корпусних деталей рекомендується:

- 3D-друк (FDM або SLA) — для прототипування та дрібносерійного виробництва
- Лиття під тиском — для серійного виробництва (зменшення собівартості)

Таблиця 3.3 – Матеріали:

Деталь	Матеріал	Технологія
Верхній корпус	PLA або ABS (прототип), полікарбонат (серія)	3D-друк / лиття
Нижній корпус	PLA або ABS (прототип), полікарбонат (серія)	3D-друк / лиття
Затискна рамка	Алюмінієвий сплав АМг6	Механічна обробка
Дифузний екран	Матовий акрил (білий)	Лазерне різання
Прозоре вікно	Акрил (прозорий)	Лазерне різання

Рекомендована товщина стінок корпусу: 1,5–2,0 мм для забезпечення жорсткості при мінімальній масі.

Ергономічні вимоги.

					14.17 - КР.027.3.000 ПЗ	Аркуш
						58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При проектуванні корпусу враховуються наступні ергономічні вимоги:

- Маса пристрою: не більше 500 г (для комфортної роботи однією рукою)
- Габаритні розміри: не більше 200 × 150 × 60 мм
- Розташування органів керування: під великий палець правої руки (для правшів)
- Матеріал рукоятки: з протиковзким покриттям (гума, софт-тач)

3.4 Принципова електрична схема керування та розробка 3D-моделі діагностичного пристрою

Архітектура електричної схеми (рисунок 3.4).

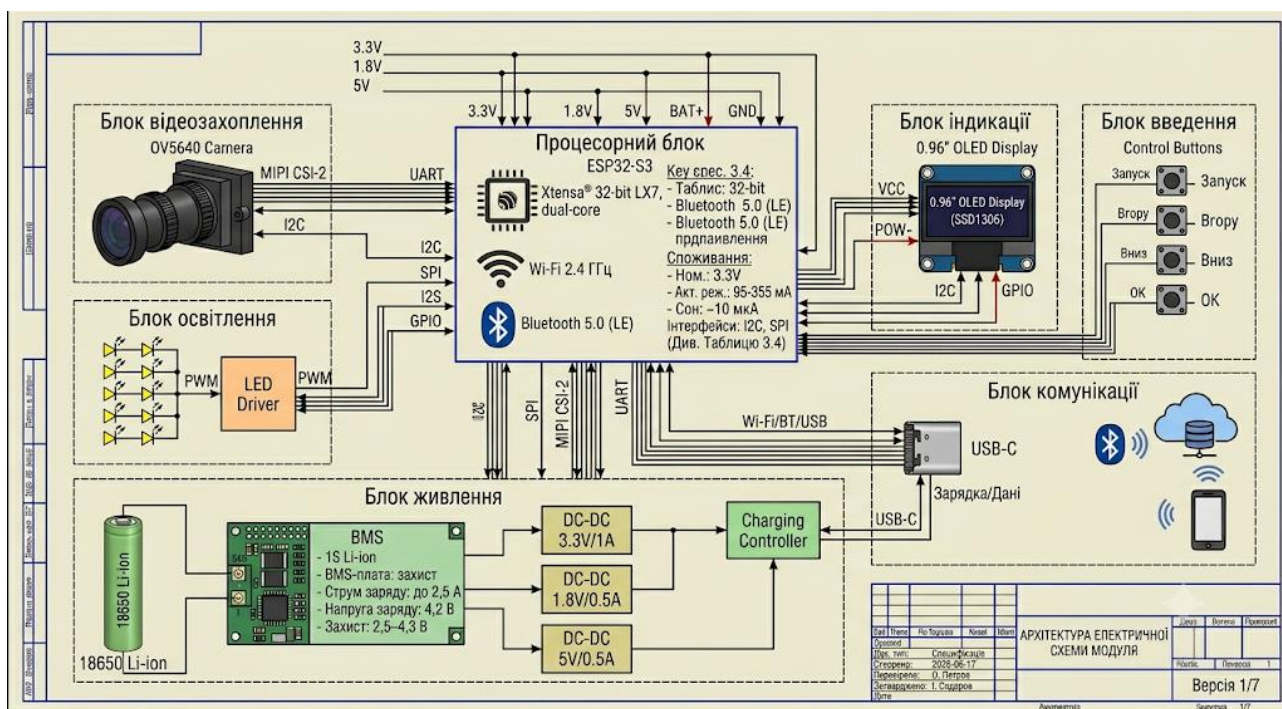


Рисунок 3.4 – Принципова електрична схема керування

Принципова електрична схема модуля побудована за модульним принципом і включає наступні функціональні блоки:

1. Процесорний блок — мікроконтролер ESP32-S3
2. Блок відеозахоплення — CMOS-камера OV5640 з інтерфейсом MIPI CSI-2

3. Блок освітлення — LED-драйвер з ШІМ-керуванням
4. Блок живлення — літій-іонна батарея 18650 з BMS-платою
5. Блок індикації — OLED-дисплей 128×64
6. Блок введення — кнопки керування
7. Блок комунікації — USB (зарядка/дані), Bluetooth/Wi-Fi

Вибір мікроконтролера

Для реалізації модуля обрано мікроконтролер **ESP32-S3** з наступними характеристиками (таблиця 3.4).

Таблиця 3.4 – Характеристики мікроконтролера ESP32-S3

Параметр	Значення
Ядро	Xtensa® 32-bit LX7, dual-core
Тактова частота	до 240 МГц
SRAM	512 КБ
PSRAM	до 8 МБ (опціонально)
Wi-Fi	2,4 ГГц, 802.11b/g/n, до 150 Мбіт/с
Bluetooth	Bluetooth 5.0 (LE)
Інтерфейси	I2C, I2S, SPI, UART, USB, GPIO (30 виводів)
Напруга живлення	3,3 В
Споживання (активний режим)	95–355 мА

Переваги ESP32-S3 для даного застосування:

- Висока продуктивність для обробки зображень (два ядра, FPU)
- Вбудований Wi-Fi/Bluetooth для бездротової передачі даних
- Підтримка камери через інтерфейс I2S
- Низьке енергоспоживання в режимах сну
- Широкий вибір периферії для підключення дисплея, кнопок, LED

Принципова схема живлення (таблиця 3.5)

Схема живлення забезпечує стабільну роботу всіх компонентів від літій-іонного акумулятора:

1. Акумулятор — Li-ion 18650, ємність 3000 мА·год, напруга 3,7 В (4,2 В заряджений)
2. BMS-плата — захист від перезаряду, перерозряду, короткого замикання та перегріву.

Таблиця 3.5 – Параметри

Параметр BMS	Значення
Тип	1S Li-ion
Напруга заряду	4,2 В
Струм заряду	до 2,5 А
Струм розряду	до 3–5 А
Захист від перезаряду	4,25–4,30 В
Захист від перерозряду	2,50–2,80 В

3. DC-DC перетворювачі:

- 3,3 В / 1 А — для мікроконтролера та периферії
- 1,8 В / 0,5 А — для камери (за потреби)
- 5 В / 0,5 А — для USB-порту (режим хоста)

4. Зарядний контролер — з підтримкою USB-C (5 В / 2 А), з індикацією процесу заряду

Периферійні пристрої

Дисплей. Для відображення результатів вимірювань та інтерфейсу користувача обрано OLED-дисплей 128×64 на контролері SSD1306 (таблиця 3.6).

