Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва
Національної академії аграрних наук України

С. П. Степаненко, А. Я. Кузьмич

НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ОСНОВИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО КОНТРОЛЮ ТА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ ФРАКЦІОНУВАННЯ ЗЕРНА

Монографія

Під загальною редакцією
доктора технічних наук
Степаненка С.П.

Глеваха – 2026

https://doi.org/10.37204/978-617-640-769-0
УДК 631.362:681.7:004.89
С 79

Рецензенти:

Алієв Е. Б. – доктор технічних наук, ст. дослідник, Дніпровський державний аграрно-економічний університет

Мироненко В. Г. – доктор технічних наук, професор, Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва Національної академії аграрних наук України

Чорновол М. І. – доктор технічних наук, професор, академік НААН, Центральноукраїнський національний технічний університет

Рекомендовано до друку Вченою радою Інституту механіки та автоматики агропромислового виробництва Національної академії аграрних наук України (протокол № 9 від 14 липня 2026 року)

Степаненко С. П., Кузьмич А. Я.

С 79 Науково-технічні основи оптико-електронного контролю та керування процесами фракціонування зерна. Монографія / Під заг. ред. С. П. Степаненка. – Глеваха : ІМА АПВ НААН, 2026. – 216 с.

ISBN 978-617-640-769-0

У монографії розглянуто сучасні підходи до автоматизації процесів післязбиральної обробки зерна з акцентом на розвиток оптико-електронних методів контролю якості сепарації. Виконано аналіз сучасних технологій решітної сепарації зернових матеріалів, досліджено вплив фізико-механічних властивостей зерна на ефективність очищення, а також розглянуто традиційні системи контролю зерноочисних машин. Особливу увагу приділено перспективам застосування комп'ютерного зору, нейронних мереж та алгоритмів глибокого навчання для експрес-аналізу фракційного складу зернового потоку та оцінювання втрат повноцінного зерна. Запропоновано теоретичні основи оптико-електронного методу контролю, що базуються на математичному моделюванні масопереносу зернової суміші та переході від геометричних характеристик об'єктів до їх масових параметрів. Розроблено підхід до автоматизованої ідентифікації фракцій зернового матеріалу із застосуванням нейромережевої архітектури YOLO, а також розглянуто принципи побудови експериментального комплексу для дослідження процесів фракціонування. Наведено результати експериментальних досліджень, що підтверджують ефективність запропонованих методів у складних умовах роботи зерноочисних систем. Призначено для здобувачів другого та третього (освітньо-наукового) рівнів вищої освіти за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» та «Агроінженерія», а також для науковців і фахівців у галузі післязбиральної обробки зерна, автоматизації технологічних процесів та агроінженерії. Може бути корисним для інженерів, дослідників та практиків агропромислового комплексу.

Особистий внесок авторів Степаненко С.П. – підрозділ 1.1; розділ 2; підрозділ 3.1; розділ 4; Кузьмич А.Я. – розділ 1; розділ 3; підрозділ 4.3.

Дослідження виконано в рамках проекту № 2025.02/0002, що фінансується Національним фондом досліджень України.

УДК 631.362:681.7:004.89

© Степаненко С.П., Кузьмич А.Я., 2026
© Видавець Лисенко М.М., 2026

ISBN 978-617-640-769-0

ЗМІСТ

Вступ ……..... 6
1. Стан та перспективи автоматизації процесів післязбиральної обробки зерна 9
1.1. Аналіз сучасних технологій та засобів решітної сепарації і фракціонування зерна 9
1.1.1. Класифікація та сучасний стан технологій решітної сепарації зернового вороху …..... 9
1.1.2. Основні фактори та критерії ефективності очищення та фракціонування 37
1.1.3. Вплив фізико-механічних властивостей зерна на динаміку його фракціонування 40
1.1.4. Недоліки традиційних систем контролю процесів очищення та фракціонування зерна 43
1.1.5. Перспективи автоматизації та оптико-електронного контролю процесів фракціонування 45
1.2. Проблема втрат повноцінного зерна та методи їх контролю …. 48
1.2.1. Класифікація та природа втрат зерна в процесах післязбиральної обробки ……..... 48
1.2.2. Механічні методи контролю та запобігання втратам 52
1.2.3. Акустичні системи детектування втрат повноцінного зерна..... 53
1.2.4. П'єзоелектричні датчики: конструкція та оптимізація 54
1.2.5. Оптичні технології та системи комп'ютерного зору 55
1.2.6. Ємнісні, ультразвукові та радарні датчики рівня …..... 58
1.2.7. Економічна ефективність та перспективні напрями вдосконалення засобів контролю сепарації зернового вороху 62
……
1.3. Огляд методів комп'ютерного зору та глибокого навчання в агроінженерії .....…….. 64
1.3.1. Еволюція архітектур глибокого навчання та згорткових нейронних мереж 65
1.3.2. Практичне застосування комп'ютерного зору в агропромисловому виробництві 68
1.3.3. Технічні виклики при оптичному аналізі та методи їх подолання 72
1.3.4. Провідні розробки, комерційні рішення та стартапи у сфері застосування комп’ютерного зору 75

1.3.5. Перспективи розвитку методів комп'ютерного зору в агропромисловому комплексі…… 77
Висновки до розділу 1 та постановка мети і завдань дослідження... 78
2. Теоретичне обґрунтування методу оптико-електронного контролю процесів фракціонування зерна …… 81
2.1. Математична модель масопереносу зернової суміші на решітних станах зерноочисних машин 81
2.2. Обґрунтування переходу від геометричних параметрів (площі проекції) до масових характеристик об'єктів 83
2.3. Дослідження впливу фізико-механічних властивостей зерна на точність оптичної детекції 90
2.4. Розробка алгоритму ідентифікації фракцій на базі архітектури нейромережі YOLOv11 ……..... 100
2.5. Спектральний аналіз контурів зернівок та його застосування для ідентифікації фракцій …….... 103
2.5.1. Параметричне задання контуру зернівки 103
2.5.2. Перехід до інваріантної системи координат 105
2.5.3. Спектральне представлення Фур'є ……..... 106
2.5.4. Інформативність гармонік 115
2.5.5. Статистична модель розпізнавання 117
2.5.6. Застосування для фракціонування зерна 118
2.5.7. Зв'язок із точністю оптичної детекції 120
Висновки до розділу 2 122
3. Проектування та технічна реалізація експериментального комплексу …… 125
3.1. Розробка лабораторного макета віброрешітного сепаратора з регульованими параметрами ……. 125
3.2. Проектування інспекційних тунелів макетного зразка для дослідження потоків зернових матеріалів 132
3.3. Апаратна інтеграція периферійного обчислювального модуля (Edge AI) в систему керування зерноочисною машиною …..... 139
3.3.1. Обґрунтування та архітектура обчислювального модуля... 139
3.3.2. Інтерфейси підключення відеосенсорів 141
3.3.3. Підключення периферійних датчиків та виконавчих механізмів 141
3.3.4. Промислове виконання та завадостійкості системи 142
3.4. Методика встановлення масово-піксельних коефіцієнтів для різних сільськогосподарських культур .....…….. 143
3.5. Методика формування специфічних датасетів та інженерна методологія навчання нейромережевої моделі YOLOv11 149

3.5.1. Формування репрезентативного набору даних …….. 150
3.5.2. Анотування (розмітка) та аугментація даних …… 152
3.5.3. Інженерна методологія навчання моделей архітектури YOLOv11 ……..……... 154
3.5.4. Візуалізація результатів та налагодження …….. 157
Висновки до розділу 3 158
4. Експериментальні дослідження та верифікація оптимізованої нейромережевої моделі контролю втрат зерна 160
4.1. Амплітудно-частотна характеристика робочих органів макета та обґрунтування матриці структури датасету YOLOv11 160
4.1.1. Аналіз отриманої амплітудно-частотної характеристики решета макетного зразка …….. 160
4.1.2. Методика цифрової зйомки зернового шару на решеті … 163
4.1.3. Обґрунтування структури класів та двокласової розмітки.. 166
4.1.4. Обсяг вибірки та топологія розподілу даних……. 169
4.2. Оцінка метрик точності (Precision, Recall, mAP) оптимізованих моделей детекції та сегментації ……. 172
4.2.1. Аналіз динаміки навчання та збіжності моделей ……. 172
4.2.2. Тестування моделей 174
4.3. Апаратна оптимізація моделей комп'ютерного зору TensorRT та дослідження їх динамічних характеристик на платформі NVIDIA Jetson Orin .....…..... 177
4.3.1. Методика експериментального оцінювання часових характеристик виклику 178
4.3.2. Дослідження конфігурацій оптимізації моделей сегментації та детекції 179
4.4. Програмна реалізація та калібрування геометричного методу визначення площі втрат за обмежувальними рамками (Bounding Boxes) …..... 181
4.4.1. Математична модель геометричного перерахунку 181
4.4.2. Алгоритм розрахунку коефіцієнта заповнення решета та метрологічне забезпечення визначення реальної швидкодії 183
4.4.3. Графічна візуалізація та інтерфейс оператора 184
4.5. Порівняльний аналіз розробленого оптико-електронного методу з класичними тензометричними та акустичними системами контролю втрат ….....……... 190
4.5.1. Фізико-технічні обмеження класичних систем контролю втрат 190

4.5.2. Порівняльна характеристика за основними метрологічними та експлуатаційними параметрами 191
4.5.3. Переваги переходу від умовних індикаторів до фізичних коефіцієнтів заповнення 192
Висновки до розділу 4 193
Висновки 195
Список використаних джерел 197
Додаток А. Лістинг розробленого програмного забезпечення 208

ВСТУП

Підвищення ефективності та якості технологічних процесів післязбиральної обробки зерна є одним із вирішальних чинників забезпечення високої конкурентоспроможності насіннєвого матеріалу та задоволення суворих вимог переробної промисловості. Ключовою ланкою цих процесів є фракціонування зернового потоку – розділення вихідної зернової маси за фізико-механічними, геометричними та оптико-технологічними властивостями на якісні фракції (повноцінне зерно, фуражна фракція, подрібнені частки та побічні домішки). Під час фракціонування кукурудзи та інших зернових культур висока інтенсивність подачі та динамічне «кипіння» шару вороху на робочих органах зерноочисних машин створюють складності для забезпечення високої точності сепарації та оперативної оцінки її показників.

Традиційні системи технологічного контролю процесів фракціонування, що базуються на застосуванні п'єзоелектричних та тензометричних датчиків ударного типу, практично вичерпали свій потенціал. Працюючи в умовах жорсткого нелінійного вібраційного поля сепарувальних решіт та вібропневмостолів, такі системи мають низьку селективність і не здатні диференціювати механічний імпульс від влучання повноцінного зерна від удару важких частинок стрижня качана чи сторонніх включень. Це унеможливлює точний фракційний аналіз у режимі реального часу та призводить до невиправданих втрат якісної насіннєвої фракції у відходах.

Сучасним вектором подолання вказаної проблеми є впровадження концепції обчислень на краю мережі (*Edge AI*) та комп'ютерного зору, які передбачають створення інтелектуальних оптико-електронних систем для безконтактного аналізу фракційного складу зернового потоку безпосередньо в процесі його руху. Перехід від реєстрації неупорядкованих механічних імпульсів до цифрового аналізу геометричних характеристик і геометрії компонентів дозволяє здійснювати прецизійну семантичну класифікацію фракцій і проводити безперервний вимір коефіцієнтів заповнення та виходу цільових продуктів.

Метою монографії є теоретичне обґрунтування та розробка науково-технічних основ і методів оптико-електронного контролю та керування процесами фракціонування зерна в реальному часі на основі

інтеграції технологій комп'ютерного зору (YOLOv11) та енергоефективних периферійних обчислювальних платформ (Edge AI).

У монографії висвітлено комплексний підхід до розв'язання задачі селективного моніторингу фракціонування, що охоплює:

– аналіз фізико-механічних та нелінійних динамічних характеристик решітного стану зерноочисної машини (його амплітудно-частотної характеристики) та їх впливу на формування розподілу фракцій у робочій зоні;
– синтез та обґрунтування оптимальної нейромережевої архітектури детекції, її компіляцію у середовищі TensorRT (FP16) та застосування механізмів оптимізації пам'яті;
– розробку та математичне калібрування геометричного методу визначення площі втрат та співвідношення фракцій за допомогою вписаних еліпсів із залученням коефіцієнта формами зерна;
– програмно-апаратну реалізацію комплексу на платформі NVIDIA Jetson Orin для обчислення коефіцієнта заповнення робочої поверхні K_{fill}, % та оцінювання метрологічної швидкодії FPS_{real};
– порівняльний аналіз розробленого оптико-електронного методу з існуючими тензометричними та акустичними системами контролю, що доводить його високу завадостійкість та селективність при розділенні зернової маси на фракції.

Монографія розрахована на наукових працівників, інженерно-технічних фахівців у галузі сільськогосподарського машинобудування та розробників обладнання для післязбиральної обробки і фракціонування зерна, фахівців з систем комп'ютерного зору, а також докторантів, аспірантів і студентів старших курсів відповідних спеціальностей.

РОЗДІЛ 1

СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ПІСЛЯЗБИРАЛЬНОЇ ОБРОБКИ ЗЕРНА

1.1. Аналіз сучасних технологій та засобів решітної сепарації і фракціонування зерна

1.1.1. Класифікація та сучасний стан технологій решітної сепарації зернового вороху

Використання універсальних зерноочисних машин дає змогу зменшити кількість необхідного обладнання у складі технологічних ліній, знизити витрати на їх оснащення та підвищити експлуатаційну надійність. Закордонні виробники зазвичай не поділяють ці машини за функціональним призначенням, наголошуючи на їх багатофункціональності. Такі агрегати придатні як для підготовки продовольчого зерна, так і для отримання насіннєвого матеріалу, залежно від схеми комплектування решітних систем. У деяких випадках вони також застосовуються для попереднього очищення зернового вороху.

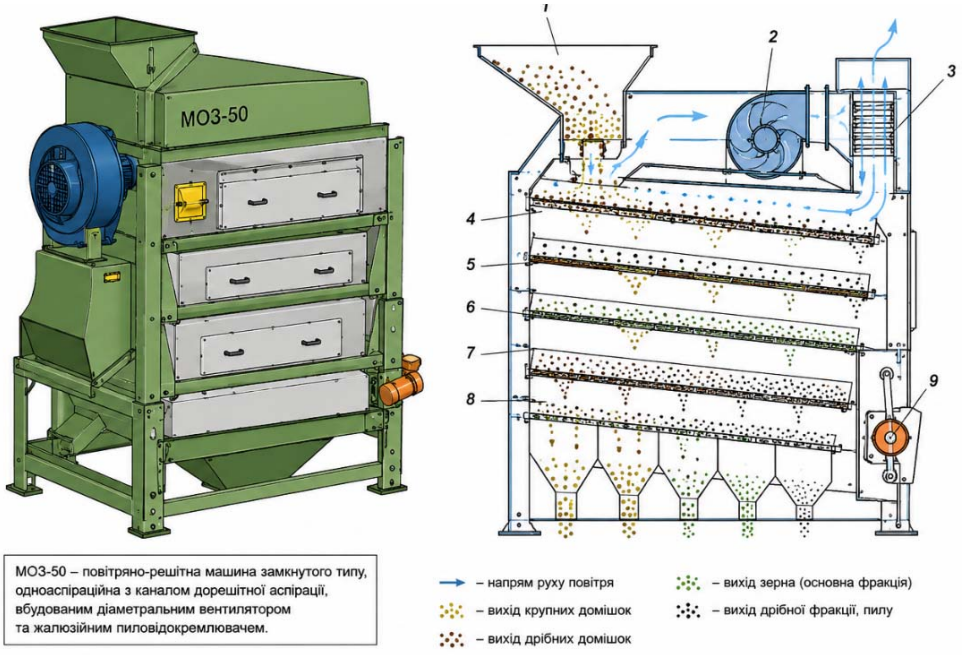
Основна конструктивна різниця між машинами первинного та вторинного очищення полягає в особливостях пневмосепарації. Установки первинного очищення оснащуються одним аспіраційним каналом, розташованим на початку технологічного процесу, тоді як машини вторинного очищення мають два канали – перед решітними станами та після них.

Подібна схема характерна як для вітчизняних, так і для зарубіжних моделей. Серед обладнання первинної очистки найбільш поширеними є повітряно-решітні сепаратори з похилими, а рідше – вертикальними пневмосепарувальними каналами та системою плоских коливальних решіт.

До машин такого компонування належать ЗВС-20А, СВТ-30, СВТ-40 і МОЗ-50. Моделі СВТ-30 та СВТ-40 оснащені вбудованими діаметральними вентиляторами власного виробництва та мають чотири решітні стани, у межах яких послідовно встановлено підсівні, сортувальні та колосові решета.

Пневмосистема машини МОЗ-50 є замкнутого типу та включає один аспіраційний канал для дорешітного очищення, діаметральний вентилятор і жалюзійний пиловідокремлювач осадової камери (рис. 1.1).

Для рівномірного розподілення зернової маси по всій ширині пневмосепараційної системи приймальний бункер 1 оснащений системою пасивних розподільників. Решітний стан виконує кругові коливальні рухи з частотою 366 хв$^{-1}$ та амплітудою 10 мм. У верхньому ярусі 4, який розташований під кутом, протилежним до інших ярусів, змонтовано два колосових решета розміром 0,99 × 0,74 м кожне.



1 – приймальний бункер із розподільним пристроєм; 2 – діаметральний вентилятор; 3 – жалюзійний пиловідокремлювач осадової камери; 4 – ярус колосових решіт; 5 – підсівне решето середнього ярусу; 6 – підсівне решето нижнього ярусу; 7 – сортувальні решета середнього ярусу; 8 – сортувальні решета нижнього ярусу; 9 – дебалансний механізм приводу

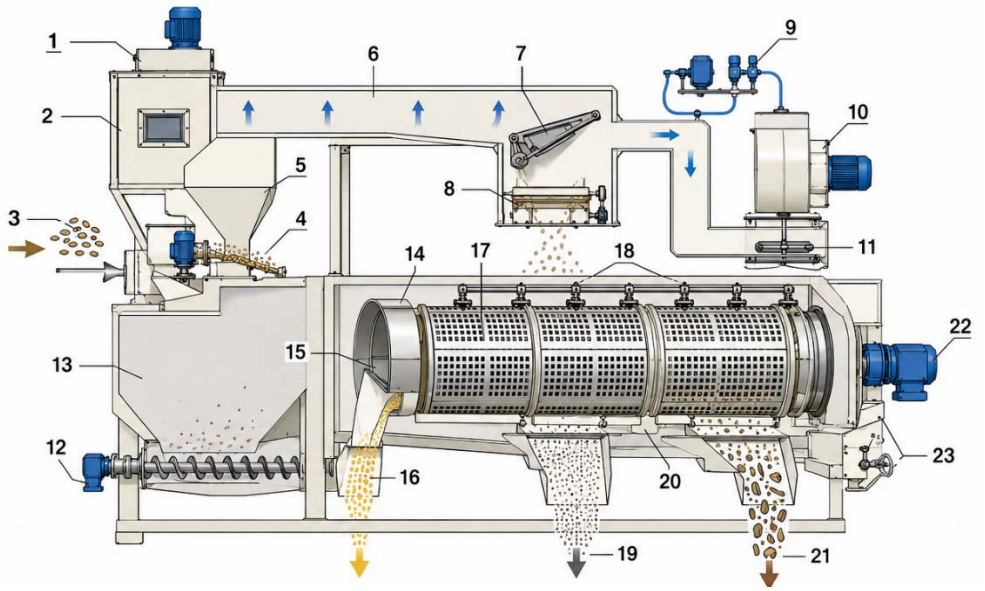
Рисунок 1.1 – Технологічна схема машини МОЗ-50

У середньому та нижньому ярусах розміщені підсівні решета 5 і 6, а також сортувальні решета 7 і 8. Після проходження через колосові решета зерновий матеріал розподіляється на два потоки, які спрямовуються до початку підсівних решіт відповідних ярусів. Частка площі колосових решіт становить близько 20 % загальної площі решітного стану, тоді як підсівні та сортувальні решета займають приблизно по 40 %.

Обмежена площа колосових решіт негативно впливає на продуктивність машини під час первинного очищення зернової маси. Крім того, відсутність системи післярешітної аспірації знижує ефективність використання машини при вторинному очищенні та сортуванні зерна.

До обладнання з одним пневмосепарувальним каналом також належать барабанні сепаратори. Прикладом таких машин є сепаратори серії CR компанії Denis та серії SDS фірми Bühler (рис. 1.2).

Продуктивність сепараторів серії CR у комплекті з аспіраторами NA при очищенні пшениці становить від 5 до 250 т/год. Діаметр барабана залежно від моделі змінюється в межах 0,46–1,26 м, а кількість решіт по його довжині може становити від двох до п’яти. Конструкція машин передбачає можливість регулювання кута нахилу решітного циліндра та частоти його обертання.



1 – завантажувальний блок; 2 – всмоктувальна коробка; 3 – подача зернового матеріалу; 4 – дозувальний механізм; 5 – завантажувальний бункер; 6 – аспіраційний канал; 7 – розподільна заслінка з противагами; 8 – живильний пристрій; 9 – пневмосистема серії NA; 10 – вентилятор або фільтр; 11 – заслінка регулювання швидкості повітряного потоку; 12 – шнек для вивантаження осаду; 13 – осадова камера; 14 – барабанний сепаратор; 15 – заслінка прямого виходу; 16 – прямий вихід; 17 – решета; 18 – механізм очищення решіт; 19 – вихід очищеного зерна або дрібних домішок і битого зерна; 20 – рухома заслінка; 21 – вихід великих домішок; 22 – мотор-редуктор з можливістю регулювання швидкості обертання решітного барабана; 23 – механізм регулювання кута нахилу решітного циліндра

Рисунок 1.2 – Технологічна схема барабанного сепаратора серії CR фірми Denis

Робота сепаратора здійснюється наступним чином. Зернова суміш 3 надходить у завантажувальний бункер 5 коробки всмоктування 2. Рівномірність подачі матеріалу в нижню похилу ділянку каналу 6 забезпечується розподільною заслінкою 7, оснащеною противагами. Через цей канал проходить повітряний потік, що створюється радіальним вентилятором 10. У результаті дії повітряного потоку із зернової маси відокремлюються пил і легкі домішки: частина з них осідає в осадовій камері 13 і видаляється за допомогою шнека 12, тоді як найдрібніші частинки транспортуються вентилятором 10 до циклона або фільтра.

Швидкість повітряного потоку в каналі регулюється заслінкою 11, яка дозволяє змінювати площу всмоктувального вікна для підсмоктування додаткового повітря без зміни частоти обертання вентилятора.

Конструкцією передбачено два режими роботи: очищення лише в аспіраційному блоці 9 з можливістю прямого вивантаження зерна через вихід 16 або повний цикл очищення в барабанному сепараторі за умови відкритої заслінки прямого виходу 15. Частота обертання решітного циліндра регулюється в діапазоні 10–25 $хв^{-1}$ (стандартне значення – 14 $хв^{-1}$), а кут його нахилу становить 1,5–5° (базове значення – 3°).

Внутрішні лопатки решітного циліндра забезпечують рівномірний розподіл зернового матеріалу по поверхні решіт. Для виділення дрібних домішок і битого зерна застосовують решета з малими отворами, тоді як решета з більшими отворами використовують для попереднього сортування та відокремлення крупних домішок. Машина може працювати в різних режимах: очищення від дрібних або великих домішок окремо, одночасне видалення обох фракцій, а також фракційне сортування за розміром.

Принцип роботи барабанної вертикальної зерноочисної машини доцільно розглянути на прикладі машини PROF-SEED торгової марки RIELA (рис. 1.3). Подібну за конструкцією машину під назвою Sigma випускає також Damas. Особливістю машини Sigma є можливість її встановлення на відкритому майданчику без необхідності спорудження фундаменту за умови наявності рівної поверхні.

На відміну від традиційних зерноочисних машин із плоскими решітними станами, у даній конструкції використовується блок вертикально розташованих циліндричних решіт, що обертаються навколо осі. Така схема забезпечує компактність конструкції, рівномірний розподіл

зернового матеріалу та ефективне відокремлення домішок різних фракцій.

Зерновий матеріал через приймальний пристрій надходить до дільника потоку, який рівномірно розподіляє його між циліндричними решетами. Під час проходження матеріалу через систему решіт відбувається поділ зернової суміші за геометричними розмірами. Виділені фракції збираються у відповідних збірниках і виводяться через окремі виходи. Для видалення легких домішок машина оснащена конусним аспіратором, через який повітряний потік відводить пил та легкі частинки. Очищене зерно після завершення процесу сепарації вивантажується через окремий вихід.



Рисунок 1.3 – Машина PROF-SEED торгової марки RIELA

Конструкція машини включає пневматичний конусний аспіратор та механічні сепаратори у вигляді барабанних сит. Неочищений зерновий матеріал через завантажувальну головку надходить до розподільника, після чого спрямовується до окремих ситових барабанів. Кожен барабан складається з внутрішнього і зовнішнього решітних циліндрів. Ситовий блок обертається навколо центральної осі машини, тоді як самі барабани одночасно здійснюють обертання навколо власних осей.

Під дією відцентрових сил зернова маса притискається до зовнішнього сита, де відбувається її розділення на окремі фракції.

Великі домішки затримуються внутрішніми ситами, а зерно, яке пройшло попереднє очищення, подається на зовнішні сита для подальшої сепарації. Дрібні частинки проходять крізь отвори зовнішніх сит і накопичуються в просторі між ситом та зовнішнім кожухом. Відібрані фракції надходять до кільцевих каналів 6 та видаляються через розвантажувальні жолоби.

Після механічного очищення зерновий матеріал, звільнений від великих і дрібних домішок, транспортується каналами до повітряного сепаратора AIR SEED, де відбувається видалення пилу та легких домішок. Потоком повітря, створеним вентилятором, ці домішки направляються до циклона. Очищене зерно виводиться через вихід, а відокремлені фракції, що надходять із жолобів, зазвичай збираються у бункерах, розташованих під машиною.

За оцінкою виробників, машини такого типу характеризуються низкою переваг. Вони забезпечують більш якісне очищення зерна від пилу, мікрофлори, грибків і плісняви порівняно з обладнанням, що використовує горизонтальні решета. Крім того, конструкція займає менше виробничої площі та працює практично без вібрацій завдяки використанню лише обертального руху робочих органів.

Разом із тим суттєвим недоліком подібних машин є підвищене енергоспоживання. Наприклад, для машини продуктивністю 25 т/год потужність приводу робочих органів становить близько 11 кВт, а вентилятора – 5,5 кВт. Для обладнання продуктивністю 100 т/год ці показники збільшуються приблизно до 30 і 15 кВт відповідно.

Найбільш поширеними у технологічних лініях післязбиральної обробки зерна є універсальні повітряно-решітні зерноочисні машини з плоскими решетами, які зазвичай комплектуються двома решітними станами. Такі машини поєднують механічне сепарування за геометричними розмірами із пневматичним очищенням за аеродинамічними властивостями зернового матеріалу, що забезпечує їх високу ефективність та універсальність застосування. Саме тому вони широко використовуються як у режимах попереднього очищення зерна після збирання, так і для первинного, вторинного очищення та сортування насіннєвого матеріалу.

Спільною конструктивною особливістю більшості машин провідних зарубіжних виробників є наявність двоаспіраційної пневмосистеми, яка має практично однакову схему компонування незалежно від

функціонального призначення обладнання. Відмінності між окремими моделями полягають переважно у розмірах аспіраційних каналів, продуктивності вентиляторів, а також способах регулювання режимів роботи пневмосистеми. У процесі експлуатації машин у режимі первинного очищення швидкість повітряного потоку в аспіраційних каналах підтримується на вищому рівні порівняно з режимом попереднього очищення. Це пояснюється як меншою питомою подачею зернового матеріалу, так і можливістю зміни режимів роботи вентиляційної системи. За таких умов із зернової маси видаляються не лише легкі домішки, а й частина компонентів, аеродинамічні характеристики яких близькі до основної культури або навіть дещо перевищують її.

