

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Якименко Роман Михайлович

УДК 631.362:004.93:681.7

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
РОЗРОБКА МОДУЛЯ ОПТИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ДЛЯ
СОРТУВАННЯ ЯБЛУК

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Якименко Р.М.

Керівник роботи

Борак К.В.

доктор технічних наук, професор

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Якименко Роман Михайлович. Розробка модуля оптичної ідентифікації для сортування яблук. – *Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

У магістерській роботі встановлено, що для підвищення ефективності розпізнавання дефектів і хвороб плодів яблуні за потокового сортування необхідне застосування автоматизованих систем контролю якості з використанням спектрального аналізу та комп'ютерного зору.

Обґрунтовано параметри модуля оптичної ідентифікації плодів яблуні на основі аналізу напружено-деформованого стану конструкції та умов безперешкодного руху плодів по роликовому транспортеру.

У результаті експериментальних досліджень прототипу модуля оптичної ідентифікації для сортування плодів встановлено, що оптимальна швидкість переміщення каретки з гіперспектрометром, за якої забезпечувалося отримання якісних гіперспектральних зображень, становила $V_{\text{кар}} = 0,4 \text{ м/с}$; значення світлового потоку системи освітлення робочої поверхні роликового транспортера – 2479,1 лм; оптимальна відстань від об'єктива камери до плода – 0,222 м.

В магістерській роботі встановлено, що класифікатор випадкового лісу (RF), навчений на ознаках, що включають вегетаційні індекси та локальні бінарні шаблони (VI + LBP), продемонстрував високу точність 97–98,2 % у розпізнаванні пошкоджених плодів на малій вибірці до 100 шт.

Ключові слова: комп'ютерний зір, гіперспектрометр, швидкість, камера, оптична ідентифікація, яблука

ANNOTATION

Yakymenko Roman Mykhailovych. Development of an Optical Identification Module for Apple Sorting. – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 Agricultural Engineering.
– Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

In the master's thesis, it was established that to improve the efficiency of defect and disease recognition in apple fruits under continuous sorting conditions, it is necessary to apply automated quality control systems based on spectral analysis and computer vision.

The parameters of the optical identification module for apple fruits were substantiated based on an analysis of the stress–strain state of the structure and the conditions for unobstructed movement of fruits along the roller conveyor.

As a result of experimental studies of the prototype optical identification module for fruit sorting, it was found that the optimal travel speed of the carriage with the hyperspectrometer, at which high-quality hyperspectral images were obtained, was $V_{car} = 0.4\text{m/s}$; the luminous flux of the lighting system for the working surface of the roller conveyor was 2479.1 lm; and the optimal distance from the camera lens to the fruit was 0.222 m.

The master's thesis also established that the random forest (RF) classifier, trained on features including vegetation indices and local binary patterns (VI + LBP), demonstrated high accuracy of 97–98.2% in recognizing damaged fruits on a small dataset of up to 100 samples.

Keywords: computer vision, hyperspectrometer, speed, camera, optical identification, apples.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ, ОБҐРУНТУВАННЯ АКТУАЛЬНОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	9
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ОПТИЧНОГО МОДУЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПЛОДІВ НА ОСНОВІ ГІПЕРСПЕКТРАЛЬНОЇ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ.....	26
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	36
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	51
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	53

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Сучасний етап розвитку агропромислового комплексу України характеризується зростанням вимог до якості плодоовочевої продукції, підвищенням рівня її стандартизації та конкурентоспроможності як на внутрішньому, так і на зовнішньому ринках. Яблуко є однією з основних плодкових культур, що займає значну частку в структурі садівництва, а обсяги його виробництва щорічно зростають. У цих умовах особливого значення набуває ефективне післязбиральне сортування плодів за розмірами, формою, забарвленням та наявністю зовнішніх дефектів, що безпосередньо впливає на товарний вигляд продукції, її цінність та рівень втрат під час реалізації.

Традиційні методи сортування яблук, які ґрунтуються на ручній праці або застосуванні простих механічних пристроїв, характеризуються низькою продуктивністю, значною суб'єктивністю оцінювання та підвищеним ризиком механічних пошкоджень плодів. Крім того, вони не забезпечують стабільної якості сортування та не відповідають сучасним вимогам автоматизації й цифровізації аграрного виробництва. У зв'язку з цим зростає потреба у впровадженні інноваційних технічних рішень, здатних забезпечити високоточну, швидку та безконтактну ідентифікацію плодової продукції.

Перспективним напрямом вирішення зазначених проблем є використання оптичних систем ідентифікації на основі цифрової обробки зображень, комп'ютерного зору та елементів штучного інтелекту. Такі системи дозволяють автоматично визначати геометричні та колірні параметри яблук, виявляти дефекти поверхні, оцінювати однорідність партій і забезпечувати об'єктивне сортування відповідно до встановлених стандартів якості. Розробка спеціалізованого модуля оптичної ідентифікації відкриває можливості для інтеграції з існуючими сортувальними лініями, підвищення їх техніко-економічних показників та зменшення витрат на ручну працю.

Особливої актуальності дана тема набуває в умовах необхідності підвищення енергоефективності та ресурсозбереження в аграрному секторі, а також адаптації вітчизняних технологій до європейських стандартів якості плодоовочевої продукції. Створення доступних, модульних і масштабованих оптичних систем сортування є важливим кроком для малих і середніх господарств, які не мають можливості використовувати дорогі імпортні комплекси.

Таким чином, розробка модуля оптичної ідентифікації для сортування яблук є актуальним науково-практичним завданням, спрямованим на підвищення рівня автоматизації післязбиральних процесів, покращення якості продукції, зниження втрат та підвищення конкурентоспроможності вітчизняного садівництва, що повністю відповідає сучасним тенденціям розвитку аграрної інженерії та цифрових технологій.

Тому в роботі поставлена наступна **мета дослідження** – підвищення ефективності потокового сортування плодів яблуні на основі гіперспектральної оптичної ідентифікації здорових і пошкоджених поверхонь.

У зв'язку з поставленою метою визначено **завдання досліджень**:

- виконати аналіз сучасного стану технічного рівня систем оптичного сканування та технологічних вимог до якості плодів яблуні;
- розробити прототип модуля оптичної ідентифікації плодів яблуні;
- розробити методику сканування плодів яблуні з різних ракурсів та визначити спектральні ознаки пошкодження їх поверхні під час руху по роликовому транспортеру.
- виконати експериментальні дослідження параметрів і режимів роботи прототипу модуля оптичної ідентифікації плодів яблуні на основі гіперспектральної зйомки.

Об'єкт досліджень – процес оптичного сканування плодів яблуні під час їх потокового руху на транспортері сортувального столу.

Предмет досліджень – параметри гіперспектральної зйомки плодів яблуні під час їх потокового руху та пошкодження плодів перед закладанням на зберігання.

Методи наукового дослідження. Теоретичні дослідження виконувалися з використанням законів і методів теоретичної механіки та математики, а також із застосуванням методів комп'ютерного проектування, моделювання й програмування. Обробка експериментальних даних, комп'ютерне моделювання та проектування здійснювалися за допомогою програмного забезпечення САПР, Excel, PlanExpB-D13_v.1.0, SolidWorks Simulation. Польові дослідження проводилися відповідно до чинних сучасних ДСТУ з використанням методики планування експериментів.

Перелік **публікацій** за темою роботи:

1. **Якименко Р.М.** Опис методики гіперспектральної зйомки при сортуванні яблук. Наукові читання – 2025: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками I-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 23 квітня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. Том 2. С. 97-102.

2. **Якименко Р.,** Борак К. Оптичні методи та сенсорні технології для оцінювання й сортування плодів. Сучасні технології та технічний сервіс: виклики і можливості: збірник матеріалів I Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Кам'янець-Подільський, 16 жовтня 2025 року). Кам'янець-Подільський: Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», 2025. 290 с. С. 164-172.

3. Куликівський В.Л., **Якименко Р.М.** Аналіз установок для сортування яблук. XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві» (01-17 жовтня 2025 р.). URL: <http://animal-conf.inf.ua/conf.html>.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено модуль оптичної ідентифікації, що здійснює сканування плодів яблуні під час їх руху по конвеєру.

Розроблено базу даних, яка містить класифікацію рослинних тканин яблук за видами дефектів у режимі реального часу під час їх переміщення транспортним конвеєром.

Розроблено методику сканування плодів яблуні з різних ракурсів.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 20 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 55 сторінок комп'ютерного тексту, містить 18 рисунків та 1 таблицю.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ, ОБҐРУНТУВАННЯ АКТУАЛЬНОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Оптичні методи та сенсорні технології для оцінювання й сортування плодів

У сучасних харчових ланцюгах контроль якості плодів набуває ключового значення. Споживачі прагнуть отримувати плоди з оптимальними смаковими властивостями, без пошкоджень та дефектів, а виробники зацікавлені у мінімізації втрат і раціональному використанні ресурсів. Традиційні методи контролю ґрунтуються на руйнуванні плодів (наприклад, використання рефрактометрів для визначення цукристості) і базуються на візуальному досвіді сортувальника, що робить їх повільними й суб'єктивними. Тому останніми роками різко зросла кількість досліджень з впровадження оптичних методів та сенсорних технологій – систем, здатних швидко та без руйнування оцінювати внутрішню і зовнішню якість плодів. Застосовуючи спектроскопію близького інфрачервоного діапазону, гіперспектральну та мультиспектральну зйомку, візуальні системи на основі машинного зору, електронні носи, ультразвукові та віброакустичні датчики, можливо кількісно оцінювати хімічний склад, твердість, ступінь стиглості та інші параметри. У цій статті узагальнено сучасні англійські, німецькі, французькі, корейські, японські та українські джерела про оптичні методи й сенсорні технології для оцінювання та сортування плодів.

Оптичні методи базуються на взаємодії електромагнітного випромінювання з тканинами плодів. Під дією випромінювання у видимому та ближньому інфрачервоному (БІК) діапазонах молекули поглинають або відбивають певні довжини хвиль, що відповідає наявності пігментів, цукрів, органічних кислот і води. На відміну від традиційних хімічних аналізів, спектроскопічні та візуальні методи не пошкоджують плоди. Основні категорії оптичних методів включають:

БІК-спектроскопія – вимірює відбивання або поглинання в межах 750–2500 нм для кількісної оцінки розчинних твердих речовин (RS), вологи, кислот тощо.

Гіперспектральна зйомка (HSI) – поєднує спектроскопію і зображення; кожен піксель містить спектр, що дозволяє будувати карти розподілу складу.

Мультиспектральна зйомка – використовує декілька дискретних довжин хвиль (видимий та НІК-діапазон) для відображення кольору, форми та хімічних властивостей.

Системи машинного зору – оцінюють форму, розмір та дефекти на основі камер і алгоритмів розпізнавання зображень.

Оптичні сенсори – портативні прилади (сканери БІК, електронні носи тощо) для швидкого польового аналізу.

До ефективного застосування цих методів необхідні калібрування та обробка даних. Наприклад, для БІК та HSI використовують методи передобробки спектрів і зменшення вимірів (наприклад, головні компоненти) перед створенням прогнозних моделей. Глибокі нейронні мережі й інші алгоритми машинного навчання допомагають підвищити точність класифікації.

Принцип та переваги. БІК-спектроскопія забезпечує швидкий збір спектральних даних з багатою інформацією, що дозволяє оцінювати внутрішню якість плодів. Однак спектри сильно перекриваються, а результати залежать від температури, сорту та неоднорідності зразків; тому для різних сортів потрібні окремі калібрувальні моделі [1]. Поширені методи моделювання включають часткові найменші квадрати (PLS), методи незалежних компонент та опорні вектори, а також глибокі нейронні мережі [1].



Рис. 1.1. Принцип дії БІК-спектроскопії.

У наведеній схемі показано, як джерело ближнього інфрачервоного світла опромінює плід, відбитий сигнал фіксується детектором, а потім обробляється алгоритмами. Така візуалізація допомагає зрозуміти, що БІК-спектроскопія складається з трьох етапів: випромінення, детектування та аналізу. Детектори зазвичай виконують роль спектрометрів, що розкладають світло за довжинами хвиль. Подальше моделювання дозволяє переводити спектр у кількісні показники, такі як розчинні тверді речовини або твердість.

Дослідження показали, що БІК-спектроскопія дозволяє прогнозувати розчинні тверді речовини та твердість яблук, манго та авокадо з високою точністю. Портативні пристрої Food-Scanner у Німеччині успішно використовуються для визначення сухої речовини, води, цукру та кислот у різних плодах, замінюючи руйнівні методи (рефрактометрію, титрування) і надаючи швидкий результат у польових умовах.

У Японії для білих сортів суниці, що не червоніють при дозріванні, застосовано суміщену видимо-БІК та чисто БІК-спектроскопію. Дослідники відзначили, що спектри містили характерні поглинання, пов'язані з антоціанами та хлорофілом й змогли з високою точністю передбачити вміст цукру незалежно від кольору шкірки. Такий підхід дозволяє оптимізувати збір урожаю та уникати суб'єктивних оцінок стиглості.

До недоліків БІК-спектроскопії належать чутливість до температури та неоднорідності плодів, а також потреба в ретельному калібруванні. Для високоточного прогнозування необхідно створювати окремі моделі для кожної культури та враховувати сезонні зміни. Однак постійне удосконалення алгоритмів та поява компактних сенсорів забезпечують перспективи для широкого впровадження в агробізнесі.