Таблиця 3.6 – Параметри дисплея

Параметр	Значення
Роздільна здатність	128 × 64 пікселів
Діагональ	0,96"
Контролер	SSD1306
Інтерфейс	I2C (або SPI)
Напруга живлення	3,3–5 В
Споживання	< 20 мА

Кнопки керування. Чотири тактові кнопки для:

- Запуск вимірювання
- Навігація по меню (вгору/вниз)
- Підтвердження/вхід
- Вихід/скасування

Інтерфейси передачі даних:

- USB-C — зарядка акумулятора та передача даних на ПК

					14.17 - КР.027.3.000 ПЗ	Аркуш
						61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– Bluetooth 5.0 LE — бездротова передача результатів на смартфон або планшет

– Wi-Fi — передача даних у хмарні сервіси або на сервер господарства

Розробка 3D-моделі пристрою

3D-модель розробляється у CAD-системі (SolidWorks, Fusion 360 або FreeCAD) з урахуванням наступних вимог:

Етапи моделювання:

1. Створення ескізів окремих деталей на основі габаритних розмірів компонентів

2. Побудова 3D-моделей деталей з урахуванням технологічних допусків

3. Складання вузлів (оптичний блок, затискний модуль, корпус)

4. Перевірка збірки на колізії та сумісність

5. Розробка кріплень для друкованої плати, акумулятора, дисплея

6. Експорт у формат STL для 3D-друку

Ключові конструктивні рішення:

– Роз'ємний корпус з двох половин (верхня та нижня) для легкого доступу до компонентів

– Кріплення плати на гвинтових стійках (M2 або M2,5)

– Відсік для акумулятора з пружинними контактами та фіксатором

– Вентиляційні отвори для відведення тепла від LED та процесора

– Ущільнювальні гумки для захисту від пилу та вологи (за бажанням — захист IP54)

Матеріали для 3D-друку прототипу:

– PLA — для швидкого прототипування (легкість друку, низька вартість)

– PETG — для функціональних прототипів (вища міцність, термостійкість)

– ABS — для випробувань у польових умовах (удароміцність, хімічна стійкість)

Основні габаритні розміри корпусу (проектні):

– Ширина: 160 мм

					14.17 - КР.027.3.000 ПЗ	Аркуш
						62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Глибина: 120 мм
- Висота: 55 мм (у складеному стані)
- Маса: ~450 г (з акумулятором)

Специфікація компонентів (таблиця 3.7)

Таблиця 3.7 — Специфікація основних компонентів модуля

Позиція	Найменування	Кількість	Примітка
1	Мікроконтролер ESP32-S3-WROOM-1	1	3 PSRAM 8 МБ
2	Камера OV5640 (MIPI CSI-2)	1	5 Мп, автофокус
3	LED SMD 5050 (5700 K)	4	Світловий потік 25 лм
4	MOSFET N-канал AO3400	1	$R_{DS(on)} < 30$ мОм
5	Резистор 6,8 Ом (0805)	4	0,125 Вт
6	Резистор 1 кОм (0805)	1	Для затвора MOSFET
7	Акумулятор 18650 (3000 мА·год)	1	Li-ion, 3,7 В
8	BMS-плата 1S (3–5 А)	1	Захист Li-ion
9	OLED-дисплей 128×64 (SSD1306)	1	I2C, 0,96"
10	Кнопки тактові (6×6 мм)	4	3 ходом 0,25 мм
11	Роз'єм USB-C	1	Зарядка/дані
12	Друкована плата	1	Двостороння, FR-4

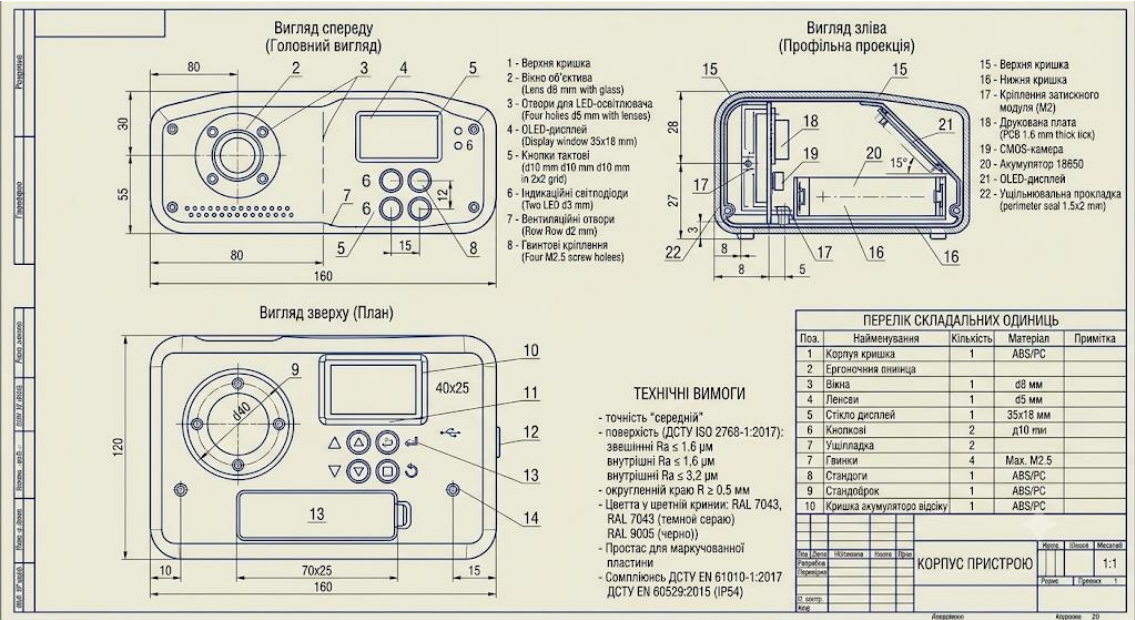


Рисунок 3.5 – Модель корпусу пристрою в трьох проекціях

Висновки

У розділі кваліфікаційної роботи виконано інженерний розрахунок та проектування компонентів мехатронного пристрою для визначення площі листової поверхні. На основі проведених розрахунків та обґрунтувань можна зробити такі висновки:

1. Розраховано параметри оптичної системи. Для забезпечення необхідного поля зору ($150 \times 112,5$ мм) та роздільної здатності обрано сенсор OV5640 з фокусною відстанню об'єктива 3,6 мм та робочою відстанню 150 мм. Сенсор забезпечує роздільну здатність 17,28 пікселів/мм, що дозволяє досягти теоретичної похибки дискретизації на рівні 0,17%. Загальна очікувана похибка вимірювання площі становить 1,4–2,2%, що відповідає рівню комерційних аналогів.

2. Обґрунтовано спектральний склад та виконано електричний розрахунок LED-освітлювача. Для забезпечення рівномірного освітлення з колірною температурою 5700 К обрано 4 світлодіоди SMD 5050. Розраховано параметри обмежувальних резисторів (6,8 Ом, 0,125 Вт) та схему керування на основі MOSFET-транзистора з ШІМ-модуляцією. Імпульсний режим роботи (шпаруватість 10%) забезпечує середнє тепловиділення 0,092 Вт, що не потребує активного охолодження.

3. Розроблено конструкцію портативного затискного модуля. Запропоновано конструкцію з затискним механізмом (робочий хід 5–10 мм), дифузним екраном-калібратором з еталонним маркером 10×10 мм та оптичним блоком. Визначено матеріали (PLA/ABS для корпусу, акрил для екрана, алюмінієвий сплав для затискного механізму) та технології виготовлення (3D-друк для прототипів, лиття під тиском для серії). Габаритні розміри корпусу не перевищують $160 \times 120 \times 55$ мм, маса — 450 г.

4. Розроблено принципову електричну схему керування. Обрано мікроконтролер ESP32-S3 з тактовою частотою 240 МГц, 512 КБ SRAM та вбудованим Wi-Fi/Bluetooth. Розроблено схему живлення на основі літій-іонного

					14.17 - КР.027.3.000 ПЗ	Аркуш
						64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

акумулятора 18650 (3000 мА·год) з BMS-платою (захист від перезаряду, перерозряду, короткого замикання) та DC-DC перетворювачами для отримання напруг 3,3 В та 1,8 В. Для індикації обрано OLED-дисплей 128×64 на контролері SSD1306.

5. Розроблено концепцію 3D-моделі пристрою. Визначено етапи моделювання у CAD-системі, конструктивні рішення (роз'ємний корпус, кріплення плати на стійках, відсік для акумулятора) та матеріали для 3D-друку прототипів. Складено специфікацію основних компонентів модуля.