Функціонування обох аспіраційних каналів у більшості випадків забезпечується одним радіальним вентилятором. Досить поширеним технічним рішенням є встановлення дахових радіальних вентиляторів безпосередньо на корпусі пневмосистеми. Подібне конструктивне виконання застосовується в машинах Cimbria, серії NSD компанії Denis, а також у більшості моделей фірми Westrup. Така схема дозволяє зменшити габарити обладнання, спростити компоновку повітропроводів і підвищити ефективність аспірації.

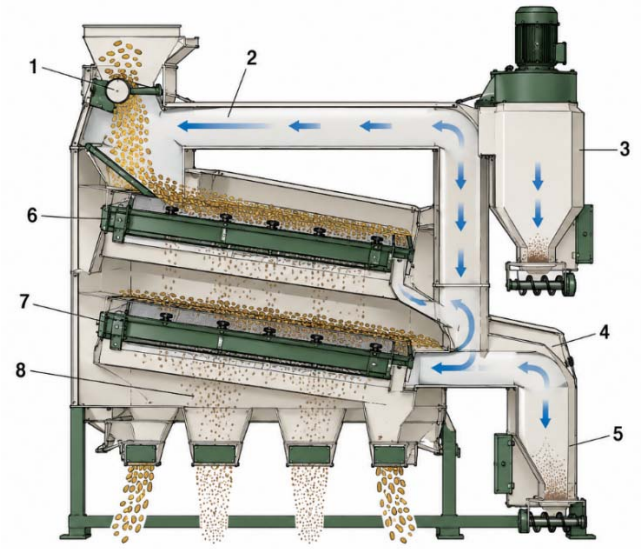
Компанія Cimbria випускає широкий спектр обладнання для післязбиральної доробки зерна, включаючи сушарки, сепаратори, машини для калібрування та сортування. Значне місце в номенклатурі займають саме повітряно-решітні машини, які представлені кількома серіями залежно від типу пневмосистеми та технологічного призначення. У конструкціях використовуються як розімкнені системи аспірації, так і комбіновані системи з частковою рециркуляцією повітря. Для машин вторинного очищення та сортування часто застосовуються пневмосистеми з додатковими нагнітальними вентиляторами та осадовими камерами, що дає змогу ефективніше виділяти зерно зі зниженою густиною й погіршеними аеродинамічними властивостями.

Решітні стани більшості машин виготовляються з високоміцної вологостійкої березової фанери, що характеризується достатньою жорсткістю, довговічністю та стійкістю до впливу вологи. Решітні полотна монтуються в змінні рамки стандартних розмірів, що значно спрощує технічне обслуговування та заміну решіт залежно від культури або технологічного режиму роботи. Для більшості моделей довжина решітної рамки становить 0,8 м, а ширина – 1,25 м.

Окрему групу становлять машини первинного очищення серії Mega, у яких застосовуються збільшені рамки розміром 1,0 × 1,8 м та інша схема розташування решітних поверхонь. Для забезпечення рівномірного розподілу зернового матеріалу використовуються живильні валики, вібраційні клапани зі зворушувачами, а в машинах серії Mega – спеціальні коливальні розподільники з автономним приводом від окремого електродвигуна. Такі технічні рішення дозволяють зменшити нерівномірність навантаження на решітні поверхні та підвищити якість очищення.

Машини DELTA серій 100, 110 та 120 призначені переважно для вторинного очищення та сортування зернових матеріалів. Залежно від модифікації площа їх решітної поверхні може досягати 24 м², а витрата повітря – близько 15 тис. м³/год, що забезпечує високу продуктивність і якісне видалення домішок.

Особливий інтерес становлять універсальні повітряно-решітні машини серії 140, які можуть ефективно працювати в режимах попереднього, первинного та вторинного очищення. Вони придатні як для товарного зерна, так і для підготовки насіннєвого матеріалу. Характерним представником цієї серії є універсальний сепаратор DELTA 146 Combi (рис.1.4.), який завдяки зміні схеми встановлення решіт і налаштуванню режимів роботи може використовуватись для очищення, калібрування та сортування зернових культур різного призначення.



1 – живлячий валик; 2 – канал дорешітної аспірації; 3 – осадова камера каналу дорешітної аспірації; 4 – канал післярешітної аспірації; 5 – осадова камера каналу післярешітної аспірації; 6 – верхній решітний стан; 7 – нижній решітний стан; 8 – скатна поверхня

Рисунок 1.4 – Схема машини DELTA 146 Combi фірми CimbriaHeid

Робота аспіраційних систем у повітряно-решітних зерноочисних машинах забезпечується радіальним вентилятором, який створює необхідний повітряний потік для видалення легких домішок із зернової маси. Для попереднього очищення використовується порівняно короткий похилий аспіраційний канал із боковим підведенням повітря, що дозволяє ефективно вилучати пил, полову та інші легкі частинки ще до потрапляння матеріалу на решета. Післярешітне очищення здійснюється у вертикальному каналі значної висоти, в який зерновий матеріал надходить за допомогою коливної похилої сітки, закріпленої на нижньому решітному стані. Така конструкція забезпечує триваліший контакт зерна з повітряним потоком і підвищує якість аспіраційного очищення.

Решітні поверхні розміщуються у двох решітних станах та оснащуються системою кулькової очистки отворів. Під час коливань гумові або полімерні кульки очищують отвори решіт від застряглих частинок, що запобігає забиванню та підтримує стабільну пропускну здатність робочих поверхонь. Це особливо важливо під час очищення вологого або засміченого зернового матеріалу.

Процес сепарації великих і дрібних домішок відбувається під час послідовного проходження зернової суміші через верхній та нижній решітні стани. Між ними встановлена глуха похила скатна поверхня, яка змінює напрям руху матеріалу та забезпечує рівномірний розподіл потоку на наступному етапі очищення. Для ефективнішого виділення дрібних домішок площа решіт, призначених для цієї операції, приблизно у півтора рази більша, ніж площа решіт для відділення великих домішок. Загальна площа решітного очищення машини досягає 15 м², а витрата повітря в аспіраційній системі становить близько 15000 м³/год, що забезпечує високу продуктивність і якість очищення.

Пневмосистема машин серії NSD компанії Denis за принципом роботи майже повністю аналогічна системам машин Cimbria. Основна відмінність полягає у конструкції вузла подачі зернового матеріалу. Для дозування та введення зерна в аспіраційний канал тут застосовується гравітаційний клапан, який забезпечує рівномірну подачу без використання складних механічних живильників.

Суттєвою перевагою очищувачів-сепараторів Denis є модульна конструкція, що дозволяє адаптувати машину до різних технологічних операцій. За необхідності всі решітні поверхні можуть бути задіяні

лише для попереднього очищення без виділення дрібних домішок або, навпаки, використовуватись виключно для калібрування зерна на дві фракції без сепарації великих домішок. Таке переналаштування дає змогу майже вдвічі підвищити продуктивність машини залежно від виробничих потреб.

Цікавим технічним рішенням характеризуються універсальні повітряно-решітні машини серій VIBAM та OMEGA компанії Damas. Їх особливістю є можливість зміни режиму роботи решітних станів – із паралельного на послідовний. У режимі попереднього очищення верхні яруси обох решітних станів використовуються для виділення великих домішок, а нижні – для видалення дрібних частинок. Під час переходу до первинного або вторинного очищення машина переводиться в послідовний режим роботи: на верхньому решітному стані здійснюється видалення великих домішок на всіх ярусах, тоді як нижній стан використовується для сепарації дрібних домішок, сортування або калібрування зернового матеріалу.

Завдяки такій універсальності сучасні повітряно-решітні машини можуть ефективно використовуватись не лише для товарного очищення зерна, а й для підготовки високоякісного насіннєвого матеріалу, калібрування зернових культур та формування однорідних фракцій для подальшої переробки або зберігання.

У машинах серії VIBAM решітний стан комплектується трьома ярусами решіт, що дозволяє гнучко змінювати технологічний режим роботи залежно від призначення очищення. Під час попереднього очищення два верхні яруси використовуються переважно для видалення великих домішок, тоді як нижній ярус забезпечує відокремлення дрібних домішок. У режимах первинного очищення та сортування функції решітних поверхонь змінюються: середній і нижній яруси застосовуються для виділення дрібних домішок, щуплого або дрібного зерна основної культури, а також проведення калібрування зернового матеріалу за розмірами.

Пневматичні системи таких машин можуть виконуватись як за розімкненою схемою, так і у вигляді замкнутих систем із рециркуляцією частини відпрацьованого повітря. Використання рециркуляції дозволяє знизити енергоспоживання, зменшити втрати тепла в холодний період року та підвищити стабільність роботи аспіраційної системи. Залежно від моделі продуктивність машин серії OMEGA під час попереднього

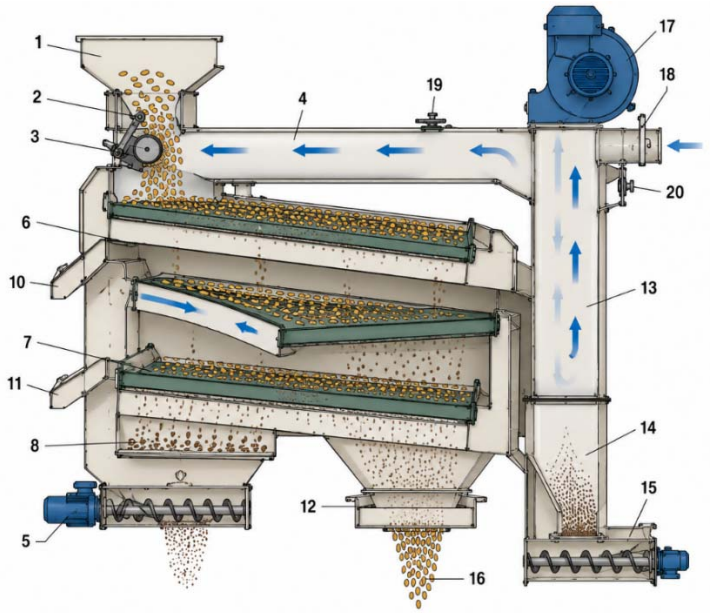
очищення з виділенням дрібних домішок становить приблизно 90–300 т/год, у режимі товарного очищення – 45–150 т/год, а при вторинному очищенні та сортуванні – 7–34 т/год. Площа решітної поверхні при цьому може змінюватися від 9 до 30 м², що забезпечує можливість адаптації машин до різних виробничих умов.

Компанія Westrup, поряд із машинами для попереднього та вторинного очищення, випускає широкий спектр універсальних зерноочисних машин. Однією з характерних конструктивних особливостей обладнання цієї фірми є використання високоміцної вологостійкої ламінованої фанери для виготовлення решітних станів. Такий матеріал забезпечує високу жорсткість конструкції, стійкість до вібраційних навантажень та тривалий термін експлуатації навіть у складних умовах роботи.

У більшості моделей (рис.1.5) застосовуються радіальні вентилятори, встановлені безпосередньо над пневмосистемою, що дозволяє зменшити габарити машини та оптимізувати рух повітряних потоків. Окремі моделі мають можливість регулювання глибини дорешітних і післярешітних аспіраційних каналів, що дає змогу точніше налаштовувати процес очищення залежно від культури, вологості зерна та ступеня його засміченості.

Пневмосистеми машин зазвичай включають два аспіраційні канали – дорешітний та післярешітний. У деяких серіях машин попереднього очищення використовується одна спільна осадова камера для обох каналів. Особливе місце займають машини серії HG продуктивністю 80–250 т/год, призначені для очищення вологого та сильно засміченого невіяного зернового матеріалу. Такі машини обладнуються двома скальператорами з отворами 30 і 25 мм, що дозволяє ефективно видаляти великі грубі домішки ще на початковому етапі очищення.

Зміна продуктивності машин у межах однієї серії досягається завдяки ступінчастому збільшенню робочої ширини – від 0,6 до 2,5 м. У машинах із шириною до 1,0 м для подачі зернового матеріалу застосовується вантажний клапан, а в моделях більшої ширини – живильні валики з клапанами або віброклапани, які забезпечують більш рівномірний розподіл зернового потоку по ширині решіт.



1 – приймальний бункер; 2 – дозувальний клапан; 3 – валик живильник; 4 – канал дорешітного очищення; 5 – шнек осадової камери каналу дорешітного очищення; 6 – колосове решето верхнього решітного стану; 7 – поворотний ярус нижнього стану; 8 – лоток виведення дрібних домішок;9 – колосове решето нижнього стану; 10, 11 – лотки великих домішок;12 – лоток виведення дрібних домішок (фуражу); 13 – канал аспірації;14 – осадова камера каналу аспірації; 15 – шнек осадової камери; 16 – вихід очищеного зерна; 17 – радіальний вентилятор; 18 – заслінка забору атмосферного повітря; 19, 20 – заслінки регулювання швидкості повітря в каналах

Рисунок 1.5 – Схема машин серії UC фірми Westrup

Машини серій UB (-600, -1000, -1250, -1500) та UC (-600, -1000, -1250, -1500) призначені переважно для вторинного очищення та сортування зернових і технічних культур. Вони можуть оснащуватися одним або двома решітними станами залежно від конструктивного виконання. У машинах серії UC використовується так званий «Z»-подібний рух зернового матеріалу через решітні поверхні. Така схема забезпечує більш тривалий шлях руху зерна, рівномірніше завантаження решіт та підвищення ефективності сепарації. Крім того, «Z»-подібний потік сприяє кращому контакту зернової маси з аспіраційними потоками, що позитивно впливає на якість очищення та сортування.

Поворотний ярус решіт 7 належить до нижнього решітного стану та використовується переважно для відокремлення дрібних домішок із зернового матеріалу. Верхній решітний стан, який складається з двох

ярусів 6, призначений головним чином для видалення великих домішок – соломи, колосків, крупних рослинних залишків та інших сторонніх включень. Нижні яруси 9 нижнього решітного стану виконують функції сортування зерна за розмірами, а також можуть застосовуватись для одночасного виділення дрібного зерна основної культури та дрібних домішок. Такий режим роботи особливо ефективний у разі необхідності отримання двох фракцій товарного зерна різної якості або під час підготовки насіннєвого матеріалу.

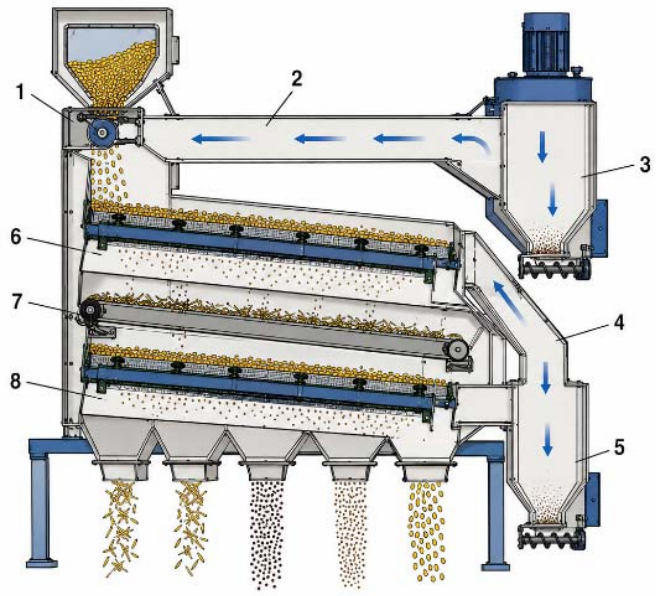
Завдяки багатоярусному компонуванню решіт і можливості зміни режимів роботи машини забезпечується висока гнучкість технологічного процесу. Це дозволяє адаптувати обладнання до очищення різних культур – пшениці, ячменю, кукурудзи, ріпаку, сої та насіння трав – із урахуванням їх фізико-механічних та аеродинамічних властивостей. Крім того, поєднання аспіраційного очищення з багатоступеневим решітним сепаруванням забезпечує підвищення якості кінцевого продукту та зменшення втрат основної культури.

Одним із світових лідерів у сфері розробки та виробництва зерноочисного обладнання є PETKUS Technologie GmbH. Компанія спеціалізується не лише на виготовленні окремих зерноочисних машин, а й на створенні комплексних насіннєочисних заводів із повним технологічним оснащенням власного виробництва. Значна увага приділяється впровадженню сучасних технологій післязбиральної доробки зерна, автоматизації процесів сепарації та підвищенню енергоефективності обладнання.

Важливу роль у науково-дослідній діяльності компанії відіграє підрозділ ROEBER Institut GmbH, фахівці якого займаються пошуком нових технічних рішень у сфері очищення та сортування зернових матеріалів. Останніми роками основний акцент робиться на розвитку методів оптичного аналізу й фотосепарації, що дозволяє виявляти дефектне, пошкоджене або заражене зерно за кольором, формою та оптичними характеристиками. Такі технології суттєво розширюють можливості сучасних зерноочисних комплексів і забезпечують підвищення якості насіннєвого матеріалу.

Компанія PETKUS Technologie GmbH випускає широкий спектр універсальних повітряно-решітних сепараторів. До них належать машини серії V для попереднього та первинного очищення, універсальні очищувачі серій A та U, а також мультиочищувачі серії M, які застосовуються переважно для вторинного очищення й калібрування

зернових культур. Такі машини характеризуються модульною конструкцією, високою продуктивністю та можливістю гнучкого налаштування технологічних режимів залежно від вимог виробництва. Схему універсального очищувача серії U12 2,4/U15 2,4 компанії PETKUS наведено на рисунку 1.6.



1 – живильний валик; 2 – пневмосепарувальний канал очищення;
3 – осадова камера пневмоканалу очищення; 4 – пневмоканал очищення;
5 – осадова камера пневмоканалу очищення; 6 – верхній решітний стан;
7 – транспортер колосового решета для виділення великих домішок;
8 – нижній решітний стан

Рисунок 1.6 – Схема машин PETKUS U12 / U15

Подача зернового матеріалу до пневматичної системи здійснюється за допомогою живильного валика 1, який працює разом із підпружиненим клапаном. Така конструкція забезпечує рівномірне дозування потоку зерна та стабільне навантаження на аспіраційні канали. У процесі проходження через пневмосистему із зернової маси видаляються пил, полова та інші легкі домішки, що суттєво покращує якість подальшого решітного очищення.

Аспіраційний канал 4 виконаний у вигляді двоканального сепаратора з регульованою впускною заслінкою. У цьому каналі відбувається виділення щуплого, недорозвиненого зерна, а також легких органічних домішок, які відрізняються за аеродинамічними властивостями від основної культури. Регулювання швидкості повітряного потоку здійснюється двома способами: зміною робочого перерізу аспіраційного каналу та використанням заслінок осадових камер, через які може

додатково надходити атмосферне повітря. Таке технічне рішення дозволяє коригувати інтенсивність аспірації без зміни режиму роботи вентилятора, що позитивно впливає на енергоефективність машини та стабільність технологічного процесу.

Питома витрата повітря в аспіраційних системах машин серії M, призначених для вторинного очищення, приблизно у 1,4–1,5 рази перевищує аналогічні показники машин серій U та V, які використовуються для попереднього й первинного очищення. Це пояснюється підвищеними вимогами до якості сепарації насіннєвого матеріалу та необхідністю точнішого видалення легких і неповноцінних компонентів.

Пневмосистеми всіх машин мають уніфіковану конструкцію та обслуговуються одним радіальним вентилятором, розташованим поза межами корпусу машини. Залежно від компонування технологічної лінії може використовуватись як верхній, так і боковий забір повітря. Витрата повітря безпосередньо залежить від робочої ширини машини: для моделей із шириною 0,9 м вона становить близько 7 тис. м³/год, для машин шириною 1,2 м – приблизно 9 тис. м³/год, а для обладнання шириною 1,5 м – до 12 тис. м³/год. Збільшення витрати повітря дозволяє підтримувати необхідну швидкість аспіраційного потоку при зростанні продуктивності машин.

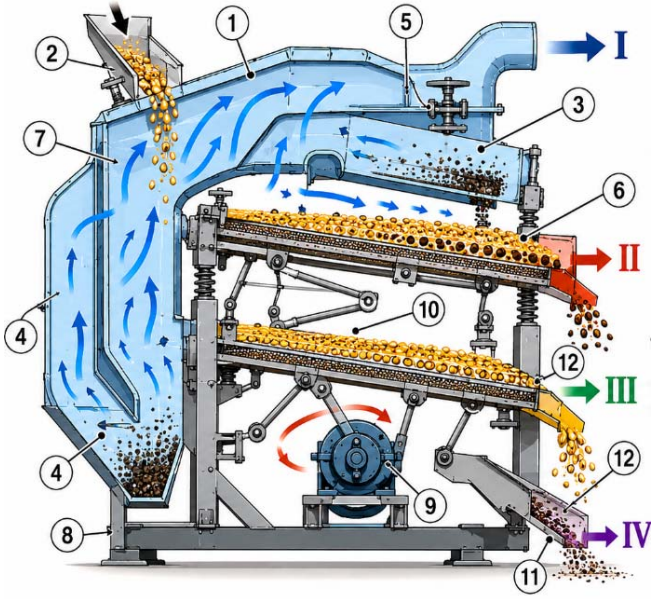
В асортименті продукції Bühler важливе місце займають універсальні повітряно-решітні машини серії TAS, які застосовуються для первинного та основного очищення зерна. Окрім цього, компанія випускає універсальні решітні сепаратори серії SMA та високопродуктивні сортувальні машини TAS, що використовуються у солодовому виробництві та для калібрування зернового матеріалу за розмірами.

Для роботи з насіннєвим матеріалом компанією розроблено спеціалізовану універсальну машину Seed Selektor. Її пневмосистема за принципом дії подібна до систем, що використовуються в машинах більшості провідних світових виробників. Конструкція включає два аспіраційні канали та осадові камери, з яких повітря відводиться спільним вентилятором. Така схема забезпечує стабільний режим аспірації та високу якість очищення насіння.

Окремої уваги заслуговують машини серії TAS компанії Schmidt-Seeger, які випускаються як для первинного очищення зерна, так і для його сортування, у тому числі в технологічних лініях солодового виробництва. Продуктивність цих машин при товарному очищенні пшениці може становити від 60 до 250 т/год. Їхньою характерною особливістю є

використання зовнішнього забору повітря у каналі післярешітного очищення з подальшим послідовним використанням цього ж повітряного потоку в каналі дорешітної аспірації.

На відміну від традиційних двоаспіраційних систем, де кожен канал працює незалежно, у машинах серії TAS один і той самий повітряний потік послідовно проходить через обидва аспіраційні канали. Це дозволяє підвищити ефективність використання повітря, зменшити енергоспоживання вентилятора та забезпечити більш стабільний режим очищення зернового матеріалу. Прикладом такої універсальної машини є сепаратор TAS 206A-26, технологічну схему якого наведено на рисунку 1.7.



1 – пневмосепарувальний канал дорешітного очищення; 2 – завантажувальний пристрій; 3 – осадова камера пневмоканалу дорешітного очищення; 4 – осадова камера пневмоканалу післярешітного очищення; 5 – клапан регулювання швидкості повітря в пневмосепарувальних каналах дорешітного очищення; 6 – решета для виділення великих домішок (крупного зерна I-го сорту); 7 – пневмосепарувальний канал післярешітного очищення; 8 – рама машини; 9 – привод решітного стану з круговими коливаннями; 10 – сортувальні решета для виділення основної фракції (II-й сорт); 11 – лоток виведення дрібного зерна та домішок; 12 – лоток виведення основної фракції; I – запилене повітря до фільтра й витяжного вентилятора; II – вихід великих домішок (крупного зерна I-го сорту); III – вихід основної фракції (II-ий сорт); IV – вихід дрібного зерна, дрібних і легких домішок

Рисунок 1.7 – Технологічна схема роботи машини TAS 206A-2-6

Обидва пневмосепарувальні канали машини працюють від єдиного повітряного потоку, який послідовно проходить через зони післярешітної та дорешітної аспірації, забезпечуючи поетапне видалення легких домішок і пилу. Конструкція машини характеризується значною площею ситових поверхонь, що дозволяє досягати високої інтенсивності сепарації та підвищеної продуктивності технологічного процесу.

Загальна площа решітного стану становить 32 м², у тому числі 8 м² припадає на колосові решета, а 24 м² – на сортувальні (підсівні) решета. Така конфігурація сит забезпечує ефективний поділ зернового матеріалу за розмірами фракцій і підвищує якість очищення. Завдяки цьому машина TAS 206A-2-6 демонструє високу ефективність у процесах первинного та вторинного очищення зерна, а також є доцільною для використання на солодових виробництвах і в технологіях підготовки насіннєвого матеріалу.

Продуктивність машини становить до 150 т/год при первинному очищенні пшениці та близько 45 т/год при вторинному очищенні, що свідчить про її універсальність у різних режимах роботи.

Для задач підготовки насіннєвого матеріалу та більш тонкого сортування після первинного очищення розроблено спеціалізовані модифікації машин типу TAS 210A-1 та TAS 200A-III. Зокрема, TAS 210A-1 обладнана однорівневим решітним станом із колосовими решетами та десятьма ярусами сортувальних сит, що забезпечує загальну площу робочих поверхонь близько 44 м² та дозволяє здійснювати більш точну класифікацію зернового матеріалу.

Наукові дослідження пневмосистем із вентиляторами та аеродинамічних процесів у них широко висвітлені у працях [1–25]. У цих роботах обґрунтовано ключові конструктивні та режимні параметри роботи аспіраційних систем, зокрема раціональне розміщення вентиляторів в осадових камерах післярешітної аспірації, оптимізацію положення розділових перегородок між камерами, геометрію відбивних елементів, а також параметри висоти та глибини осадових зон.

При проєктуванні сучасних високопродуктивних зерноочисних машин решітного та повітряно-решітного типу враховано результати досліджень двоаспіраційних пневмосистем із використанням діаметральних вентиляторів, що дозволило підвищити ефективність очищення, стабільність повітряного потоку та зменшити енергетичні витрати.

Слід також підкреслити, що поряд із традиційними комбінованими зерноочисними машинами все більшого поширення набувають технічні засоби, призначені для фракціонування зернового матеріалу за сукупністю аеродинамічних властивостей. Уже на етапі попередніх досліджень можна зробити висновок, що такі системи потенційно здатні забезпечувати не лише розділення за аеродинамічними характеристиками, але й опосередковане фракціонування за густиною зернівок. Це розширює класичні уявлення про процеси поділу та формує нові підходи до організації сепарації в пневмогравітаційних каналах різного конструктивно-технологічного виконання.

Одним із найбільш простих і водночас ефективних способів первинного фракціонування зернового вороху є його обробка повітряними потоками за аеродинамічними властивостями. Дослідження показують, що за умов якісної пневмосепарації ефективність розділення суттєво підвищується: повнота виділення легкої фракції може зростати до двох разів, а вилучення дрібних сміттєвих домішок – приблизно в 1,5 рази. При цьому питомі енерговитрати на первинну обробку зменшуються орієнтовно на 20 % для легких домішок і до 10 % для дрібної фракції. Важливою перевагою повітряних сепараторів порівняно з решітними системами є їх менша чутливість до вологості та неоднорідності вихідного матеріалу, що підвищує стабільність технологічного процесу.

Серед параметрів, що визначають ефективність розділення, густина компонентів зернового вороху має найбільш тісний зв’язок зі швидкістю їх витання. Аналіз фізико-механічних властивостей показує, що за допомогою звичайних повітряних каналів складно повністю відокремити компоненти з близькими аеродинамічними характеристиками до подальших етапів очищення на решітних системах або трієрах. У той же час застосування керованих повітряних потоків дозволяє здійснювати більш глибоке структурування вихідного матеріалу на кілька фракцій: основну цінну фракцію, фракцію легких домішок, а також проміжну фракцію зі змішаним складом компонентів.