Гіперспектральна зйомка формує тривимірну "кубову" структуру даних, де кожен піксель містить спектр у видимому та БІК діапазонах. Поєднання просторової та спектральної інформації дозволяє виявляти біохімічні та структурні особливості плодів, недоступні для звичайного зору. Через велику

кількість спектрів необхідні методи передоброби та зменшення розмірності (головні компоненти, відбір значущих хвильових діапазонів).

Схема ілюструє концепцію гіперспектральної лінійної зйомки: лінійний сканер та джерело світла переміщуються над стрічкою з плодами, збираючи спектральну інформацію для кожного пікселя. Зібрані дані формують тривимірний "куб" з розмірністю за просторовими координатами та довжиною хвилі. Кожний зріз куба відображає інтенсивність відбитого світла на певній довжині хвилі, а подальший аналіз дозволяє визначати хімічний склад і дефекти. Такий підхід забезпечує більш детальну картину внутрішнього стану плодів порівняно з традиційними зображеннями.

У міжнародному дослідженні HSI успішно застосовували для прогнозування вмісту цукру, вітаміну С та органічних кислот у помело, а також для виявлення ранньої гнилі у апельсинах і класифікації гранатів за допомогою глибоких нейронних мереж [2].

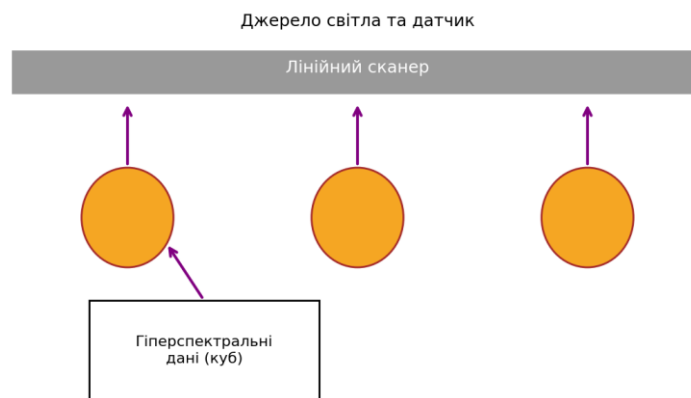


Рис. 1.2. Гіперспектральна зйомка.

Системи на основі HSI здатні виявляти навіть невеликі пошкодження та зовнішніх шкідників у яблуках [2]. Такі системи відносяться до "візії 4.0" у харчовій промисловості: французькі фахівці зазначають, що гіперспектральна візія дозволяє в реальному часі відокремлювати плоди за ступенем зрілості, рівнем забруднення та іншими ознаками й трансформувати складні спектральні дані в зрозумілі кольорові карти (так званий хімічний колориметричний аналіз)/

У дослідженні японських науковців для білих суниць була розроблена БІК-гіперспектральна система, яка дозволила візуалізувати розподіл цукру на поверхні ягоди. Застосовуючи машинне навчання та алгоритми обробки зображень для автоматичного визначення насінин, вдалося отримати карти розподілу цукру, що не залежать від кольору шкірки. Такий метод дає змогу точно визначати стиглість кожного плоду та сприяє експорту японських ягід високої якості [3].

Гіперспектральні системи забезпечують найвищу точність та універсальність; однак вони є дорогими та генерують великі обсяги даних. Інтерпретація результатів потребує складних алгоритмів та потужного апаратного забезпечення. Комерційні рішення все частіше використовують глибокі згорткові мережі для автоматичної класифікації та оцінки якості.

На відміну від HSI, мультиспектральні системи працюють з невеликою кількістю вибраних діапазонів (наприклад, 400–700 нм та 700–1000 нм) і використовуються для швидкого сортування на конвеєрі. Корейські джерела повідомляють, що такі камери аналізують форму, розмір та поверхневі дефекти плодів, а також оцінюють внутрішні параметри, як-от вологість та вміст цукрів за допомогою видимого та БІК випромінювання. Вони здатні виявляти забруднення й поверхневі пошкодження, визначати суху речовину й стиглість (наприклад, для бананів) і допомагають визначати оптимальний час збору та пакування.

Машинне зору та штучний інтелект. Системи машинного зору використовують RGB-камери й алгоритми обробки для оцінювання кольору, форми та дефектів. За даними англомовного огляду, такі системи дозволяють автоматизувати контроль якості й зменшити суб'єктивність ручної перевірки; основними етапами є передобробка, сегментація, вилучення ознак та класифікація. Використання глибоких згорткових мереж та методів машинного навчання дає можливість здійснювати сортування в реальному часі, однак потребує великого набору навчальних даних та обчислювальних ресурсів.

В Україні розроблено роботизований комплекс сортування фруктів на основі штучного інтелекту, який об'єднує камеру, маніпулятор та нейронну мережу. Розробники зазначають, що, щоб відповідати стандартам ЄС, система повинна враховувати фізичні пошкодження, гнилість, ураження шкідниками, колір, дефекти шкірки та відхилення за розміром [4]. Маніпулятор із встановленою камерою Gemix A10 забезпечує рівномірне освітлення, що мінімізує похибку під час класифікації, а нейронну мережу тренували на наборі з 316 зображень, використовуючи архітектуру YOLO для розпізнавання на дистанції до 30 см [4]. Отримані результати показують, що система може автоматично перенаправляти плоди на відповідні конвеєри й зменшувати потребу в ручній праці.

Електронний ніс (e-nose) складається з набору газових датчиків (наприклад, метал-оксидних чи електрохімічних), що реагують на леткі органічні сполуки. У нещодавньому дослідженні для суниць пошкоджених мікромеханічними ударами, розробники побудували портативний e-nose, де комбінувалися метал-оксидні та електрохімічні сенсори; застосування методів відбору ознак та підтримкового вектора (SVM) дозволило досягти точності класифікації 84 % [5]. Технологія дозволяє швидко й без руйнування виявляти незначні пошкодження, що важливо для запобігання псуванню під час зберігання та транспортування.

Ультразвук та віброакустика дозволяють оцінювати механічні властивості плодів без контакту. Лінійні моделі показують, що зі збільшенням часу зберігання швидкість ультразвуку зменшується, а затухання сигналу збільшується, що відображає зниження твердості; такі підходи застосовувалися для апельсинів, яблук та ківі [1]. Віброакустичні системи, аналізуючи реакцію плода на удар або вібрацію, дозволяють оцінити твердість та модуль пружності, а методи швидкого перетворення Фур'є та часткових найменших квадратів використовують для оцінки стиглості й вмісту цукру [1]. Перевагою є висока

швидкість та відсутність потреби в освітленні, однак ці методи чутливі до геометрії плоду та часто потребують багаторазового калібрування.

Поряд з оптичними методами, до контролю якості плодів залучаються датчики тиску, магнітно-резонансні та індукційні пристрої. У німецькому проекті Food-Scanner мініатюрні БІК-сенсори забезпечують оцінку вологи, сухої речовини, цукру та кислот безпосередньо на полях або в пакувальних цехах. Комбінування оптичних та інших сенсорів (наприклад, e-nose, ультразвуку) дозволяє створювати комплексні системи контролю.

Ефективне сортування та оцінка плодів вимагає інтеграції різних джерел даних і застосування алгоритмів машинного навчання. На схемі зображено конвеєрну стрічку з плодами, над якою встановлено декілька сенсорів: камера видимого діапазону, БІК-детектор, електронний ніс і ультразвуковий датчик. Інформація від кожного сенсора використовується для класифікації плодів за якістю та спрямування їх у відповідні контейнери. Такий комплексний підхід дозволяє компенсувати недоліки окремих методів та підвищити точність сортування. Сучасні системи використовують одночасно БІК-сканери, камерні системи та електронні носи для створення цифрового профілю плоду. Глибокі мережі покращують точність класифікації й дозволяють адаптуватися до різних сортів і умов вирощування.

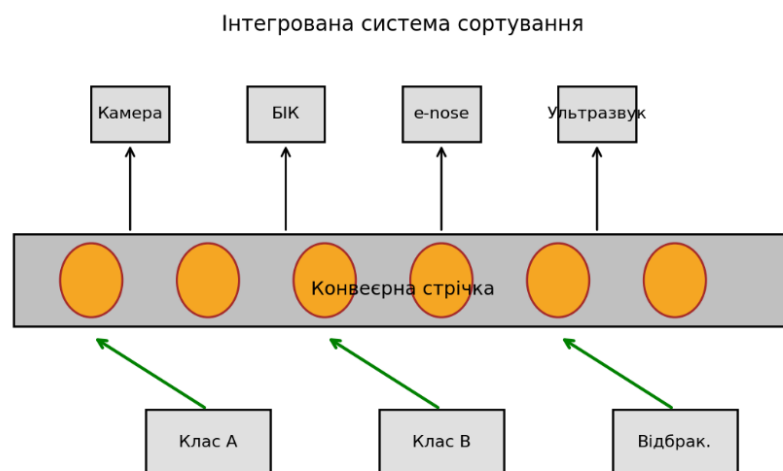


Рис. 1.3. Інтегрована система сортування.

Разом із тим, існують виклики:

1. Складність обробки даних. Гіперспектральні та мультисенсорні системи генерують великі обсяги даних, що потребують швидких обчислень та оптимізованих алгоритмів.

2. Уніфікація моделей. Через різноманіття сортів і умов вирощування необхідно створювати гнучкі моделі, здатні адаптуватися до нових даних та мінімізувати залежність від температури й зовнішніх умов [1].

3. Вартість та доступність. Гіперспектральні та мультиспектральні камери залишаються дорогими; здешевлення технологій й розвиток портативних сенсорів (наприклад, мініатюрних БК-сканерів) відкриває нові можливості для фермерів та торгових мереж.

4. Стандартизація та прийняття. Для інтеграції в міжнародні торгові системи потрібні єдині стандарти якості та сертифікації. Українські дослідники підкреслюють, що впровадження роботизованих комплексів на основі штучного інтелекту допоможе адаптувати продукцію до стандартів ЄС, враховуючи фізичні та органолептичні критерії [4].

У майбутньому можна очікувати появи більш компактних і доступних пристроїв, що поєднуюватимуть різні методи (оптичні, акустичні, газоаналізаторні) та забезпечуватимуть хмарну аналітику. Акцент зрушується на розробку моделей машинного навчання, що враховуватимуть біологічну мінливість і надаватимуть зрозумілі рекомендації для фермерів, сортувальних центрів та експортерів.

Оптичні методи та сенсорні технології кардинально змінюють підхід до оцінювання й сортування плодів. БК-спектроскопія та гіперспектральна зйомка дають можливість безконтактно оцінювати хімічний склад плодів, а мультиспектральні камери й системи машинного зору дозволяють виявляти дефекти та класифікувати плоди за зовнішнім виглядом. Електронні носи, ультразвукові та віброакустичні датчики доповнюють спектральні методи, забезпечуючи повніший контроль якості. Інтегровані системи, що поєднують

різні сенсори і штучний інтелект, уже застосовуються у промисловості й наукових лабораторіях. Незважаючи на виклики, пов'язані зі складністю обробки та високою вартістю обладнання, постійний прогрес у мініатюризації, обчислювальній техніці та машинному навчанні відкриває шлях до широкого впровадження цих технологій у всьому світі, включно з Україною.

1.2. Аналіз установок для сортування плодів яблуні

Завдання сортування сільськогосподарської продукції належить до числа фундаментальних проблем у сфері агроінженерії. Різні аграрні сектори, зокрема рослинництво, садівництво та овочівництво, під час упровадження автоматизованих систем і сільськогосподарського обладнання демонструють підвищення продуктивності на 40–60% порівняно з ручними операціями за контрольованих умов.

Використання автоматизованих систем з керувальними обчислювальними модулями дає змогу ефективно реалізовувати завдання сортування зі швидкістю обробки 0,5–2 секунди на об'єкт і точністю позиціонування $\pm 0,1$ – $0,5$ мм, досягаючи надійності операцій на рівні 99% успішних циклів.

Збирання та класифікація плодів є завданням, яке необхідно реалізовувати за допомогою автоматичних систем. Така система повинна виконувати операції у суворо визначеній послідовності для забезпечення можливості збирання та сортування плодів. Ця послідовність включає ідентифікацію цільових об'єктів, розрахунок оптимального порядку захоплення плодів, безпосереднє захоплення, підйом предмета та його точне позиціонування.

Ранні дослідження в галузі автономного сортування зосереджувалися на дискретних завданнях, пов'язаних з ідентифікацією об'єктів і розробленням машин для класифікації відповідно до фундаментальних якісних параметрів, таких як визначення стиглості плодів за кольором — у цьому контексті колірна ознака дозволяла виявляти показник якості.

Технічні комплекси базувалися на класичних принципах архітектури, що передбачали застосування інтегральних оптико-електронних сенсорів, які функціонували в одному або декількох спектральних діапазонах.