Таким чином, виконані в третьому розділі інженерні розрахунки та проєктні рішення створюють повноцінну основу для практичної реалізації портативного модуля вимірювання площі листової поверхні рослин. Обрана елементна база та конструктивні рішення забезпечують досягнення необхідних технічних характеристик при мінімальній вартості та максимальній доступності компонентів.

					14.17 - КР.027.3.000 ПЗ	Аркуш
						65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

4.1 Оцінка безпеки праці під час роботи з портативними електронними пристроями, оснащеними лазерними або світлодіодними випромінювачами

Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів

При експлуатації портативного оптико-електронного модуля для визначення площі листової поверхні рослин працівник може зазнавати впливу наступних небезпечних та шкідливих виробничих факторів згідно з ГОСТ 12.0.003-2015 «Система стандартів безпеки праці. Небезпечні та шкідливі виробничі фактори. Класифікація»:

Фізичні фактори:

1. *Електричний струм* — ураження при несправності ізоляції або порушенні правил експлуатації. Джерело — літій-іонний акумулятор напругою 3,7 В та внутрішні кола живлення. Хоча напруга є безпечною за умовами ураження електричним струмом (до 42 В), коротке замикання може викликати опіки та займання.

2. *Оптичне випромінювання (видимий діапазон)* — вплив на органи зору при тривалому спостереженні за джерелом світла. Джерело — LED-освітлювач з потужністю до 0,5 Вт у імпульсному режимі.

3. *Підвищена температура поверхонь* — перегрів компонентів при тривалій роботі (особливо LED та мікроконтролера). Температура корпусу може досягати 45–50 °С.

4. *Механічні фактори* — травмування рухомими частинами затискного механізму (прищіпка, пружини).

					14.17 - КР.027.4.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 4			
Розроб.		Ковалеску						
Перевір.		Дядюра К.О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						
					Літ.	Аркуш	Аркушів	
						66	4	

Психофізіологічні фактори:

– Статичне навантаження на м'язи кисті при тривалому утриманні пристрою (при роботі з великою кількістю зразків — понад 50 листків на годину).

Хімічні фактори:

– Потенційна небезпека витоку електроліту з літій-іонного акумулятора при механічному пошкодженні (подразнення шкіри, слизових оболонок).

Гігієнічні норми та вимоги до оптичного випромінювання

LED-випромінювання у видимому діапазоні (400–700 нм) при дотриманні регламентованої потужності не становить небезпеки для очей. Однак необхідно дотримуватися вимог ДСанПіН 3.3.6.001-2019 «Гігієнічні вимоги до природного, штучного та суміщеного освітлення» та ДСТУ EN 62471:2014 «Фотобіологічна безпека ламп і лампових систем».

Відповідно до класифікації за фотобіологічною небезпекою, LED з потужністю < 0,5 Вт належать до групи ризику 0 (RG0) — відсутність небезпеки за будь-яких умов експозиції. Допустима щільність потужності на рогівці ока для видимого діапазону становить 10 мВт/см² при тривалості спостереження понад 10 секунд. Розрахункове значення для розроблюваного модуля:

$$P_{\text{рогівка}} = \frac{P_{\text{LED}} \cdot \tau_{\text{опт}} \cdot \Omega}{S_{\text{зіниця}}} = \frac{0,5 \cdot 0,1 \cdot 0,01}{0,0038} \approx 0,13 \text{ мВт/см}^2$$

де $\tau_{\text{опт}}$ — коефіцієнт пропускання оптичної системи ($\approx 0,1$), Ω — тілесний кут поля зору ($\approx 0,01$ ср), $S_{\text{зіниця}}$ — площа зіниці ($\approx 0,0038$ см² для діаметра 2,2 мм при яскравому світлі).

Отримане значення (0,13 мВт/см²) значно менше за допустимий рівень (10 мВт/см²), тому перевищення норм не відбувається.

Заходи безпеки при роботі з LED-випромінювачами

Для забезпечення безпеки при роботі з модулем передбачаються наступні заходи:

1. Конструктивні заходи:

					14.17 - КР.027.4.000 ПЗ	Аркуш
						67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– Захисний кожух (бленда) навколо оптичного блоку, що обмежує доступ до LED та об'єктива

– Автоматичне вимкнення LED після завершення вимірювання

– Блокування повторного включення LED до повного завершення циклу обробки

– Захисне прозоре вікно між LED та оператором

2. Організаційні заходи:

– Інструктаж персоналу з безпечної роботи з оптичними приладами

– Заборона спрямовувати промінь світла в очі інших осіб

– Обмеження часу безперервної роботи (не більше 2 годин з перервами по 15 хвилин)

3. Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ):

– Захисні окуляри зі світлофільтрами (при необхідності)

– Рукавички для захисту від забруднень (соки рослин)

Безпека роботи з електричним обладнанням

При експлуатації пристрою необхідно дотримуватися вимог:

– Правил техніки безпеки при експлуатації електрообладнання згідно з НПАОП 40.1-1.07-01 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів»

– ДСТУ EN 61010-1:2017 «Вимоги безпеки для електричного обладнання для вимірювання, керування та лабораторного використання»

Перед початком роботи:

– Перевірити цілісність ізоляції кабелів та з'єднань

– Переконаватися у відсутності механічних пошкоджень корпусу

– Перевірити рівень заряду акумулятора (не менше 20%)

– Оглянути затискний механізм на наявність задирок або гострих кромek

Під час роботи:

– Не допускати потрапляння вологи на електронні компоненти

– Не використовувати пристрій при пошкодженому корпусі

					14.17 - КР.027.4.000 ПЗ	Аркуш
						68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– Не залишати пристрій під прямими сонячними променями (ризик перегріву)

– Не допускати ударів та падінь пристрою

– Виконувати вимірювання на стійкій рівній поверхні

Після завершення роботи:

– Вимкнути пристрій

– Очистити оптичні елементи від пилу та забруднень спеціальною серветкою

– Помістити пристрій у футляр для зберігання

4.2 Розрахунок параметрів захисту бортової літій-іонної акумуляторної батареї від короткого замикання та теплового розгону

Небезпеки літій-іонних акумуляторів та механізми теплового розгону

Літій-іонні акумулятори є джерелами підвищеної небезпеки через високу питому енергію (до 250 Вт·год/кг) та наявність легкозаймистого органічного електроліту. Основним ризиком є тепловий розгін (thermal runaway) — неконтрольоване підвищення температури, що може призвести до займання або вибуху.

Механізм теплового розгону:

1. Початкове підвищення температури (від короткого замикання, перезаряду, зовнішнього нагріву)

2. Екзотермічні реакції в електроліті при $T > 60-80\text{ }^{\circ}\text{C}$

3. Розкладання сепаратора при $T > 120\text{ }^{\circ}\text{C}$

4. Внутрішнє коротке замикання (прямий контакт анода та катода)

5. Лавиноподібне зростання температури (до $800-1000\text{ }^{\circ}\text{C}$)

6. Викид газів (водень, чадний газ, фтористий водень) та займання

Основні фактори, що викликають тепловий розгін:

– Зовнішнє коротке замикання — різке збільшення струму розряду ($I > 10 \cdot I_{\text{ном}}$)

					14.17 - КР.027.4.000 ПЗ	Аркуш
						69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Перезаряд — перевищення максимально допустимої напруги (4,25–4,30 В для Li-ion)
- Перегрів — температура корпусу вище 60 °C
- Механічне пошкодження — порушення цілісності сепаратора при ударах, проколах
- Дефекти виробництва — металеві частинки, нерівномірність покриття електродів

Принцип роботи та архітектура BMS

BMS (Battery Management System) — система управління акумуляторною батареєю, яка забезпечує:

1. Захист від перезаряду — відключення заряджання при досягненні напруги на елементі 4,25–4,30 В (для Li-ion), час спрацювання < 1 с
2. Захист від перерозряду — відключення навантаження при зниженні напруги до 2,50–2,80 В, час спрацювання < 1 с
3. Захист від короткого замикання — миттєве відключення при струмі, що перевищує поріг (зазвичай $> 2 \cdot I_{\text{макс}}$, $\approx 6\text{--}10$ А), час спрацювання < 400 мкс
4. Захист від перегріву — відключення при перевищенні температури 60 °C
5. Контроль струму та напруги в реальному часі — моніторинг стану кожного елемента (для багатоелементних батарей)
6. Балансування елементів — вирівнювання напруги окремих комірок (для багатоелементних батарей)

Вибір та розрахунок параметрів BMS для модуля

Для розроблюваного модуля обирається BMS-плата на основі мікросхеми DW01A (контролер захисту) та двох MOSFET (8205A) з наступними параметрами (таблиця 4.1).