Такий підхід до попередньої підготовки зернового матеріалу перед основною сепарацією створює передумови для підвищення ефективності подальших технологічних операцій. Розділені фракції можуть оброблятися окремо на відповідних машинах, що дозволяє більш повно реалізувати потенціал робочих органів і підвищити їх пропускну

здатність при збереженні високих якісних показників очищення. Повітряні сепаратори, що реалізують фракціонування за аеродинамічними властивостями, можуть працювати у вертикальних, похилих та горизонтальних повітряних потоках, що розширює їх технологічні можливості.

Найбільш розвиненим є аеродинамічний принцип поділу із введенням матеріалу в супутній горизонтальний або похилий повітряний струмінь. Саме така схема реалізована в сучасних аеродинамічних сепараторах типу «САД» та «Алмаз», які забезпечують розділення зернового матеріалу на 6–10 фракцій із одночасним видаленням легких домішок, що суттєво підвищує ефективність попереднього очищення та стабільність технологічного процесу (рис 1.8).

Для проєктування пневмосепарувальних систем, призначених для розділення зернового матеріалу на окремі фракції, важливим є обґрунтований вибір найбільш раціональної технологічної схеми, яка враховує як властивості конкретних сільськогосподарських культур, так і тип застосовуваних машин (стаціонарних або мобільних). До основних варіантів організації процесу фракціонування належать пневмогравітаційні, аеродинамічні прямоточні, пневмоінерційні, проточні та струменеві схеми, кожна з яких має свої конструктивно-технологічні особливості та область ефективного застосування.

За умови використання повітряних потоків як основного робочого середовища для фракціонування зернового вороху найбільш доцільним є застосування пневмоінерційного принципу сепарації. Це пояснюється низкою його суттєвих переваг: у таких системах значно посилюється вплив аеродинамічних властивостей частинок, а також з’являється можливість отримання регульованої кількості фракцій із керованою якістю розділення.

Подібний ефект досягається завдяки конструктивній особливості – горизонтальному розташуванню повітряного каналу, що забезпечує розширений час взаємодії зернівок із повітряним потоком та більш стабільні умови їхнього розділення. На відміну від класичних вертикальних сепараторів, де зазвичай виділяються лише дві фракції (легкі домішки та очищене зерно), пневмоінерційні системи дозволяють формувати багатофракційний продукт. Крім того, процес фракціонування в них поєднується з попереднім очищенням, що підвищує загальну технологічну ефективність.

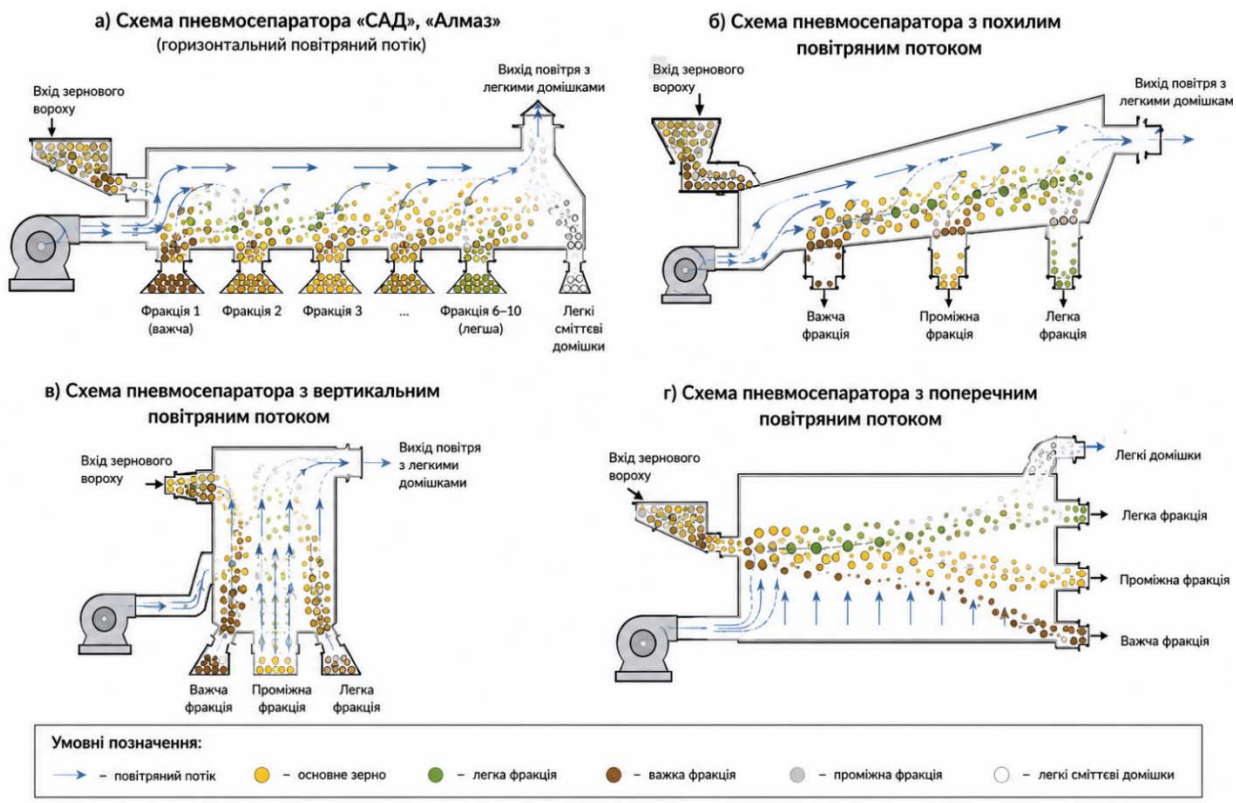


Рисунок 1.8 – Схеми пневмосепарувальних систем для фракціонування зернових матеріалів

Важливим фактором, що суттєво впливає на якість сепарації, продуктивність і енергетичні витрати, є швидкість введення зернового матеріалу в повітряний потік. За однакової якості розділення підвищення швидкості подачі дозволяє збільшити продуктивність обладнання та одночасно знизити енерговитрати на формування інтенсивного повітряного потоку. У зв’язку з цим за умов підвищених навантажень більш ефективною є схема протитоку, за якої зерновий матеріал подається під кутом, протилежним напрямку руху повітряного потоку (рис. 1.8, б). Такий підхід забезпечує інтенсивніше сортування частинок за аеродинамічними характеристиками.

Вертикальні повітряні потоки характеризуються високою ефективністю лише при невеликих подачах матеріалу в канал. У разі збільшення продуктивності їх ефективність істотно знижується, що обумовлено обмеженою пропускною здатністю прямокутних каналів та складністю рівномірного розподілу зернового потоку по перерізу.

Перспективним напрямом удосконалення пневмогравітаційних сепараторів є формування спеціалізованих зон розділення та організація

контрольованого виведення фракцій із нижньої частини каналів. При цьому ключовою умовою ефективної сепарації є забезпечення вільного та достатньо тривалого перебування зернівок у повітряному потоці, що сприяє більш повному їх розшаруванню за аеродинамічними властивостями.

Особливе значення має спосіб введення матеріалу в робочу зону. Найбільш ефективним є подача зерна у вигляді моношару (однозернинового потоку), що забезпечує мінімальну взаємодію частинок між собою та максимальну точність розділення. Однак реалізація тонкошарової подачі у прямокутних каналах обмежується їх геометрією та складністю забезпечення рівномірності розподілу по ширині.

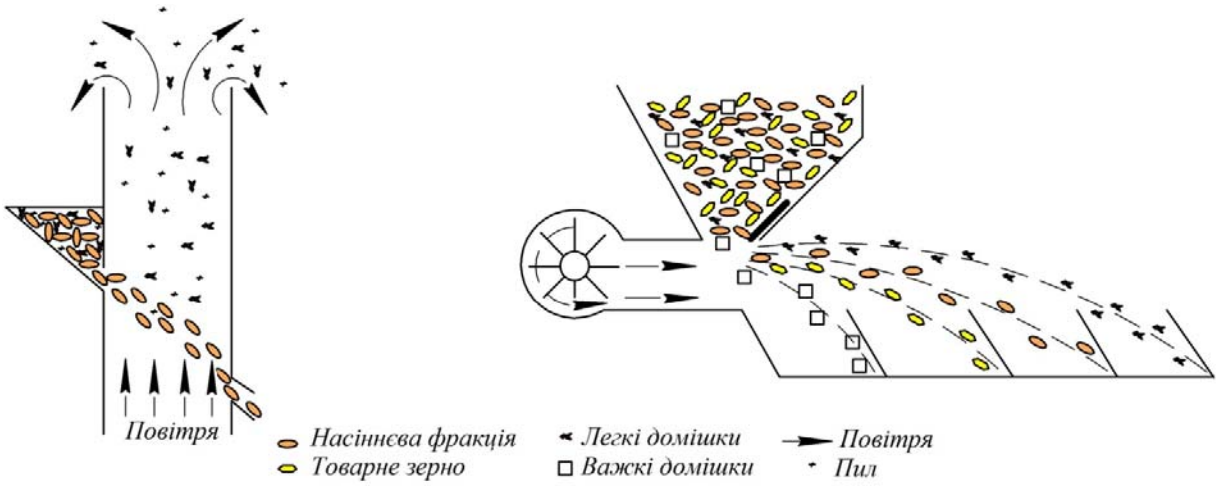
Більш технологічно гнучким є використання каналів кругового або кільцевого перетину з подачею матеріалу через живильники конічної або тороїдальної форми. Така конструкція забезпечує поступове розширення зони введення зерна та стабілізацію потоку. Виведення товарних фракцій у цьому випадку здійснюється гравітаційним способом у нижній частині каналу. Застосування подібної схеми (рис. 1.8, в) дозволяє досягти високої ефективності розділення навіть у вертикальних потоках, при цьому зона подачі додатково сприяє видаленню легкої фракції у верхню частину системи. Ефективність такого підходу підтверджена експериментальними дослідженнями та практичною експлуатацією.

Подальшим розвитком даного класу пневмогравітаційних систем є конструкції зі звуженням каналу в напрямку руху повітряного потоку. Це сприяє збільшенню часу перебування зернівок у робочій зоні та підвищенню ймовірності їх повного розділення за аеродинамічними ознаками, що в цілому покращує якість фракціонування (рис. 1.9).

Класифікація пневматичних сепараторів наведена на рисунку 1.10.

Аналіз сучасних конструктивних рішень пневмосепарувальних каналів показує, що їх можна умовно класифікувати на п’ять основних типів: вертикальні, похилі, зигзагоподібні, криволінійні та спіральні.

Найбільш поширеними в аграрному виробництві є вертикальні канали, у яких процес розділення зернового матеріалу базується на принципі аеродинамічного «зважування» частинок. Такі системи переважно використовуються як самостійні пневмосепараційні установки, що забезпечують попереднє або остаточне очищення зерна.



а *б*

Рисунок 1.9 – Схема розділення матеріалу в пневмосепаруючих каналах: а) – метод «зважування»; б) – метод «відхилення»

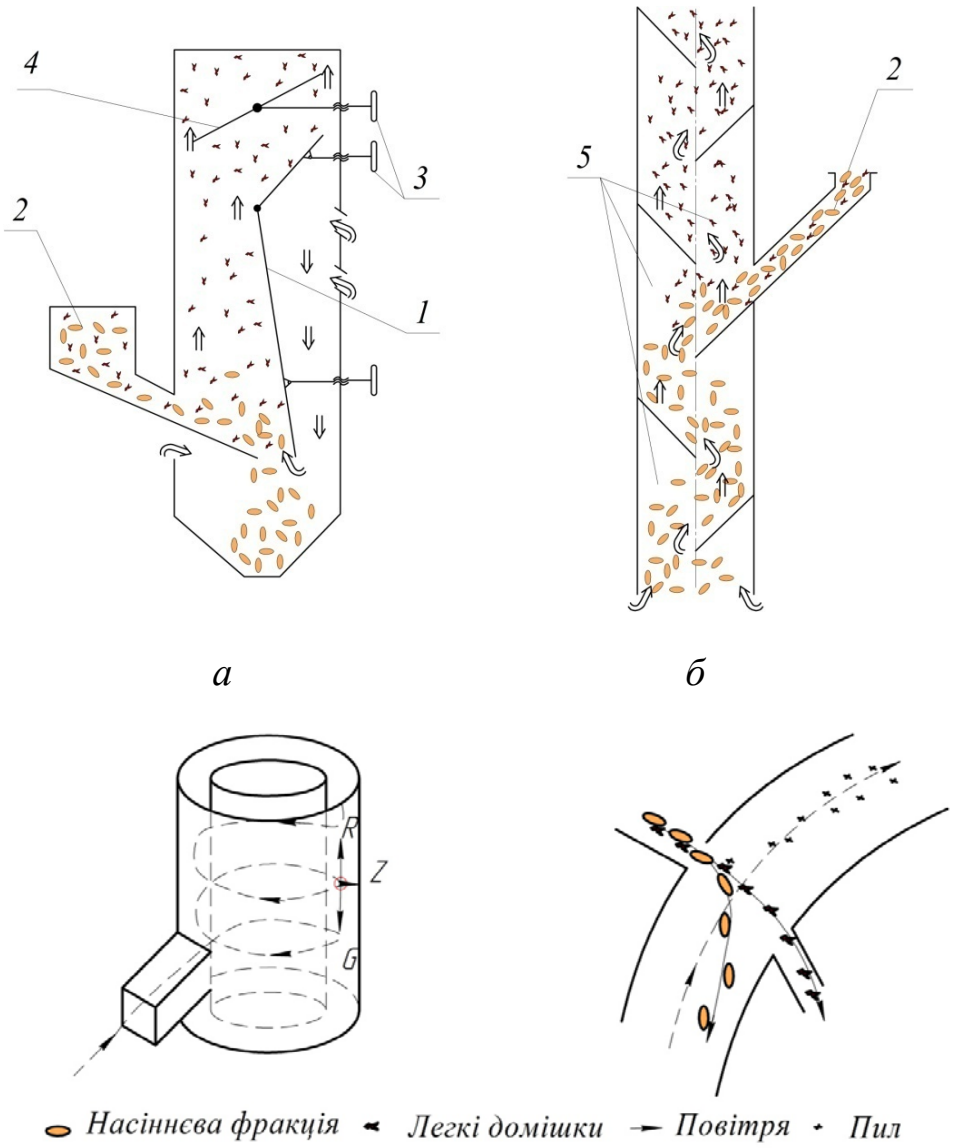
Окрему групу становлять вертикальні канали зі змінною по висоті площею поперечного перерізу (рис. 1.11). До них належать пневмосепаратори типу РЗ-БАБ, FA фірми Superior, БАС, КК251, КК401, КК502 та інші [15–17]. Конструктивна особливість таких систем дозволяє стабілізувати повітряний потік і підвищити ефективність розділення за рахунок більш рівномірного розподілу швидкостей по висоті каналу.

Похилі канали традиційного типу працюють за принципом аеродинамічного «відхилення» зернового матеріалу. Це дає можливість одночасно виділяти кілька фракцій, відмінних за густиною та аеродинамічними властивостями. Такі конструкції широко застосовуються як у вигляді автономних пневмосепарувальних систем, так і в складі багатофункціональних зерноочисних машин, де відбувається комплексне розділення зернових сумішей за сукупністю фізико-механічних характеристик.

Додатково слід зазначити, що ефективність роботи пневмоканалів значною мірою залежить від стабільності повітряного потоку, рівномірності завантаження та геометрії робочої зони, що визначає якість кінцевого фракціонування матеріалу.



Рисунок 1.10 – Класифікація пневматичних сепараторів



а *б*

в *г*

1 – рухома стінка; 2 – бункер; 3 – гвинтовий механізм;
4 – заслінка; 5 – повітряний канал.

Рисунок 1.11 – Форми каналів: а – вертикальна із змінною по висоті площею; б – зигзагоподібна; в – спіральна; г – криволінійна

Зигзагоподібні пневмосепараційні канали зі змінним напрямком повітряного потоку (рис. 1.11 *б*) реалізують процес розділення переважно за принципом аеродинамічного «зважування» частинок. У кожній секції такого каналу формується локальний вихровий рух повітря, який обертається навколо горизонтальної осі. Під час руху вниз зерновий матеріал багаторазово перетинає ці вихрові зони, що суттєво

збільшує тривалість контакту частинок із повітряним середовищем. У результаті підвищується точність і стабільність сепарації, особливо для сумішей зі схожими аеродинамічними характеристиками. Додатковою перевагою таких систем є можливість більш глибокого розділення дрібних і легких домішок, хоча конструктивна складність і підвищений аеродинамічний опір обмежують їх широке впровадження.

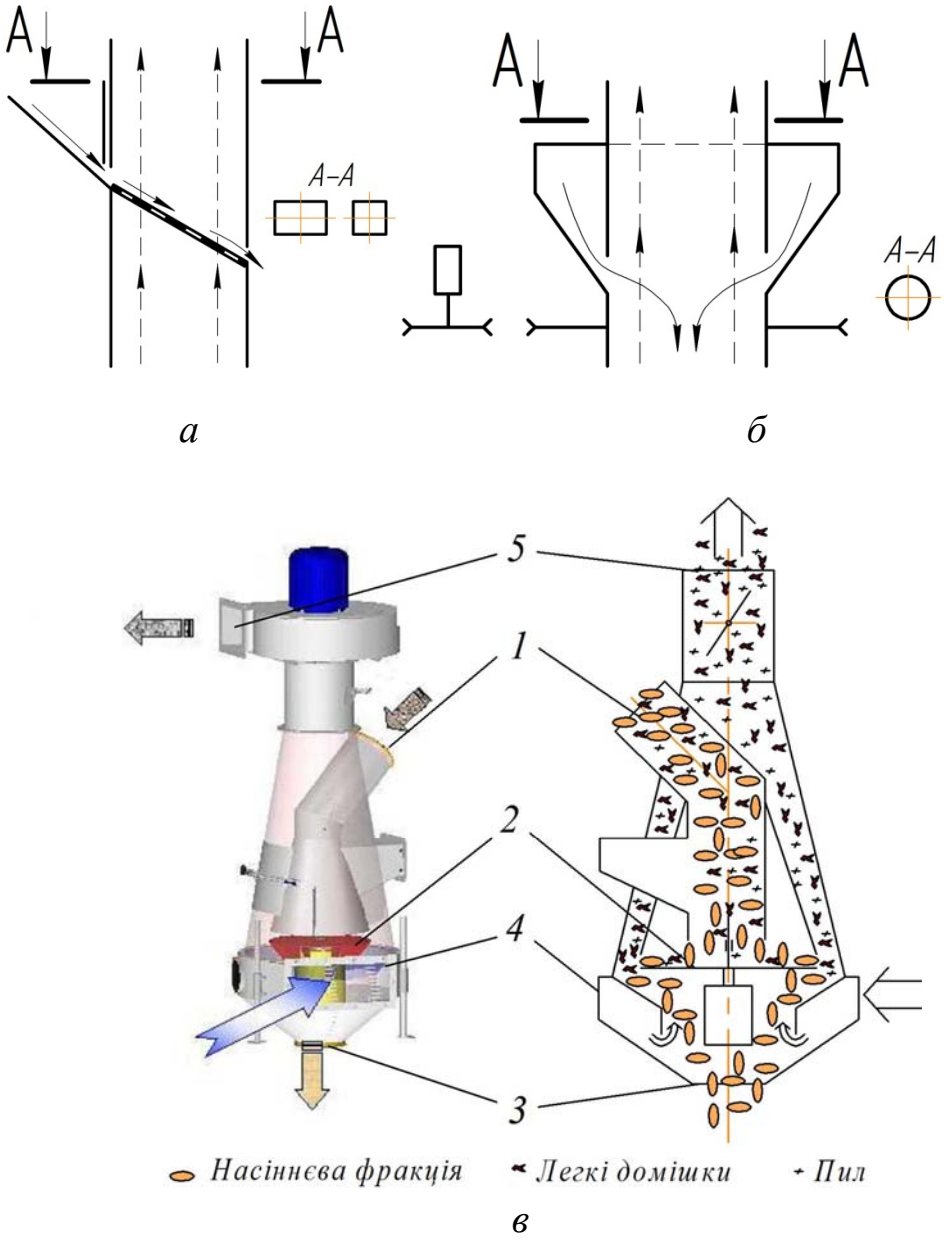
У спіральних пневмосепараційних каналах (рис. 1.11 в) на частинки зернової суміші одночасно діють сила тяжіння, аеродинамічний опір повітряного потоку та відцентрові сили, що виникають унаслідок спірального руху. Це призводить до додаткового контакту частинок із внутрішньою поверхнею каналу та інтенсифікує процес розділення за рахунок відмінностей не лише аеродинамічних властивостей, але й коефіцієнта тертя поверхні зерна. Такий комбінований механізм теоретично забезпечує більш глибоке фракціонування, однак на практиці ефективність знижується при збільшенні продуктивності через складність підтримання рівномірних умов обробки всього потоку. Саме тому спіральні канали не набули масового промислового застосування і використовуються переважно в спеціальних або експериментальних установках.

Криволінійні пневмосепараційні канали (рис. 1.11 г) за принципом дії близькі до спіральних, однак характеризуються менш складною геометрією потоку. Вони широко застосовуються у сільськогосподарській техніці, зокрема в скальператорах і сепараторах провідних виробників, таких як «Carter-Day» (США), «Schule» (Німеччина), а також у вітчизняних машинах ОКС-4, СТ-121 та інших. Їх популярність пояснюється відносною простотою конструкції, надійністю та достатньо високою ефективністю очищення зерна при помірних енергетичних витратах.

Окремо слід розглянути класифікацію пневмосепараторів за формою поперечного перерізу каналу, яка суттєво впливає на характер формування повітряного потоку та ефективність розділення. У промисловості застосовуються канали прямокутного, круглого та кільцевого перерізів.

Канали прямокутного перерізу (рис. 1.12 а) найбільш поширені у складі складних зерноочисних машин завдяки зручності компонування з решітними системами.

Водночас їх основним недоліком є нерівномірність розподілу швидкостей повітряного потоку по перерізу: у кутових зонах утворюються застійні ділянки («тіньові зони»), що знижує ефективність очищення та призводить до часткового проходження домішок без сепарації [8–9, 21].



а *б* *в*

Рисунок 1.12 – Форми поперечного перерізу каналів: а – прямокутної (зерноочисна машина ОС-4,5); б – круглої (сепаратор А.С. Матвєєва); в – кільцевої (пневмосепаратор SIGMA фірми "Damas")

Канали круглого перерізу відзначаються більш рівномірною структурою повітряного потоку, що позитивно впливає на стабільність

процесу сепарації, однак їх конструктивне компонування в багатофункціональних машинах є складнішим. Кільцеві пневмоканали, у свою чергу, забезпечують більш рівномірний розподіл повітря по радіусу потоку і застосовуються переважно в аспіраційних системах попереднього очищення, де важливо досягти високої стабільності аеродинамічних умов.

Узагальнюючи, можна зазначити, що вибір конструкції пневмоканалу визначається компромісом між ефективністю сепарації, енергетичними витратами, складністю виготовлення та можливістю інтеграції в технологічні лінії післязбиральної обробки зерна.

Дослідження, наведені в роботах [8–9, 19, 22], свідчать, що в пневмоканалах круглого поперечного перерізу (рис. 1.4 б) створюються умови для формування відносно рівномірного поля швидкостей повітря по всій площі каналу. Разом із тим, через вплив сил в'язкого тертя повітря біля стінок виникає неоднорідність у взаємодії зернового матеріалу з повітряним потоком. У результаті частинки, розташовані ближче до центральної осі, перебувають у зоні інтенсивної дії повітря довше, тоді як зернівки периферійних шарів зазнають менш тривалого аеродинамічного впливу, що знижує однорідність процесу сепарації.

Пневмоканали кільцевого перерізу набули найбільшого поширення у зерноочисних машинах іноземного виробництва. Їх конструкція забезпечує більш раціональне завантаження робочої зони та формування відносно стабільного і вирівняного швидкісного поля повітряного потоку. Це позитивно впливає на якість розділення зернової суміші. Водночас до недоліків таких систем слід віднести конструктивну складність, а також утворення локальних «тіньових» зон у місцях подачі матеріалу в канал і його подальшого виведення, що частково знижує ефективність очищення.

Аналіз сучасних зерноочисних технологій показує, що потенціал використання повітряного потоку як універсального робочого середовища для фракціонування зернових сумішей є значним. Саме тому подальше вдосконалення пневмосепараційних систем залишається актуальним напрямом досліджень, особливо в частині підвищення точності та стабільності процесу розділення.

Слід зазначити, що спроби підвищення продуктивності сепараторів шляхом простого збільшення питомого навантаження на робочі органи без їх конструктивного удосконалення призводять до суттєвого

погіршення якості сепарації та зростання втрат повноцінного зерна у відходи. При цьому можливості інтенсифікації процесу лише за рахунок геометричних параметрів пневмоканалів фактично наближаються до межі вичерпання. Це обумовлює необхідність переходу до нових технічних рішень, зокрема використання додаткових пасивних або активних елементів, здатних формувати більш сприятливі (умовно «ідеальні») умови для розділення зернової суміші.

На сучасному етапі розвитку зерноочисної техніки особливу увагу приділяють удосконаленню відцентрово-пневматичних сепараторів із кільцевим пневмоканалом. У таких системах реалізується принцип відцентрового розшарування зернового потоку з одночасним формуванням декількох фракційних шарів, що дозволяє підвищити точність та стабільність процесу сепарації. Подальше вдосконалення подібних конструкцій є перспективним напрямом для підвищення ефективності післязбиральної обробки зерна.

Проведений аналіз сучасних зерноочисних машин показав суттєві зміни у підходах до організації процесів очищення зернового матеріалу та загальні тенденції розвитку цієї техніки.

По-перше, слід відзначити, що традиційний етап попереднього очищення зерна, який раніше був спрямований переважно на виділення великих, легких та грубих домішок, у сучасних технологічних лініях поступово втрачає свою самостійність. Його функції значною мірою інтегруються в етап первинного очищення, під час якого додатково відокремлюється також значна частина дрібних домішок. Такий підхід дозволяє скоротити кількість технологічних операцій і підвищити загальну ефективність післязбиральної обробки зерна.

По-друге, характерною рисою розвитку світового машинобудування є формування широкої номенклатури універсальних зерноочисних машин потокового типу. Провідні зарубіжні виробники випускають серії обладнання з продуктивністю від 10–20 т/год до 150–250 т/год, що забезпечує їх використання як у невеликих фермерських господарствах, так і на великих зернопереробних комплексах. Водночас вітчизняні аналоги, як правило, мають обмежену продуктивність на рівні 40–50 т/год. Така різниця у технічному рівні є однією з причин недостатньо високої якості товарного зерна та насіннєвого матеріалу, особливо при інтенсивних потокових технологіях.

По-третє, у сучасних конструкціях зерноочисних машин перевага надається універсальним системам, оснащеним пневматичними каналами дорешітної та післярешітної аспірації. Завдяки гнучкості налаштувань такі машини можуть ефективно працювати як у режимі попереднього очищення, так і при підготовці насіннєвого матеріалу високої якості. Це значно розширює їх функціональні можливості та підвищує економічну доцільність застосування.

По-четверте, більшість високопродуктивних машин реалізує багатоступеневий принцип розділення зернового матеріалу за розмірами, як правило, з виділенням трьох основних фракцій: великих домішок, дрібних домішок і фуражного зерна. Така структура сепарації дозволяє більш точно керувати якістю кінцевого продукту та зменшувати втрати основного зерна.

По-п’яте, важливою конструктивною тенденцією є вдосконалення решітних систем. У сучасних машинах решета одного функціонального призначення, як правило, об’єднуються в один робочий ярус, тоді як колосові решета виділяються в окремий ярус або навіть в окремий решітний блок зі своїм кутом нахилу. Це дозволяє оптимізувати процес розподілу матеріалу по поверхні решіт, підвищити їх пропускну здатність і стабілізувати якість сепарації.