Автоматизовані системи поетапно вдосконалювалися шляхом численних ітерацій сортувальних механізмів, у межах яких враховувалися специфічні властивості об'єктів, що підлягали сортуванню. Зокрема, здійснювалася оцінка фізичної цілісності та візуальних характеристик, які дозволяли ідентифікувати наявність захворювань, а також різних категорій пошкоджень, включно з проколами та іншими дефектами. У початкових механізмах застосовувалися оптико-механічні сканувальні системи. Згодом було здійснено перехід до використання телевізійних обчислювальних пристроїв, тобто монохромних і спектрональних сенсорів вакуумного та твердотільного типу (пристроїв із зарядовим зв'язком — ПЗЗ-матриць). Покращення характеристик відеосенсорів, зокрема поліхромних, в основі яких лежить технологія ПЗЗ-матриць, поряд із розвитком засобів і методів оброблення отриманих даних, спричинило значний прогрес у сфері впровадження систем розпізнавання у сортувальні механізми. У результаті зазначені системи стали менш специфічними завдяки процесу універсалізації. Таким чином, зросла кількість якісних показників, які можуть бути визначені одним пристроєм. Крім того, це зумовило підвищення показника надійності подібних систем, що зробило можливим і економічно доцільним їх застосування в умовах сучасного виробництва, зокрема у цехах обробки та переробки продукції.

Нині сформовано різноманітні підходи до сортування плодів. У промислових умовах застосовується техніка, здатна витримувати безперервний потік плодів, який не можна зменшувати через загрозу скорочення виробництва та фінансових втрат. Промислові машини здійснюють сортування продукції за такими ознаками: діаметр, довжина, маса, колір, внутрішній і зовнішній стан.

Машини, що здійснюють сортування за різними ознаками, можна класифікувати за типом методів роботи та конструктивним виконанням (табл.1).

Таблиця 1 – Напіваавтоматичні сортувальні машини

№	Назва	Установка
1.	Барабанні	
2.	Вібраційне	
3.	Валкові	
4.	З стрічковим конвеєром	
5.	Дискові	

6.	Струнні	
7	Роликові	

Кожен із представлених типів сортувальних машин має як свої переваги, так і недоліки. Усі вони певною мірою виконують необхідні функції, проте суттєві недоліки можуть впливати на підприємство як в економічному аспекті (висока вартість), так і у виробничому (темпи роботи). До основних проблем механізмів барабанного типу належать такі специфічні дефекти, як застрягання об'єктів та пошкодження їх поверхні. Крім того, складно швидко скоригувати параметри сортування відповідно до змінних характеристик продукції, що призводить до умовної точності процесу. Це стосується того, що дрібні об'єкти через неминучі перевантаження сортувального апарата можуть потрапляти до інших секцій барабанного калібратора. Подібний тип сортувальних механізмів є малоуніверсальним і передбачає його використання лише для певних культур, таких як цибуля, каштани, картопля, горіхи тощо. Використання такого апарата доцільне, коли картоплезбиральний комбайн застосовується без модифікації для попереднього сортування. У такому разі завантажити до барабанного сортувального механізму й відсортувати огірки, буряк, моркву чи яблука практично неможливо, принаймні на необхідному рівні ефективності. Слід також урахувати загальну громіздкість механізмів цього типу. Усе це призводить до того, що подібні апарати не користуються попитом

серед виробників сільськогосподарської техніки, а також рідко застосовуються у логістичних хабах і на підприємствах із переробки овочів.

Однією з основних проблем вібраційних сортувальних механізмів також є їх вузька спеціалізація, що зумовлює доцільність їх використання лише для сортування обмеженого асортименту плодкових культур, таких як цибуля та картопля. Крім того, такі системи споживають значну кількість енергії під час роботи й належать до високої цінової категорії. Ще одним недоліком подібного типу сортувальних конструкцій є велика кількість механічних з'єднань і вузлів. Це призводить до необхідності залучення висококваліфікованого технічного персоналу для роботи з такими установками, а їх технічне обслуговування належить до категорії підвищеної складності. Аналогічно до сортувальних систем попереднього типу, вібраційні установки характеризуються частим проявом такого «побічного ефекту», як пошкодження сировини. Крім того, через конструктивні особливості виникає проблема налипання вологого ґрунту на важкодоступні ділянки, очищення яких є особливо складним. У вібраційних системах сита розташовані одне над одним, а величина проміжку між ними є незначною. Унаслідок цього оперативний доступ до нижніх ярусів для проведення обслуговування установки не забезпечується.

Низька якість роботи є характерною рисою валкових сортувальників. Ця особливість найбільшою мірою проявляється в ситуаціях перевантаження сортувальної системи та переміщення сировини у два шари (яруси) або більше. Для таких систем також типовою є проблема налипання ґрунту в зонах, доступ до яких ускладнений. Окрім цього, подібні системи мають надзвичайно велику кількість з'єднань і вузлів, які потребують підвищеної уваги та інтенсивного технічного обслуговування, у тому числі під час ремонту. Також такі сортувальники потребують значної кількості запасних частин для здійснення заміни у випадку поломок.

Стрічкові сортувальники характеризуються великою кількістю приводів. Для порівняння: за аналогічних показників продуктивності барабанні або

струнні установки потребують лише одного мотор-редуктора потужністю 1,5 кВт, тоді як у стрічковому апараті необхідний окремий мотор-редуктор для кожної робочої секції.

Це призводить до того, що, незважаючи на співставні технічні характеристики, витрати на споживання енергії у таких апаратів відрізняються щонайменше у п'ять разів. Ще однією особливістю цього типу сортувальників є висока чутливість до перевантажувальних навантажень, що спричиняє зниження ефективності та якості роботи при збільшенні кількості шарів продукції. Для експлуатації подібних систем необхідно забезпечити додаткове обладнання на вході, наприклад, приймальний бункер із механізмом подачі на наступний технологічний етап, з метою забезпечення рівномірної подачі сировини та запобігання перевантаженню. Крім того, стрічкові сортувальники не передбачають можливості швидкого коригування. Зміна калібрів здійснюється виключно шляхом заміни стрічок. Ця процедура стає необхідною у випадках, коли після оброблення однієї культури, наприклад цибулі, потрібно сортувати буряк, який має значно більші середні розміри. При цьому стрічкові сортувальники не забезпечують можливості роботи з огірками, морквою та іншою сировиною з вираженою витягнутою формою. Наявність ґрунту, особливо вологого, істотно ускладнює функціонування стрічкових сортувальників. Зазначене ускладнення виникає через налипання такого ґрунту на ведені та приводні вали, що значно ускладнює процес налаштування, оскільки спричиняє зміщення стрічок у бік одного з торців на веденому та ведучому барабанах.

Дисковий сортувальник має значну кількість недоліків, ключовим із яких є низька точність — до 70%. Зокрема, при потраплянні плоду малого розміру між дисками, призначеними для більших діаметрів, виникає висока ймовірність його помилкового віднесення до фракції, призначеної для великих об'єктів.

Окрім цього, такі установки демонструють високу чутливість до рівня завантаження: подавання плодів яблуні потребує суворо дозованого режиму, бажано в один шар — здійснення сортування на дисковому пристрої іншим

способом є неможливим. Це обумовлює необхідність оснащення подібної сортувальної системи живильним пристроєм (приймальним бункером), який має систему частотного або варіативного керування. Сукупність зазначених факторів призводить до того, що такі установки характеризуються низьким рівнем продуктивності. Виробники декларують продуктивність до 1,5 тонн на годину, проте емпіричні дані свідчать, що навіть за максимальної завантаженості подібні сортувальники не здатні забезпечити продуктивність понад 700–800 кг/год при задовільній якості сортування. Крім того, дискові установки непридатні для сортування огірків або моркви – з високим ступенем достовірності можна стверджувати, що у 90% випадків їх застосування обмежується сортуванням плодів яблуні.

Основним недоліком експлуатації струнних сортувальних установок є регулярні ускладнення, зумовлені падінням оброблюваної сировини. Оскільки діапазон висоти падіння продукції становить 300–700 міліметрів, цей тип обладнання є непридатним для сортування сировини, що має підвищену чутливість до ударних механічних впливів. Таким чином, виключається можливість оброблення делікатних плодів. Важливим аспектом функціонування подібних установок є необхідність урахування умов експлуатації: під час використання ланцюгів як робочого органа слід брати до уваги явище корозії, що виникає внаслідок їх чутливості до вологи. У зв'язку з цим експлуатація ланцюгових установок забороняється після проведення процедури миття. Отже, варто зазначити, що ремінні та тросові установки позбавлені зазначеного недоліку, однак, своєю чергою, ремені та троси характеризуються меншим строком служби порівняно з ланцюгами.

Установки з роликками характеризуються вищою вартістю порівняно з вищезазначеними типами обладнання. Продукція, що піддається сортуванню на роликкових установках, перебуває під ризиком падіння з висоти, починаючи від 300 міліметрів. Унаслідок цього роликкові установки непридатні для сортування плодів, чутливих до механічних пошкоджень. Роликкові установки належать до

категорії технічно складного обладнання. Вони потребують наявності висококваліфікованого технічного персоналу для виконання обслуговування, оскільки роботи з технічного обслуговування та ремонту подібних установок відзначаються підвищеною складністю. Також слід урахувати значні витрати під час проведення капітального ремонту, який необхідно здійснювати кожні 5–6 років активної експлуатації. Сортувальні машини, що аналізують довжину об'єкта й базуються на вібраційному принципі роботи, мають суттєвий недолік – вузьку спеціалізацію, а також швидке зношення конструкції, що пов'язано з характерними для цього обладнання втомними навантаженнями та вібраційними впливами. Це, своєю чергою, зумовлює високу вартість як самої установки, так і її технічного обслуговування.

Компанія Hortisort (Індія) пропонує промислові рішення для сортування фруктів за зовнішніми параметрами та масою. На офіційному сайті зазначено, що машини здійснюють сортування до десяти фруктів за хвилину на кожному каналі. Класифікація виконується за кольором, діаметром (у діапазоні 40–120 міліметрів) і масою (до 350 грамів на один плід) із використанням модульних чашок, що відповідають харчовим стандартам. На візуалізації користувацького інтерфейсу показано, що системи підтримують спрощене налаштування градувальних параметрів, багатомовний інтерфейс (зокрема англійську, гінді та інші мови), а також забезпечують формування детальних звітів за кожним фруктом, партією або сезоном. На рис. 1.4 зображено автоматичну установку HORTISORT HS Rotary.

Автоматизована сортувальна установка Hortisort HS Rotary являє собою систему високого рівня автоматизації, призначену для сортування фруктів, зокрема плодів яблуні.



Рис. 1.4 Автоматична роторна сортувальна лінія Hortisort HS Rotary

Виробник зазначає пропускну здатність до десяти плодів за хвилину на одну лінію, при здійсненні класифікації за кольором, діаметром у діапазоні 40–120 мм та масою до 350 г. Для візуального аналізу установка Hortisort HS Rotary використовує RGB-камеру високої роздільної здатності з подальшою обробкою даних за допомогою згорткової нейронної мережі, яка виконує ідентифікацію та класифікацію плодів на основі аналізу їх візуальних характеристик. Модульна конструкція включає спеціалізовані чашки, що відповідають харчовим стандартам, забезпечують дбайливе поводження з плодами, а також програмний інтерфейс із функціоналом налаштування параметрів сортування та генерації детальної аналітики щодо оброблених партій фруктів. У комерційній конфігурації, яку пропонують дилери (зокрема Zentron Labs), заявлена продуктивність становить приблизно 2–3 т/год на одну лінію, за споживаної потужності обладнання 40 кВт і напруги живлення 440 В. Ця установка оптимізована для експлуатації в умовах індійського агропромислового комплексу та демонструє значний потенціал для масштабування у сфері сільськогосподарської автоматизації.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА ОПТИЧНОГО МОДУЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПЛОДІВ НА ОСНОВІ ГІПЕРСПЕКТРАЛЬНОЇ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ

2.1 Обґрунтування параметрів модуля ідентифікації

Модуль оптичної ідентифікації розташований над роликівим транспортером. Ролики є ключовими робочими елементами модуля, розміщеними паралельно та такими, що перебувають у обертальному русі. Їх поверхня зазвичай покрита м'яким матеріалом для зниження ризику пошкодження плодів. Зазор між роликами є регульованим, що забезпечує можливість сортування плодів за розмірними характеристиками. Конструкція роликів часто передбачає поступове збільшення міжосьової відстані за ходом руху плодів, що дає змогу здійснювати поетапний відбір продукції за заданими параметрами.

Для покращення якості зображень, отриманих під час стандартної зйомки та флуоресцентної спектроскопії, використовуються спеціалізовані освітлювальні системи та оптичні компоненти. До останніх належать світлофільтри, лінзи та інші оптичні елементи, які забезпечують підвищення чіткості зображення та точності спектральних вимірювань [66], [67]. Передбачено можливість обертання досліджуваного біологічного об'єкта на 360 градусів навколо власної осі за рахунок роботи орієнтувального модуля, оснащеного роликами, які одночасно забезпечують поступальне переміщення та осьове обертання плодів.

У процесі роботи модуля яблука переміщуються в поперечному напрямку з одночасним обертанням навколо власної осі, що досягається завдяки синхронізованому обертанню роликів з однаковою кутовою швидкістю під час їх взаємодії з плодами [6]. Ключовими параметрами роликів є їх діаметр, крок гвинтової лінії, висота витка, а також зазор між сусідніми роликами. Надто

малий зазор може призводити до здавлювання плодів, особливо якщо яблука різняться за розмірами. Надто великий зазор підвищує ймовірність застрягання плодів. Старі або зношені ролики можуть мати шорстку поверхню, що збільшує ризик пошкодження яблук [9]. Сучасні машини оснащуються сенсорами та камерами, які допомагають аналізувати стан плодів і автоматично керувати процесом сортування (рис. 2.1).