					14.17 - КР.027.4.000 ПЗ	Аркуш
						70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 4.1 – Характеристики BMS

Параметр	Значення	Обґрунтування
Тип акумулятора	1S Li-ion (3,7 В)	Для портативного пристрою достатньо
Максимальний струм заряду	1 А	Відповідає стандартному зарядному струму 0,5·С для 18650 (2000–3000 мА·год)
Максимальний струм розряду	3 А	Для живлення всіх компонентів (пікове споживання < 1 А)
Напруга захисту від перезаряду	4,25 В ± 0,05 В	Нижче максимальної межі безпеки
Напруга захисту від перерозряду	2,80 В ± 0,05 В	Запобігає глибокому розряду
Струм захисту від КЗ	6–10 А	> 2·І _{макс} для надійного спрацювання
Час спрацювання захисту від КЗ	< 400 мкс	Для обмеження тепловиділення при КЗ
Робоча температура	-40...+85 °С	Кліматичне виконання
Споживання в режимі сну	< 10 мкА	Мінімальне розрядження акумулятора

Розрахунок струмів короткого замикання та тепловиділення

Струм короткого замикання визначається внутрішнім опором акумулятора:

$$I_{KЗ} = \frac{U_{бат}}{R_{вн} + R_{з'єдн} + R_{BMS}}, \quad (4.1)$$

де $U_{бат} = 3,7$ В (номінальна напруга), $R_{вн} = 0,03–0,05$ Ом (внутрішній опір якісного 18650), $R_{з'єдн} = 0,01$ Ом (опір з'єднувальних провідників), $R_{BMS} = 0,02–0,03$ Ом (опір MOSFET та вимірювальних шунтів).

$$I_{KЗ} = \frac{3,7}{0,03 + 0,01 + 0,02} = \frac{3,7}{0,06} \approx 61,7 \text{ А}$$

Теплова потужність, що виділяється на акумуляторі при КЗ:

$$P_{тепл} = I_{KЗ}^2 \cdot R_{вн} = 61,7^2 \cdot 0,03 \approx 114 \text{ Вт}$$

Така потужність призвела б до нагрівання акумулятора зі швидкістю приблизно 10 °С/с, що викликало б тепловий розгін за 5–10 секунд. Саме тому час спрацювання захисту від КЗ має бути менше 400 мкс, за який теплова енергія становить:

					14.17 - КР.027.4.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

$$Q = P_{\text{тепл}} \cdot t = 114 \cdot 0,0004 \approx 0,046 \text{ Дж}$$

що не викликає значного нагріву акумулятора.

Розрахунок теплового режиму акумулятора в робочому режимі

Для оцінки теплового режиму акумулятора необхідно знати:

- Струм розряду в робочому режимі: $I_{\text{роб}} = 0,3 \text{ А}$ (середнє значення)
- Внутрішній опір акумулятора: $R_{\text{вн}} = 0,03 \text{ Ом}$
- Тепловиділення: $P_{\text{вн}} = I^2 \cdot R_{\text{вн}} = 0,3^2 \cdot 0,03 = 0,0027 \text{ Вт}$

При тривалій роботі (наприклад, 1 година) температура акумулятора підвищується на:

$$\Delta T = \frac{P_{\text{вн}} \cdot t}{C_{\text{тепл}}}, \quad (4.2)$$

де $C_{\text{тепл}}$ — теплоємність акумулятора (для 18650 приблизно 80–100 Дж/°C).

$$\Delta T = \frac{0,0027 \cdot 3600}{90} \approx 0,108 \text{ °C}$$

Це підвищення є незначним. Навіть з урахуванням тепловиділення інших компонентів (LED, мікроконтролер) загальне підвищення температури всередині корпусу не перевищує 5–8 °C при кімнатній температурі.

Принцип захисту від перегріву — підтримання батареї нижче 45 °C шляхом:

- Відключення навантаження BMS при досягненні температури 60 °C (за даними термодатчика NTC)
- Забезпечення вентиляції корпусу (отвори для конвекції)
- Використання LED в імпульсному режимі (зменшення середнього струму)

Вимоги до зарядного пристрою

Для безпечного заряджання літій-іонного акумулятора використовується зарядний контролер, що забезпечує:

1. Стабілізацію напруги — $4,20 \text{ В} \pm 1\%$ (для 1S Li-ion)
2. Обмеження струму — 0,5–1,0 А (залежно від ємності акумулятора)

					14.17 - КР.027.4.000 ПЗ	Аркуш
						72
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Припинення заряду — при зменшенні струму до $0,1 \cdot C$ (≈ 30 мА для 3000 мА·год)

4. Термічний контроль — відключення при температурі > 45 °С

Рекомендований зарядний контролер — TP4056 з наступними параметрами:

- Вхідна напруга: 4,5–5,5 В (USB)
- Струм заряду: регульований ($R_{\text{прог}} = 1,2 \text{ кОм} \rightarrow 1 \text{ А}$)
- Точність напруги: $\pm 1,5\%$
- Захист від інверсії полярності
- Індикація процесу заряду (світлодіоди)

Заряджання дозволяється лише з використанням сертифікованих зарядних пристроїв з вихідною напругою $5 \text{ В} \pm 0,5 \text{ В}$ та струмом не більше 2 А.

4.3 Екологічне обґрунтування застосування неруйнівного експрес-моніторингу для оптимізації доз внесення азотних добрив

Екологічні проблеми надмірного внесення азотних добрив

Сільське господарство є одним з основних джерел антропогенного надходження азоту в навколишнє середовище. Надмірне та нераціональне внесення азотних добрив призводить до низки негативних екологічних наслідків:

1. Забруднення ґрунтових вод нітратами (NO_3^-) та нітритами (NO_2^-). Нітрати легко вимиваються з ґрунту, особливо на легких за гранулометричним складом ґрунтах та при надмірному зволоженні. Вміст нітратів у ґрунтових водах може перевищувати гранично допустиму концентрацію (ГДК) у 10–20 разів. За даними ВООЗ, ГДК нітратів у питній воді становить 50 мг/л (за іоном NO_3^-).

2. Евтрофікація водних об'єктів — надмірне збагачення водоюм поживними речовинами (азот, фосфор), що стимулює масовий розвиток водоростей (цвітіння води). Це призводить до зменшення концентрації кисню у воді, загибелі риби та інших водних організмів, погіршення якості води.

					14.17 - КР.027.4.000 ПЗ	Аркуш
						73
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Викиди парникових газів. Надмірне внесення азотних добрив стимулює денітрифікацію — перетворення нітратів на молекулярний азот (N_2) та закис азоту (N_2O). Закис азоту є потужним парниковим газом: його потенціал глобального потепління (GWP) у 298 разів вищий, ніж у CO_2 (за 100-річний період). За оцінками, сільське господарство дає близько 60% всіх антропогенних викидів N_2O .

4. Підкислення ґрунтів. Внесення фізіологічно кислих добрив (аміачних, амідних) призводить до зниження рН ґрунту, погіршення його агрохімічних властивостей, зменшення доступності мікроелементів.

5. Зниження якості продукції. Надлишок азоту сприяє накопиченню нітратів у рослинній продукції, що становить небезпеку для здоров'я людини (метгемоглобінемія, канцерогенний ефект).