Додатково слід зазначити, що загальною тенденцією розвитку зерноочисної техніки є перехід до більш інтегрованих та адаптивних систем, здатних автоматично підлаштовуватися під властивості зернового матеріалу (вологість, засміченість, фракційний склад). У перспективі це відкриває можливості створення інтелектуальних зерноочисних комплексів із елементами автоматичного контролю та оптимізації процесів очищення в реальному часі.

1.1.2. Основні фактори та критерії ефективності очищення та фракціонування

Ефективність процесу очищення зернового матеріалу є одним із визначальних показників роботи сучасних зерноочисних машин, оскільки вона безпосередньо впливає на якість отриманого товарного та насіннєвого зерна, рівень втрат основної культури у відходи, а також на енергетичні витрати технологічного процесу. Умови сучасного аграрного виробництва характеризуються значною різноманітністю вихідного матеріалу, нестабільністю його фізико-механічних властивостей та

підвищеними вимогами до якості очищення, що обумовлює необхідність системного аналізу факторів, які визначають ефективність сепарації.

Одним із базових факторів є фізико-механічні властивості зернової суміші. До них відносять вологість, натуру, щільність, масу тисячі зерен, форму, шорсткість поверхні та аеродинамічні характеристики частинок. Вологість зерна є особливо критичною, оскільки вона змінює не лише масу та щільність частинок, але й характер їх взаємодії між собою. При підвищеній вологості спостерігається ефект агломерації дрібних домішок, що ускладнює їх відокремлення в пневматичних каналах та на решітних поверхнях. У той же час надмірно сухе зерно може бути крихким, що призводить до утворення додаткових дрібних фракцій і перевантаження системи очищення.

Гранулометричний склад є не менш важливим фактором, що визначає складність процесу сепарації. У випадку значної різниці між розмірами основної культури та домішок процес очищення відбувається більш ефективно, оскільки домінують механічні методи розділення. Проте при близьких розмірах компонентів основна роль переходить до аеродинамічних властивостей, зокрема до швидкості витання частинок, що потребує високої точності налаштування повітряного потоку та стабільності його параметрів.

Ключовим технологічним фактором є параметри повітряного потоку в пневмосистемах. Швидкість повітряного потоку повинна бути оптимальною: недостатня швидкість не забезпечує повного видалення легких домішок, тоді як надлишкова призводить до втрат кондиційного зерна. Крім швидкості, суттєве значення має рівномірність розподілу повітря по перерізу каналу. Нерівномірність потоку формує зони з різною інтенсивністю впливу, що викликає неоднакову якість сепарації в різних частинах робочої зони. Додатково важливими є турбулентність потоку, стабільність його структури та відсутність локальних завихрень, які можуть порушувати траєкторії руху частинок.

Конструктивні параметри робочих органів зерноочисних машин також мають визначальний вплив на ефективність очищення. До них належать геометрія та форма пневмоканалів, тип поперечного перерізу, кут нахилу каналів і решіт, довжина робочої зони, а також характер руху зернового шару. Наприклад, у прямокутних каналах часто виникають застійні «тіньові» зони, тоді як у круглих і кільцевих каналах

забезпечується більш рівномірний розподіл потоку, хоча вони є складнішими у виготовленні та обслуговуванні. У решітних системах важливим є не лише розмір отворів, але й характер коливального руху, який впливає на самоочищення решіт та запобігає їх забиванню.

Режимні параметри роботи машини також відіграють суттєву роль. Зокрема, продуктивність подачі зерна визначає товщину шару матеріалу на робочих поверхнях. При надмірному завантаженні знижується ефективність розділення через екранування частинок і погіршення доступу повітря до всього об'єму матеріалу. Навпаки, надто низьке завантаження призводить до нераціонального використання енергетичних ресурсів. Оптимізація подачі матеріалу є одним із ключових завдань налаштування зерноочисних машин.

Важливим фактором є також ступінь попередньої підготовки зерна. Попереднє очищення дозволяє видалити найбільш великі та легкі домішки, що значно знижує навантаження на основні робочі органи. Якщо цей етап пропущено або виконано неякісно, це призводить до перевантаження системи, зниження стабільності повітряного потоку та погіршення якості кінцевого продукту. У потокових технологіях попередня підготовка є обов'язковою складовою ефективного процесу очищення.

Окремо слід розглянути вплив взаємодії частинок у зерновому потоці. При високій концентрації матеріалу виникають ефекти взаємного екранування, зіткнення частинок та зміна їх траєкторій руху. Це особливо критично для пневмосепараційних систем, де процес розділення базується на різниці аеродинамічних властивостей. Надмірна щільність потоку знижує точність розділення і може призводити до змішування фракцій.

Суттєвим фактором є також технічний стан обладнання. Зношування робочих поверхонь, забруднення каналів, порушення герметичності системи подачі повітря, а також нестабільність роботи вентиляторів призводять до зміни розрахункових параметрів процесу. У результаті знижується точність сепарації та зростають енергетичні витрати. Регулярне технічне обслуговування та контроль параметрів роботи є обов'язковими умовами стабільної ефективності очищення.

У сучасних умовах важливого значення набуває автоматизація процесів керування зерноочисними машинами. Використання датчиків витрати, тиску повітря, вологості та засміченості зерна дозволяє в

режимі реального часу коригувати параметри роботи системи. Це забезпечує адаптивність процесу очищення до змінних властивостей вихідного матеріалу та підвищує стабільність якості кінцевого продукту.

Окремо слід відзначити енергетичний фактор, який все частіше враховується при оцінці ефективності зерноочисних систем. Надмірні втрати енергії в пневмосистемах, нераціональна організація повітряних потоків та перевантаження робочих органів призводять до зростання собівартості обробки зерна. Тому сучасні тенденції розвитку спрямовані на зменшення енергоспоживання при одночасному підвищенні точності сепарації.

Таким чином, ефективність очищення зернового матеріалу є складною багатофакторною категорією, що формується під впливом властивостей зернової суміші, аеродинамічних режимів, конструктивних і режимних параметрів обладнання, ступеня попередньої підготовки, технічного стану машин та рівня автоматизації процесу. Лише комплексне врахування всіх зазначених чинників дозволяє досягти високої якості очищення, мінімізувати втрати зерна та забезпечити стабільну роботу зерноочисних комплексів у реальних виробничих умовах.

1.1.3. Вплив фізико-механічних властивостей зерна на динаміку його фракціонування

Фізико-механічні властивості зернового матеріалу є одним із визначальних факторів, що формують ефективність процесів очищення, сепарації та фракціонування у зерноочисних машинах. Саме сукупність цих властивостей задає початкові умови для роботи решітних, пневматичних та комбінованих систем розділення, впливаючи на характер руху зерна, його взаємодію з робочими поверхнями та поведінку в повітряному потоці. У реальних умовах післязбиральної обробки зернова маса є неоднорідною системою, що включає основну культуру, домішки органічного та мінерального походження, а також пошкоджені та недозрілі зернівки, що суттєво ускладнює процес її розділення.

Однією з найважливіших характеристик є вологість зерна. Вона безпосередньо впливає на масу, щільність, пружність і липкість частинок. При підвищенні вологості зерновий матеріал набуває схильності до злипання, утворення агломератів і налипання на робочі поверхні машин. Це особливо негативно позначається на роботі решітних систем,

де зменшується ефективна площа просіювання, а також на пневмосепараційних каналах, у яких змінюється аеродинамічна поведінка частинок. У той же час надмірне зниження вологості може призводити до підвищення крихкості зерна, утворення додаткових дрібних фракцій і, як наслідок, перевантаження системи очищення.

Щільність і маса зернівок також відіграють суттєву роль у процесах сепарації. Різниця густини між основною культурою та домішками є базовою умовою для ефективного гравітаційного та аеродинамічного розділення. У пневмосепараційних системах саме співвідношення маси та площі проєкції частинки визначає її швидкість витання, а отже – траєкторію руху в повітряному потоці. Чим більша різниця у щільності компонентів суміші, тим вищою є точність їх розділення. Однак у випадку близьких значень цього параметра ефективність процесу суттєво знижується, що вимагає більш точного регулювання режимів роботи машин.

Форма зерна є ще одним важливим фактором, що впливає на характер його руху. Овальні, видовжені або плоскі зернівки мають різні аеродинамічні характеристики, що призводить до неоднакової поведінки в повітряному потоці. Крім того, форма частинок визначає їх здатність до просіювання через отвори решіт: видовжені зернівки можуть орієнтуватися певним чином і проходити через отвори, розмір яких співмірний із їх поперечним перерізом. Це явище може як покращувати, так і погіршувати якість розділення залежно від режиму роботи обладнання.

Шорсткість і стан поверхні зерна також суттєво впливають на процес сепарації. Зернівки з підвищеною шорсткістю мають більший коефіцієнт тертя, що впливає на їх рух по решітних поверхнях і взаємодію з повітряним потоком у пневмосистемах. Наявність пилу, воскового нальоту або механічних пошкоджень змінює аеродинамічні властивості частинок і може призводити до відхилення від розрахункових траєкторій руху. У свою чергу гладкі поверхні сприяють більш рівномірному переміщенню, але знижують ефект захоплення повітряним потоком для легких частинок.

Аеродинамічні властивості зерна, зокрема швидкість витання, є одним із ключових параметрів, що визначає ефективність пневматичного очищення. Швидкість витання залежить від маси, форми, розмірів і стану поверхні частинки. У процесі сепарації зернова суміш

розділяється саме за різницею у швидкостях витання компонентів. Якщо ці значення близькі між собою, процес розділення ускладнюється, і необхідно застосовувати більш складні конструктивні рішення пневмоканалів або багатоступеневі системи очищення.

Механічна міцність зерна також має практичне значення, особливо в умовах інтенсивної обробки. Під дією ударних навантажень, вібрацій і тертя частина зернівок може руйнуватися, утворюючи дрібні фракції та пил, що додатково ускладнює процес сепарації. Це особливо характерно для пересушеного або біологічно ослабленого зерна. У результаті зростає навантаження на пневмосистеми та знижується загальна ефективність очищення.

Не менш важливим є гранулометричний склад зернової маси, який визначає співвідношення частинок різних розмірів. Наявність широкого діапазону фракцій ускладнює процес розділення, оскільки частинки різних домішок можуть мати схожі розміри з основною культурою. У таких випадках зростає роль комбінованих систем очищення, що поєднують решітні, пневматичні та інерційні методи сепарації.

Слід також враховувати, що фізико-механічні властивості зерна є змінними параметрами, які залежать від умов вирощування, сорту культури, технології збирання та зберігання. Це створює додаткові труднощі при проєктуванні універсальних зерноочисних машин, оскільки вони повинні забезпечувати стабільну роботу в широкому діапазоні вхідних характеристик матеріалу.

Додатково необхідно зазначити, що взаємодія частинок між собою в зерновому потоці також залежить від їх фізико-механічних властивостей. При високій концентрації матеріалу виникають ефекти тертя, зіткнень і екранування, що змінюють траєкторії руху окремих зернівок і знижують точність сепарації. Це особливо актуально для пневмосепараційних каналів, де процес розділення базується на індивідуальній поведінці частинок у повітряному середовищі.

Узагальнюючи, слід відзначити, що фізико-механічні властивості зерна є базовим фактором, який визначає не лише ефективність очищення, але й вибір конструктивних і режимних параметрів зерноочисних машин. Їх комплексний вплив вимагає врахування при проєктуванні обладнання, оптимізації технологічних режимів та розробці нових високоефективних систем післязбиральної обробки зернових культур.

1.1.4. Недоліки традиційних систем контролю процесів очищення та фракціонування зерна

Традиційні системи контролю процесів очищення зернового матеріалу, які широко застосовуються у зерноочисних машинах попередніх поколінь, характеризуються низкою суттєвих обмежень, що знижують загальну ефективність роботи обладнання та ускладнюють забезпечення стабільної якості кінцевого продукту. Незважаючи на конструктивну простоту та відносну надійність, такі системи не здатні повною мірою враховувати змінність властивостей зернового матеріалу та динамічний характер технологічного процесу.

Одним із ключових недоліків традиційних систем контролю є їх переважно механічний або напівавтоматичний характер. У більшості випадків регулювання параметрів роботи зерноочисних машин здійснюється оператором на основі візуальних спостережень або за непрямими ознаками, такими як кількість відходів або зовнішній вигляд очищеного зерна. Такий підхід є суб’єктивним і не забезпечує достатньої точності керування процесом, особливо в умовах змінної вологості, засміченості та фракційного складу зернової маси.

Іншим суттєвим обмеженням є відсутність оперативного зворотного зв’язку в реальному часі. У традиційних системах контроль параметрів, як правило, здійснюється періодично або з великими інтервалами часу, що не дозволяє швидко реагувати на зміни властивостей вхідного матеріалу. У результаті виникають коливання якості очищення, перевантаження окремих робочих органів або, навпаки, їх недовантаження, що негативно впливає на стабільність технологічного процесу.

Важливою проблемою є також обмежені можливості регулювання повітряних потоків у пневмосистемах. У багатьох традиційних конструкціях швидкість і рівномірність повітряного потоку встановлюються один раз перед початком роботи і не коригуються в процесі експлуатації. Це призводить до того, що при зміні вологості або засміченості зерна оптимальні умови сепарації порушуються, а ефективність очищення знижується. Відсутність автоматичного регулювання вентиляторів та заслінок є однією з основних причин нестабільної якості роботи таких систем.

Суттєвим недоліком є також низький рівень інформативності традиційних систем контролю. У більшості випадків оператор не має можливості отримувати детальну інформацію про параметри повітряного

потоку, товщину зернового шару, швидкість руху матеріалу або ступінь його очищення. Відсутність точних вимірювальних даних ускладнює прийняття обґрунтованих рішень щодо оптимізації режимів роботи машини.

Окремо слід відзначити недостатню адаптивність традиційних систем до різних видів зернових культур. Кожна культура має свої специфічні фізико-механічні властивості, однак у більшості випадків налаштування зерноочисних машин виконується за усередненими параметрами. Це призводить до того, що при переході з однієї культури на іншу (наприклад, з пшениці на ячмінь або кукурудзу) ефективність очищення суттєво змінюється і потребує тривалого ручного переналаднання обладнання.

Ще одним важливим недоліком є значні втрати зерна у відходи через недостатньо точне регулювання процесу сепарації. У традиційних системах часто спостерігається або надмірне «перевівання» зерна, коли частина повноцінного продукту потрапляє у відходи, або, навпаки, недостатнє очищення, коли домішки залишаються у товарній фракції. Обидва випадки негативно впливають на економічну ефективність виробництва.

Також слід враховувати, що традиційні системи контролю мають обмежені можливості інтеграції в сучасні автоматизовані технологічні лінії. Відсутність цифрових інтерфейсів, датчиків високої точності та систем дистанційного керування ускладнює їх включення в єдині інформаційно-керовані комплекси післязбиральної обробки зерна.

Крім того, значним недоліком є підвищена залежність якості роботи від кваліфікації оператора. Оскільки більшість рішень приймається вручну, ефективність роботи машини значною мірою визначається досвідом персоналу. Це створює додатковий людський фактор ризику та знижує повторюваність результатів очищення.

Слід також відзначити, що традиційні системи контролю не враховують у повному обсязі динамічні процеси, які відбуваються в зерновому потоці. Зокрема, не аналізуються ефекти взаємодії частинок, зміни щільності шару, турбулентність повітряного потоку та локальні неоднорідності завантаження. Усі ці фактори суттєво впливають на якість сепарації, але залишаються поза межами контролю в класичних системах.

У сучасних умовах особливо актуальною проблемою є також енергонеефективність традиційних систем. Через відсутність точного

регулювання режимів роботи часто спостерігається надлишкове споживання електроенергії вентиляторами та приводами, що збільшує експлуатаційні витрати.

Таким чином, традиційні системи контролю зерноочисних машин мають низку суттєвих недоліків, серед яких можна виділити низький рівень автоматизації, відсутність оперативного зворотного зв'язку, обмежену адаптивність до змінних властивостей зернового матеріалу, недостатню інформативність та значну залежність від людського фактору. У сукупності ці недоліки зумовлюють необхідність переходу до сучасних автоматизованих та інтелектуальних систем керування, здатних забезпечити стабільну якість очищення, мінімізацію втрат та підвищення енергоефективності технологічного процесу.

1.1.5. Перспективи автоматизації та оптико-електронного контролю процесів фракціонування

Сучасний етап розвитку зерноочисних технологій характеризується переходом від традиційних механічних та напівавтоматичних систем керування до комплексних автоматизованих і цифрових рішень, які забезпечують безперервний контроль параметрів технологічного процесу та адаптивне регулювання режимів роботи обладнання. Особливе місце в цьому напрямі займає впровадження систем оптичного контролю, комп'ютерного зору та елементів штучного інтелекту, що дозволяє суттєво підвищити точність сепарації та стабільність якості очищення зерна.

Однією з ключових передумов автоматизації є необхідність обробки великого обсягу змінних вхідних даних, пов'язаних із фізико-механічними властивостями зернової маси. У реальних умовах зерно надходить на очищення з різним рівнем вологості, засміченості, фракційного складу та механічних пошкоджень. Це створює складну динамічну систему, яка потребує оперативного коригування параметрів роботи машин. Традиційні методи керування не здатні забезпечити таку гнучкість, тоді як автоматизовані системи з використанням сенсорів та оптичних модулів дозволяють здійснювати безперервний моніторинг стану зернового потоку.

Оптичний контроль у зерноочисних системах базується на аналізі зображень зернової маси за допомогою камер високої роздільної здатності та спеціалізованих алгоритмів обробки даних. Такі системи

дозволяють визначати форму, розмір, колір, ступінь пошкодження та наявність домішок у режимі реального часу. Використання методів комп'ютерного зору дає можливість автоматично класифікувати частинки зернового матеріалу та оцінювати якість очищення без необхідності відбору проб і лабораторного аналізу.

Важливою перевагою оптичних систем є їх здатність до високошвидкісного аналізу великого потоку частинок. Це особливо актуально для сучасних високопродуктивних зерноочисних машин, де обробляються десятки і сотні тон зерна на годину. У таких умовах ручний контроль є неможливим або малоефективним, тоді як автоматизовані системи здатні забезпечувати безперервний моніторинг із високою точністю.

Іншим перспективним напрямом є інтеграція оптичного контролю з системами автоматичного регулювання пневмосепараційних і решітних модулів. Наприклад, на основі аналізу концентрації легких домішок у повітряному потоці може автоматично змінюватися швидкість вентилятора або положення регулюючих заслінок. Аналогічно, інформація про фракційний склад зерна може використовуватися для адаптації режимів роботи решітного стану, що дозволяє підтримувати оптимальні умови сепарації незалежно від змін властивостей вихідного матеріалу.

Суттєвим кроком у розвитку автоматизації є впровадження елементів штучного інтелекту та машинного навчання. Такі системи здатні накопичувати статистичні дані про процес очищення, аналізувати їх та формувати оптимальні стратегії керування обладнанням. Зокрема, можливе створення моделей прогнозування якості очищення залежно від параметрів зернового потоку, що дозволяє завчасно коригувати режими роботи машини.

Окремо слід відзначити розвиток сенсорних технологій, які доповнюють оптичний контроль. До них належать датчики вологості, тиску повітря, швидкості потоку, вібраційні сенсори та системи контролю навантаження на робочі органи. Комплексне використання таких датчиків забезпечує формування повної інформаційної картини технологічного процесу та дозволяє здійснювати багатокритеріальну оптимізацію роботи зерноочисних систем.

Перспективним напрямом також є впровадження безконтактних методів контролю якості зерна, зокрема спектрального аналізу в

інфрачервоному та ближньому інфрачервоному діапазоні. Такі методи дозволяють визначати вологість, вміст білка, олійності та інших якісних показників без руйнування матеріалу, що особливо важливо для насіннєвого зерна.

Важливою тенденцією є також розвиток концепції «розумних» зерноочисних машин, які здатні самостійно адаптуватися до змін умов роботи. У таких системах усі основні процеси – подача зерна, регулювання повітряного потоку, робота решітного стану та контроль якості – інтегруються в єдину цифрову платформу керування. Це дозволяє мінімізувати вплив людського фактору та забезпечити стабільну якість продукції незалежно від зовнішніх умов.

Окрему роль відіграє можливість дистанційного моніторингу та керування зерноочисними комплексами. Завдяки використанню промислових мереж передачі даних та хмарних технологій оператор може контролювати роботу обладнання в режимі реального часу, отримувати аналітичні звіти та оперативно реагувати на відхилення у процесі очищення.

Слід також зазначити, що автоматизація та оптичний контроль сприяють підвищенню енергоефективності зерноочисних систем. Завдяки точному регулюванню режимів роботи зменшуються втрати енергії на надлишкову вентиляцію, зайве механічне перемішування та перевантаження робочих органів. Це дозволяє не лише покращити якість очищення, але й знизити експлуатаційні витрати.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що перспективи розвитку зерноочисних технологій безпосередньо пов’язані з впровадженням автоматизованих систем керування, оптичного контролю та інтелектуальних алгоритмів обробки даних. Поєднання цих технологій створює передумови для формування нового покоління зерноочисних машин, здатних забезпечувати високу точність сепарації, адаптивність до змінних умов роботи та мінімальний рівень енергоспоживання при максимальній продуктивності.

Таким чином, подальший розвиток зерноочисної техніки пов’язаний із переходом до комплексних автоматизованих та інтелектуальних систем, що забезпечить високий рівень ефективності процесу фракціонування зерна.

1.2. Проблема втрат повноцінного зерна та методи їх контролю

Ефективність функціонування аграрного сектору та забезпечення глобальної продовольчої безпеки безпосередньо залежать від мінімізації втрат сільськогосподарської продукції на етапах післязбиральної обробки. Проблема втрат повноцінного зерна є комплексним викликом, що охоплює кількісні показники маси та якісні характеристики продукції, які формують її ринкову вартість. На сучасних елеваторах, токах та зерноочисних комплексах контроль за станом зернової маси здійснюється за допомогою широкого спектру технологій – від традиційних механічних пристроїв до складних акустичних та оптичних датчиків, інтегрованих у загальні системи автоматизації [26].

1.2.1. Класифікація та природа втрат зерна в процесах післязбиральної обробки

Втрати повноцінного зерна під час сепарації є критичним фактором, оскільки на етапі очищення видаляється від 15% до 20% маси зібраного врожаю, що складається з домішок та відходів. В Україні загальні втрати на етапах післязбиральної обробки оцінюються щонайменше у 15% (близько 5 млн тон на рік), значна частина яких припадає саме на неефективну роботу зерноочисних машин.

Природа та причини втрат залежать від типу робочих органів машин.

В повітряно-решітних сепараторах втрати виникають переважно через неправильне налаштування повітряного потоку та стан решіт.

При високій швидкості повітря або щільному поданні маси в канал повноцінне зерно захоплюється потоком разом із легкими домішками та виноситься у відходи.

У плоско-решітних сепараторах (типу ОВС) велика кількість зерна може висипатися через технологічні щілини під час перетікання з сита на сито.

Наявність вологого бур'яну або трави призводить до забивання отворів, через що зерно не просіюється, а сходить у відходи.

Відцентрові сепаратори (БЦС) характеризуються високою інтенсивністю впливу на зерно.

Втрати зерна у відходи в відцентрових сепараторах зазвичай становлять від 2% до 6% залежно від культури.

Для ефективної сепарації барабан розкручується до 800 обертів на хвилину, що спричиняє сильне дроблення кукурудзи, гороху та сої. Травмоване зерно (січка) автоматично переходить у категорію відходів або втрачає посівні якості.

В трієрних циліндрах (для очищення за довжиною) втрати виникають через неточне калібрування. Втрати зростають при збільшенні частоти обертання циліндра або неправильному встановленні кута приймального жолоба.

Якщо розмір чарунок вибрано невірно (занадто великі для повноцінного зерна), основна культура потрапляє в жолоб для коротких домішок.

У пневмосепараторах та гравітаційних столах втрати виникають при роботі з зерном, яке має низьку натуру (щупле зерно), оскільки система не може чітко відрізнити його від важких домішок. Ефективність очищення в таких системах зазвичай становить близько 95,9-96%, але при високій вологості вона різко падає.

Загалом, недостатнє регулювання обладнання під час обробки може призводити до втрат до 4.5% врожаю. На насіннєвих лініях, де вимоги до чистоти перевищують 99%, у процесі очищення та калібрування може бути втрачено до 50% потенційно придатного насіння, якщо воно не відповідає суворим стандартам розміру або ваги.

Перевантаження обладнання та помилки в його налаштуванні є основними суб'єктивними факторами, що призводять до значних втрат повноцінного зерна під час сепарації. За даними досліджень, неправильне регулювання обладнання може збільшити втрати до 4,5% від загального врожаю.

Вплив перевантаження (надмірної подачі)

Перевантаження зерноочисних машин призводить до порушення фізики процесу сепарації.

Виникає ефект «килима». При занадто високій швидкості подачі на решетах утворюється щільний шар матеріалу (зернової маси разом із половою та соломою). У таких умовах зерно не встигає досягти поверхні решета і «пливе» поверх шару домішок безпосередньо у відходи.

Порушення аеродинаміки. В аспіраційних каналах надмірна концентрація зерна в потоці повітря заважає вільному виділенню легких домішок. В результаті або домішки залишаються в зерні, або потік повітря підхоплює частину зерна через зміну опору середовища.

На практиці продуктивність сепараторів (наприклад, БЦС-25) часто виявляється вдвічі нижчою за паспортну при роботі з вологим або сильно засміченим зерном. Спроба працювати на «паспортних» показниках у таких умовах неминуче веде до скидання 2–6% зерна у відходи.

Типові помилки при налаштуванні

Кожна культура вимагає індивідуального підбору параметрів, відхилення від яких критично впливає на рівень втрат.

Швидкість повітряного потоку це найважливіший параметр. Якщо швидкість повітря перевищує критичну швидкість витання зерна (для пшениці це зазвичай 8,5–11,5 м/с), повноцінне зерно виноситься в аспірацію. Оптимальний діапазон для очищення зазвичай становить 3,5–4,8 м/с.

Частота та амплітуда вібрації. При надто високій частоті вібрації зерно «скаче» по решету, що скорочує час його контакту з отворами. Зернівка просто не встигає провалитися і виходить разом із грубими відходами.

Вибір розміру отворів решіт. Типова помилка – використання занадто малих підсівних решіт. Наприклад, використання решета діаметром 8–9 мм замість необхідних 10–12 мм для певних сортів ячменю різко збільшує вихід зерна у відходи.

Кут нахилу та забивання. Невірний кут нахилу решіт призводить до занадто швидкого або повільного руху маси. Крім того, відсутність контролю за очищенням решіт (наприклад, через знос щіток або гумових кульок) призводить до їх забивання вологим сміттям, що повністю блокує сепарацію.

Таблиця 1.1 – Наслідки помилок для різних типів машин

Помилка / Фактор	**Повітряно-решітні**	**Відцентрові (БЦС)**
Перевантаження	Створення «мату» з полови, що несе зерно у відходи	Забивання внутрішнього барабана, просипання через верх
Висока швидкість повітря	Прямий винос зерна в осадову камеру	Менший вплив, але погіршує якість очищення
Невідповідність решіт	Зерно виходить «сходом» (через край)	Зерно залишається у барабані або травмується

Втрати зерна при транспортуванні та обробці на елеваторах прийнято розділяти на дві основні групи: за кількістю (недостача ваги) та за якістю (невідповідність показників). У свою чергу, ці втрати діляться на нормативні, що допускаються державними стандартами, та наднормативні, які виникають внаслідок технічних несправностей або порушень технологічного процесу [27].