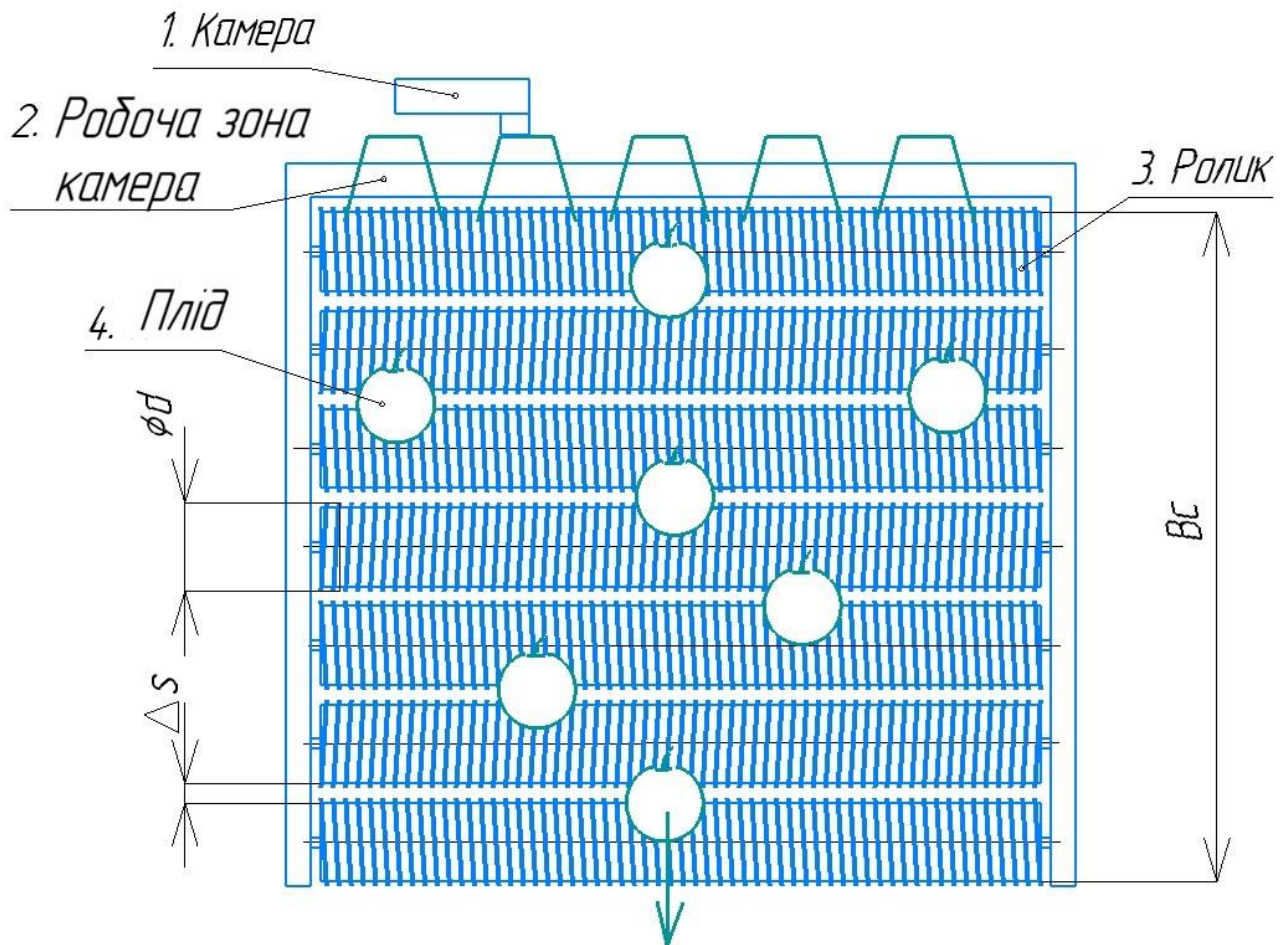


Рис. 2.1. Конструктивна схема роликового транспортера оптичної системи ідентифікації.

2.2 Розробка оптичного модуля для ідентифікації плодів яблуні

Формування вихідних вимог до модуля. Розробка модуля оптичної ідентифікації для сортування яблук потребує забезпечення високої точності розпізнавання на основі дискримінантних функцій та аналізу характеристик

плодів. Необхідною є реалізація попередньої обробки даних, що включає корекцію зображень для усунення спотворень, зумовлених особливостями оптичної системи, компенсацію геометричних відхилень, пов'язаних із формою та розмірами плодів, а також синтез кольорових зображень із даних багатоканальної зйомки. Оптична система повинна забезпечувати зйомку в кількох спектральних діапазонах із якістю зображення, достатньою для ідентифікації [6].

Обробка даних має включати підвищення якості зображень плодів, аналіз спектральних характеристик для кожної ділянки поверхні, класифікацію дефектів із використанням нейромережових і статистичних методів, а також оптимізацію параметрів зйомки для різних сортів яблук.

Модуль ґрунтується на багатоканальній зйомці плодів у різних спектральних діапазонах. Кожне яблуко подається у вигляді набору зображень у різних спектральних каналах, що дає змогу виявляти зовнішні дефекти та особливості поверхні.

Для обробки даних сортування необхідне спеціалізоване програмне забезпечення, яке забезпечує [67]:

1. Кластеризацію плодів за якісними характеристиками;
2. Багатокласове розпізнавання дефектів поверхні;
3. Кількісну оцінку параметрів плодів;
4. Аналіз текстури поверхні;
5. Дослідження спектральних характеристик;
6. Багатопараметричний аналіз даних;
7. Формування вихідних даних для системи сортування;
8. Генерацію звітів на основі каліброваних зображень.

Розробка модуля оптичної ідентифікації передбачає створення оптико-електронного модуля для неінвазивного отримання спектральної інформації про плоди. Структурну схему модуля було розроблено з метою формування вихідних даних і визначення необхідних компонентів системи (рисунок 12). На її основі

встановлено базові вимоги, що включають освітлювальний блок, який забезпечує стабільне регульоване освітлення у заданому спектральному діапазоні з метою зменшення похибок, спричинених зовнішньою засвіткою та неоднорідністю поверхні. Об'єктивна частина модуля призначена для збирання та фокусування відбитого випромінювання з проєкцією зображення на вхід спектрального блока. Реєстрація випромінювання здійснюється ПЗС-матрицею (ПЗС-матрицею) з високою чутливістю та низьким рівнем шумів. Інтеграція модуля в конвеєрну лінію потребує синхронізації з механізмом переміщення зразків і забезпечення багатоточкового сканування.

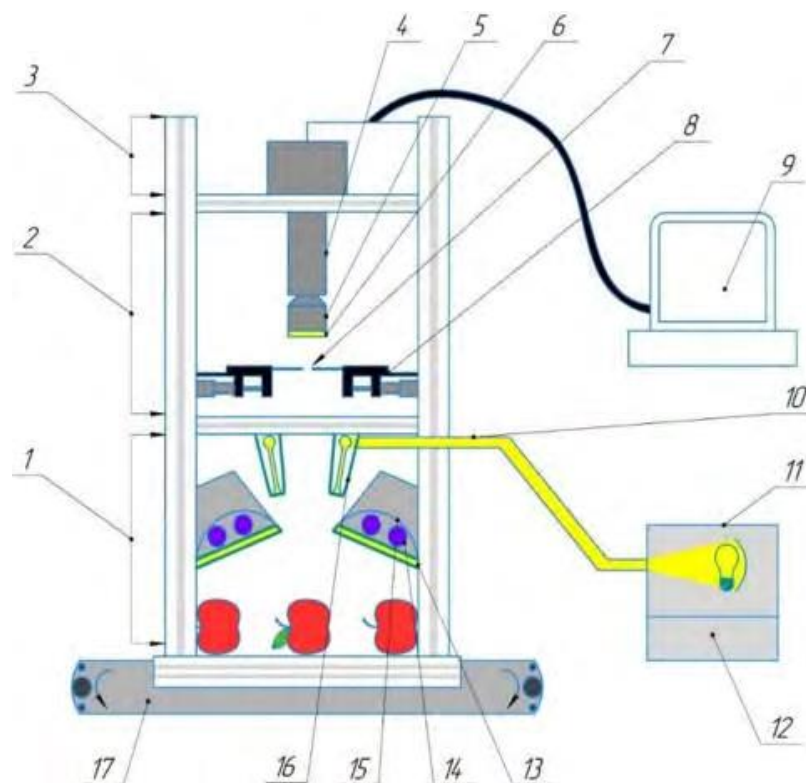


Рис. 2.2. Конструктивно-технологічна схема оптичної системи ідентифікації плодів яблуни: 1 – сенсорний датчик; 2 – оптичний модуль; 3 – модуль освітлення досліджуваного зразка; 4 – об'єктив камери; 5 – короткохвильовий фільтр; 6 – об'єктив; 7 – регульована щілина; 8 – ПЗС-матриця; 9 – інтерфейс контролера ПЗС-матриці; 10 – світлопровідний потік; 11 – світлова призма; 12 – відбивач; 13 – матриця з підсвічуванням; 14 – пакет люмінесцентних ламп; 15 – світлофільтр довгого проходження; 16 – привід мікрометра; 17 – конвеєрна стрічка.

Обґрунтування вибору компонентів модуля оптичної ідентифікації. На підставі розрахунку розподілу навантажень у середовищі SolidWorks Simulation обрано основні компоненти модуля оптичної ідентифікації (рис. 2.3).

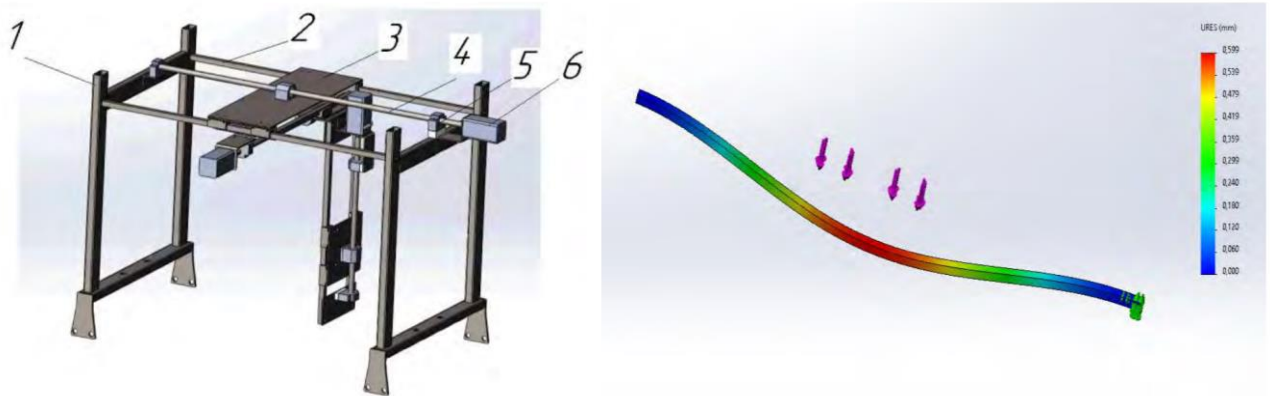


Рис. 2.3. Модуль оптичної ідентифікації, виконаний у середовищі SolidWorks Simulation

У середовищі SolidWorks Simulation проведено моделювання механічних навантажень і переміщень конструкції модуля оптичної ідентифікації з урахуванням реальних умов експлуатації. Вибір лінійної напрямної HSAC GHR15 обґрунтований її жорсткістю, при якій деформація не перевищує 0,5 мм за навантаження 20 кг. Кульково-гвинтова передача SCR1605-TBI забезпечує мінімальний люфт і високу ефективність переміщень. Кроковий двигун PL57H110-D8 підібрано виходячи з розрахункових зусиль для переміщення платформи з урахуванням маси компонентів (до 5 кг на вісь) при заданому прискоренні. Коефіцієнт запасу моменту 1,5 виключає перегрів під час тривалої експлуатації.

Розроблено принципову електричну схему керування модулем, яку наведено на рисунку 2.4.

Розроблена схема реалізує керування трьома кроковими двигунами через мікроконтролер Atmel ATmega168 із застосуванням драйверів DM556 та двигунів PL57H110-D8. У системі організовано централізоване керування електроживленням і послідовністю операцій, що дає змогу використовувати її в

автоматизованих позиціонувальних пристроях, зокрема у сканувальних системах і мехатронних установках.