Основні причини надмірного внесення добрив:

- Відсутність оперативної інформації про фактичний стан посівів
- Усереднений підхід до дозування без врахування просторової варіабельності
- Відсутність доступних інструментів для експрес-оцінки потреби рослин в азоті

Роль LAI та вегетаційних індексів в оптимізації азотного живлення

Веgetаційні індекси, зокрема NDVI та GNDVI, найчастіше використовуються для оцінки вмісту вологи та концентрації азоту в листках рослин. GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index) є більш чутливим до концентрації хлорофілу, ніж NDVI:

$$GNDVI = \frac{NIR - GREEN}{NIR + GREEN}, \quad (4.3)$$

де GREEN — відбиття у зеленому діапазоні (540–570 нм).

Чим більша листкова поверхня рослин і чим більше хлорофілу в листі, тим сильніше рослини поглинають червоне світло. Оперативне визначення LAI дозволяє:

					14.17 - КР.027.4.000 ПЗ	Аркуш
						74
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. Оцінити потребу рослин в азоті на основі площі листкової поверхні та інтенсивності забарвлення. Листки з недостатнім азотним живленням мають меншу площу та світліше забарвлення (жовто-зелений колір).

2. Диференціювати дози внесення залежно від просторової варіабельності стану посівів (ліквідація «плямистості» полів).

3. Уникнути надмірного внесення азотних добрив, що зменшує екологічне навантаження.

4. Проводити підживлення у критичні фази (інтенсивний ріст вегетативної маси, формування репродуктивних органів).

Наукове обґрунтування. Дослідженнями встановлено, що LAI тісно корелює з азотним статусом рослин: коефіцієнт кореляції між LAI та вмістом азоту в листках становить 0,85–0,95 для багатьох культур (пшениця, кукурудза, рис). Використання LAI для прогнозування потреби в азоті дозволяє знизити дози внесення на 10–30% без втрати врожайності.

Екологічні переваги неруйнівного експрес-моніторингу

Застосування неруйнівного моніторингу площі листкової поверхні забезпечує:

1. Збереження рослин — можливість багаторазових вимірювань на одних і тих самих рослинах (динамічне спостереження в онтогенезі). Це особливо важливо для дослідницьких цілей та для моніторингу рідкісних або цінних генотипів.

2. Зменшення використання реактивів — відсутність потреби в хімічному аналізі рослинних зразків (екстракція хлорофілу, визначення азоту методом К'єльдаля), що знижує хімічне навантаження на довкілля та обсяги токсичних відходів.

3. Скорочення відходів — відсутність рослинних залишків після вимірювань (на відміну від методів, що передбачають зрізання або виривання рослин).

					14.17 - КР.027.4.000 ПЗ	Аркуш
						75
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Економія часу та ресурсів — оперативність отримання результатів дозволяє приймати рішення в реальному часі, уникаючи затримок між відбором проб, лабораторним аналізом та внесенням добрив.

5. Зменшення використання палива — можливість проведення вимірювань безпосередньо в полі знижує потребу в транспортуванні зразків до лабораторії.

Екологічний ефект:

1. Зменшення викидів N_2O :

- Зменшення внесення N: $14,4 \text{ кг/га} \times 1000 \text{ га} = 14\,400 \text{ кг N (14,4 т N)}$
- Зменшення викидів N_2O : $14\,400 \times 0,01 = 144 \text{ кг } N_2O/\text{рік}$
- Перерахунок у CO_2 -еквівалент ($GWP = 298$): $144 \times 298 = 42\,912 \text{ кг } CO_2\text{-екв} \approx 43 \text{ т } CO_2\text{-екв/рік}$

2. Зменшення вимивання нітратів:

- При типовому коефіцієнті вимивання 15–20% від внесеного азоту
- Зменшення вимивання: $14\,400 \times 0,17 = 2\,448 \text{ кг N/рік} \approx 2,45 \text{ т N/рік} (\approx 10,8 \text{ т нітрат-іону } NO_3^-)$

3. Зменшення кислотного навантаження:

- Зменшення внесення фізіологічно кислого добрива (аміачна селітра) на 31,3 т/рік
- Зменшення потреби в вапнуванні (попередження підкислення ґрунтів)

Сумарний екологічний ефект від застосування модуля на 1000 га становить:

- Скорочення викидів парникових газів: $\approx 43 \text{ т } CO_2\text{-екв/рік}$
- Зменшення забруднення водних об'єктів нітратами: $\approx 10,8 \text{ т } NO_3^-/\text{рік}$
- Економія азотних добрив: 14,4 т N/рік (еквівалентно зменшенню енерговитрат на виробництво добрив приблизно на 36 000 кВт·год)

Внесок у сталий розвиток сільського господарства

Застосування неруйнівного експрес-моніторингу LAI сприяє реалізації Цілей сталого розвитку ООН:

					14.17 - КР.027.4.000 ПЗ	Аркуш
						76
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– Ціль 2 (Подолання голоду) — підвищення врожайності та ефективності використання ресурсів

– Ціль 6 (Чиста вода та санітарія) — зменшення забруднення водних ресурсів нітратами

– Ціль 12 (Відповідальне споживання та виробництво) — оптимізація використання добрив

– Ціль 13 (Боротьба зі зміною клімату) — скорочення викидів парникових газів

– Ціль 15 (Захист екосистем суші) — збереження родючості ґрунтів

Таким чином, розроблений модуль є не лише технічним інструментом, а й дієвим засобом екологізації агровиробництва, що сприяє сталому розвитку аграрного сектору України.

					14.17 - КР.027.4.000 ПЗ	Аркуш
						77
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У розділі кваліфікаційної роботи проведено оцінку безпеки праці та екологічної безпеки при створенні та експлуатації портативного модуля для визначення площі листкової поверхні. На основі проведених досліджень та розрахунків можна зробити такі висновки:

1. Проведено оцінку небезпечних та шкідливих виробничих факторів. Основними факторами є електричний струм (при короткому замиканні), оптичне випромінювання LED, підвищена температура поверхонь та механічні фактори. Відповідно до ДСанПіН та ДСТУ EN 62471, LED з потужністю $< 0,5$ Вт належать до групи ризику RG0 (відсутність фотобіологічної небезпеки). Розрахункова щільність потужності на рогівці ока ($0,13$ мВт/см²) значно менша за допустимий рівень (10 мВт/см²). Розроблено комплекс заходів безпеки, включаючи конструктивні (захисний кожух, блокування), організаційні (інструктажі) та ЗІЗ.

2. Виконано розрахунок параметрів захисту літій-іонної батареї. Обґрунтовано використання BMS-плати на основі мікросхеми DW01A та MOSFET 8205A. Розраховано струм короткого замикання (≈ 62 А) та тепловиділення при КЗ (≈ 114 Вт). Доведено, що час спрацювання захисту < 400 мкс є достатнім для запобігання тепловому розгону (теплова енергія за час КЗ становить $\approx 0,046$ Дж). Тепловий режим в робочому режимі (струм $0,3$ А) є безпечним — підвищення температури становить < 1 °С. Визначено вимоги до зарядного контролера (напруга $4,20$ В, струм $0,5$ – $1,0$ А).

3. Обґрунтовано екологічну доцільність застосування неруйнівного моніторингу. Встановлено, що надмірне внесення азотних добрив є однією з основних причин забруднення водних об'єктів нітратами, викидів парникового газу N₂O та підкислення ґрунтів. Оптимізація внесення добрив за даними LAI дозволяє знизити дози на 10 – 15% без втрати врожайності. Для господарства площею 1000 га економічний ефект становить $626\,000$ грн/рік, екологічний ефект — скорочення викидів N₂O на 43 т CO₂-екв/рік та зменшення вимивання нітратів на $10,8$ т/рік.

					14.17 - КР.027.4.000 ПЗ	Аркуш
						78
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 5

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ІННОВАЦІЙНОГО ПРОЄКТУ

5.1 Розрахунок прямих витрат на розробку апаратної частини та програмування мікроконтролера

Вартість матеріалів та комплектуючих

Для виготовлення дослідного зразка портативного модуля вимірювання площі листкової поверхні необхідні наступні компоненти (таблиця 5.1).