Кількісні та нормативні втрати

Нормативні втрати зерна включають природні втрати під час транспортування та похибку ваговимірювального обладнання. Згідно з чинними в Україні нормами, прийнятими ще у 1986 році, нормою втрати зерна в автотранспортних перевезеннях вважається 0,07% ваги нетто [28]. Для залізничного транспорту цей показник значно вищий і становить 0,5%, що часто стає причиною переведення вантажів на автомобільні шляхи. Похибка ваг зазвичай коливається в межах 20–80 кг на партію, що для різних культур становить 0,17–0,19% від загальної маси [29].

Таблиця 1.2 – Нормативні втрати та причини втрат зерна при транспортуванні зерна [30]

Вид транспорту / Обладнання	**Нормативні втрати (%)**	**Причини**
Автомобільний транспорт	0,07	Розпил, просипання
Залізничний транспорт	0,50	Конструкція вагонів, витік
Ваговимірювальне обладнання	0,17 – 0,19	Технічна похибка приладів
Ковшові елеватори (норії)	1,78 – 1,98	Подрібнення
Шнекові конвеєри	1,36 – 1,73	Тертя між зерном та коробом

Якісні втрати та фактори впливу

Втрати за якістю спричиняються як об'єктивними фізичними процесами, так і суб'єктивними факторами. До об'єктивних причин відносять механічні пошкодження зернівки робочими органами машин, що призводить до утворення зернового пилу та дрібних часток [31]. До суб'єктивних факторів належать маніпуляції лаборантів при взятті проб, навмисне додавання сміття або води для збільшення ваги, а також перешарування зерна в ємностях зберігання[29]. Підвищена вологість є одним із найкритичніших факторів, оскільки вона сприяє швидкому зростанню грибкових інфекцій та втраті поживних властивостей, що може призвести до біологічних втрат на рівні 10–15% [32].

1.2.2. Механічні методи контролю та запобігання втратам

Механічні втрати на елеваторах зерноочисних комплексах – це передусім зерновий пил та бите зерно, що утворюються внаслідок взаємодії продукції з робочими органами транспортерів, стінками трубопроводів та іншими механізмами. Для боротьби з цим явищем на підприємствах впроваджується комплекс організаційних, технологічних та технічних заходів.

Організаційні та технологічні заходи

Організаційні методи спрямовані на мінімізацію руху зерна між підрозділами елеватора. Аналіз існуючих шляхів руху дозволяє виключити непотрібні ланки, де зерно може піддаватися додатковому механічному впливу. Технологічні заходи зосереджені на оптимізації процесів доробки (очищення та сепарації), де рух зерна є найбільш інтенсивним. Впровадження автоматизації управлінського обліку, зокрема через спеціалізоване програмне забезпечення (наприклад, GES: Зерно КОРП), дозволяє швидко виявляти неефективні ланки внутрішнього руху [31].

Технічні рішення та модернізація обладнання

Найбільш дієвим технічним заходом є футерування робочих поверхонь. Покриття стінок самопливів, лотків та вузлів пересипки поліуретаном або іншими зносостійкими полімерами дозволяє знизити втрати повноцінного зерна до 5% [31]. Окрім захисту продукції, це суттєво подовжує термін служби металоконструкцій. Заміна застарілих механічних систем на пневматичні або гравітаційні також сприяє збереженню цілісності зернівки.

Таблиця 1.3 – Методи контролю та запобігання втратам запобігання втратам зерна

Тип обладнання	**Метод контролю / Оптимізації**	**Ефект**
Самопливне обладнання	Футерування поліуретаном	Зниження бою зерна до 5%
Вагові дозатори	Автоматизація та тензометрія	Підвищення точності зважування
Очисні машини	Регулювання аспірації	Зменшення виносу зерна в пил
Бункери та силоси	Датчики рівня (мембранні, прапорцеві)	Запобігання просипам та завалам

Для контролю наявності зерна в ємностях та потоках використовуються механічні датчики рівня. Мембранні пристрої (типу МДУ) реагують на тиск зернової маси, що передається через мембрану на мікровимикач [33]. Прапорцеві датчики використовують кутове переміщення шарнірно-підвішеної пластини, яка під тиском зерна змінює стан контактів. Ці прості, але надійні пристрої є фундаментом для систем запобігання втратам внаслідок переповнення обладнання.

1.2.3. Акустичні системи детектування втрат повноцінного зерна

Акустичні методи контролю базуються на реєстрації звукових хвиль або вібрацій, що виникають при ударі зерна об чутливу поверхню. Це дозволяє в реальному часі визначати кількість зерна, що потрапляє у відходи очисних машин або залишається в соломі при обмолоті [34].

Принцип дії та фізичне підґрунтя

Коли зернівка вдаряється об металеву або полімерну пластину, виникає імпульсний сигнал. Маса повноцінного зерна значно перевищує масу часток соломи чи полови, що створює різницю в амплітуді та частотному спектрі акустичного відгуку[35]. Сучасні акустичні датчики використовують мікрофони або п'єзоелектричні перетворювачі для вловлювання цих коливань. Сигнал передається через слухову трубку або безпосередньо від п'єзоелемента до електронного блоку керування (ECU), де він піддається фільтрації та аналізу [36].

Математично процес удару зернівки об пластину можна описати як імпульсну силу F, що викликає коливання пластини. Згідно з теорією тонких пластин Кірхгофа, власна частота коливань f_n залежить від геометрії та матеріалу чутливого елемента. Для ефективної сепарації сигналу зерна від шуму обладнання застосовується смугова фільтрація, зазвичай у діапазоні від 1,0 до 3,0 кГц для зернових культур [39].

Інноваційні алгоритми обробки сигналів

Традиційні акустичні системи часто страждають від вібраційного шуму самих машин. Для вирішення цієї проблеми застосовуються передові алгоритми.

- Швидке перетворення Фур'є (FFT). Дозволяє аналізувати енергію сигналу в різних частотних діапазонах, ідентифікуючи піки, характерні для повноцінного зерна [39].
- Дискретне вейвлет-перетворення (DWT). Використовується для

багатоканального детектування ударів, що дозволяє виявляти навіть слабкі сигнали в умовах інтенсивного потоку домішок [34].

- Адаптивна нейро-нечітка система виведення (ANFIS). Допомагає коригувати поріг детектування в залежності від вологості зерна та швидкості подачі, що підвищує точність моніторингу до 92,6% [42].

Практичне застосування на очисних комплексах

На зерноочисних комплексах акустичні датчики встановлюються в місцях вивантаження відходів. Це дозволяє оператору миттєво реагувати на збільшення втрат повноцінного зерна, змінюючи швидкість повітряного потоку в аспіраційних каналах або зазори в решетних станах [43]. Наприклад, системи від Precision Planting використовують акустичні трубки та iPad-інтерфейс для візуалізації потоку зерна та сповіщення про блокування або надмірні втрати [38].

1.2.4. П'єзоелектричні датчики: конструкція та оптимізація

П'єзоелектричні сенсори є найбільш поширеним типом контактних датчиків для моніторингу втрат [34]. Вони перетворюють механічну напругу безпосередньо в електричний заряд (рис. 1.13).

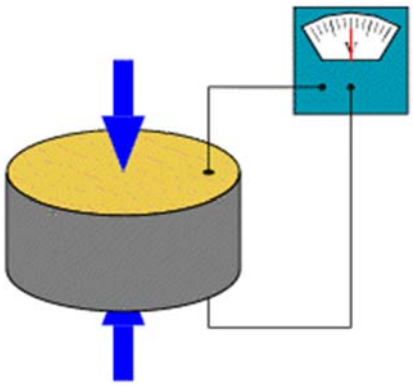


Рисунок 1.13 – Схема п'єзоелектричного датчика

Ефективність датчика залежить від вибору матеріалу чутливої пластини та її форми. Дослідження з використанням програмного забезпечення COMSOL 6.0 показали [40], що кругла пластина з нержавіючої сталі 304 має кращі характеристики чутливості та вищі власні частоти порівняно з алюмінієвими чи мідно-нікелевими прямокутними пластинами (табл .1.4).

Таблиця 1.4 – Характеристики матеріалу чутливої пластини п'єзоелектричного датчика

Характеристика матеріалу	**Нержавіюча сталь 304**	**Алюмінієвий сплав**	**П'єзокераміка (PZT)**
Власна частота	Висока	Середня	Дуже висока
Стійкість до зносу	Висока	Низька	Крихка (потребує захисту)
Співвідношення сигнал/шум	Оптимальне	Низьке	Високе

Для підвищення точності детектування часто використовується двошарова структура: ударна пластина з нержавіючої сталі та шар п'єзокераміки або п'єзоплівки PVDF, розділені віскоеластичним демпфуючим шаром [34]. Це дозволяє швидко гасити коливання від попереднього удару, запобігаючи перекриттю сигналів при високій інтенсивності потоку (понад 40 зерен на секунду) [39].

Точність вимірювання залежить від параметрів монтажу датчика. Оптимальним вважається кут нахилу пластини від 30° до 60°, що забезпечує чіткий удар та швидке відскакування зернівки без ризику повторної реєстрації [34]. Висота падіння зерна на датчик має бути в межах 300–550 мм для створення достатньої кінетичної енергії удару [37]. Системи на базі мікроконтролерів ESP32 з фільтром Калмана дозволяють розраховувати втрати з похибкою менше 3%.

1.2.5. Оптичні технології та системи комп'ютерного зору

Оптичні датчики та системи машинного зору представляють собою вершину технологій контролю втрат, пропонуючи безконтактний аналіз кожного об'єкта в потоці [45].

Принцип роботи оптичних сортувальників (фотосепараторів)

Сучасні фотосепаратори (наприклад, серії PETKUS X-clean або Buhler SORTEX) використовують високошвидкісні камери та AI-алгоритми для інспекції зерна (рис.1.14). Кожна зернівка сканується на предмет кольору, форми, розміру та характеристик поверхні [45].

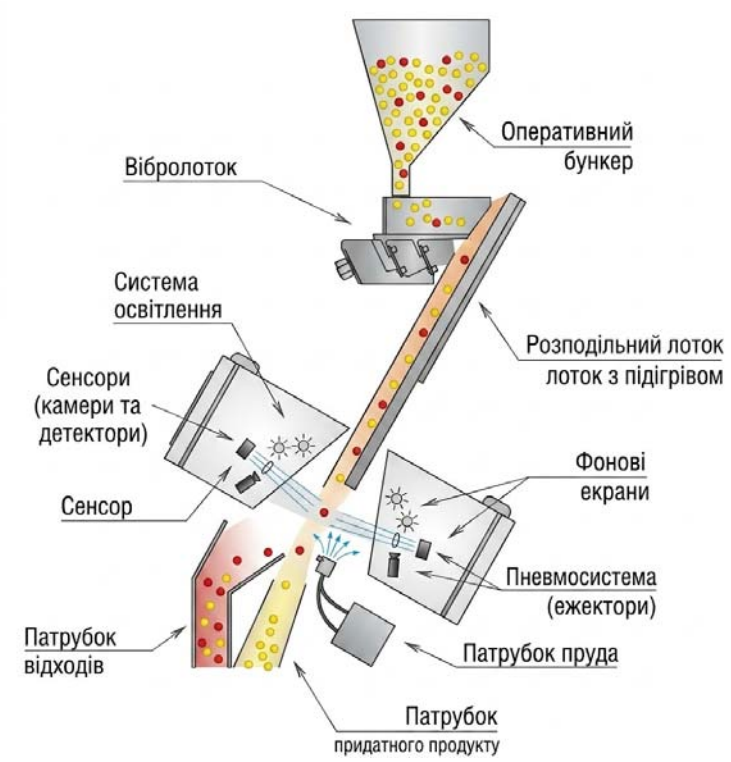


Рисунок 1.14 – Принцип роботи оптичного сортувальника (фотосепаратора)

Процес фракціонування здійснюється наступним чином.

1. Захоплення зображення. Камери фіксують мільйони пікселів спектральних даних щосекунди.
2. Класифікація. Система порівнює дані з еталонними параметрами якості в режимі реального часу (мілісекунди).
3. Відбраковування. При виявленні дефекту або стороннього матеріалу активуються прецизійні повітряні форсунки, які «відстрілюють» небажаний об'єкт із потоку.

Такі системи здатні виявляти дефекти розміром до 0,5 мм, що робить їх незамінними для видалення фузаріозних зерен, насіння бур'янів або дрібних камінців, які пошкоджують млинарське обладнання.

Комп'ютерний зір та глибоке навчання (AI)

Застосування нейронних мереж, таких як YOLO (You Only Look Once), дозволяє системам не лише бачити зерно, а й розуміти його стан. Модель YOLO-SDL, побудована на архітектурі ShuffleNetV2, забезпечує високу точність детектування пшеничного зерна, розрізняючи цілі, проростлі, хворі та пошкоджені екземпляри [48].

Таблиця 1.5 – Характеристики нейронних мереж та їх застосування

Модель / Алгоритм	**Точність (%)**	**Сфера застосування**
YOLOv8n / YOLO-SDL	> 99	Детектування та класифікація дефектів
Mask R-CNN	99,5	Сегментація та підрахунок зерна
SVM (Метод опорних векторів)	96,1	Класифікація сигналів від ударів
CNN (Згорткові мережі)	> 95	Розпізнавання внутрішніх дефектів

Використання вбудованих обчислювальних платформ (наприклад, NVIDIA Jetson Nano) дозволяє розгортати ці моделі безпосередньо на очисних машинах, забезпечуючи швидкість обробки понад 13 кадрів на секунду для локалізації домішок у тривимірному просторі [50].

NIR-спектроскопія: контроль хімічного складу в потоці

Спектроскопія в ближньому інфрачервоному діапазоні (NIR) дозволяє здійснювати безперервний контроль якості без руйнування зерна (рис. 1.15). Датчики NIR (наприклад, Visum NIR In-Line або SCiO) вимірюють вологість, вміст білка, олії та крохмалю безпосередньо в транспортних лініях [51]. Це дозволяє миттєво приймати рішення про спрямування зерна на сушіння або в певні силоси для довготривалого зберігання, що мінімізує ризики псування через недотримання режимів.

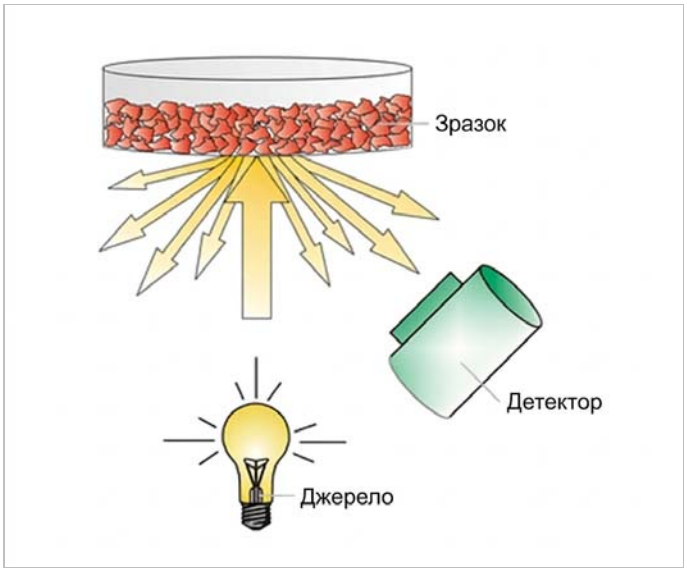


Рисунок 1.15 – Схема принципу вимірювання показників якості зерна методом спектроскопії у ближньому інфрачервоному діапазоні (NIR) на відбиття

Представлена оптико-електронна схема ілюструє метод безконтактного та неруйнівного експрес-аналізу внутрішніх компонентів зернової маси (вмісту білка, клейковини, вологості чи олійності) за допомогою вимірювання дифузного відбиття.

Процес вимірювання та контролю якості реалізується за такою фізичною моделлю. Джерело випромінювання генерує світловий потік у ближньому інфрачервоному діапазоні (зазвичай у межах довжин хвиль $\lambda = 780 - 2500$ нм).

Зразок зернового матеріалу, який подається в інспекційну зону, піддається діючому випромінюванню. Інфрачервоні хвилі частково проникають у поверхневий шар зерна, де енергія фотонів вибірково поглинається молекулярними зв'язками хімічних речовин ($O - H$ для води, $N - H$ для амінокислот/білка, $C - H$ для жирів та вуглеводнів).

Детектор фіксує дифузновідбитий світловий потік, який не був поглинений внутрішніми структурами зерна. Оптичний сенсор трансформує інтенсивність відбитого світла в електричний сигнал, формуючи спектральну характеристику зразка.

На відміну від класичних хімічних методів аналізу, NIR-спектроскопія дає змогу миттєво отримувати дані про біохімічний склад суміші безпосередньо у технологічному потоці зерноочисної машини, що дозволяє реалізувати прецизійне фракціонування за якісними показниками зерна в реальному часі.

1.2.6. Ємнісні, ультразвукові та радарні датчики рівня

Для надійного контролю наповнення силосів, бункерів-дозаторів та оперативних місткостей зерноочисних комплексів, а також для запобігання втратам внаслідок переповнення або пустого ходу обладнання, застосовуються різноманітні безконтактні та безперервні технології вимірювання. Специфіка зернової маси як сипкого середовища (наявність схилів, утворення пилової завіси під час завантаження, абразивний знос та коливання вологості) вимагає обґрунтованого вибору фізичного принципу роботи сенсорів для забезпечення завадостійкості контуру керування.

Ємнісні датчики

Ці сенсори реєструють зміну електричної ємності при наближенні зернової маси до зонда. Вони не мають рухомих частин, що робить їх стійкими до зносу при роботі з абразивними матеріалами [53]. Ємнісні

системи часто інтегруються з термометрією (наприклад, системи FineTek), забезпечуючи одночасний контроль рівня та виявлення «гарячих точок» усередині силосу, що запобігає втратам від самозігрівання [56].

Принцип дії базується на вимірюванні електричної ємності системи, що утворюється між чутливим елементом датчика (зондом) та стінкою силосу (або допоміжним електродом). Роль діелектрика відіграє середовище всередині місткості. Оскільки діелектрична проникність повітря $\varepsilon \sim 1$, а сухого зерна коливається в межах $\varepsilon = 2{,}5 - 4{,}0$ залежно від культури та щільності укладки, заповнення силосу призводить до пропорційного зростання загальної ємності (рис. 1.16): $C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \frac{S}{d}$, де ε_0 – електрична стала, S – площа електродів, d – відстань між ними.

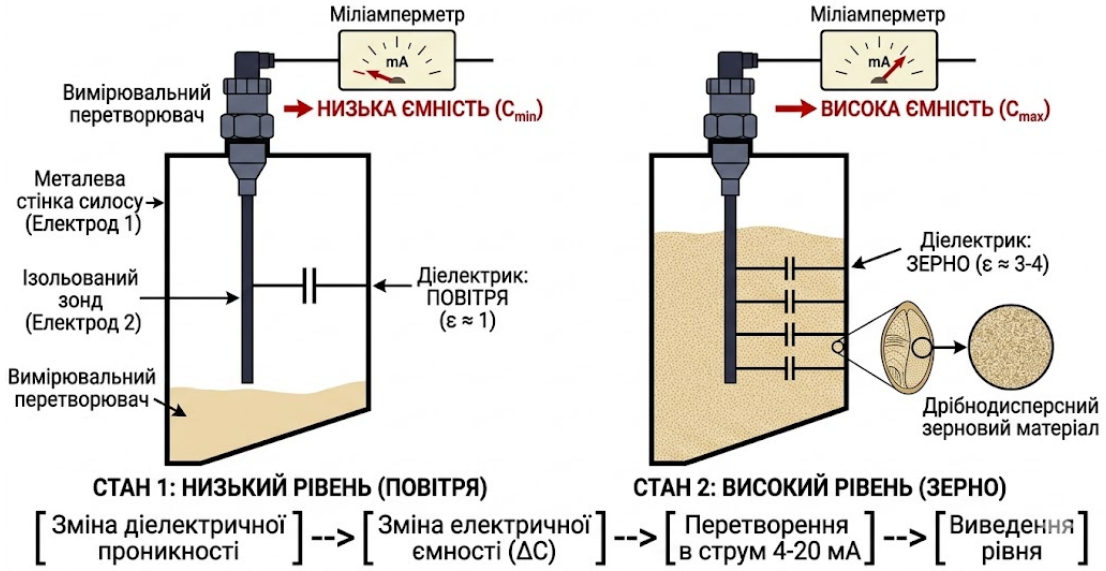


Рисунок 1.16 – Схема принципу роботи ємнісних датчиків рівня зерна

Перевагами ємнісних датчиків є низька вартість, відсутність рухомих частин, висока надійність як сигналізаторів граничного (верхнього/нижнього) рівня. Однак дані сенсори чутливі до налипання дрібнодисперсного пилу на зонд, що може викликати хибні спрацьовування. Також суттєва зміна вологості зерна (де ε води досягає 80) вимагає динамічного перекалібрування датчика.

Ультразвукові датчики рівня

Належать до класу безконтактних систем ехолокації. Сенсор, встановлений у верхній частині силосу, випромінює спрямовані

акустичні імпульси високої частоти $20 - 40$ кГц. Хвиля відбивається від поверхні зернового насипу і повертається назад до приймача. Рівень заповнення обчислюється через час проходження сигналу (ToF):

$$H = H_{max} - v \cdot \frac{t}{2}$$

де v – швидкість поширення звуку в повітрі, t – час між випромінюванням та прийомом імпульсу.

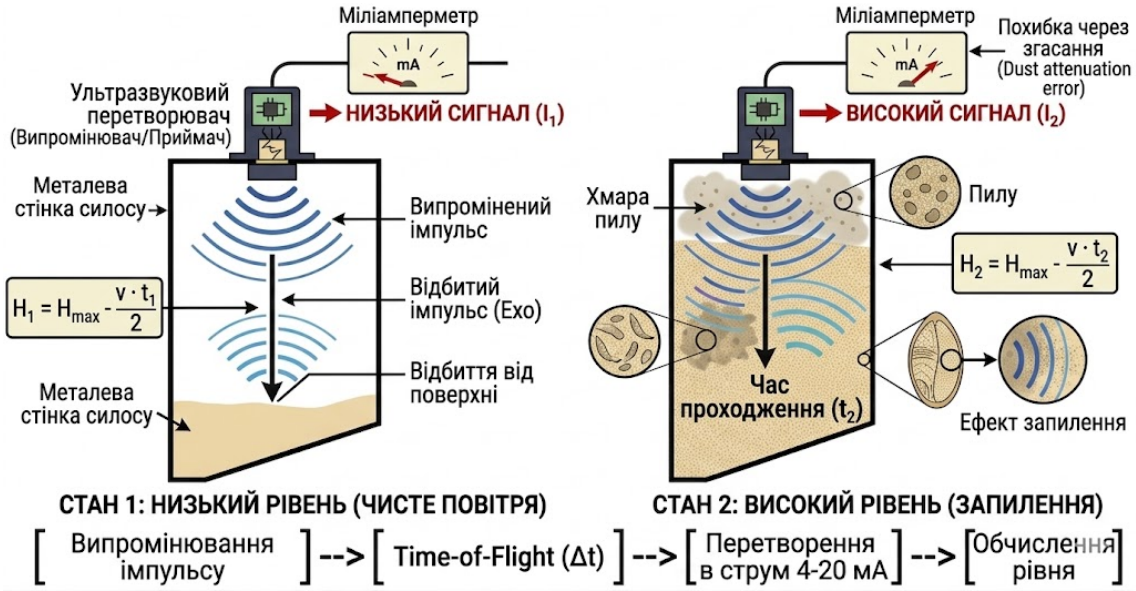


Рисунок 1.17 – Схема принципу роботи ультразвукових датчиків рівня зерна

Перевагами ультразвукових датчиків є повний безконтактний контроль, універсальність для різних типів дрібнонасіннєвих та грубозернистих культур.

Як обмеження слід відмітити, що вони суттєво деградують в умовах інтенсивного завантаження силосу через високу концентрацію пилу, який розсіює та поглинає акустичні хвилі. Крім того, швидкість звуку v залежить від температури повітря, що вимагає обов'язкової інтеграції термокомпенсаційних контурів у конструкцію датчика.

Радарні датчики рівня

Є найбільш прогресивним та завадостійким рішенням для сучасних автоматизованих елеваторів [54]. Вони працюють за принципом випромінювання високочастотних мікрохвиль (радіочастотний діапазон $24 - 80$ ГГц). Застосовуються дві основні технології: безконтактний

радар (імпульсний або FMCW-модуляції) та радар із спрямованою хвилею (Guided Wave Radar), де сигнал поширюється вздовж металевого троса-хвилеводу.

Мікрохвилі частотою 80 ГГц практично не чутливі до щільної пилової завіси, водяної пари, турбулентних потоків повітря та змін температури/тиску всередині силосу. Висока частота дозволяє фокусувати промінь у вузький сектор, виключаючи завади від внутрішніх конструкцій (ребер жорсткості, сходів) та точно відстежувати профіль насипного конуса зерна.

Обмеженнями є висока капітальна вартість обладнання у порівнянні з ємнісними та ультразвуковими аналогами.

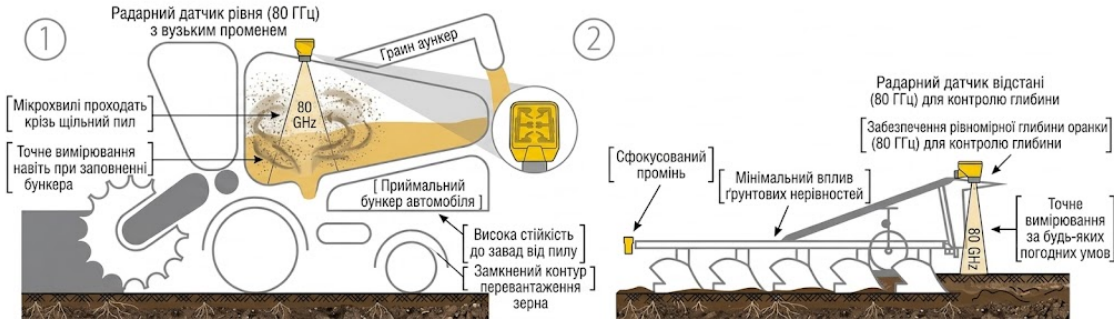


Рисунок 1.17 – Приклади використання радарних датчиків рівня зерна в бкунекрі комбайна (1) та контролю глибини обробки ґрунту (2)

Таблиця 1.6 – Порівняльний інженерний аналіз технологій контролю рівня зерна [54]

Критерій порівняння	**Ємнісний датчик**	**Ультразвуковий радар**	**Радарний датчик (80 ГГц)**
Тип вимірювання	Точковий (граничний)	Безперервний	Безперервний
Стійкість до запилення	Середня (залежить від налипання)	Низька (сильне згасання сигналу)	Абсолютна
Вплив вологості продукту	Високий (зсув ємності)	Відсутній	Відсутній
Вплив геометрії насипу (конуса)	Відсутній	Середній	Низький (завдяки вузькому променю)
Основна зона застосування	Захист від переповнення бункерів	Оперативні місткості (чисте зерно)	Силоси тривалого зберігання

Для контуру керування процесами фракціонування зерна оптимальним є комбінований підхід: використання безконтактних радарних датчиків високої частоти для безперервного моніторингу об'єму сировини в силосах великої місткості, та дублювання системи ємнісними сигналізаторами у критичних точках пересипання для гарантованого захисту агрегатів від аварійного завалу.

1.2.7. Економічна ефективність та перспективні напрями вдосконалення засобів контролю сепарації зернового вороху

Сучасний контроль втрат неможливий без об'єднання всіх датчиків у єдину Автоматизовану Систему Управління Технологічними Процесами (АСУ ТП). Це дозволяє не лише збирати дані, а й автоматично коригувати роботу обладнання для оптимізації показників [27].