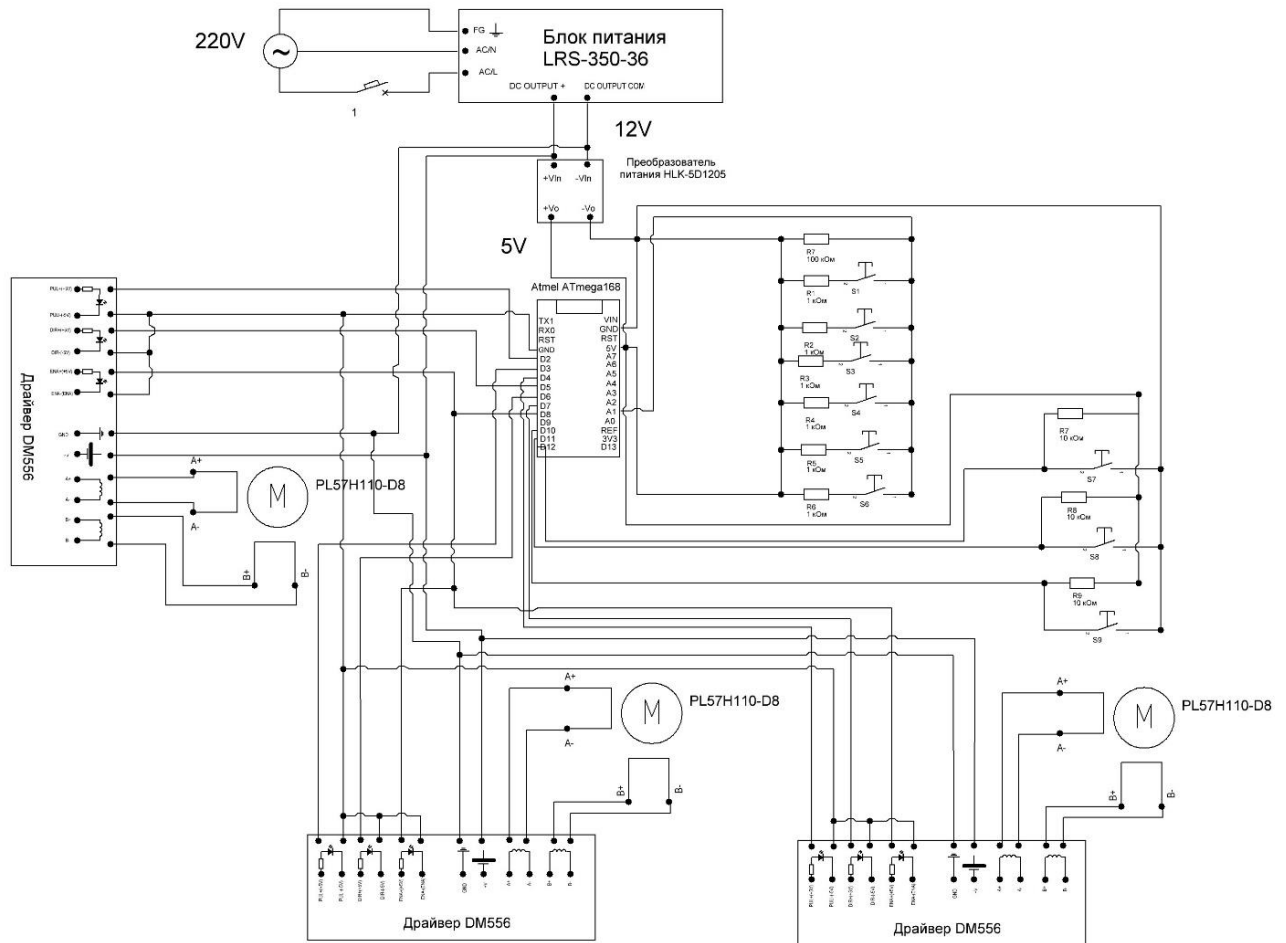


Рис. 2.4. Принципова електрична схема модуля.

Живлення схеми здійснюється від мережі змінного струму 220 В через імпульсний блок LRS-350-36. Даний джерело живлення формує стабілізовану напругу 12 В постійного струму, яка розподіляється по двох колах: безпосередньо на драйвери DM556 та через понижувальний перетворювач HLK-5D1205 для отримання напруги 5 В, необхідної для роботи мікроконтролера ATmega168 і цифрової логіки керування.

Центральним керувальним елементом системи є мікроконтролер ATmega168. Він приймає сигнали з панелі керування, що містить дев'ять тактових кнопок (аналоговий вхід A1, цифрові входи D10, D11 та D12), підключених до входів через струмообмежувальні резистори номіналом 1 кОм (для аналогових входів) і 10 кОм (для цифрових входів). Кнопкова панель

забезпечує ручне керування основними функціями системи: вибір напрямку обертання, формування крокових імпульсів і перемикання робочих режимів.

Кожен із трьох крокових двигунів PL57H110-D8 керується через драйвер DM556, який отримує від мікроконтролера три типи сигналів: PUL (крокові імпульси), DIR (напрямок обертання) та ENA (дозвіл роботи). Усі сигнальні лінії виконані у вигляді диференціальних пар (PUL+/PUL-, DIR+/DIR-, ENA+/ENA-), що підвищує завадостійкість системи. Драйвери, які живляться напругою 12 В, керують обмотками двигунів PL57H110-D8 за чотирипровідною схемою (A+, A-, B+, B-), формуючи необхідні струми для покрокового руху.

Реалізовано комплексну систему з автономним керуванням, яка забезпечує точне позиціонування завдяки узгодженій роботі мікроконтролера, драйверів і крокових двигунів. Конструкція передбачає захист від електромагнітних завад, стабілізоване живлення та модульну архітектуру, що дає змогу використовувати систему в робототехнічних комплексах. Для ідентифікації дефектів яблук розроблено оптичний модуль (рис. 2.5).



Рис. 2.5. Прототип модуля оптичної ідентифікації для отримання гіперспектральних зображень плодів яблуні: 1 – рама установки; 2 – гіперспектральна камера; 3 – стіл із гумовими роликами; 4 – підвіска камери; 5, 6 – крокові двигуни; 7 – трансмісія; 8 – джерело світла.

Гіперспектральна камера ОСІ-F 2 виконана з високою деталізацією сканованих об'єктів. Вона працює з різними довжинами хвиль світла в інфрачервоній частині електромагнітного спектра та має спектроскопічні характеристики (відбивна здатність, флуоресценція тощо). Після відбиття світла від поверхні об'єкта відбувається його візуалізація. Залежно від хімічного складу об'єкт сканування відбиває світло по-різному. Відбитий від об'єкта світловий потік є його спектральним підписом, який надалі порівнюється з еталонними підписами з попередньо сформованої електронної бази даних, що зберігається в блоці керування (ноутбуці). Камера 2 закріплена у підвісі 4 з можливістю переміщення за рахунок крокових електродвигунів 5 по напрямних 6 та рейкових передачах 7 вгору і вниз у вертикальній площині, а також уздовж і впоперек у горизонтальній площині. Крокові електродвигуни 5, що живляться від мережі змінного струму, жорстко закріплені на рамі сортувального пристрою 1 і передають рух через рейкові передачі 7. Переміщення камери 2 у горизонтальній і вертикальній площинах дає змогу охоплювати всю робочу поверхню та виконувати сканування об'єктів з усіх сторін. Рух у вертикальній площині реалізовано для зйомки плодів різних розмірів або для одночасної зйомки кількох плодів. Система освітлення 8 встановлена над робочою поверхнею. Наявність системи освітлення 8 дає змогу зменшити тривалість сканування об'єктів [8]. Гіперспектральна камера 2, встановлена з можливістю переміщення у вертикальній і горизонтальній площинах, разом із системою освітлення 8, керованою мікроконтролером, забезпечує покращене виявлення мікро- та макропошкоджень тканин яблук і підвищує точність їх класифікації.

Опис технологічного процесу ідентифікації плодів. Технологічний процес на лінії з оптичною системою детектування пошкоджень тканин яблук організовано таким чином: плоди з транспортного засобу надходять на робочу поверхню столу 3. Під час руху яблук по гумових роликах гіперспектральна камера 2, закріплена у підвісі 4, приводиться в рух кроковими електродвигунами 5, які переміщують її по напрямних 6 за допомогою рейкових передач 7. Камера

здійснює переміщення у вертикальному та горизонтальному напрямках, виконуючи сканування плодів під дією розсіяного світлового потоку [8]. Встановлена система освітлення 8 сортувальної поверхні дає змогу підвищити освітленість об'єктів, скоротити час сканування, ідентифікації мікро- та макропошкоджень тканин плодів яблуні, вибраковування та відведення пошкоджених плодів. Для цього використовувалися галогенні лампи Camelion GU10 35W, встановлені над робочою поверхнею на підвісі 4. Камера 2 передає зображення до блока керування (ноутбука), програмне забезпечення якого забезпечує розпізнавання та порівняння з еталонними параметрами, класифікацію об'єкта сортування, визначення його класу та подальше вилучення невідповідних плодів із потоку.

Висновки по розділу

Проведено обґрунтування параметрів модуля оптичної ідентифікації плодів яблуні на основі аналізу напружено-деформованого стану конструкції та умов безперешкодного руху плодів по роликовому транспортеру. Обрано П-подібну форму конструкції з метою спрощеного впровадження на типові лінії сортування агропромислового комплексу. Розрахунки напружено-деформованого стану та аналіз кінематики транспортування плодів дали змогу визначити конструктивні й експлуатаційні параметри розроблюваного модуля. Максимальний прогин у центрі рейкових напрямних HSAC GHR15 становив не більше 0,5 мм, що не впливає на процес сканування та не створює перешкод під час переміщення камери. Оптимальний рух плодів по роликовому транспортеру досягається за зазору між роликами 0,11–0,125 м і щільності розміщення до 12 яблук на 1 пог. м, при цьому запобігається защемленню плодів і втратам продукції. Швидкісні параметри ключових компонентів модуля, а саме каретки з камерою, роликового транспортера та швидкість сканування камери, синхронізовані й перебувають у діапазоні 0,05–0,07 м/с.

Розроблено модуль оптичної ідентифікації, що включає систему рейкових напрямних – 6 шт. і гвинтових напрямних – 3 шт., платформи на профільних опорах – 3 шт., гіперспектральну камеру сканувального типу – 1 шт., датчики зворотного зв'язку — 3 шт., контролер ATmega168 – 1 шт. Модуль забезпечує переміщення камери зі швидкістю 0,01–0,1 м/с над роликівим транспортером за заданими у програмі мікроконтролера точками в просторовій системі координат гіперспектральної камери.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Опис методики гіперспектральної зйомки при сортуванні яблук

Для виконання завдань зі збору, візуалізації та обробки гіперспектральних зображень у ході дослідження застосовувалися спеціалізовані програми: «SpecGrabber» – для налаштування параметрів зйомки та вилучення спектральних даних, «CubeCreator» – для формування і обробки гіперспектральних кубів, а також «Gelion» – для моделювання і розрахунку характеристик освітлювальної системи.

Використання зазначеного програмного забезпечення гарантувало високу точність відтворення спектральної інформації та забезпечило можливість оптимізації параметрів освітлення і зйомки під час сканування яблук.

Зйомку плодів здійснювали із застосуванням програми «SpecGrabber» (рис. 1), у якій встановлювали параметри зйомки.

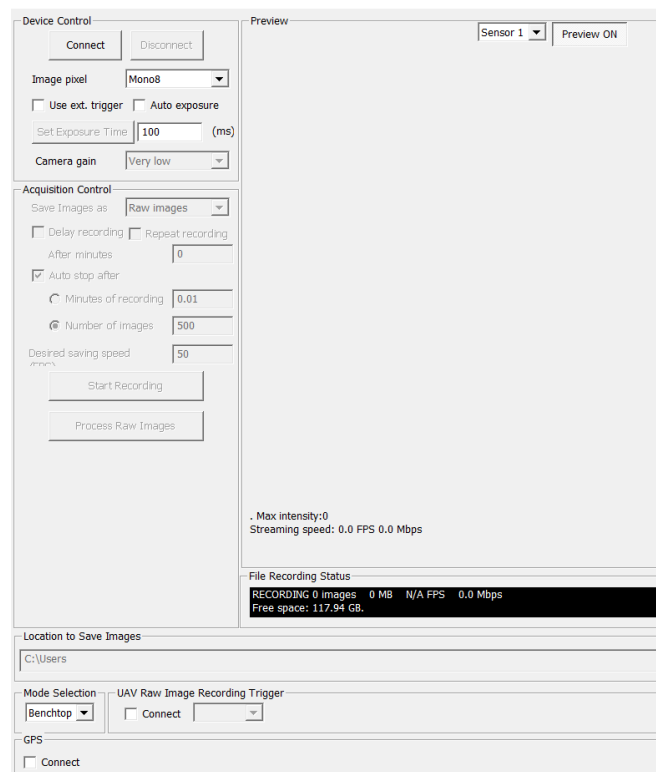


Рис. 3.1. Головне вікно програми SpecGrabber

Графічний інтерфейс SpecGrabber складається з п'яти панелей: «Device Control», «Acquisition Control», «Preview», «Status» та «Location to Save Images».

Елементи графічного інтерфейсу користувача та їх функції описані нижче (рис. 3.2).