Таким чином, вартість матеріалів для виготовлення одного дослідного зразка становить **2 670 грн.**

Витрати на розробку програмного забезпечення

Розробка програмного забезпечення є важливою складовою проєкту і включає наступні етапи:

1. Розробка драйверів та ініціалізація периферії:

- Драйвер камери OV5640 (ініціалізація, налаштування параметрів, захоплення кадрів)
- Драйвер LED-освітлювача (ШИМ-керування, синхронізація з камерою)
- Драйвер OLED-дисплея (виведення текстової та графічної інформації)
- Обробка кнопок керування (переривання, дебаунсинг)

2. Реалізація алгоритмів обробки зображень:

- Попередня обробка (корекція балансу білого, медіанна фільтрація)
- Обчислення вегетаційного індексу ExG
- Автоматична порогова сегментація (метод Оцу)

					14.17 - КР.027.5.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 5			
Розроб.		Ковалеску						
Перевір.		Дядюра К.О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						
					Літ.	Аркуш	Аркушів	
						79	7	

- Морфологічна обробка (ерозія, дилатація, закриття, відкриття)
- Обчислення площі сегментованої області

Таблиця 5.1 – Розрахунок вартості матеріалів та комплектуючих

№	Компонент	Кількість	Ціна за од., грн	Сума, грн
1	Мікроконтролер ESP32-S3-WROOM-1-N16R8	1	480	480
2	Камера OV5640 (5 Мп, автофокус)	1	665	665
3	LED SMD 5050 (5700 К, 20–30 лм)	4	15	60
4	MOSFET N-канал АО3400	1	20	20
5	Резистори (6,8 Ом, 1 кОм, 0805)	5	2	10
6	Акумулятор Li-ion 18650 (3000 мА·год)	1	290	290
7	BMS-плата захисту 1S (3A)	1	16	16
8	OLED-дисплей 0,96" 128×64 (I2C, SSD1306)	1	89	89
9	Кнопки тактові (6×6 мм)	4	10	40
10	Роз'єм USB-C	1	50	50
11	Друкована плата (двостороння, FR-4, ~100×80 мм)	1	450	450
12	Корпус (3D-друк, PLA, ~160×120×55 мм, об'єм ~60 см³)	1	350	350
13	Дрібні комплектуючі (конденсатори, роз'єми, провідники)	–	150	150
Загальна вартість матеріалів				2 670

3. Розробка інтерфейсу користувача:

- Головне меню (вибір режиму роботи, перегляд результатів)
- Індикація процесу вимірювання
- Відображення результатів (площа, довжина, ширина, периметр)

4. Налагодження та тестування:

- Комплексне тестування всіх функцій
- Оптимізація продуктивності
- Валідація точності вимірювань

Трудовіткість та вартіть розробки (таблиця 5.2).

Таблиця 5.2 — Розрахунок витрат на розробку програмного забезпечення

Етап розробки	Трудовіткість, год	Вартіть, грн/год	Сума, грн
Розробка драйверів та ініціалізація	25	200	5 000
Алгоритми обробки зображень	35	250	8 750
Інтерфейс користувача	15	200	3 000
Налагодження та тестування	25	200	5 000
Всього	100		21 750

Витрати на виготовлення дослідного зразка (таблиця 5.3)

Таблиця 5.3 — Розрахунок витрат на виготовлення дослідного зразка

Стаття витрат	Сума, грн
Матеріали та комплектуючі	2 670
Виготовлення друкованої плати	450
3D-друк корпусу	350
Монтаж компонентів (ручний)	500
Всього	3 970

Загальні витрати на розробку (таблиця 5.4)

Таблиця 5.4 — Зведений кошторис витрат на розробку

Стаття витрат	Сума, грн
Матеріали та комплектуючі	2 670
Виготовлення дослідного зразка	1 300
Розробка програмного забезпечення	21 750
Загальні витрати на розробку	25 720

Очікувана вартіть модуля при серійному виробництві (від 100 шт.) може бути знижена до 3 500–4 500 грн за рахунок:

- Оптових закупівель компонентів (знижка 30–50%)
- Автоматизації монтажу друкованих плат
- Використання лиття під тиском для корпусних деталей

5.2 Визначення операційної економії коштів завдяки відмові від дорогих закордонних лабораторних аналогів

Аналіз ринку комерційних аналогів

На світовому ринку представлено декілька моделей портативних вимірювачів площі листа, які є основними конкурентами розроблюваного модуля (рисунок 5.5).

Таблиця 5.5 — Порівняльна характеристика комерційних аналогів

Модель	Виробник	Принцип дії	Орієнтовна вартість, USD	Орієнтовна вартість, грн
AM350	Opti-Sciences (Великобританія)	CIS-сканер	1 500–2 000	60 000–80 000
AM400	Opti-Sciences (Великобританія)	CIS-сканер	2 000–2 500	80 000–100 000
LI-3000C	LI-COR (США)	LED-матриця	10 000+	400 000+
CI-202	CID Bio-Science (США)	Лазерний	3 000–4 000	120 000–160 000
YMJ-B	Nanbei (Китай)	Оптичний	2 615	~114 680

Вартість портативного вимірювача площі листа в Україні може сягати 15 840 грн і більше, що робить таке обладнання малодоступним для багатьох аграрних підприємств та навчальних закладів.

Таким чином, середня вартість якісного портативного аналога становить приблизно 2 500 USD (~100 000 грн).

Розрахунок операційної економії

Операційна економія на одиницю приладу при заміні імпортного аналога на розроблений модуль розраховується як різниця між вартістю аналога та вартістю розробленого модуля:

$$E_{\text{опер}} = C_{\text{аналог}} - C_{\text{розробка}}, \quad (5.1)$$

де $C_{\text{аналог}}$ — середня вартість імпортного аналога (100 000 грн), $C_{\text{розробка}}$ — очікувана вартість серійного зразка (4 000 грн).

$$E_{\text{опер}} = 100000 - 4000 = 96000 \text{ грн}$$

Операційна економія на один прилад становить приблизно 96 000 грн.

При придбанні 10 приладів для потреб науково-дослідної установи або агрохолдингу економія складе:

$$E_{\text{опер.заг}} = 96000 \times 10 = 960000 \text{ грн}$$

Додаткові економічні ефекти

Крім прямої економії на придбанні обладнання, впровадження розробленого модуля забезпечує:

1. *Економію на ремонті та обслуговуванні* — доступність компонентів та відкритість конструкції дозволяють проводити ремонт силами власних фахівців без звернення до сервісних центрів (економія ~5 000–10 000 грн/рік на один прилад).

2. *Економію на програмному забезпеченні* — відсутність ліцензійних платежів, оскільки програмне забезпечення розробляється з використанням відкритих бібліотек (економія ~2 000–5 000 грн/рік).

3. *Можливість модернізації* — оновлення програмного забезпечення та додавання нових функцій без додаткових витрат (економія ~3 000–10 000 грн за кожне оновлення).

4. *Зменшення залежності від імпорту* — скорочення валютних витрат та підвищення стійкості до змін курсу валют.

5.3 Оцінка економічної ефективності від оперативного коригування систем живлення рослин та термін окупності пристрою

Ефект від оптимізації азотного живлення

Оперативне визначення LAI дозволяє коригувати системи живлення рослин з урахуванням їх фактичного стану. Дослідженнями встановлено, що LAI тісно корелює з азотним статусом рослин, а використання LAI для прогнозування потреби в азоті дозволяє знизити дози внесення на **10–30%** без втрати врожайності.