Автоматизація елеваторних комплексів охоплює управління маршрутами, контроль швидкості транспортерів та моніторинг стану кожного агрегату. [28] Системи на базі промислових контролерів (PLC) та програмного забезпечення SCADA забезпечують:

- Диспетчеризацію та візуалізацію: Оператор бачить стан всієї лінії на екрані, отримуючи миттєві сповіщення про аварійні ситуації або перевищення рівня втрат.
- Контроль забивання. Спеціальні датчики в самопливах автоматично зупиняють подачу при виникненні затору, запобігаючи масовим посипанням зерна [58].
- Автоматичне балансування продуктивності. Система узгоджує швидкість подачі зерна з пропускною здатністю очисних машин, що мінімізує винос повноцінного зерна у відходи через перевантаження.

Впровадження АСУ ТП дозволяє суттєво знизити енергоспоживання підприємства. Наприклад, на автоматизованих елеваторах витрати енергії складають близько 7 кВт на тонну зерна, тоді як на застарілих об'єктах цей показник досягає 12 кВт [69]. Оптимізація маршрутів переміщення не лише економить електрику, а й зменшує кількість циклів механічного впливу на зерно, зберігаючи його цілісність.

Світовий ринок обладнання для очищення та обробки зерна демонструє стабільне зростання, досягнувши обсягу понад 5,8 млрд доларів США у 2025 році з прогнозом зростання до 8,4 млрд до 2030 року [61].

Висока вартість передових систем залишається основним бар'єром для їх широкого впровадження, особливо для малих та середніх фермерських господарств. Сучасні оптичні сортувальники можуть коштувати понад 50 000 доларів США [65]. Проте, враховуючи, що такі системи дозволяють підвищити вихід якісного продукту та зменшити втрати на 20%, термін їх окупності для середніх підприємств становить від 3 до 5 років [45]. Витрати на технічне обслуговування таких систем зазвичай складають близько 15% від початкових інвестицій щорічно [65].

Розвиток технологій рухається у напрямку повної автономізації зерносховищ та використання "інтернету речей" (IoT) [67].

– Роботизоване чищення силосів. Використання роботів зі стінними альпіністськими здібностями для виявлення та видалення зерна, що прилипло до стінок силосу, не лише зберігає продукцію, а й рятує життя людей, виключаючи необхідність їхнього входу в небезпечне середовище [69].
– Інтелектуальні системи очищення насіннєвих комбайнів. Поєднання RGB-D камер та 4-ступеневих маніпуляторів дозволяє автоматично виявляти та видаляти залишки зерна іншого сорту, забезпечуючи чистоту насіння на рівні понад 99% [50].
– Хмарні платформи та Big Data. Дані від тисяч датчиків по всьому світу аналізуються для створення прогностичних моделей, які допомагають операторам елеваторів оптимізувати режими роботи машин ще до початку сезону [70].

Проблема втрат повноцінного зерна на зерноочисних комплексах та елеваторах вимагає переходу від пасивного спостереження до активного інтелектуального моніторингу. Механічні засоби (футерування, датчики рівня) створюють необхідну базу для збереження продукції, тоді як акустичні та п'єзоелектричні системи забезпечують точний контроль за процесами сепарації. Впровадження оптичних методів та комп'ютерного зору дозволяє досягти безпрецедентної якості очищення та мінімізувати винос придатного зерна у відходи. Інтеграція цих технологій у загальну систему АСУ ТП підприємства є ключем до підвищення рентабельності, енергоефективності та конкурентоспроможності агробізнесу в сучасних умовах.

1.3. Огляд методів комп'ютерного зору та глибокого навчання в агроінженерії

Сучасний стан глобального агропромислового комплексу характеризується безпрецедентним тиском з боку зростання чисельності населення, дефіциту природних ресурсів та кліматичної нестабільності. В умовах, коли традиційні методи управління досягли межі своєї ефективності, цифрова трансформація, керована штучним інтелектом (ШІ) та комп’ютерним зором (КЗ), стає не просто конкурентною перевагою, а критичною умовою забезпечення продовольчої безпеки та сталого розвитку [71]. Перехід від моделей, що базуються на емпіричному досвіді, до інтелектуальних систем дозволяє агровиробникам приймати рішення на основі об’єктивних даних у реальному часі, що мінімізує людський фактор, оптимізує використання ресурсів та підвищує загальну рентабельність виробництва [72]. Сьогодні ми спостерігаємо структурну трансформацію сектора, де дефіцит робочої сили через міграцію та старіння сільського населення компенсується впровадженням автономних систем, здатних виконувати складні завдання з високою точністю (рис 1.18).

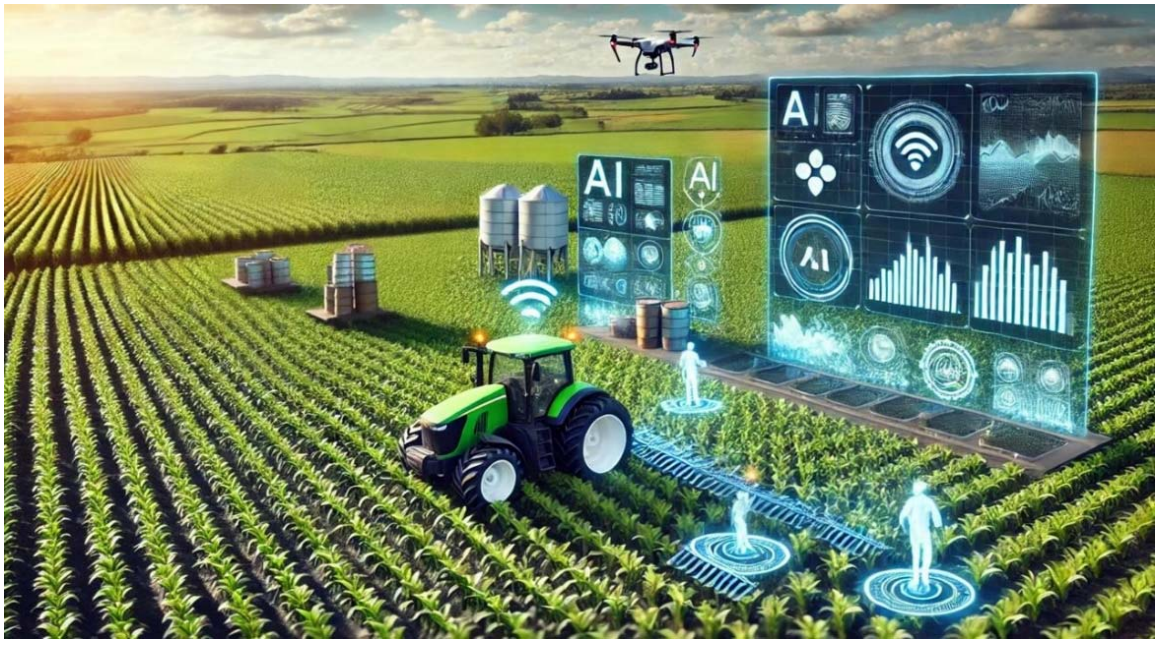


Рисунок 1.18 – Приклади впровадженням автономних систем та штучного інтелекту в агропромисловому комплексі

1.3.1. Еволюція архітектур глибокого навчання та згорткових нейронних мереж

Протягом останнього десятиліття методи комп'ютерного зору в сільському господарстві пройшли шлях від простої порогової сегментації та ручного вилучення ознак до складних мультимодальних архітектур на базі глибокого навчання. Глибоке навчання дозволяє автоматично витягувати ієрархічні ознаки з візуальних даних, забезпечуючи високу точність у складних, динамічних та неструктурованих польових умовах, де традиційні методи часто зазнають невдачі через мінливість освітлення та оклюзію [71].

Згорткові нейронні мережі та сімейство архітектур YOLO

Згорткові нейронні мережі (CNN) (рис. 1.19) залишаються фундаментом для більшості завдань ідентифікації патологій рослин, класифікації об'єктів та аналізу зображень у сільському господарстві. Вони демонструють виняткову здатність до вивчення локальних патернів, таких як текстура листя, колірні плями хвороб або морфологічні особливості плодів [75]. Проте для завдань реального часу, таких як точкове обприскування бур'янів або автономна навігація польових роботів, критично важливою є швидкість обробки кадрів. Саме в цьому сегменті домінують архітектури сімейства YOLO, які поєднують високу точність детекції з низькою затримкою інференсу [77].

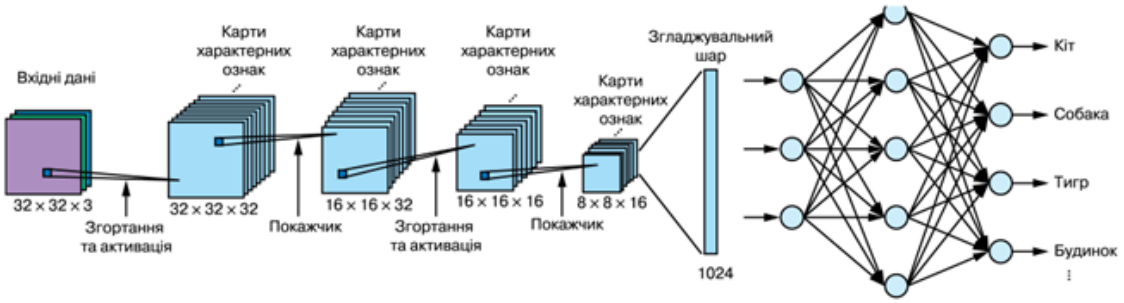


Рисунок 1.19 – Структурна схема згорткової нейронної мережі (CNN) для класифікації зображень

Еволюція YOLO відображає постійний пошук балансу між обчислювальною ефективністю та здатністю моделі до узагальнення. Починаючи з YOLOv3, де було впроваджено фреймворк Darknet-53 та механізми виявлення на трьох масштабах за допомогою мереж пірамід ознак (FPN), кожна наступна версія приносила значні архітектурні інновації [77]:

- *YOLOv4 та YOLOv5*. Впровадження CSP-блоків (Cross Stage Partial) дозволило розділити потік градієнтів, що значно покращило ефективність навчання та зменшило обчислювальні витрати. YOLOv5, перейшовши на бібліотеку PyTorch, забезпечила легкість розгортання та кастомізації, що стало вирішальним фактором для агротехнічних стартапів.
- *YOLOv6 та YOLOv7*. Впровадження RepVGG архітектури та CSPStackRep блоків у YOLOv6 оптимізувало моделі для інференсу на мобільних пристроях. YOLOv7-Tiny продемонструвала високу ефективність у виявленні дрібних та частково перекритих об’єктів, таких як плоди в густій кроні, завдяки використанню механізмів уваги, таких як SimAM [78].
- *YOLOv8 та YOLOv9*. YOLOv8 представила можливості семантичної сегментації, що є критичним для оцінки біомаси. YOLOv9, використовуючи концепцію програмованої інформації градієнтів (PGI), досягла надзвичайної точності, хоча й зіткнулася з певними труднощами у виявленні дуже дрібних об’єктів у складних сценах.
- *YOLOv10 – YOLOv12*. Останні ітерації фокусуються на архітектурних рішеннях без використання NMS (Non-Maximum Suppression) для прискорення обробки та впровадженні Area Attention для кращого моделювання просторових зв’язків, що особливо важливо для аналізу відеопотоків з дронів.

Таблиця 1.7 – Порівняльний аналіз моделей YOLO за ключовими технологічними інноваціями та перевагами їх застосування в АПК

Версія YOLO	**Ключова технологічна інновація**	**Переваги для агропромислового комплексу**
YOLOv3	Darknet-53, Three-Scale detection	Надійна детекція об'єктів різного розміру (листя, плоди)
YOLOv5	CSP-Backbone, PyTorch integration	Гнучкість розгортання на edge-пристроях та дронах
YOLOv8	Pixel-level semantic segmentation	Точне визначення контурів рослин для оцінки росту
YOLOv9	Programmable Gradient Information (PGI)	Максимальна точність виявлення в складних умовах
YOLOv11	R-ELAN, Area Attention (A2)	Стабільність виявлення об'єктів в умовах затінення
YOLOv12	Optimized Feature Aggregation	Найвища швидкість інференсу для роботизованих систем

Вибір конкретної архітектури в агросекторі безпосередньо залежить від апаратних обмежень. Наприклад, для систем виявлення хворих тварин у закритих приміщеннях успішно застосовується YOLOv6, яка демонструє 81,3% успіху в польових випробуваннях [78]. Для складних завдань, таких як виявлення пилку або оцінка схожості насіння, використовуються легковагові версії, такі як YOLOv8-Pearpollen, що досягає швидкості детекції 147,1 FPS за рахунок прунінгу та дистиляції знань [78].

Трансформери та механізми уваги в агрономічному аналізі

Попри успіх CNN, вони мають обмежене рецептивне поле, що ускладнює моделювання глобальних контекстуальних залежностей на зображенні. Vision Transformers (ViTs) вирішують цю проблему за допомогою механізмів самонавчання (*self-attention*), що дозволяє моделі враховувати взаємозв'язок між віддаленими частинами зображення [75]. В агрономії це критично важливо для завдань фенотипування, де структура всієї рослини або всього поля має значення для прогнозування врожайності.

Прикладом високоефективного застосування трансформерів є мережа SDS-Net (Symmetric Diffusion Segmentation Network), яка використовує Transformer-backbone для сегментації екземплярів пшениці в умовах надвисокої щільності посіву. Вона досягає F1-показника 0,89 для сегментації та 0,92 для вимірювання росту, що значно перевершує традиційні згорткові моделі в умовах сильного перекриття листків [78]. Окрім точності, розробляються легковагові трансформерні фреймворки, які зменшують кількість параметрів на 48,47% та обчислювальні витрати (FLOPs) на 56,2%, зберігаючи при цьому стійкість до неструктурованого зовнішнього середовища.

Генеративні моделі та подолання дефіциту анотованих даних

Однією з найбільших перешкод для впровадження методів глибокого навчання в агрономії є брак якісних, збалансованих та анотованих наборів даних. Збір зображень хвороб рослин або рідкісних видів бур'янів у різних фазах росту, під різними кутами зйомки та за різних погодних умов є надзвичайно дорогим та тривалим процесом [78]. Генеративні змагальні мережі (GAN) та дифузійні моделі пропонують інноваційний шлях вирішення цієї проблеми через синтез фотореалістичних зображень.

Застосування StyleGAN3 у поєднанні з техніками Vision Transformer дозволило створити синтетичні набори даних стадій росту томатів, що допомогло подолати проблему дисбалансу класів у навчальних вибірках. Це призвело до досягнення точності тестування на реальних об'єктах на рівні 98,39% [78]. Дифузійні моделі, своєю чергою, демонструють високу ефективність у створенні напівкерованих мереж для виявлення бур'янів, генеруючи високоякісні синтетичні зображення, які враховують спектральні особливості рослин, що значно підвищує адаптивність моделей у середовищах з обмеженими реальними даними.

1.3.2. Практичне застосування комп'ютерного зору в агропромисловому виробництві

Комп'ютерний зір трансформує весь цикл управління рослинництвом – від стратегічного планування посіву до високотехнологічної післязбиральної обробки та сортування продукції [71].

Прецизійний моніторинг здоров'я та діагностика хвороб

Автоматизована діагностика захворювань за допомогою аналізу зображень листків та канопі дозволяє агрономам виявляти проблеми на ранніх стадіях, коли вони ще не видимі неозброєним оком. Це мінімізує використання фунгіцидів та запобігає масштабним втратам врожаю [72]. Сучасні системи використовують глибокі CNN для мультикласової класифікації патологій. Наприклад, системи, побудовані на базі Sequential API в TensorFlow, здатні ідентифікувати до восьми поширених захворювань сільськогосподарських культур з точністю навчання близько 90%, хоча валідаційна точність у 60% вказує на складність узагальнення для реальних польових умов [76].

Для роботи у відкритому полі розробляються спеціалізовані моделі, такі як YOLO-vegetable. Вона використовує оптимізовані функції втрат (box loss, dfl loss, classification loss) та досягає mAP@0,5 близько 95% на наборах даних овочевих культур. При обчислювальній складності в 14,7 GFLOPs така модель є ідеальною для розгортання на мобільних терміналах агрономів [81]. Крім того, використання гіперспектральної зйомки з БПЛА дозволяє виявляти біохімічні зміни, такі як деградація хлорофілу, ще до появи видимих симптомів [82].

Інтелектуальне управління бур'янами та технологія "Green-on-Green"

Виявлення бур'янів на фоні голого ґрунту (технологія "green-on-brown") є відносно простим завданням, яке вже широко впроваджено в комерційних системах (рис. 1.20). Справжнім технологічним викликом та проривом є технологія "green-on-green", яка дозволяє ідентифікувати бур'яни безпосередньо в рядах культурних рослин, навіть якщо вони мають схожу морфологію та колір [82].

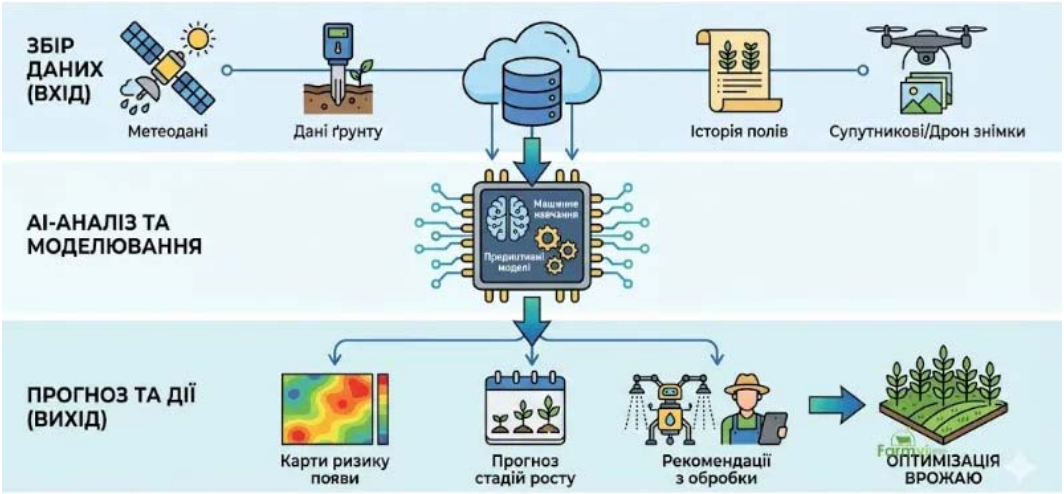


Рисунок 1.20 – Прогнозування появи бур'янів на основі ШІ–аналітики

Системи, такі як Zoneye від стартапу Skymaps, використовують ШІ-моделі, навчені на мільйонах зображень з дронів, для розпізнавання 37 поширених видів бур'янів серед таких культур, як кукурудза, пшениця, соя та соняшник. Це дозволяє фермерам створювати точні карти приписів для обприскувачів, скорочуючи витрати на гербіциди до 50% та підвищуючи врожайність на 20% завдяки зменшенню фітотоксичного стресу на основну культуру [83]. Моделі на кшталт CPD-WeedNet використовують інноваційні блоки CSP-MUIB для витягування ознак при низьких обчислювальних витратах, що робить їх придатними для встановлення на малопотужні бортові комп'ютери польових роботів [84].

Фенотипування та оцінка врожайності

Комп'ютерний зір відіграє ключову роль у неінвазивному фенотипуванні, забезпечуючи безперервний моніторинг морфологічних ознак та стадій розвитку рослин (рис. 1.21). Системи на базі смартфонів

або фіксованих камер у теплицях використовують рекурсивні моделі сегментації для динамічного коригування поливу та живлення на основі виміряної площі листкової поверхні [82].

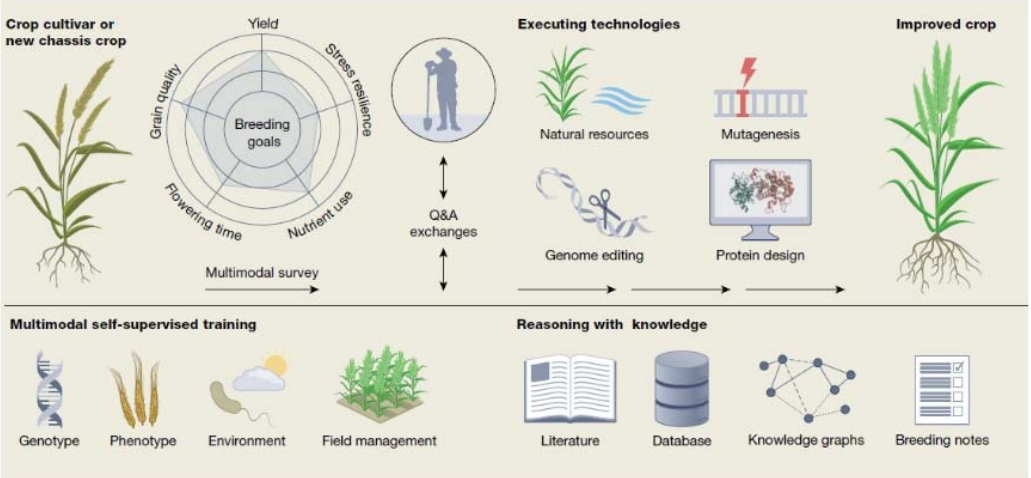


Рисунок 1.21 – Фенотипування рослин

Для прогнозування врожайності використовуються моделі, що поєднують візуальну інформацію про щільність посадки та розмір плодів з метеорологічними даними. Наприклад, використання NeRF дозволяє конвертувати 2D-відео в 3D-цифрові моделі рослин, що дає можливість точно підрахувати кількість плодів навіть у густому листі [85]. У плодівництві впроваджуються системи, що використовують бокові камери для оцінки щільності бур'янів та стану дерев, застосовуючи модулі уваги для виявлення об'єктів, що частково перекриті стовбурами або іншими рослинами [86].



Рисунок 1.21 – Прогнозування врожайності

Порівняльна характеристика методів комп'ютерного зору для аграрних завдань наведена в таблиці 1.8.

Таблиця 1.8 – Порівняльна характеристика методів комп'ютерного зору та моделей глибокого навчання за завданнями аналізу сільськогосподарських культур

Завдання	**Архітектура / Метод**	**Ключовий показник ефективності**
Детекція хвороб овочів	YOLO-vegetable	mAP_{50} ~ 95%
Сегментація пшениці	SDS-Net (Transformer)	F1-score 0,89
Виявлення бур'янів	CPD-WeedNet	Баланс точності та швидкості
Оцінка росту томатів	StyleGAN3 + ViT	Точність тестування 98,39%
Прогнозування врожаю	NeRF / 3D Reconstruction	Точний підрахунок при оклюзії

Цифровізація тваринництва

Цифровізація тваринництва базується на концепції Precision Livestock Farming (PLF), де комп'ютерний зір виступає як основний інструмент безконтактного та неінвазивного моніторингу тварин, що критично важливо для їхнього добробуту та здоров’я [87].

Традиційні методи ідентифікації, такі як вушні бірки або татуювання, мають обмеження щодо довговічності та точності, а також спричиняють стрес тваринам. Комп’ютерний зір дозволяє ідентифікувати окремих особин за унікальними біометричними ознаками: патернами забарвлення, формою морди або структурою судин [87].

Системи відстеження використовують моделі YOLO для детекції тварин у загоні та алгоритми DeepSORT для збереження ідентифікатора особини під час її руху. Використання інфрачервоних та термальних камер дозволяє системі працювати цілодобово, забезпечуючи безперервний збір даних про активність кожної тварини [87]. Це дозволяє автоматично вимірювати час, проведений твариною біля годівниці, що є непрямим показником споживання корму та стану здоров’я [88].

Оцінка вгодованості (Body Condition Score, BCS) є критичним показником для управління годівлею молочної худоби. Автоматизовані системи використовують 3D-камери глибини (наприклад, Microsoft

Kinect або Intel RealSense), встановлені над проходами або в зонах доїння. Моделі на базі архітектури ResNet-50 аналізують топографію спини тварини та досягають точності 96.2% у визначенні балу вгодованості [87].

Окрім BCS, комп'ютерний зір використовується для:

– Детекції кульгавості. Аналіз траєкторії руху спини та ритмічності кроків дозволяє виявляти ранні стадії кульгавості, що запобігає зниженню надоїв та витратам на лікування [87].

– Вимірювання ваги. У свинарстві впроваджуються системи оцінки ваги безпосередньо в загонах за допомогою стереозору. Це усуває потребу у фізичному зважуванні, яке є стресовим для свиней та фізично важким для персоналу. Точність таких систем сягає 98% [91].

– Моніторингу острусу та поведінки. Аналіз змін в активності (збільшення часу стояння або ходьби) дозволяє точно визначати оптимальний час для осіменіння, підвищуючи репродуктивну ефективність стада [90].

1.3.3. Технічні виклики при оптичному аналізі та методи їх подолання

Сільськогосподарські угіддя є одними з найскладніших середовищ для систем комп'ютерного зору через високу варіативність, неструктурованість та агресивний вплив зовнішніх факторів [88].

Проблема оклюзії та щільних канопі

У щільних посівах або плодових садах об'єкти інтересу (плоди, листя, бур'яни) часто перекриваються іншими рослинами або елементами інфраструктури. Для вирішення цієї проблеми застосовуються три основні стратегії:

- Апаратні методи. Використання LiDAR для побудови хмар точок або мультивідних камер для отримання повної 3D-структури рослини. Це ефективно, але вимагає дорогих сенсорів та значних обчислювальних потужностей для обробки великих обсягів даних [93].
- Алгоритмічний інпейнтинг (Inpainting). Використання генеративних моделей для віртуальної реконструкції прихованих частин об'єкта. Наприклад, модель AOT-GAN демонструє здатність фотореалістично відновлювати вигляд цілої рослини салату на основі її видимих частин, що дозволяє оцінювати біомасу з високою точністю ($R^2 = 0{,}848$ після відновлення проти початкових низьких показників при оклюзії) [93].

- Семантична фільтрація та NeRF: Використання нейронних полів сяйва дозволяє "вирізати" канопі з візуальної сцени, синтезуючи чистий вигляд поверхні ґрунту або стовбурів дерев під листям [95].

Варіативне освітлення та погодні умови

Для забезпечення надійності систем у будь-який час доби та за будь-якої погоди (туман, дощ, пил) агороботи оснащуються мультиспектральними та термальними датчиками. Моделі комп'ютерного зору адаптуються до змін освітлення через використання спеціальних функцій втрат, менш чутливих до яскравості, та через аугментацію даних, що імітує різні світлові сценарії [59]. Впровадження Edge AI дозволяє здійснювати локальну адаптацію моделей у реальному часі, де легковагові дифузійні мережі синтезують Bespoke-набори даних безпосередньо в полі, враховуючи поточний кут сонця та хмарність [92].

Апаратне забезпечення та концепція Edge AI

Через віддаленість багатьох сільськогосподарських територій від центрів обробки даних та обмежену пропускну здатність мобільних мереж, концепція Edge AI (ШІ на периферії) стала домінуючою в агротехнологіях. Обробка відеопотоків безпосередньо на борту дрона або трактора мінімізує затримку прийняття рішень, що є критичним для безпеки автономних систем [72].

Платформи обчислень на периферії

Основними апаратними платформами, що забезпечують роботу комп'ютерного зору в агросекторі, є NVIDIA Jetson та Google Coral TPU (табл. 1.9).

Таблиця 1.9 – Порівняльна характеристика апаратних платформ локальних обчислень (Edge AI)

Характеристика	**NVIDIA Jetson Orin Nano**	**Google Coral Dev Board**	**NVIDIA Jetson Thor**
Макс. продуктивність	40 TOPS	4 TOPS (int8)	2070 TOPS
Енергоспожи-вання	7 – 15 Вт	2 – 4 Вт	40 – 130 Вт
Сфера застосування	Агро-дрони, розумні камери	IoT-датчики, мобільні додатки	Автономні тракто-ри, велика техніка
Обсяг пам'яті	До 8 ГБ LPDDR5	1 ГБ або 4 ГБ RAM	128 ГБ LPDDR5

NVIDIA Jetson AGX Orin / Thor. Ці модулі забезпечують до 275-2070 TOPS обчислювальної потужності, що дозволяє запускати великі трансформерні моделі та складні алгоритми сегментації в реальному часі. Вони підтримують повний стек CUDA та TensorRT, що полегшує перенос моделей з серверних середовищ [98].