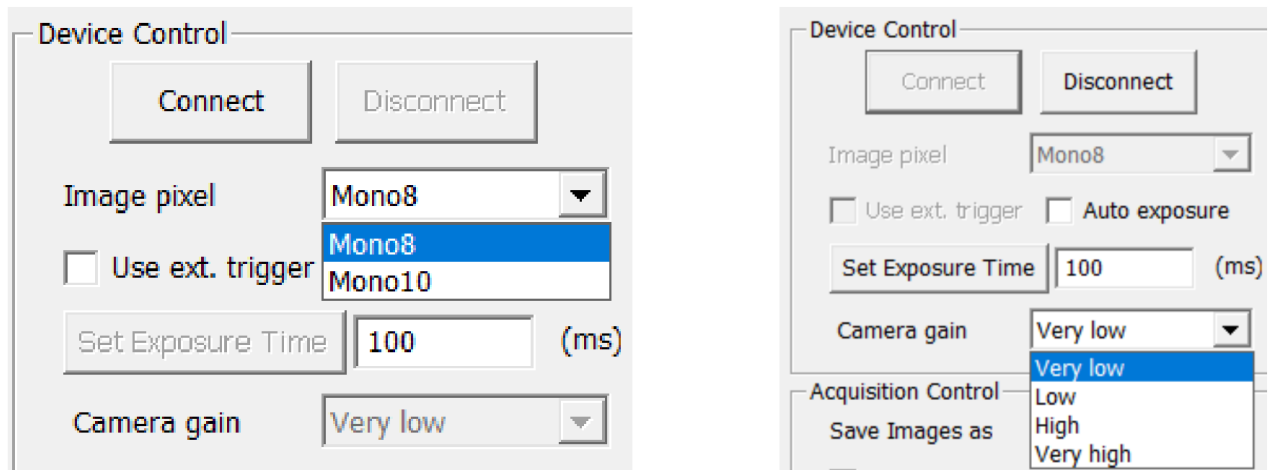


Рис. 3.2. Вікно налаштування «Device Control» у програмі «SpecGrabber»

Для виконання підключення за допомогою кабелів із роз'ємами USB 3.0 до комп'ютера під'єднуються 2 датчики. Лише після цього необхідно запустити SpecGrabber, після чого у правому верхньому куті з'явиться список «Sensor 1» / «Sensor 2» (рисунк 3), у якому можна обрати потрібний датчик. Вікно «Preview» при натисканні «Connect» відобразить зображення з потрібного датчика, однак перед цим програма виконає перевірку наявності підключеної камери. Перед натисканням цієї кнопки можна змінити формат даних, що надходять від сенсорів. Операція виконується за допомогою налаштування Image pixel format. Для першого датчика доступні варіанти Mono8 і Mono10. У першому випадку пікселі зберігаються як 8 біт (1 байт). У другому – пікселі зберігаються як 16 біт (2 байти), причому 10 із них зарезервовані під дані. Дана версія камери підтримує для другого датчика лише Mono8. Крім того, можливо налаштування часу експозиції камери: необхідно вказати потрібне значення в мс і натиснути Set Exposure Time. Якщо активовано прапорець Auto exposure, натискання цієї кнопки дозволить програмі автоматично підібрати оптимальне значення експозиції – це приблизно 90% інтенсивності насичення (приблизно 230 для

Mono8 і Mono10) при поточному посиленні камери. Список «Camera gain» дає можливість налаштувати підсилення камери для отримання якісніших зображень за слабкого або надмірно яскравого освітлення. Доступні режими: Very Low, Low, High та Very High.



Рис. 3.3. Вікно «Preview» у програмі SpecGrabber

Параметри, що встановлюються у вікні «Acquisition Control», використовуються під час налаштування процесу збереження зображення. Це застосовується при формуванні так званої попередньо визначеної файлової системи. Отримані дані призначені для подальшої обробки у CubeCreator, а також для формування гіперспектральних зображень. Кожен сенсор отримує по три підпапки в каталозі, зазначеному через опцію «Location to Save Images». Це: White reference – для усереднених еталонних білих знімків; Dark background – для усереднених темних (фонових) знімків; Raw images – для вихідних гіперспектральних зображень. Ці еталонні зображення є необхідними для обчислення відбивної здатності гіперспектральних даних. Можна розпочати запис білого або темного фону, натиснувши White reference або Dark background у випадяючому списку Save Image as. При виборі Raw images запускається запис

кадрів досліджуваного об'єкта (рис. 3.4). Запис білого і темного фону перед зйомкою є обов'язковим.

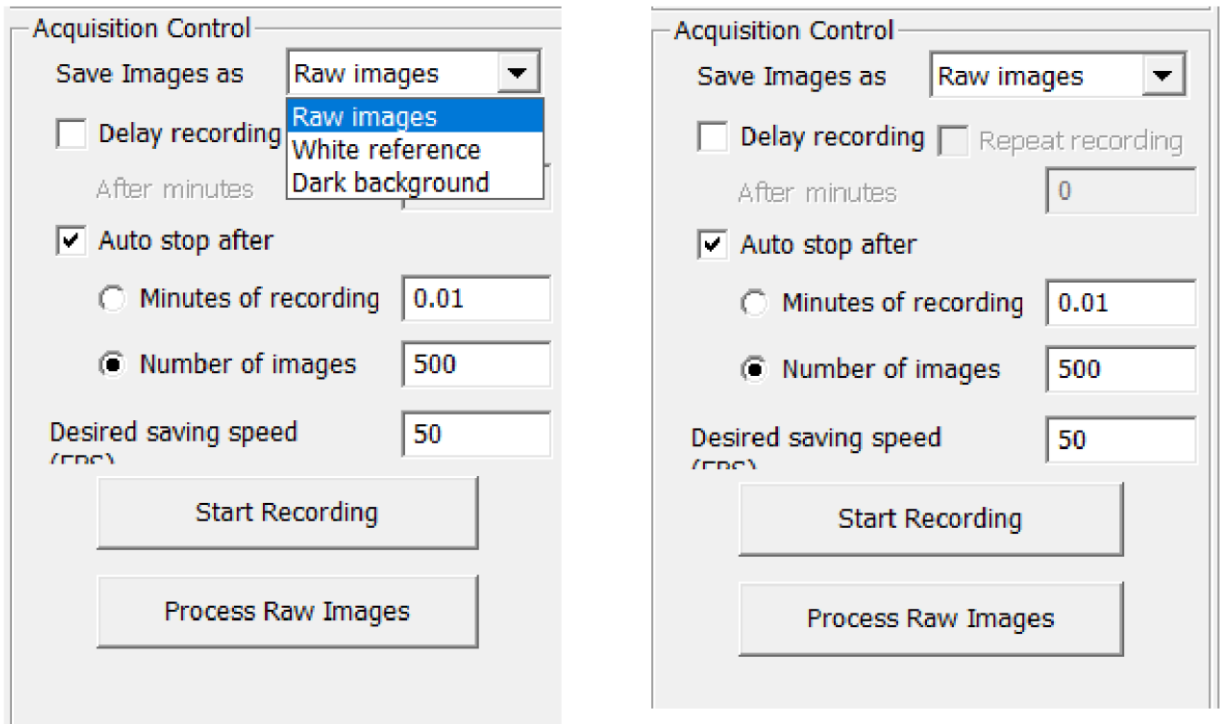


Рис. 3.4. Вікно «Acquisition Control» у програмі «SpecGrabber»

Ключовими параметрами зйомки, що суттєво впливають на якість отриманого зображення, є час експозиції (exposure) і коефіцієнт цифрового підсилення (gain).

У межах дослідження виникла необхідність експериментально підібрати оптимальні значення зазначених параметрів під час попередніх тестових випробувань. За результатами проведених експериментів були обрані автоматичне налаштування експозиції (auto exposure) та мінімально можливий рівень цифрового підсилення (very low, VL).

Далі для калібрування гіперспектрометра послідовно сканували стандарт 100% відбиття – біле тіло формату А4 з відбивного матеріалу (white reference) та записували значення темних сигналів (dark background).

Основний алгоритм зйомки:

1. закріпити камеру, налаштувати фокус;
2. помістити під об'єktiv білий еталон, що поставляється з камерою;
3. у налаштуваннях обрати запис білого референса (white reference);

4. після завершення запису прибрати білий еталон і закрити об'єкти чорною кришкою;
5. вибрати запис чорного референса (black reference);
6. після запису зняти кришку й розмістити об'єкт зйомки;
7. вибрати raw images замість black reference;
8. налаштувати камеру на зйомку за часом або за кількістю кадрів і запустити процес сканування.

Обробку raw-даних для формування гіперкубів виконували за допомогою програми BaySpec CubeCreator 2100 (рис. 3.5).

BaySpec CubeCreator – це Windows-додаток, призначений для обробки вихідних зображень, отриманих камерами BaySpec, з подальшим перетворенням їх у гіперспектральні куби. Функціонал програми передбачає: перегляд і перевірку білого еталону; перегляд темного фону та необроблених зображень; перегляд гіперспектральних кубів та окремих спектральних смуг. Програмне забезпечення сумісне з операційними системами Windows 10 та Windows 7.

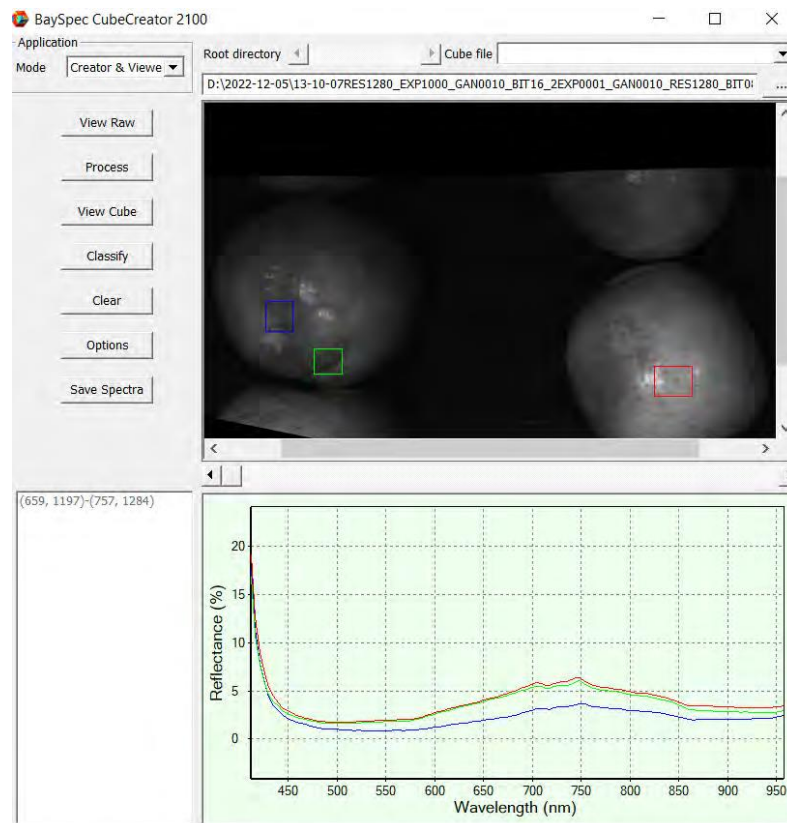


Рис. 3.5. Створення гіперкуба в програмі «CubeCreator 2100»

Режим Creator & Viewer: у цьому режимі програма дозволяє користувачу переглядати записані необроблені зображення, обробляти їх для створення файлів гіперспектральних кубів, відображати спектри з куб-файлів та виконувати класифікацію на основі спектральних даних.

Режим Viewer Only: у цьому режимі програма працює лише як засіб перегляду файлів гіперспектрального куба. Усі функції, пов'язані зі створенням гіперспектральних кубів, вимикаються.

CubeCreator здатний приймати 16-бітні зображення як вхідні дані. Проте всі вихідні файли відображаються і зберігаються у 8-бітному форматі.

CubeCreator надає базові функції класифікації гіперспектральних даних (сегментації зображень), які групують пікселі з подібними спектрами на основі алгоритму лінійної кореляції Пірсона, якщо значення кореляції перевищує порогове значення класифікації, встановлене у налаштуваннях.

Після визначення областей інтересу натискання кнопки Classify запускає процес класифікації, під час якого всі пікселі зі спектрами, подібними до вибраних областей, позначаються одним кольором. Це забезпечує швидку сегментацію гіперспектрального зображення на основі матеріалу (тобто спектральних характеристик).

Під час обробки зображень для формування гіперспектральних кубів використовували рекомендовані (стандартні) налаштування програмного забезпечення.

Програма також підтримує біннінг (Data binning) — операцію групування сусідніх пікселів або спектральних каналів для підвищення відношення сигнал/шум і зниження рівня шуму.

Біннінг було вимкнено з метою оцінки достатнього спектрального розширення.

Тематичну обробку гіперспектральних даних (розмітку областей інтересу, перегляд і експорт спектральної інформації, поканальний аналіз спектра) виконували в оригінальній програмі «Gelion» (рис. 3.6).

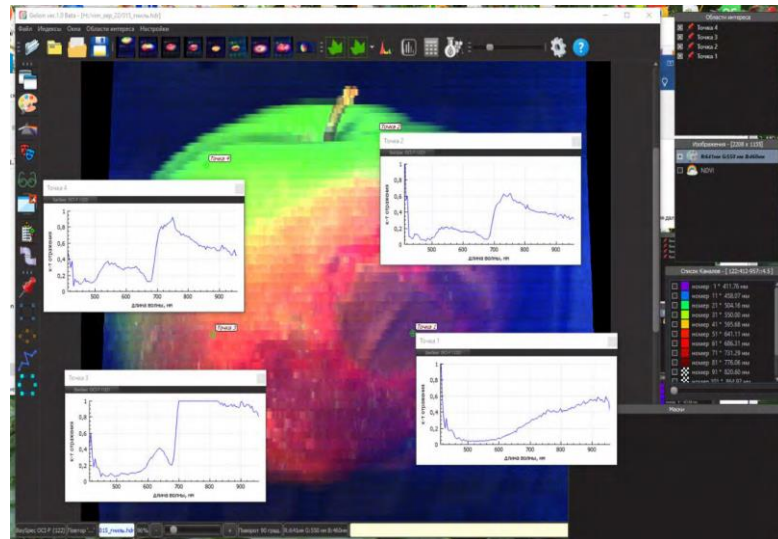


Рис. 3.6. Гіперкуб біологічного об'єкта в програмі «Gelion»

Аналіз спектрів, експортованих у цифровій формі, здійснювали в електронних таблицях. Достовірність відмінностей середніх значень оцінювали за t-критерієм Стьюдента, а також використовували однофакторний дисперсійний аналіз засобами Analysis Toolpack у Microsoft Excel 2025.

