

Роман ЯКИМЕНКО

здобувач освіти 2 курсу ОС «Магістр»
спеціальності 208 «Агроінженерія»

Науковий керівник:

Костянтин БОРАК

д-р. техн. Наук, професор

Поліський національний університет, м. Житомир

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].

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.



Рис. 1. Принцип дії БІК-спектроскопії

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 передобробки 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].

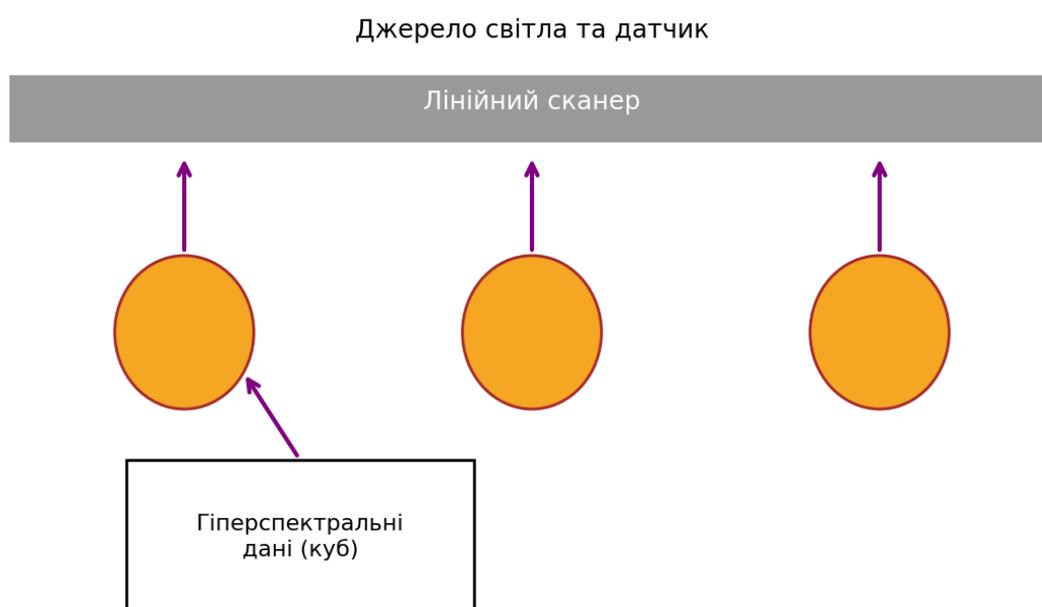


Рис. 2. Гіперспектральна зйомка.

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.

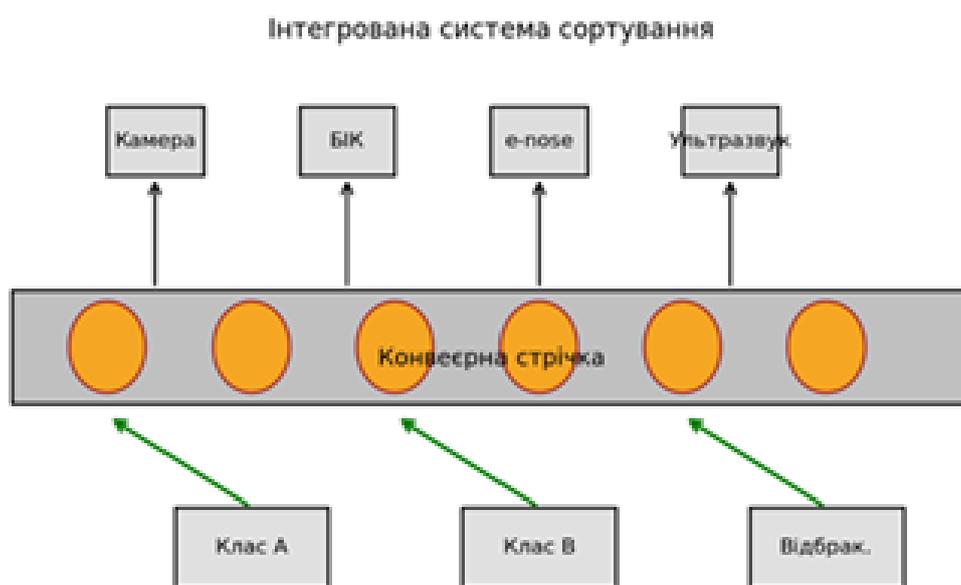


Рис. 3. Інтегрована система сортування.

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 БІК-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. БІК-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.

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. 白イチゴの糖度を可視・近赤外光で「見える化」
～果皮の色によらない選別と熟度判定の技術確立に寄与～. 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>.