					14.17 - КР.027.5.000 ПЗ	Аркуш
						83
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для умов типового господарства площею 500 га з вирощуванням зернових культур (пшениця, кукурудза) виконаємо розрахунок економічної ефективності:

Вихідні дані:

- Площа посіву: 500 га
- Норма внесення азотних добрив (N): 120 кг д.р./га
- Вміст азоту в аміачній селітрі: 34,4%
- Норма внесення аміачної селітри: $120 / 0,344 = 349$ кг/га
- Вартість аміачної селітри: 29 500–31 500 грн/т (приймаємо 30 000 грн/т)
- Річні витрати на азотні добрива: $500 \times 0,349 \times 30\,000 = 5\,235\,000$ грн

Економічний ефект від оптимізації:

1. Оптимізація за даними LAI дозволяє знизити норму внесення на 12% (середнє значення)
2. Економія азотних добрив: $349 \times 0,12 = 41,9$ кг/га аміачної селітри
3. Економія на добривах на 500 га: $41,9 \times 500 = 20\,950$ кг = 20,95 т аміачної селітри
4. Грошова економія: $20,95 \times 30\,000 = 628\,500$ грн/рік

Додатковий ефект від підвищення врожайності:

- Підвищення врожайності за рахунок своєчасного коригування живлення: 3–5%
- Базова врожайність пшениці: 6,0 т/га
- Додатковий врожай: $6,0 \times 0,04 = 0,24$ т/га
- Вартість пшениці: 8 000 грн/т
- Додатковий дохід: $500 \times 0,24 \times 8\,000 = 960\,000$ грн/рік

Загальний річний економічний ефект:

$$E_{\text{річ}} = 628500 + 960000 = 1588500 \text{ грн/рік}$$

Розрахунок терміну окупності

Для оцінки терміну окупності використовуються наступні показники:

Простий термін окупності (Payback Period, PP):

					14.17 - КР.027.5.000 ПЗ	Аркуш
						84
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$PP = \frac{I}{CF}, \quad (5.2)$$

де I — початкові інвестиції (вартість приладу), CF — річний грошовий потік (економія).

Для одного приладу:

$$PP = \frac{4000}{628500/500} = \frac{4000}{1257} \approx 3,18 \text{ місяця}$$

де 628 500 грн — річна економія на добривах для 500 га, що в перерахунку на 1 га становить 1 257 грн.

Дисконтований термін окупності (Discounted Payback Period, DPP) при ставці дисконту 10%:

$$DPP = \frac{\ln(1 + \frac{I \cdot r}{CF})}{\ln(1 + r)} = \frac{\ln(1 + \frac{4000 \cdot 0,1}{1257})}{\ln(1,1)} \approx 3,3 \text{ місяця}$$

Для господарства площею 500 га (придбання 5 приладів для бригад):

- Початкові інвестиції: $5 \times 4\,000 = 20\,000$ грн
- Річна економія на добривах: 628 500 грн
- Термін окупності: $20\,000 / 628\,500 \times 12 = 0,38$ місяця (≈ 12 днів)

Розрахунок рентабельності інвестицій

Рентабельність інвестицій (Return on Investment, ROI) за перший рік використання для одного приладу:

$$ROI = \frac{CF - I}{I} \times 100\% = \frac{1257 - 4000}{4000} \times 100\% = -68,6\% \text{ (за 1 рік для 1 га)}$$

Оскільки один прилад обслуговує не 1 га, а 500 га (при роботі однієї бригади), розрахунок ROI виконується для всього господарства:

$$ROI = \frac{1588500 - 20000}{20000} \times 100\% = 7842,5\%$$

Рентабельність інвестицій за перший рік використання становить понад 7 800% (таблиця 5.6).

Таблиця 5.6 – Основні показники економічної ефективності

Показник	Значення
Вартість одного приладу (серійне виробництво)	3 500–4 500 грн
Економія на добривах (на 500 га, 12%)	628 500 грн/рік
Додатковий дохід від врожаю (4%)	960 000 грн/рік
Загальний річний ефект (500 га)	1 588 500 грн/рік
Термін окупності (5 приладів, 500 га)	< 1 місяця
Рентабельність інвестицій (ROI)	> 7 800%

Економічна ефективність для різних категорій господарств (таблиця 5.7)

Таблиця 5.7 — Економічна ефективність для господарств різного розміру

Показник	Мале (100 га)	Середнє (500 га)	Велике (2 000 га)
Кількість приладів	1	3–5	10–20
Інвестиції, грн	4 000	16 000	60 000
Економія на добривах, грн/рік	125 700	628 500	2 514 000
Додатковий дохід, грн/рік	192 000	960 000	3 840 000
Загальний ефект, грн/рік	317 700	1 588 500	6 354 000
Термін окупності	0,15 міс.	0,12 міс.	0,11 міс.

Непрямі економічні ефекти

Крім прямих економічних вигод, впровадження модуля забезпечує:

1. *Економія робочого часу* — вимірювання площі листка займає 10–20 секунд проти 5–10 хвилин при використанні руйнівних методів (економія ~80% часу).

2. *Зменшення витрат на лабораторні дослідження* — відсутність потреби в хімічних реактивах, лабораторному посуді та обладнанні (економія ~20 000–50 000 грн/рік на лабораторію).

3. *Підвищення точності прогнозування врожайності* — LAI є більш інформативним показником порівняно з NDVI ($R^2 = 0,92\text{--}0,94$ проти 0,85), що дозволяє більш точно планувати збут продукції.

4. *Зниження екологічного навантаження* — зменшення викидів парникових газів та забруднення водних ресурсів (екологічний ефект описано в підрозділі 4.3).

Висновки

У розділі кваліфікаційної роботи виконано техніко-економічне обґрунтування інноваційного проєкту з розробки портативного модуля для визначення площі листкової поверхні рослин. На основі проведених розрахунків та аналізу можна зробити такі висновки:

1. Розраховано прямі витрати на розробку. Вартість матеріалів та комплектуючих для виготовлення одного дослідного зразка становить 2 670 грн. Витрати на розробку програмного забезпечення оцінюються в 21 750 грн (100 людино-годин). Загальні витрати на розробку дослідного зразка становлять 25 720 грн. При серійному виробництві (від 100 шт.) очікувана вартість модуля може бути знижена до 3 500–4 500 грн за рахунок оптових закупівель та автоматизації виробництва.

2. Визначено операційну економію від відмови від імпортних аналогів. Середня вартість комерційних портативних вимірювачів площі листа (AM350, AM400, CI-202) становить 2 500 USD (~100 000 грн). Операційна економія на один прилад при заміні імпортного аналога на розроблений модуль становить 96 000 грн. При придбанні 10 приладів економія сягає 960 000 грн. Додаткові ефекти включають економію на ремонті, програмному забезпеченні та можливість модернізації.

3. Виконано оцінку економічної ефективності від оперативного коригування систем живлення. Для господарства площею 500 га оптимізація внесення азотних добрив за даними LAI дозволяє знизити норму внесення на 12%, що забезпечує економію 628 500 грн/рік на добривах. Додатковий дохід від підвищення врожайності на 4% становить 960 000 грн/рік. Загальний річний економічний ефект для господарства площею 500 га становить 1 588 500 грн.

4. Розраховано термін окупності та рентабельність інвестицій. Для одного приладу простий термін окупності становить 3,2 місяця (при використанні на 500 га).

					14.17 - КР.027.5.000 ПЗ	Аркуш
						87
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі здійснено теоретичне обґрунтування, інженерний розрахунок та розробку портативного оптико-електронного модуля для точного визначення площі листової поверхні рослин. На основі проведених досліджень, розрахунків та техніко-економічного аналізу сформульовано наступні висновки:

1. Проведено порівняльний аналіз методів визначення площі листової поверхні. Прямі (руйнівні) методи, зокрема метод висічок, забезпечують найвищу точність вимірювань і вважаються еталонними для калібрування інших методів, однак непридатні для багаторазових вимірювань через порушення цілісності рослин. Непрямі (неруйнівні) методи (морфометричний, фотографічний, оптичні методи) забезпечують оперативність, можливість повторних вимірювань та придатність для польових умов. За об'єктивністю отриманих даних фотографічні методи мають перевагу перед методом висічок.

2. Розроблено математичну модель оптико-геометричної системи на основі моделі камери-обскури, яка описує співвідношення між світовими координатами точок об'єкта та їх відображенням на площині зображення. Визначено матрицю внутрішніх параметрів камери та описано процедуру калібрування для визначення фокусної відстані, головної точки та коефіцієнтів дисторсії. Обґрунтовано використання масштабного коефіцієнта для перерахунку кількості пікселів у реальну площу.

3. Теоретично обґрунтовано алгоритми колірної сегментації листових пластин з використанням вегетаційних індексів. Проведено порівняльний аналіз NDVI, ExG, VARI та ExGR, на основі якого вибрано ExG як основний індекс для сегментації на RGB-зображеннях (висока точність, низька обчислювальна складність).