3.2. Результати експериментальних досліджень

Плоди яблуні (*Malus × domestica* Borkh.) (n = 100) сорту «Гала» (червоно-зеленого забарвлення) були вирощені у комерційному саду плодородної компанії «Зоринський сад» (м. Обоянь, Курська область, Росія). Плоди збирали вручну з дерева та зберігали за нормальних умов до проведення процесу сканування. Плоди, що не мали візуально помітних ознак пошкодження, знімалися разом із плодами, які мали ознаки різних ушкоджень, зокрема сонячні опіки, грибкові ураження, механічні пошкодження та забиття.

Гіперспектральні зображення були перетворені у відповідні кольорові зображення з використанням апроксимації кривих спектральної чутливості спостерігача та стандартного джерела освітлення. Два експерти виконали анотацію з використанням бітових масок за допомогою онлайн-інструмента для маркування «Supervisely», присвоївши клас «Плоди» неушкодженим тканинам і клас «Пошкодження» ушкодженим ділянкам поверхні яблука. Як фон

розглядалися немарковані частини зображення [7]. Коефіцієнт Коена на рівні пікселів між коментарями експертів для кожного зображення становив $0,93 \pm 0,05$, що визначало базову продуктивність моделі. Результати наведено для однієї з анотацій, яка використовувалася як для навчання, так і для валідації; інша анотація застосовувалася для перевірки стабільності класифікатора щодо використовуваних навчальних міток [8].

Попіксельну класифікацію було виконано за допомогою класифікаторів випадкового лісу (RF) та опорних векторів (SVC) із використанням пакета «scikit-learn Python» [7]. Далі весь набір даних було розділено у співвідношенні 80:20 між навчальним і тестовим наборами зображень. У кожному наборі кожен піксель спочатку представлявся вектором ознак, що складався або зі спектральних коефіцієнтів відбиття, або зі значень вегетаційних індексів (VI) та локальних бінарних шаблонів (LBP), після чого з кожного зображення вилучалися вектори інформативних ознак. Класифікатори навчалися на вибірковій підмножині (до 3000 пікселів на зображення, менше 1 % від загальної кількості пікселів) отриманих векторів ознак. Після цього, застосувавши ті самі перетворення до всього набору даних, було отримано результати для всіх пікселів, які порівнювалися з еталонними даними (експертною анотацією) [69].

Для виконання якісного та кількісного аналізу пошкоджень яблук методом гіперспектральної візуалізації проведено розрахунки кореляційних зв'язків між коефіцієнтами відбиття у різних спектральних діапазонах і фізіологічними станами досліджуваних зразків. Виявлені залежності стали основою для визначення спектральних і гіперспектральних ознак, значущих для автоматичного розпізнавання дефектів, зокрема гнилі, сонячних опіків, парші та інших патологічних змін [10]–[13].

Порівняння відбивних характеристик у зонах впливу основних пігментів (антоціанів, хлорофілів, каротиноїдів і бурих меланінових пігментів) дало змогу ідентифікувати спектральні області, що найбільш чутливо реагують на біохімічні зміни в тканинах пошкоджених плодів.

Зазначені спектральні маркери надалі застосовувалися під час формування навчальних наборів даних і побудови векторів ознак для алгоритмів машинного навчання, призначених для покомпонентної класифікації гіперспектральних зображень.

Графічні результати, наведені на рис. 3.7 і 3.8, отримані в ході комплексного аналізу відбивних спектрів різних ділянок плодів і слугують підґрунтям для розроблення діагностичних моделей, що реалізують автоматичне виявлення дефектів на основі взаємопов'язаних спектральних і текстурних ознак [4], [5].

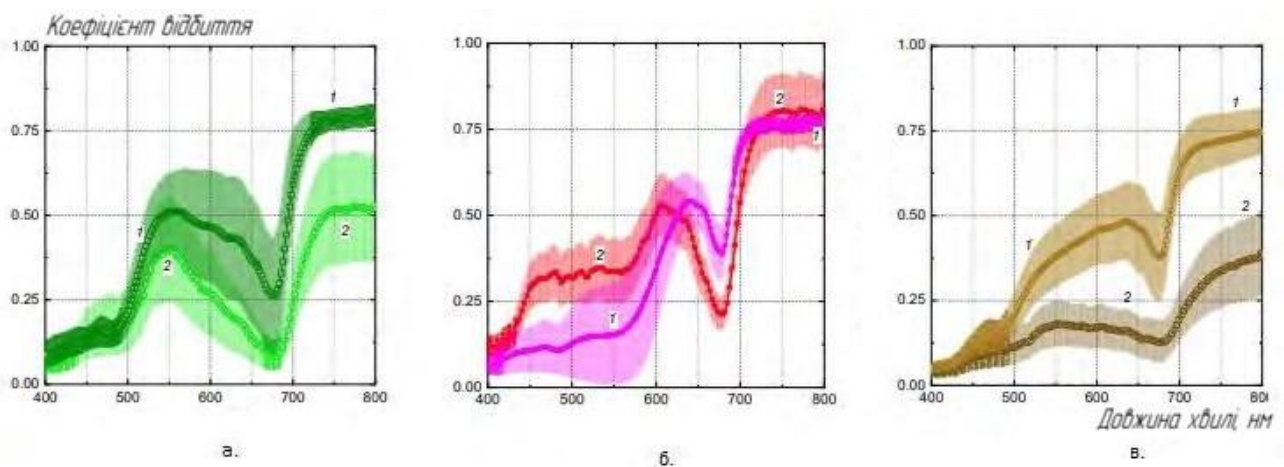


Рис. 3.7. Характерні спектри відбиття для трьох типів ділянок поверхні плодів яблуни: а – здорових зелених зон; б – здорових червоних зон; в – пошкоджених коричневих зон.

На рис. 3.7 наведено спектри відбиття яблук, зареєстровані у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах (Vis-NIR, 400–800 нм). Графіки відповідають різним типам зразків: а – здорове зелене яблуко, б – здорове червоне яблуко, в – пошкоджене яблуко. Напівпрозорі області навколо спектральних кривих відображають стандартне відхилення, яке характеризує варіабельність спектрів між різними точками вимірювань.

В усіх трьох випадках спостерігаються характерні спектральні особливості, що відповідають фізіологічному стану плодів. На графіках чітко видно підвищене відбиття у ближній інфрачервоній області (750–800 нм) – від 75 % до 85 %, що є типовою ознакою здорових яблук. Неушкоджені плоди

демонструють «плоский» спектр у діапазоні 720–850 нм (особливо виражено на графіку **а**). Водночас пошкоджені зразки (графік **в**) показують підвищену варіабельність у цьому діапазоні, причому значення кривої інколи перевищують 1,0, що може бути пов'язано з похибками калібрування або оптичними ефектами пошкодженої поверхні [6].

У видимій області спектра чітко простежуються особливості, зумовлені поглинанням світла основними пігментами [87]: хлорофілами *a* і *b* (Chl *a*, Chl *b*), каротиноїдами (Car) та антоціанами (AnC).

Для всіх зразків характерні виражені смуги поглинання:

1. для Chl *a* – максимум у районі 678 нм;
2. для Chl *b* – інтенсивне поглинання в області близько 650 нм;
3. для AnC (особливо у червоних яблуках) – зниження відбиття в діапазоні 550–600 нм і наявність плеча поблизу 550 нм (рисунок 34, **б**).

Графік для червоних яблук демонструє виражене поглинання у короткохвильовому діапазоні (400–600 нм), зумовлене високим вмістом антоціанів, що визначає червоне забарвлення плодів. Це спричиняє зміщення максимумів відбиття у довгохвильову область і зменшення значень коефіцієнта відбиття у зеленій зоні спектра (550–600 нм) [8].

Пошкоджені зразки характеризуються зміненими відбивними властивостями: менш вираженим піком у діапазоні 700–800 нм і згладженою спектральною кривою, що свідчить про деградацію клітинних структур. Подібні спектральні зміни також можуть відображати порушення вмісту хлорофілів і появу продуктів розпаду в процесі гниття.

На рис. 3.8 наведено гіперспектральну криву відбиття яблука в діапазоні довжин хвиль від 400 до 800 нм.

На графіку відображено значення коефіцієнта відбиття по осі ординат і довжини хвиль по осі абсцис. Окремо виділено зони спектра, що відповідають впливу різних пігментів: антоціанів (AnC), хлорофілів (Chl) та бурих пігментів, подібних до меланіну (BR). Криві демонструють усереднені значення відбиття

від ділянок яблука з різними візуальними характеристиками – від здорових тканин до ділянок, уражених патогенами та механічними пошкодженнями [8].

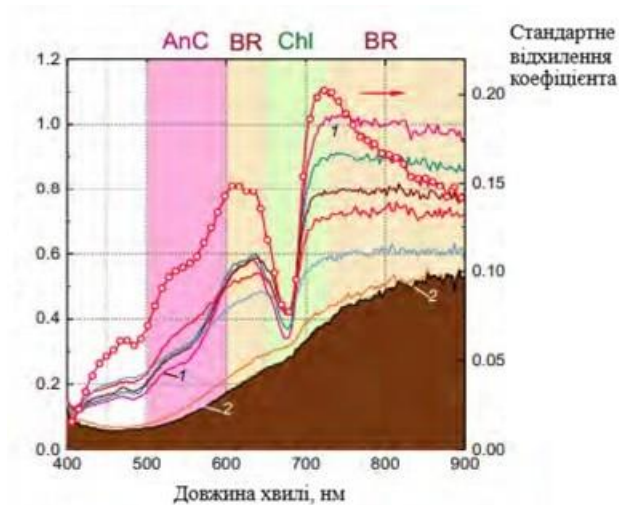


Рис. 3.8. Гіперспектральні спектри відбиття ділянок плодів яблуні.

Графік ілюструє відмінності у спектральних характеристиках досліджуваних плодів яблуні, що перебувають у різних станах: здорові (крива 1) та пошкоджені (крива 2).

На графіку рисунка 3.8 зображено кілька кривих, кожна з яких відображає усереднені спектри відбиття від певних типів ділянок поверхні плода. Кольорові лінії на графіку позначають відмінності у відбивній здатності, а штрихова заливка відображає стандартне відхилення (STD), вказуючи на рівень варіативності спектральних даних для кожної категорії ділянок.

Спектральний аналіз виявив суттєве зменшення відбиття у діапазоні 550–600 нм (область антоціанів) на ділянках із підвищеною концентрацією цих пігментів. Червоні яблука з високим вмістом антоціанів (AnC) демонструють інтенсивне поглинання у зазначеному спектральному діапазоні, на відміну від зелених яблук, у яких цей ефект виражений слабше.

Дослідження підтвердили, що здорові тканини зелених яблук мають підвищену відбивну здатність у діапазоні 700–750 нм, що зумовлено поглинанням хлорофілів (Chl a і Chl b). Натомість ділянки з фізіологічними порушеннями (початкові стадії гниття або механічні пошкодження) в цьому ж діапазоні демонструють зниження інтенсивності відбиття, спричинене

руйнуванням клітинних структур і деградацією хлорофілів. У зоні бурих меланіноподібних сполук (BR) зафіксовано додаткове зменшення коефіцієнта відбиття, особливо помітне на ділянках із темними плямами.

Отримані спектральні криві забезпечують надійне розрізнення типів тканин за їх оптичними властивостями, підтверджуючи значущість антоціанів (AnC), хлорофілу (Chl) та бурих меланіноподібних сполук (BR) у формуванні спектра відбиття. Виявлена сильна кореляція між спектральними змінами та фізіологічним станом плодів свідчить про високу ефективність гіперспектральної зйомки для неруйнівного контролю якості та діагностики пошкоджень яблук.

У межах поточного аналізу застосовувалися вегетаційні індекси, що відповідають основним групам пігментів у плодових культурах. До них належать модифікований індекс відбиття антоціанів (mARI), CI700 – чутливий показник, що відображає вміст хлорофілу (Chl), індекс, тісно пов'язаний із вмістом антоціанів (AnC) у плодах, а також модифікований синій індекс відбиття (mBRI), раніше запропонований як індикатор вмісту каротиноїдів, слабо чутливий до впливу антоціанів (AnC). Важливим доповненням є також аналіз відносної яскравості з використанням спектрального коефіцієнта відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні (NIR), на який не впливає поглинання фотонів пігментами (наприклад, R800) [9].

Спектральні показники розроблено таким чином, щоб мінімізувати вплив змін умов освітлення, водночас просторовий розподіл видимої яскравості містить інформацію про геометрію об'єкта.