Google Coral TPU. Орієнтований на низьке енергоспоживання (близько 2 Вт), цей прискорювач ідеально підходить для пристроїв на батарейках. Він спеціалізується на 8-бітних квантованих моделях TensorFlow Lite, забезпечуючи високу швидкість інференсу для завдань класифікації та детекції об'єктів [100].

Intel Neural Compute Stick 2. Економічне рішення для прототипування, що використовує VPU Movidius Myriad X для прискорення візуальних обчислень за допомогою інструментарію OpenVINO [100].

Системна архітектура "Cloud-Edge-Device"

Сучасні агросистеми будуються за трирівневою моделлю:

1. Рівень пристроїв (Device). Камери та датчики збирають первинну візуальну інформацію.
2. Edge-рівень (Edge). Локальні обчислювальні вузли (на тракторі або в теплиці) обробляють дані в реальному часі, виконують детекцію об'єктів та генерують миттєві команди для актуаторів (наприклад, відкриття форсунки обприскувача) [97].
3. Хмарний рівень (Cloud). Вибрані, стиснуті дані передаються в хмару для довгострокового зберігання, аналізу трендів вегетації та перенавчання глобальних моделей на основі виявлених аномалій [97].

Цифрові двійники та синтетичні дані

Концепція цифрових двійників (Digital Twins) в агрономії виходить за межі простої візуалізації. Це динамічні віртуальні копії реальних рослин, полів або процесів, які постійно оновлюються даними з сенсорів [85].

Використання цифрових двійників дозволяє:

– Оптимізувати польові випробування. Замість фізичного тестування сотень комбінацій добрив та сортів, агровиробники моделюють тисячі сценаріїв у віртуальному середовищі, що дозволяє вибрати найбільш перспективні варіанти для реального посіву. Це значно скорочує витрати часу та ресурсів [103].

– Прогнозувати сценарії розвитку: Моделі, що базуються на фізиці росту рослин, дозволяють передбачати реакцію культури на зміну

метеорологічних умов або появу шкідників, що дає фермерам час на превентивні заходи [85].

– Навчати автономні системи: Віртуальні середовища (на кшталт Omniverse від NVIDIA) використовуються для навчання роботів навігації та маніпуляціям у складних умовах, де помилка в реальному світі могла б призвести до пошкодження дорогої техніки або врожаю [95].

Синтетичні дані, генеровані в цих середовищах, дозволяють моделювати сценарії, які рідко зустрічаються в реальності (наприклад, екстремальні градобої або рідкісні мутації хвороб), що робить моделі комп'ютерного зору більш надійними та стійкими [80].

Україна, володіючи понад 42 мільйонами гектарів орних земель, є ідеальним полігоном для масштабування AgriTech-рішень. Сучасні умови змушують український агросектор до швидкої адаптації та переходу на цифрові рейки, де ефективність управління "Digital EBITDA на гектар" стає важливішою за валові показники врожаю [74].

1.3.4. Провідні розробки, комерційні рішення та стартапи у сфері застосування комп'ютерного зору

– FRENDT. Компанія спеціалізується на впровадженні систем прецизійного землеробства для господарств будь-якого розміру. Вони тестують повністю автономні платформи, впроваджують RTK-навігацію та телеметрію, а також інвестують у створення R&D-центрів для навчання майбутніх фахівців з експлуатації агророботів [74].
– FlyAgData. Стартап, що використовує ШІ для збору та валідації понад 100 польових показників у реальному часі. Система діє як цифровий асистент агронома, допомагаючи уникнути помилок, спричинених людським фактором, та оптимізувати логістику [93].
– AgriChain. Розробник комплексної екосистеми управління агробізнесом. Модулі системи (AgriFarm) дозволяють здійснювати сезонне планування на основі історичних даних, 3D-картування полів та управління земельним банком за допомогою КЗ та супутникового аналізу [105].
– AGRO.BI. Платформа бізнес-аналітики, що використовує високоточні знімки з дронів для виявлення загроз врожаю. Компанія працює над автономним роботом, який знищуватиме бур'яни електричними розрядами, пропонуючи екологічну альтернативу гербіцидам [106].

- SmartFarming: Спеціалізується на інтеграції БПЛА в процеси захисту рослин та аналізу стану посівів, забезпечуючи оцифрування всього циклу виробництва [107].

Важливим трендом в Україні є конвергенція військових технологій та агросектору. Досвід використання дронів та систем ШІ на полі бою створює унікальний пул талантів, здатних швидко інтегрувати автономні платформи в сільське господарство після закінчення війни. Це розглядається як стратегічна можливість для України стати світовим лідером у сфері експорту агротехнологічних рішень [74].

Європейські та глобальні лідери в області агроробототехніки

Європейський ринок AgriTech демонструє найвищі темпи зростання в сегменті інтелектуального прополювання та захисту рослин завдяки жорстким екологічним нормам ЄС та стратегії «Farm to Fork» [108].

Ключові гравці та їхні розробки

1. EcoRobotix (Швейцарія). Компанія розробила технологію ARA, яка за допомогою КЗ та ШІ здійснює надточне точкове обприскування. Це дозволяє ідентифікувати кожну рослину окремо та вносити засоби захисту лише на бур'яни, що економить до 96% хімікатів [74].
2. Naïo Technologies (Франція). Один із піонерів у створенні автономних роботів для механічного прополювання (моделі Oz, Dino, Ted). Їхні системи використовують комп'ютерний зір для точної навігації між рядами культур, повністю виключаючи потребу в ручній праці [108].
3. Carbon Robotics (США). Розробник лазерного прополювача Autonomous LaserWeeder. Робот використовує 30 високошвидкісних камер та ШІ для ідентифікації бур'янів, які потім знищуються термічно за допомогою вуглекислотних лазерів. Це забезпечує повністю безхімічний обробіток ґрунту [108].
4. FarmDroid (Данія). Повністю сонячний робот, який пам'ятає координати кожної посіяної насінини. Це дозволяє йому здійснювати прополювання ще до того, як культурна рослина зійде, використовуючи прецизійне позиціонування та візуальне підтвердження [109].
5. Small Robot Company (Велика Британія). Пропонує модель «Farming as a Service» (FaaS), надаючи доступ до точного прополювання та моніторингу за підпискою, що знижує вхідний фінансовий бар'єр для фермерів [109].

1.3.5. Перспективи розвитку методів комп'ютерного зору в агропромисловому комплексі

Комп’ютерний зір в агропромисловому комплексі пройшов шлях від допоміжного інструменту до центральної технології, що визначає ефективність сучасного виробництва. Аналіз поточних трендів та технологій дозволяє зробити наступні висновки:

1. Майбутні системи будуть об’єднувати візуальні дані з аудіо-датчиками (наприклад, для виявлення шкідників за звуком), даними IoT та великими мовними моделями (LLM) для створення інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень, здатних пояснювати свої рекомендації фермеру [82].
2. Розвиток Edge AI та хмарних платформ (як-от Farmonaut) робить технології прецизійного землеробства доступними не лише для великих холдингів, а й для дрібних фермерів, надаючи їм потужні інструменти діагностики безпосередньо у смартфонах [74].
3. До 2035 року ринок агроробототехніки перевищить 100 мільярдів доларів. Роботизовані платформи стануть стандартною частиною парку будь-якого господарства, вирішуючи проблему дефіциту кадрів та підвищуючи точність операцій [74].
4. Комп'ютерний зір у поєднанні з прецизійним зрошенням та диференційованим внесенням добрив є ключовим інструментом адаптації до глобального потепління, дозволяючи отримувати стабільні врожаї навіть у деградованих засушливих регіонах [82].
5. Україна має всі передумови для того, щоб не лише бути житницею світу, а й стати його технологічним цехом. Синергія аграрного досвіду, IT-талантів та бойового досвіду роботи з автономними системами створює сприятливе інституційно-інноваційне середовище для прискореного розвитку та комерціалізації перспективних AgriTech-стартапів [73].

Впровадження розглянутих методів комп'ютерного зору – це не просто модернізація техніки, а фундаментальна зміна філософії господарювання, де кожен окремий об'єкт (рослина чи тварина) отримує індивідуальну увагу та догляд, що є єдиним шляхом до створення стійкої, прибуткової та екологічної продовольчої системи майбутнього.

Висновки до розділу 1 та постановка мети і завдань дослідження

У результаті аналізу сучасного стану зерноочисних технологій, конструкцій пневмосепараційних систем, фізико-механічних властивостей зернового матеріалу, а також існуючих підходів до контролю та автоматизації процесів очищення можна сформулювати такі узагальнені висновки.

Встановлено, що ефективність очищення зерна є багатофакторною характеристикою, яка формується під впливом сукупності взаємопов'язаних параметрів, серед яких ключову роль відіграють фізико-механічні властивості зернової маси (вологість, щільність, форма, шорсткість, аеродинамічні характеристики), режимні параметри роботи машин, а також конструктивні особливості робочих органів. Зміна будь-якого з цих факторів призводить до суттєвого коливання якості сепарації та стабільності технологічного процесу.

Показано, що традиційні системи очищення та контролю зерна мають низку суттєвих обмежень, зокрема недостатній рівень автоматизації, відсутність оперативного зворотного зв'язку, обмежені можливості регулювання повітряних потоків і значну залежність від людського фактору. Це призводить до нестабільності показників очищення, підвищених втрат зерна та зниження енергоефективності процесу.

Аналіз конструкцій зерноочисних машин засвідчив, що існуючі пневмосепараційні системи в значній мірі наблизилися до межі свого конструктивного удосконалення лише за рахунок геометричних параметрів каналів. Подальше підвищення ефективності можливе переважно за рахунок впровадження нових принципів керування процесом, використання додаткових робочих органів та переходу до адаптивних технологічних систем.

Визначено, що найбільш перспективним напрямом розвитку є інтеграція автоматизованих систем керування з оптичними методами контролю якості зерна. Використання технологій комп'ютерного зору, сенсорних систем та елементів штучного інтелекту дозволяє забезпечити безперервний моніторинг параметрів зернового потоку, своєчасне регулювання режимів роботи машин та підвищення точності сепарації.

Встановлено, що впровадження інтелектуальних систем керування дає можливість не лише покращити якість очищення зерна, але й

знизити енергоспоживання, мінімізувати втрати основної культури та забезпечити стабільність роботи зерноочисних комплексів у широкому діапазоні змін вхідних параметрів.

Таким чином, подальший розвиток зерноочисної техніки пов’язаний із переходом до комплексних автоматизованих та інтелектуальних систем, які поєднують механічні, аеродинамічні та інформаційні технології в єдину керовану структуру, що забезпечує високий рівень ефективності процесу очищення зерна.

Сучасний етап розвитку зернопереробної галузі характеризується переходом до концепції «Елеватор 4.0», що передбачає повну цифровізацію технологічних процесів. Проте контроль якості роботи решітних сепараторів досі залишається слабкою ланкою через дискретність відбору проб та значну похибку існуючих датчиків втрат. У зв'язку з цим виникає необхідність розробки принципово нового методу моніторингу.

Метою дослідження є теоретичне обґрунтування та розробка науково-технічних основ і методів оптико-електронного контролю та керування процесами фракціонування зерна в реальному часі на основі інтеграції технологій комп'ютерного зору (YOLOv11) та енергоефективних периферійних обчислювальних платформ (Edge AI).

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні завдання:

– Обґрунтувати конструктивні параметри та оптико-геометричні режими функціонування оптико-електронних інспекційних модулів для забезпечення стабілізації візуальних характеристик динамічного зернового потоку в умовах вібраційного впливу.

– Обґрунтувати математичний апарат та розробити методику опису морфологічних ознак зернівок і фракцій зернового вороху на основі спектрального Фур’є-аналізу контурів та адаптованих легковагових архітектур нейронних мереж.

– Встановити аналітичні та кореляційні залежності між геометричними 2D-параметрами (площею проекцій) об'єктів у кадрі та їхніми масовими характеристиками для забезпечення оцінювання відносних втрат і засміченості зерна в реальному часі.

– Обґрунтувати архітектуру та режими функціонування периферійного обчислювального комплексу (Edge AI) для виконання

алгоритмів детекції та сегментації з мінімальною затримкою керуючого сигналу в умовах обмежених ресурсів енергоспоживання.

– Розробити апаратно-програмні засоби оптико-електронного моніторингу та провести їхню експериментальну верифікацію на лабораторному макеті з оцінюванням технологічної ефективності зниження втрат зерна.

РОЗДІЛ 2
ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО КОНТРОЛЮ ПРОЦЕСІВ ФРАКЦІОНУВАННЯ ЗЕРНА

2.1. Математична модель масопереносу зернової суміші на решітних станах зерноочисних машин

Для реалізації безконтактного методу вимірювання маси необхідно встановити аналітичний зв'язок між двовимірним зображенням зернового потоку та його тривимірними фізичними параметрами.

Маса окремого зерна (або домішки) m_i може бути виражена через його об'єм V_i та щільність r_i:

$$m_i = V_i \cdot r_i. \tag{2.1}$$

Оскільки камера фіксує площу проекції об'єкта S_i на площину лотка, об'єм можна представити як добуток площі проекції на середню товщину об'єкта h_i (або через коефіцієнт сферичності):

$$V_i = S_i \cdot h_i \cdot k_{shape}. \tag{2.2}$$

де k_{shape} – коефіцієнт форми, що враховує морфологію конкретної культури.

Сумарна маса зерна M, що пройшла через зону контролю за час t, визначається як сума мас усіх детектованих об'єктів:

$$M(t) = \sum_{i=1}^{N(t)} (S_i \cdot K). \tag{2.3}$$

де $N(t)$ – загальна кількість зерен, ідентифікованих YOLOv11; S_i – площа i-го об'єкта в пікселях; K– зведений калібрувальний коефіцієнт, що враховує масштаб (мм/піксель), середню товщину зерна та його щільність.

$$K = \delta^2 \cdot \bar{h} \cdot \rho \cdot k_{shape}, \tag{2.4}$$

де δ – просторова роздільна здатність (мм/піксель); $\bar{h}$ – середня геометрична висота зернівки даної культури.

Оскільки зерно рухається по вібролотку зі швидкістю v, миттєва масова подача Q (г/с) визначається через щільність заповнення лотка:

$$Q = \frac{M_{frame} \cdot v}{L_{roi}}, \tag{2.5}$$

де M_{frame} – маса зерна в поточному кадрі, L_{roi} – довжина зони інтересу (Region of Interest) у напрямку руху.

У реальних умовах промислової сепарації зерна можуть частково перекривати одне одного. Для компенсації цього ефекту вводиться коефіцієнт експозиції шару η:

$$M_{real} = M_{calc} \cdot (1 + \alpha \cdot \eta), \tag{2.6}$$

де α – емпіричний коефіцієнт, що залежить від частоти вібрації та товщини шару. При роботі в один шар (моношар) $\eta \rightarrow 0$.

Завдяки використанню YOLOv11, загальна маса розділяється на компоненти:

$$M_{total} = M_{pure} + M_{broken} + M_{waste}. \tag{2.7}$$

Це дозволяє розрахувати показник якості сепарації (чистоту):

$$P = \frac{M_{pure}}{M_{total}} \cdot 100\ \%. \tag{2.8}$$

Запропонована модель дозволяє трансформувати дискретні візуальні дані у неперервний сигнал масової витрати. Ключовою перевагою є можливість селективного підрахунку маси тільки цільового зерна M_{pure}, що ігнорується класичними механічними вагами.

Для автоматизованого визначення кількості зернівок у пробі застосовано згорткову нейронну мережу (CNN), що реалізує задачу об'єктної детекції та сегментації зернових частинок на цифровому зображенні.

Нехай вхідне зображення представлено як:

$$X \in R^{H \times W \times C} \tag{2.9}$$

де H, W – розміри зображення, C – кількість каналів (RGB).

CNN реалізує відображення:

$$f_\theta(X) \rightarrow \{B_i, P_i\}_{i=1}^{N} \tag{2.10}$$

де $B_i = (x_i, y_i, w_i, h_i)B$ – обмежувальна рамка і-ї зернівки (область локалізації і-ї зернівки);

P_i – ймовірність належності об'єкта до класу «зерно»;

N – кількість виявлених об'єктів.

Функція втрат моделі визначається як комбінація втрат локалізації та класифікації:

$$\mathcal{L} = \lambda_1 \mathcal{L}_{cls} + \lambda_2 \mathcal{L}_{box} \quad (2.11)$$

де $\mathcal{L}_{cls}$ – крос-ентропійна функція втрат класифікації,
$\mathcal{L}_{box}$ – функція втрат координат (IoU / GIoU),
λ_1, λ_2 – вагові коефіцієнти.

Кількість зернівок визначається як:

$$N = \sum_{i=1}^{n} I(P_i > P_{thr}) \quad (2.12)$$

де I – індикаторна функція, P_{thr}– порогове значення впевненості моделі.

Таким чином, CNN виконує перехід від просторового зображення до дискретного кількісного представлення зернової проби.

2.2. Обґрунтування переходу від геометричних параметрів (площі проекції) до масових характеристик об'єктів

Сучасні технології післязбиральної обробки зерна потребують точного визначення параметрів зернової маси. Важливими характеристиками є розмір зерен, їх форма, ступінь пошкодження та наявність домішок. Традиційні методи визначення цих показників ґрунтуються на ручному аналізі або лабораторних вимірюваннях, що потребує значних витрат часу.

Застосування методів комп’ютерного зору дозволяє автоматизувати аналіз зернових матеріалів. Цифрові зображення можуть використовуватися для визначення геометричних характеристик зерна пшениці, розподілу розмірів та ступеня неоднорідності зернового шару.

Основною задачею є створення алгоритму, який дозволяє на основі фотознімків або потокового відео оцінити структуру зернової маси та розподіл зерен за розмірами та масою.

Аналіз фотознімків зернової маси включає кілька ключових етапів: попередню обробку зображення; підвищення контрастності; виділення контурів зерен; сегментацію зображення; визначення геометричних параметрів.

Цифрове зображення представляється у вигляді матриці яскравості:

$$I(x, y), \quad (2.13)$$

де (x, y) – координати пікселя, I – інтенсивність яскравості.

Для зменшення шуму використовується згладжування зображення за допомогою Гаусового фільтра

$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}, \tag{2.14}$$

де σ – параметр розмиття.

Після фільтрації отримується нове зображення:

$$I_f(x,y) = I(x,y) * G(x,y), \tag{3.15}$$

де $*$ – операція згортки.

Для визначення меж зерен використовується градієнт інтенсивності:

$$| \nabla I | = \sqrt{\left(\frac{\partial I}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial y}\right)^2} \tag{2.16}$$

Високі значення градієнта відповідають межам зерен.

Сегментація зернового шару.

Після виділення контурів виконується бінаризація зображення:

$$B(x,y) = \begin{cases} 1, & I(x,y) > T \\ 0, & I(x,y) \le T \end{cases} \tag{2.17}$$

де T – порогове значення.

Це дозволяє розділити пікселі зерна та фону.

Визначення геометричних параметрів зерна.

Для кожного виділеного зерна визначається площа:

$$A_i = \sum_{x,y} B_i(x,y), \tag{2.18}$$

де B_i – область i-го зерна.

Еквівалентний діаметр зерна:

$$d_i = \sqrt{\frac{4A_i}{\pi}}. \tag{2.19}$$

Розподіл зерен за розмірами.

Середній діаметр зерна визначається:

$$\bar{d} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} d_i, \tag{2.20}$$

де n – кількість зерен.

Дисперсія розподілу:

$$\sigma_d^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(d_i - \bar{d}\right)^2 \tag{3.21}$$

Ці показники характеризують однорідність зернової маси.

Оцінка щільності зернового шару.

Щільність розташування зерен на зображенні можна визначити як

$$\rho = \frac{\sum A_i}{A_{im}}, \tag{2.22}$$

де A_{im} – площа зображення.

Для оцінки форми використовується коефіцієнт округлості:

$$K_f = \frac{4\pi A}{P^2}, \tag{2.23}$$

де A – площа зерна, P – периметр.

Цей параметр дозволяє виявляти пошкоджені або деформовані зерна пшениці.

Встановлена пряма залежність маси від площі проекції.

Використаємо емпіричну залежність:

$$m = kA_p^{1,5}, \tag{2.24}$$

де k – коефіцієнт пропорційності, який визначається експериментально.

З урахуванням прийнятих припущень: $Ap \sim d^2$.

Встановлена геометрична модель зерна (модель еліпсоїда):

$$V = \frac{\pi}{6} LBT, \tag{2.25}$$

або через площу:

$$V = k_f \cdot A_p^{1,5}, \tag{2.26}$$

де: k_f – коефіцієнт форми.

Слід врахувати також орієнтацію зерна на поверхні решета за новою залежністю:

$$Ap = A_{real} \cdot cos\theta; \tag{2.27}$$

$$V = k_f \cdot \left(\frac{A_p}{\cos\theta}\right)^{1,5}. \tag{2.28}$$

Врахуємо перекриття, яке спостерігається в процесах фракціонування:

$$A_{eff} = A_p(1 - \xi); \tag{2.29}$$

$$V = k_f \cdot A_{eff}^{1,5}. \tag{2.30}$$

де: ξ – коефіцієнт перекриття зернин.

Маса 1000 зерен може бути оцінена через середню масу:

$$M_{1000} = 1000\bar{m}\ , \tag{2.31}$$

де

$$\bar{m} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} m_i. \tag{2.32}$$

Для автоматичних систем аналізу зерна можна застосувати:

$$m_i = \rho k_f A_{pi}^{1,5}, \tag{2.33}$$

де ρ – щільність розташування зерен на зображенні; k_f – коефіцієнт форми зерна.

Залежність між площею та масою зернового шару.

Для шару зерна на зображенні:

$$M = \sum_{i=1}^{n} m_i, \tag{2.34}$$

або

$$M = \rho k_f \sum_{i=1}^{n} A_{pi}^{1,5}. \tag{2.35}$$

Залежність маси шару зерна пшениці від площі його проекції на зображенні наведено на рисунку 2.1.

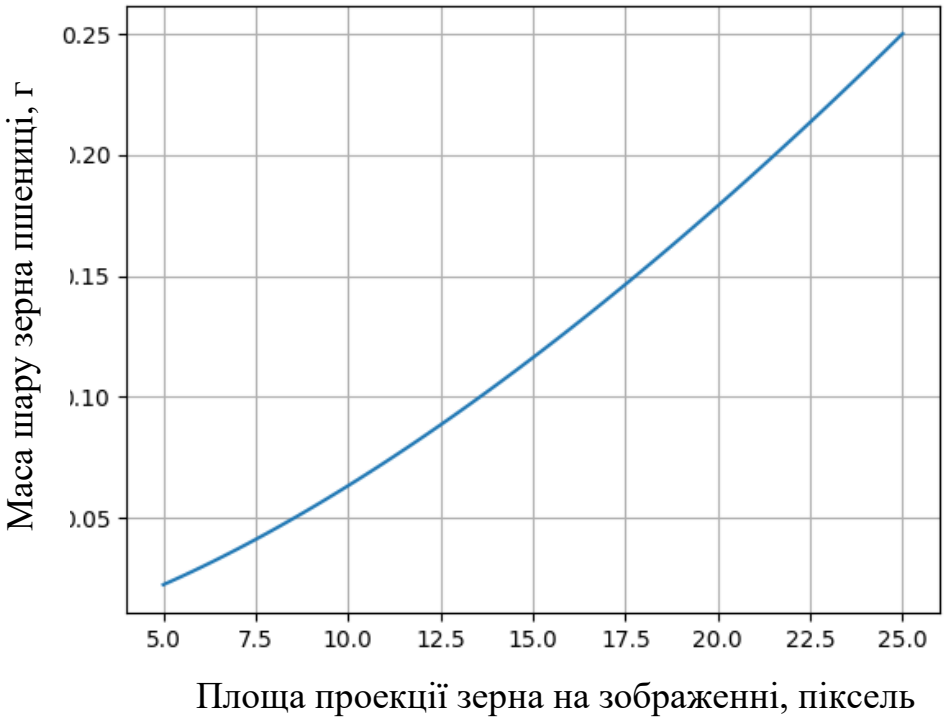


Рисунок 2.1 – Залежність маси шару зерна пшениці від площі його проекції на зображенні.

Визначимо модель похибки, яка буде визначатися:

$$\varepsilon_m = \frac{\Delta m}{m} = \frac{3}{2}\frac{\Delta A}{A}, \tag{2.36}$$

$$\varepsilon m = \frac{3}{2}\frac{\Delta A}{A} + \varepsilon_\rho + \varepsilon_s. \tag{2.37}$$

Алгоритм апроксимації напрямку руху зернових частинок.

Для аналізу переміщення зерен пшениці на зображенні використовується алгоритм визначення напрямку руху частинок на основі локальних максимумів інтенсивності або вагової функції.

Припустимо, що максимальні значення вагової функції відповідають центрам або областям концентрації зерен, які формують основні траєкторії руху зернового потоку.

Нехай цифрове зображення зернового шару описується функцією яскравості

$$I(x, y), \tag{2.38}$$

де x, y – координати пікселя.

Для аналізу введемо вагову функцію:

$$W(x, y) = f\big(I(x, y)\big), \tag{2.39}$$

яка характеризує ймовірність належності пікселя до області зерна.

Етапи алгоритму складаються з наступних блоків.

1. Фільтрація малих значень.

На першому етапі відсікаються пікселі, значення яких нижчі за заданий поріг

$$W(x, y) < T. \tag{2.40}$$

Це дозволяє усунути шум та фонові ділянки зображення.

2. Пошук локальних максимумів.

Далі визначаються точки локальних максимумів вагової функції:

$$\frac{\partial W}{\partial x} = 0, \frac{\partial W}{\partial y} = 0, \tag{2.41}$$

та виконуємо перевірку умови максимуму

$$\frac{\partial^2 \mathrm{W}}{\partial\, \mathrm{x}^2} + \frac{\partial^2 \mathrm{W}}{\partial\, \mathrm{y}^2} < 0. \tag{2.42}$$

Такі точки відповідають центрам зерен або локальним скупченням зерна.

3. Формування початкової точки траєкторії.

Серед знайдених максимумів вибирається точка з найбільшим значенням ваги W_{max}. Вона приймається як початкова точка побудови траєкторії руху зерна.

4. Побудова траєкторії руху зерна.

Подальші точки траєкторії визначаються серед максимумів, які розташовані в секторі $\Delta\theta \leq 5°$, відносно попереднього напрямку руху.

Напрямок руху визначається як:

$$\theta = tan^{-1}\left(\frac{y_{i+1}-y_i}{x_{i+1}-x_i}\right). \quad (2.43)$$

Отримана послідовність точок формує ламану лінію, яка апроксимує траєкторію руху зернової частинки або локального зернового потоку.

5. Завершення побудови траєкторії.

Алгоритм повторюється доти, поки в межах допустимого сектору не буде знайдено наступну точку максимуму.

У результаті формується просторова структура зернового потоку (рис. 2.2).