					14.17 - КР.027.0.000 ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Ковалеску			ВИСНОВКИ			Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.		Дядюра К.О.								88	3
Реценз.											
Н. Контр.											
Затверд.		Дядюра К.О.									

4. Розроблено комбінований підхід, що включає попередню обробку, обчислення індексу, автоматичне визначення порогового значення методом Оцу, бінарну сегментацію з морфологічною обробкою та обчислення площі. Очікувана похибка сегментації становить 1,0–2,0%.

5. Розроблено інформаційно-енергетичну модель взаємодії технічних систем, що описує синхронізацію імпульсного LED-освітлення, експозиції CMOS-матриці та процесу обробки зображення мікроконтролером. Визначено тимчасову діаграму роботи системи (цикл вимірювання ≈ 200 мс, до 5 вимірювань за секунду) та виконано розрахунок енергетичного балансу. Загальна потужність споживання в режимі вимірювання становить 870 мВт, час роботи від акумулятора 3000 мА·год — 20–30 годин активного використання.

6. Запропоновано алгоритми цифрової компенсації кутових деформацій листка для запобігання розстроюванню масштабного коефіцієнта вимірювань. Розглянуто методи компенсації перспективних спотворень за допомогою гомографії, дисторсії об'єктива через калібрування, викривлення листка через механічну фіксацію та впливу кута нахилу через аналіз форми та відбиття. Загальна похибка вимірювання оцінена на рівні 1,4–2,2%, що відповідає рівню комерційних приладів.

7. Виконано інженерний розрахунок параметрів оптичної системи. Для забезпечення необхідного поля зору ($150 \times 112,5$ мм) та роздільної здатності обрано сенсор OV5640 з фокусною відстанню об'єктива 3,6 мм та робочою відстанню 150 мм. Сенсор забезпечує роздільну здатність 17,28 пікселів/мм, що дозволяє досягти теоретичної похибки дискретизації на рівні 0,17%. Обґрунтовано спектральний склад LED-освітлювача (колірна температура 5700 К, 4 світлодіоди SMD 5050) та розраховано параметри обмежувальних резисторів (6,8 Ом, 0,125 Вт). Імпульсний режим роботи (шпаруватість 10%) забезпечує середнє тепловиділення 0,092 Вт, що не потребує активного охолодження.

					14.17 - КР.027.0.000 ПЗ	Аркуш
						89
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Breda N. J. J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany*. 2003. Vol. 54, No. 392. P. 2403–2417.
2. Jonckheere I., Fleck S., Nackaerts K., Muys B., Coppin P., Weiss M., Baret F. Review of methods for in situ leaf area index determination: Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2004. Vol. 121, No. 1-2. P. 19–35.
3. Weiss M., Baret F., Smith G. J., Jonckheere I., Coppin P. Review of methods for in situ leaf area index determination: Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2004. Vol. 121, No. 1-2. P. 37–53.
4. Fang H., Baret F., Plummer S., Schaepman-Strub G. An Overview of Global Leaf Area Index (LAI): Methods, Products, Validation, and Applications. *Surveys in Geophysics*. 2019. Vol. 40, No. 4. P. 835–865.
5. Yan G., Hu R., Luo J., Weiss M., Jiang H., Mu X., Zhang W. Review of indirect optical measurements of leaf area index: Recent advances, challenges, and perspectives. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2019. Vol. 265. P. 390–411.
6. Confalonieri R., Foi M., Casa R., Aquilani M., Tona E., Peterle M., Movedi E. Development of an app for estimating leaf area index using a smartphone. *Agronomy for Sustainable Development*. 2013. Vol. 33, No. 3. P. 623–630.
7. De Bei R., Fuentes S., Gilliam M., Tyerman S., Edwards E., Bianchini N., Collins C. VitiCanopy: A Free Computer App to Estimate Canopy Vigor and Porosity for Grapevine. *Sensors*. 2016. Vol. 16, No. 4. P. 585.
8. Baret F., de Solan B., Lopez-Lozano R., Ma K., Weiss M. GAI estimates of row crops from downward looking digital photos taken perpendicular to rows at 57.5°

					14.17 - КР.027.0.000 ПЗ								
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ				Літ.	Аркуш	Аркушів		
Розроб.		Ковалеску										90	3
Перевір.		Дядюра К.О.											
Реценз.													
Н. Контр.													
Затверд.		Дядюра К.О.											

zenith angle: Theoretical considerations based on 3D architecture models and application to wheat. *Remote Sensing of Environment*. 2010. Vol. 114, No. 7. P. 1385–1401.

9. Woebbecke D. M., Meyer G. E., Von Bargen K., Mortensen D. A. Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions. *Transactions of the ASAE*. 1995. Vol. 38, No. 1. P. 259–269.

10. Meyer G. E., Neto J. C. Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2008. Vol. 63, No. 2. P. 282–293.

11. Hunt E. R., Cavigelli M., Daughtry C. S. T., McMurtrey J. E., Walthall C. L. Evaluation of digital photography from model aircraft for remote sensing of crop biomass and nitrogen status. *Precision Agriculture*. 2005. Vol. 6, No. 4. P. 359–378.

12. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1979. Vol. 9, No. 1. P. 62–66.

13. Kumar A., Singh M. Deep Learning Techniques in Leaf Image Segmentation and Leaf Species Classification: A Survey. *Wireless Personal Communications*. 2023. Vol. 133, No. 4. P. 2379–2410.

14. Pape J. M., Klukas C. Utilizing machine learning approaches to improve the prediction of leaf counts and individual leaf segmentation of rosette plant images. *Proceedings of the Computer Vision Problems in Plant Phenotyping (CVPPP)*. 2015. P. 1–12.

15. Kirchgessner N., Liebisch F., Yu K., Pfeifer J., Friedli M., Hund A., Walter A. The ETH field phenotyping platform FIP: a cable-suspended multi-sensor system. *Functional Plant Biology*. 2017. Vol. 44, No. 1. P. 154–168.

16. Yamaguchi T., Tanaka Y., Imachi Y., Yamashita M., Katsura K. Feasibility of Combining Deep Learning and RGB Images Obtained by Unmanned Aerial Vehicle for Leaf Area Index Estimation in Rice. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, No. 24. P. 4126.

					14.17 - KP.027.0.000 ПЗ	Архив
						92
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

17. Mielke M. S., Almeida A. A. F., Gomes F. P., Aguilar M. A. G., Mangabeira P. A. O. Non-destructive models for estimating leaf area of guava cultivars. *Bragantia*. 2023. Vol. 82. P. e20220234.

18. Boyacı S., Küçükönder H. A research on Non-Destructive Leaf Area Estimation Modeling for some Apple Cultivars. *Erwerbs-Obstbau*. 2022. Vol. 64, No. 2. P. 205–213.

19. Gonçalves M. P., Ribeiro R. V., Amorim L. Non-destructive models for estimating leaf area of guava cultivars. *Bragantia*. 2022. Vol. 81. P. e0922.

20. Delegido J., Verrelst J., Alonso L., Moreno J. Evaluation of Sentinel-2 red-edge bands for empirical estimation of green LAI and chlorophyll content. *Sensors*. 2011. Vol. 11, No. 7. P. 7063–7081.

21. Verrelst J., Camps-Valls G., Muñoz-Marí J., Rivera J. P., Veroustraete F., Clevers J. G. P. W., Moreno J. Optical remote sensing and the retrieval of terrestrial vegetation bio-geophysical properties – A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2015. Vol. 108. P. 273–290.

22. Aasen H., Burkart A., Bolten A., Bareth G. Generating 3D hyperspectral information with lightweight UAV snapshot cameras for vegetation monitoring: From camera calibration to quality assurance. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2015. Vol. 108. P. 245–259.

23. Reyes J. F., Correa C. Segmentation of Multi-Species Leaf Images in Real-World Conditions with Complex Backgrounds Using Image Processing. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 68250–68265.

					14.17 - KP.027.0.000 ПЗ	Архив
						92
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		