Встановлено, що класифікатор випадкового лісу, який використовує вегетаційні індекси та локальні бінарні шаблони (VI + LBP), є найбільш чутливим і точним. Наступним за ефективністю є класифікатор, що застосовує необроблені значення коефіцієнта відбиття без зменшення спектральної дискретизації. Продуктивність методу опорних векторів (SVC) і класифікатора випадкового лісу (RF) була близькою, проте метод опорних векторів показав кращі результати при використанні нетрансформованих ознак порівняно з

вегетаційними індексами як вхідними даними та виявився більш чутливим до зменшення спектральної дискретизації. При цьому показники F_2 поступово знижувалися зі зменшенням спектральної роздільної здатності [3], чого не спостерігалося для класифікатора випадкового лісу (RF). Ефект зниження спектральної роздільної здатності внаслідок понижувальної дискретизації для обох класифікаторів був незначним доти, доки ширина змодельованого спектрального каналу не досягала 36 нм.

Приклад візуалізації об'єктів, що використовувалися для формування вегетаційних індексів і класифікації текстур, наведено на рисунку 3.9.

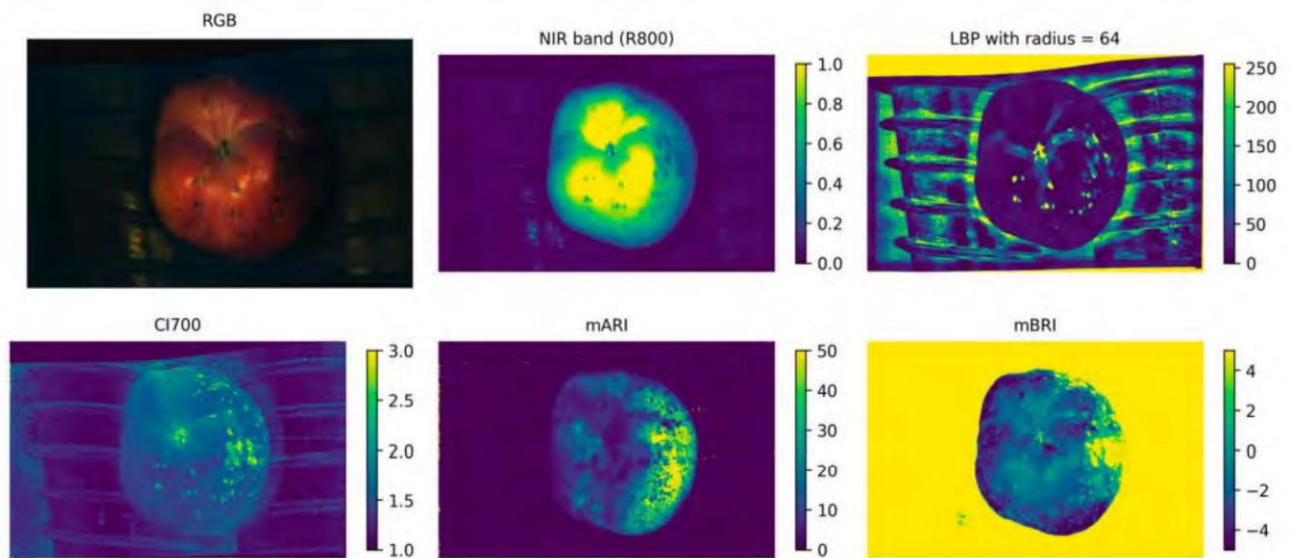


Рис. 3.9. Візуальне представлення деяких ознак, що використовуються для класифікації здорових і пошкоджених ділянок плода.

Проведено тестування різних методів обробки даних гіперспектрального відбиття з метою виявлення пошкоджених зон яблук, при цьому застосовувався підхід, заснований на алгоритмах машинного навчання (ML). Ефективність класифікації оцінювалася для ознак різного типу з використанням алгоритмів випадкового лісу (RF) та методу опорних векторів (SVC). Додатково досліджувався вплив зниження спектральної роздільної здатності на точність класифікації [3].

Обидва методи забезпечили отримання детальних даних про спектральні характеристики відбиття, пов'язані з накопиченням антоціанів (AnC),

фотоокиснювальними пошкодженнями (сонячними опіками) та некротичними змінами клітин, спричиненими фітопатогенами. У гіперспектральних даних виявлено кореляцію між значеннями коефіцієнтів відбиття на довжинах хвиль 550 нм і 700 нм, а також зниження цих показників у червоних та/або пошкоджених плодів [3].

За результатами попиксельної класифікації встановлено, що неінвазивне виявлення пошкоджень плодів із використанням гіперспектральних зображень можливе з точністю, порівнянною з точністю експертів-людей.

Висновки по розділу

У ході досліджень було розроблено методику збору, зберігання та обробки гіперспектральних зображень плодів яблуни, яка забезпечує оцінювання їх фізіологічного стану. Хвороби та пошкодження плодів спричиняють зменшення коефіцієнта відбиття у спектральному діапазоні 550–700 нм, що зумовлено руйнуванням пігментів хлорофілу та антоціанів. Встановлено, що на довжинах хвиль 550 нм і 700 нм відбивна здатність зменшувалася на 15–20 %.

Під час експерименту, проведеного з варіюванням зазначених факторів, було виконано статистичну обробку даних у програмному середовищі PlanExp B-D13 v.1.0, у межах якої визначено оптимальні параметри модуля оптичної ідентифікації для отримання гіперспектральних знімків. Оптимальна швидкість переміщення каретки з гіперспектрометром, за якої забезпечувалося отримання якісних гіперспектральних зображень, становила $V_{\text{кар}} = 0,04 \text{ м/с}$; значення світлового потоку системи освітлення робочої поверхні роликowego транспортера – 2 79,1 лм; оптимальна відстань від об'єктива камери до плода – 0,222 м.

Порівняльний аналіз алгоритмів класифікації показав, що високу точність до 98 % – на вибірковій підмножині плодів яблуни продемонстрував метод випадкового лісу (RF), навчений на основі ознак вегетаційних індексів і

текстурних характеристик (VI + LBP). Водночас встановлено, що даний метод потребує значних обчислювальних ресурсів, що знижує його ефективність за потокового сортування та збільшує тривалість процесу сканування до 30 с.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Аналіз технічного рівня та тенденцій розвитку систем сканування біологічних об'єктів показав, що застосування наявних технологій проведення спектральних вимірювань у поєднанні з нейромережевими алгоритмами класифікації має значний потенціал практичного використання та здатне забезпечувати високу достовірність класифікації плодів яблуні з точністю понад 95 %. Встановлено, що недотримання чинних стандартів (відсутність зовнішніх і внутрішніх дефектів, відповідність розмірам, формі та ступеню стиглості) під час сортування призводить до збільшення втрат при зберіганні до 20–30 %. Допуск шорсткого побуріння шкірки (іржі) на поверхні плодів: для вищого сорту – категорично не допускається; для першого сорту – не більше 10 % поверхні плода; для другого сорту – до 25 %. Механічні пошкодження не допускаються у вищому сорті; у першому сорті дозволяються пошкодження глибиною до 0,5 см, у другому – до 1 см. Для підвищення ефективності розпізнавання дефектів і хвороб плодів яблуні за потокового сортування необхідне застосування автоматизованих систем контролю якості з використанням спектрального аналізу та комп'ютерного зору.

Обґрунтовано параметри модуля оптичної ідентифікації плодів яблуні на основі аналізу напружено-деформованого стану конструкції та умов безперешкодного руху плодів по роликовому транспортеру:

- максимальний прогин у центральній зоні рейкових напрямних не перевищує 0,5 мм;
- максимальна кількість плодів на 1 пог. м – не більше 12 шт. яблук; діаметр зазору D_p між роликами транспортера обрано в діапазоні 0,11–0,125 м з умови відсутності защемлення плодів, а також їх втрат;
- рух каретки з камерою, переміщення плодів по роликовому транспортеру та процес сканування синхронізовані й здійснюються зі швидкістю 0,05–0,07 м/с.

У результаті експериментальних досліджень прототипу модуля оптичної ідентифікації для сортування плодів встановлено, що:

- оптимальна швидкість переміщення каретки з гіперспектрометром, за якої забезпечувалося отримання якісних гіперспектральних зображень, становила $V_{\text{кар}} = 0,4 \text{ м/с}$; значення світлового потоку системи освітлення робочої поверхні роликового транспортера – 2479,1 лм; оптимальна відстань від об'єктива камери до плода – 0,222 м;
- класифікатор випадкового лісу (RF), навчений на ознаках, що включають вегетаційні індекси та локальні бінарні шаблони (VI + LBP), продемонстрував високу точність 97–98,2 % у розпізнаванні пошкоджених плодів на малій вибірці до 100 шт. Водночас даний метод характеризується значними обчислювальними та часовими витратами, що збільшує тривалість процесу розпізнавання плодів до 30 с;
- керовані методи класифікації (двійкове кодування, максимальна правдоподібність, мінімальна відстань, паралелепіпед, метод опорних векторів) мають вищу точність порівняно з некерованими методами (метод самоорганізації та k -середніх) під час класифікації гіперспектральних зображень для виявлення пошкоджень яблук. Найбільш збалансованим за точністю (до 86 %) та обчислювальною ефективністю на великій вибірці виявився метод опорних векторів (SVM).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Liu J., Sun J., Wang Y., Liu X., Zhang Y., Fu H. Non-Destructive Detection of Fruit Quality: Technologies, Applications and Prospects. *Foods* 2025, 14(12), 2137; <https://doi.org/10.3390/foods14122137>.
2. Liu J., Sun J., Wang Y., Liu X., Zhang Y., Fu H. Non-Destructive Detection of Fruit Quality: Technologies, Applications and Prospects. *Foods* 2025, 14(12), 2137; <https://doi.org/10.3390/foods14122137>.
3. Seki H, Murakami H, Ma T, Tsuchikawa S, Inagaki T. URL: <https://doi.org/10.3390/foods13142274>.
4. Данченков В.О., Данченков Я.В. Розробка роботизованого комплексу сортування фруктів на основі штучного інтелекту. Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2025). Вісімнадцята міжнародна науково-практична конференція 20-21 травня 2025 р., Київ, Україна. К.: КАІ, 2025С. 26-28.
5. Qin Y., Jia W., Sun X. Development of electronic nose for detection of micro-mechanical damages in strawberries. *Sec. Nutrition and Food Science Technology Volume 10 – 2023*. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1222988>.
6. Qin, J., Lu, R., & Kim, M. S. Hyperspectral imaging for food quality and safety inspection. *Applied Spectroscopy Reviews*, 48(1), 1–30, 2013.
7. Lorente, D., Aleixos, N., Gómez-Sanchis, J., & Blasco, J. Recent advances and applications of hyperspectral imaging for fruit and vegetable quality assessment. *Food and Bioprocess Technology*, 5, 1121–1142, 2012.
8. ElMasry, G., Sun, D. W., & Allen, P. Near-infrared hyperspectral imaging for predicting colour, pH and tenderness of fresh beef. *Journal of Food Engineering*, 110(1), 127–140, 2012.
9. Cubero, S., Aleixos, N., Moltó, E., Gómez-Sanchis, J., & Blasco, J. Advances in machine vision applications for automatic inspection and quality

evaluation of fruits and vegetables. *Food and Bioprocess Technology*, 4, 487–504, 2011.

10. Li, J., Rao, X., & Ying, Y. Detection of common defects on apples using hyperspectral imaging. *Journal of Food Engineering*, 110(3), 396–404, 2012.

11. Blahovec, J., & Paprštejn, F. Optische Methoden zur Qualitätsbewertung von Obst und Gemüse. *Landtechnik*, 64(4), 250–255, 2009.

12. Herppich, W. B., & Huyskens-Keil, S. Physiologische Grundlagen der Qualitätsbewertung von Obst. *Erwerbs-Obstbau*, 51, 63–70, 2009.

13. Keresztes, J. C., & Schlüter, O. Maschinelle Bildverarbeitung in der Obstsortierung. *Tagungsband Agrartechnik*, VDI Verlag, Düsseldorf, 2015.

14. Zude, M. Optische Technologien zur zerstörungsfreien Qualitätsanalyse von Obst. *Mitteilungen Klosterneuburg*, 59, 173–182, 2009.

15. Blasco, J., Aleixos, N., & Moltó, E. Visión artificial para la inspección y clasificación de frutas. *Agroindustria*, 5(2), 45–52, 2008.

16. Cubero, S., Diago, M. P., Blasco, J., Tardáguila, J., & Millán, B. Aplicación de imágenes hiperespectrales en la clasificación de productos agrícolas. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 11(3), 276–285, 2014.

17. Gómez-Sanchis, J., Lorente, D., & Blasco, J. Detección automática de defectos en frutas mediante visión artificial. *Tecnología Agroalimentaria*, 7, 33–39, 2013.

18. Якименко Р.М. Опис методики гіперспектральної зйомки при сортуванні яблук. Наукові читання – 2025: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками I-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 23 квітня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. Том 2. С. 97-102.

19. Якименко Р., Борак К. Оптичні методи та сенсорні технології для оцінювання й сортування плодів. Сучасні технології та технічний сервіс: виклики і можливості: збірник матеріалів I Міжнародної науково-практичної

інтернет-конференції (м. Кам'янець-Подільський, 16 жовтня 2025 року). Кам'янець-Подільський: Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», 2025. 290 с. С. 164-172.

20. Куликівський В.Л., Якименко Р.М. Аналіз установок для сортування яблук. XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві» (01-17 жовтня 2025 р.). URL: <http://animal-conf.inf.ua/conf.html>.