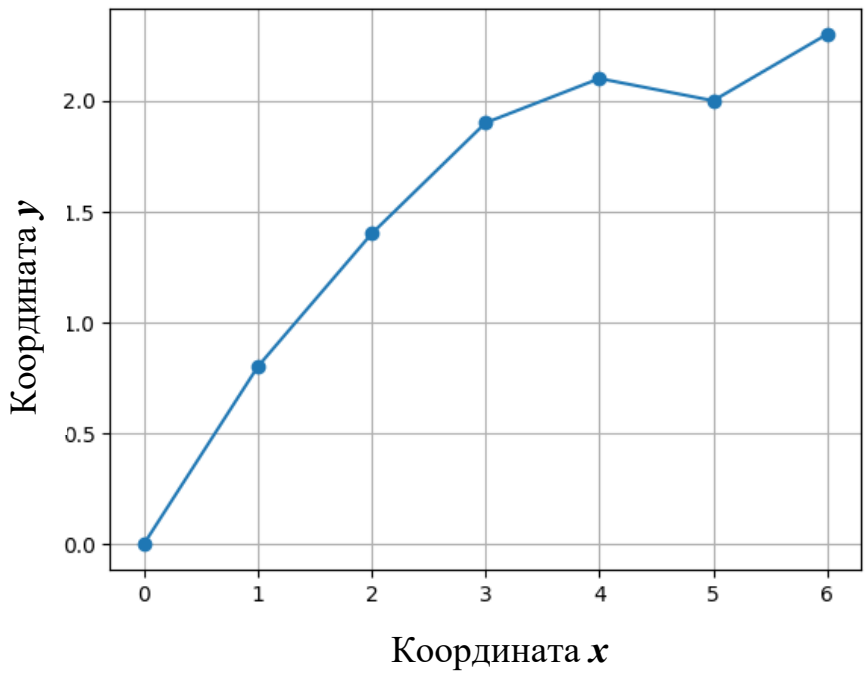


Рисунок 2.2 – Залежність, яка апроксимує траєкторію руху зернової частинки або локального зернового потоку

У результаті проведених досліджень розроблено та теоретично обґрунтовано узагальнений підхід до переходу від геометричних параметрів зернових об’єктів, отриманих за допомогою методів комп’ютерного зору, до їх масових характеристик. Вперше встановлено аналітичний зв’язок між площею проекції зернини на цифровому зображенні та її об’ємом і масою на основі степеневої залежності виду $V \sim A_p^{1,5}$, що дозволяє здійснювати коректний перехід від двовимірного опису до тривимірних фізичних характеристик зерна.

Доведено, що використання коефіцієнта форми як узагальненого параметра дає можливість враховувати відхилення реальної геометрії зернини від ідеалізованих моделей (сфера, еліпсоїд), що підвищує точність визначення об’єму та маси в умовах варіативності морфологічних характеристик зерна пшениці. Вперше запропоновано враховувати вплив орієнтації зернини відносно площини зйомки шляхом введення поправочного множника, що коригує площу проекції та забезпечує інваріантність моделі до просторового положення об’єкта.

Обґрунтовано доцільність введення масштабного коефіцієнта для переходу від піксельних вимірювань до метричних величин, що дозволяє інтегрувати результати цифрової обробки зображень у інженерні розрахунки технологічних процесів. Вперше отримано узагальнену залежність для визначення маси зерна, яка враховує не лише геометричні параметри, але й фізичні властивості матеріалу через ефективну густину.

Показано, що похибка визначення масових характеристик має мультиплікативний характер і визначається сукупністю факторів, серед яких домінуючими є похибка сегментації зображення та апроксимації площі проекції. Встановлено аналітичний зв’язок між відносною похибкою площі та похибкою маси, що дозволяє кількісно оцінювати достовірність результатів оптичної детекції.

Таким чином, сформовано цілісну математичну основу для реалізації інтелектуальних систем оптико-електронного контролю зернових сумішей, яка забезпечує підвищення точності визначення масових характеристик об’єктів у потоці. Отримані результати створюють передумови для подальшого розвитку адаптивних алгоритмів, що враховують вплив експлуатаційних факторів, та можуть бути використані при побудові систем автоматизованого управління процесами сепарації і фракціонування зерна.

2.3. Дослідження впливу фізико-механічних властивостей зерна на точність оптичної детекції

Точність визначення геометричних параметрів зерна за допомогою методів комп'ютерного зору значною мірою залежить від фізико-механічних властивостей зернової маси. Найбільш суттєвими факторами, що впливають на результати оптичної детекції, є вологість зерна та ступінь його засміченості сторонніми домішками. Зміна цих параметрів призводить до варіацій оптичних характеристик поверхні зерна, що у свою чергу впливає на точність сегментації та визначення геометричних параметрів об'єктів на цифрових зображеннях.

Вологість зерна змінює коефіцієнт відбиття та інтенсивність розсіяного світла, що фіксується камерою. У цифровому зображенні це проявляється у зміні середньої яскравості пікселів, які відповідають зернам. Середнє значення яскравості області зерна може бути визначене як:

$$\bar{I} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} I_i, \tag{2.44}$$

де I_i – інтенсивність яскравості і-го пікселя, N – кількість пікселів, що належать області зерна.

Зі збільшенням вологості зерна W поверхня стає більш гладкою та темнішою, що може призводити до зменшення контрасту між зерном і фоном. Контрастність зображення визначається відношенням:

$$W = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}, \tag{2.45}$$

де I_{max} та I_{min} – максимальна та мінімальна яскравість на зображенні.

Зменшення контрасту ускладнює процедуру сегментації зерен, що призводить до похибок визначення площі проекції.

Оцінка площі проекції зерна наводилась вище та визначається як:

$$A_p = \sum_{x,y} B(x, y), \tag{2.46}$$

де $B(x, y)$ – бінарна функція сегментованого зображення.

Помилка визначення площі проекції може бути представлена у вигляді:

$$\Delta A = A_{\text{алгоритм}} - A_{\text{зерна}}, \tag{2.47}$$

де $A_{\text{алгоритм}}$ – площа, визначена алгоритмом обробки зображення, $A_{\text{зерна}}$ – реальна площа проекції зерна.

Другим важливим фактором є засміченість зернової маси, яка характеризується наявністю органічних та мінеральних домішок. Домішки мають різні оптичні властивості та форму, що може призводити до помилкової ідентифікації об'єктів на зображенні.

Ступінь засміченості зерна визначається відношенням:

$$Z = \frac{m_{\text{домішок}}}{m_{\text{суміші}}}, \tag{2.48}$$

де $m_{\text{домішок}}$ – маса домішок, $m_{\text{суміші}}$ – загальна маса зернової суміші.

Наявність домішок впливає на точність визначення кількості зерен на зображенні. Помилка підрахунку може бути оцінена як:

$$\varepsilon_n = \frac{|n_{\text{алгоритм}} - n_{\text{зерен}}|}{n_{\text{зерен}}}, \tag{2.49}$$

де $n_{\text{алгоритм}}$ – кількість об'єктів, визначених алгоритмом, $n_{\text{зерен}}$ – фактична кількість зерен.

Зміна фізичних властивостей зерна також впливає на точність визначення масових характеристик, які обчислюються на основі площі проекції. Якщо маса зернини визначається через залежність наведену вище:

$$m = kA_p^{1,5}, \tag{2.50}$$

то відносна похибка визначення маси становитиме:

$$\varepsilon_m = \frac{\Delta m}{m} = \frac{3}{2}\frac{\Delta A}{A_p}. \tag{2.51}$$

Таким чином, навіть незначні помилки сегментації можуть призводити до суттєвих відхилень у визначенні маси зерна.

Отримані залежності показують, що для забезпечення високої точності оптичної детекції зерна необхідно враховувати вплив вологості та засміченості зернової маси, а також застосовувати алгоритми адаптивної обробки зображень, які коригують параметри сегментації залежно від умов зйомки.

Встановимо узагальнену залежність маси зерна.

$$m = k\, A_p^{1,5}\,(1 + \alpha W)\,(1 - \beta Z), \tag{2.52}$$

де m – оцінена маса зерна;

A_p – площа проекції зерна на зображенні;

W – вологість зерна (у частках одиниці);

Z – коефіцієнт засміченості зернової суміші;

k – коефіцієнт пропорційності, що залежить від густини зерна та масштабу зображення;

α – коефіцієнт впливу вологості на масу та оптичні характеристики зерна;

β – коефіцієнт впливу засміченості на точність визначення параметрів зерна.

Слід зазначити наступний фізичний зміст отриманої залежності.

Член $A_p^{1,5}$ виникає при переході від площі проекції до об'єму зерна. Множник $(1 + \alpha W)$ враховує зміну маси та оптичних характеристик зерна при збільшенні вологості.

Множник $(1 - \beta Z)$ відображає вплив домішок, які знижують точність сегментації та можуть призводити до помилкового визначення площі зерна.

Для спрощення деяких розрахунків запропонуємо спрощену інженерну форму. Якщо прийняти середні значення коефіцієнтів, формула може бути записана у вигляді:

$$m = \frac{A_p^{1,5}\, W}{\rho(1+Z)}, \tag{2.53}$$

де ρ – ефективна густина зернової суміші.

З урахуванням вище наведеного залежність маси зернового шару для групи зерен на зображенні:

$$M = \sum_{i=1}^{n} k\; A_{pi}^{1,5}\,(1 + \alpha W)(1 - \beta Z), \tag{2.54}$$

де n – кількість зерен на зображенні.

Використаємо узагальнену модель точності:

$$\eta(w) = \eta_{max} \cdot e^{-k\left(w - w_{opt}\right)^2} \cdot e^{-\beta Z}, \tag{2.55}$$

де $\eta(w)$ – точність оптичної детекції, %;

w – вологість зерна, %;

$w_{opt} = 12\text{–}14\%$ – оптимальна вологість;

k – коефіцієнт чутливості (≈0,03–0,06);
$\eta_{max} \approx 97–99\%$.

Графік впливу вологості на точність оптичної детекції наведено на рисунку 2.3.

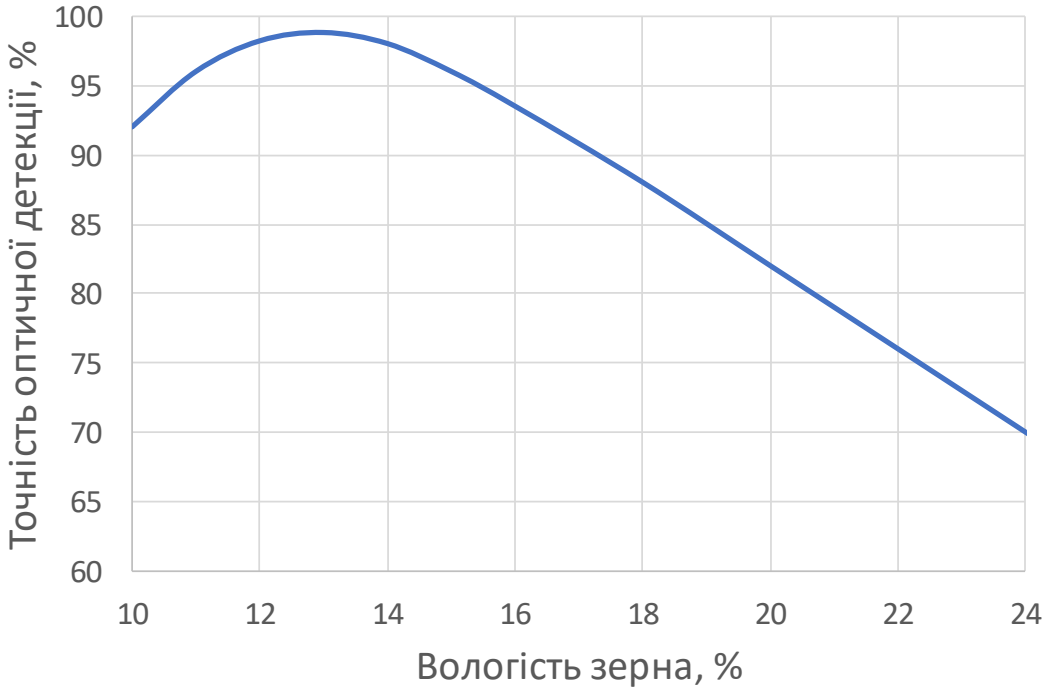


Рисунок 2.3 – Графік впливу вологості на точність оптичної детекції

Використаємо модель спадання точності детекції:

$$\eta(Z) = \eta_{max} \cdot (1 - \beta Z). \quad (2.56)$$

Після дослідження даної моделі встановлений слабкий кореляційний зв'язок, тому була встановлена нелінійна модель:

$$\eta(Z) = \eta_{max} \cdot e^{-\beta Z}, \quad (2.56)$$

де $\eta(Z)$ – точність детекції, %;
Z – засміченість (частка, 0–1 або %);
β – коефіцієнт впливу домішок (≈2–4);
$\eta_{max} \approx 98 - 99\%$.

Графік впливу засміченості на точність оптичної детекції наведено на рисунку 2.4.

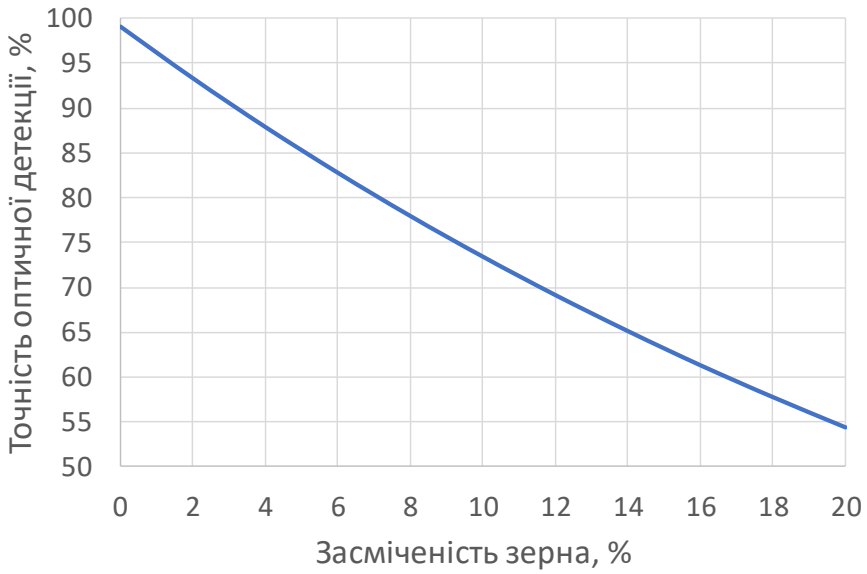


Рисунок 2.4 – Вплив засміченості на точність детекції зерна пшениці

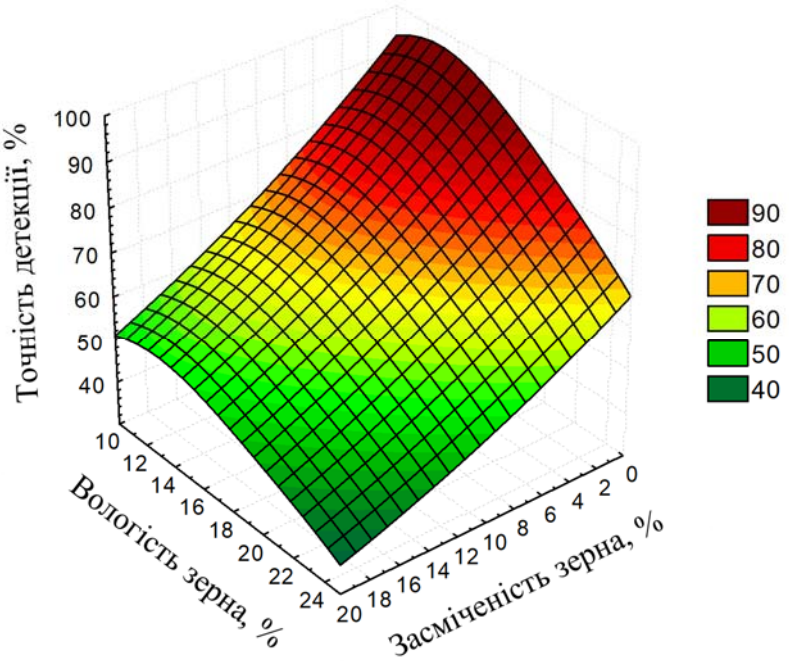


Рисунок 2.5 – Вплив засміченості та вологості на точність оптичної детекції зерна пшениці

Аналізом графічної залежності наведеної на рис. 2.5 встановлено, що максимум точності (~98–99%) досягається при вологості w≈12–14% та мінімальній засміченості $Z \to 0$.

Вплив вологості має нелінійний (Гаусовий) характер; при w>18% точність різко падає.

Вплив засміченості монотонно зменшує точність; при Z>15% спостерігається критичне погіршення детекції.

При одночасно високій вологості і засміченості, точність може знижуватись до 40–60% і нижче; вплив факторів є мультиплікативним, а не адитивним.

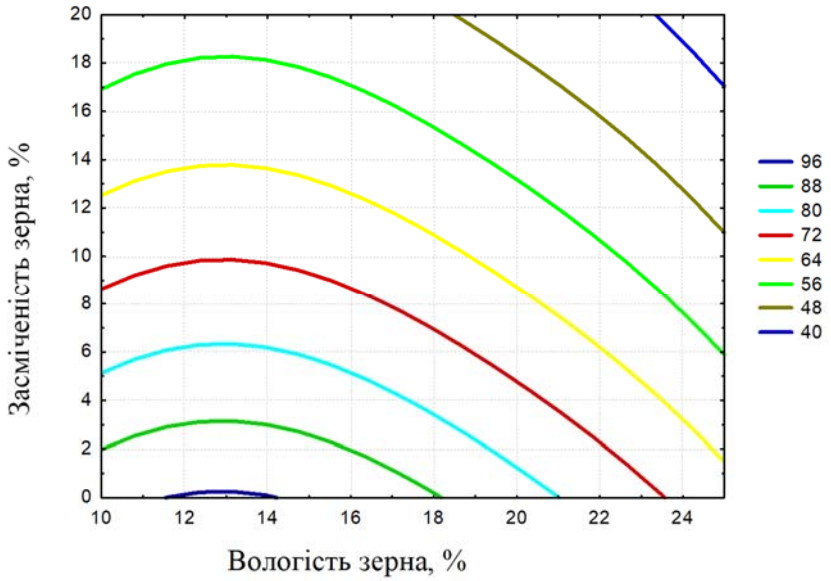


Рисунок 2.6 – Ізолінії точності оптичної детекції

Дослідженнями встановлена розширена модель похибки:

$$\delta(w, Z) = \delta_0 \cdot e^{k_w (w - w_{opt})^2} \cdot e^{k_Z Z}, \tag{2.57}$$

або

$$\delta(w, Z) = \delta_0 \cdot \exp\left(k_w (w - w_{opt})^2 + k_Z Z\right), \tag{2.58}$$

де k_w – чутливість до вологості;
k_Z – чутливість до засміченості.

Розраховані значення похибки оптичної детекції наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Чисельні значення впливу вологості та засміченості на похибку оптичної детекції

w (%)	**Z (%)**	**δ (%)**
13	0	2–3
13	10	4–6
18	10	8–12
20	20	15–25

Розглянемо фізичний зміст даного явища:

$(w - w_{opt})^2$ → відбувається вплив блиску, темніння, злипання зерен.

Z → відбувається вплив шуму, хибних об'єктів, перекриття обєктів.

Похибка оптичної детекції зерна пшениці має нелінійний характер і визначається сукупним впливом вологості та засміченості зернової маси. Мінімум похибки досягається при оптимальній вологості 12–14% та мінімальному вмісті домішок.

Використовуючи вихідну модель похибки наведену вище, знайдемо градієнти (частинні похідні) по вологості:

$$\frac{\partial \delta}{\partial w} = \delta(w, Z) \cdot 2k_w(w - w_{opt}). \quad (2.59)$$

Слід зазначити, що:

при $w = w_{opt}$ → градієнт = 0 (мінімум похибки);

при $w > w_{opt}$ → різке зростання похибки;

при $w < w_{opt}$ → також зростання (симетрично).

По засміченості:

$$\frac{\partial \delta}{\partial Z} = \delta(w, Z) \cdot k_Z. \quad (2.60)$$

Аналіз даної залежності свідчить, що градієнт завжди додатний, похибка монотонно зростає та вплив сильніший при великих значеннях δ.

Чутливість похибки до вологості має нелінійний характер і залежить від відхилення від оптимального значення, тоді як чутливість до засміченості є монотонною та експоненційно зростає разом із самою похибкою.

Слід відмітити наступне, що мінімальна чутливість до вологості спостерігається при $w = 13\%$. При $w > 18\%$ – система стає нестабільною (високий градієнт), засміченість має стабільно негативний вплив на точність детекції. Комбінований вплив факторів призводить до різкого зростання похибки.

Інтерпретація векторного поля рис. 2.7, на якому стрілки показують напрям найбільшого зростання похибки, де система найбільш нестабільна. Біля w_{opt} стрілки малі, при відхиленні – різко ростуть.

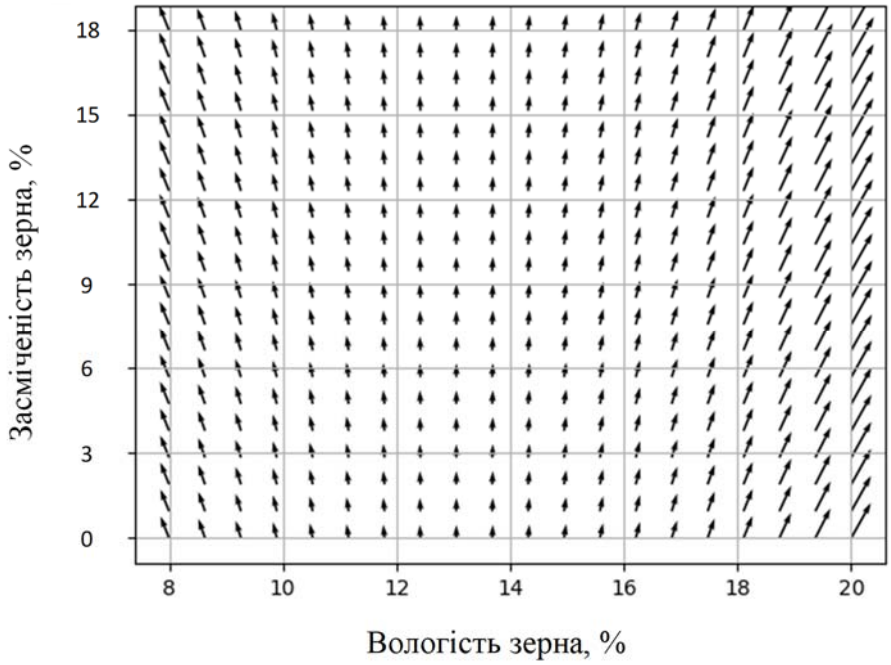


Рисунок 2.7 – Векторне поле градієнтів (напрям зростання похибки)

Введемо новий узагальнений коефіцієнт нестабільності оптичної детекції, який визначимо наступною залежністю:

$$K_{dyn} = k_1\mu + k_2 C_d \frac{\rho_a v^2}{2\rho_g g d} + k_3 \frac{v}{\sqrt{gd}} + k_4\phi, \tag{2.62}$$

де кожен член полінома враховує наступні фактори.

Тертя зерна по робочій поверхні $k_1\mu$, що характеризує контактну нестабільність (залипання, ривки).

Динамічний вплив на робочій поверхні, аналог критерія Ейлера:

$$k_2 C_d \frac{\rho_a v^2}{2\rho_g g d}, \tag{2.63}$$

де ρ_a – густина середовища; ρ_g – густина зерна.

Інерційно-гравітаційний член, аналог числа Фруда:

$$k_3 \frac{v}{\sqrt{gd}}. \tag{2.64}$$

Фізичний зміст даного члена рівняння, визначає «збудженість» руху зерна на робочій поверхні.

Концентрація потоку відповідає за перекриття, колізії, шум у зображенні $k_4\phi$, де ϕ – об'ємна концентрація зерна на робочій поверхні (решета).

Для оцінки впливу динамічних факторів руху зернового потоку на точність оптичної детекції визначено узагальнений коефіцієнт нестабільності K_{dyn}, який враховує контактні, динамічні та кінематичні параметри системи.

Запропонований критерій дозволяє інтегрувати вплив коефіцієнта тертя, динамічного опору, швидкості руху та концентрації потоку в єдину безрозмірну характеристику.

Ефективність функціонування оптико-електронних систем контролю процесів фракціонування безпосередньо залежить від стабільності візуальних ознак об'єктів сепарації. На відміну від класичних механічних або пневматичних робочих органів, які взаємодіють з аеродинамічними та масовими характеристиками компонентів суміші, нейромережеві моделі комп'ютерного зору оперують двовимірними матрицями яскравості та кольору. У зв'язку з цим виникає необхідність встановлення закономірностей впливу базових фізико-механічних та оптичних властивостей зернового матеріалу на точність його сегментації та класифікації алгоритмами ШІ.

Вологість зернового матеріалу суттєво змінює стан його зовнішньої оболонки. Зі збільшенням вологості поверхня зерна трансформується з дифузно-відбивальної у частково дзеркальну, що зумовлено утворенням мікроскопічної водяної плівки.

Цей ефект призводить до двох негативних явищ при оптичному контролі:

- Спрямовані бліки. Поява зон екстремальної яскравості (пікселі зі значеннями [255, 255, 255] у просторі RGB), які повністю нівелюють текстуру зернини. Нейромережа YOLOv11 у таких випадках може фрагментувати одну зернину на кілька дрібних об'єктів або помилково класифікувати блік як мінеральну домішку (камінець).
- Зміна колірного контрасту. Вологе зерно візуально сприймається як темніше (зменшується коефіцієнт дифузного відбиття), що зближує його за спектральними характеристиками з деякими видами бур'янів та органічних домішок.

Кожна сільськогосподарська культура має унікальний геометричний профіль, який описується коефіцієнтами сферичності, видовженості та асиметрії. При фракціонуванні пшениці, соняшнику чи кукурудзи нейромережева модель YOLOv11 та платформа Roboflow

використовуються для точної сегментації контурів, де кожна культура вимагає адаптації критеріїв детекції.

- Пшениця характеризується наявністю поздовжньої борідки та еліпсоїдною формою. Основним інженерним завданням для моделі YOLOv11 є чітке розрізнення цілого зерна від битого (половинок), де критерієм є порушення симетрії контуру та оголення ендосперму, що має вищу відбивну здатність.
- Соняшник має високу видовженість та смугасту текстуру оболонки. Наявність світлих і темних смуг створює внутрішньо-об’єктний контраст, що за відсутності належного навчання може спричинити помилкову сегментацію однієї насінини як кількох паралельних об'єктів.
- Кукурудза: Форма зерна близька до неправильного багатогранника. При аналізі качанів або зернової маси кукурудзи критичним є врахування різниці термічних та оптичних властивостей зерна і часток стрижня (кочеріжки), які мають схожі геометричні розміри, але кардинально відмінну морфологію поверхні.

Для забезпечення високих показників точності (Precision) та повноти (Recall) детекції, колірний контраст між цільовим зерном та домішками має бути максимальним. Математично контраст K_c між об'єктом (O) та фоном лотка (B) у певному спектральному каналі виражається як:

$$K_c = \frac{I_O - I_B}{I_O + I_B} \tag{2.65}$$

де I_O та I_B – середні інтенсивності випромінювання об'єкта та фону відповідно.

Експериментально встановлено, що використання монохромних (сірих) або блискучих металевих лотків у вібросепараторах призводить до злиття кольору пилу та оболонок зерна з фоном. Для стабілізації детекції необхідно обирати колір підкладки (робочої поверхні інспекційного каналу), який є комплементарним (протилежним у колірному колі) до домішок та зерна. Наприклад, для пшениці та кукурудзи ефективним є матово-синій або антрацитовий фон, що максимізує значення K_c.

Оскільки метод розробляється для інтеграції у вібровідцентрові та пневмомеханічні сепаратори, зерно перебуває у стані постійного руху зі швидкістю $v = 0{,}5 - 1{,}5$ м/с під дією коливань частотою до 50 Гц.

При недостатній швидкості затвора камери (Exposure Time) виникає ефект динамічного розмиття контурів (Motion Blur). Розмиття краю об'єкта на величину Δx пікселів призводить до штучного збільшення його площі проекції у кадрі:

$$\Delta x = v \cdot t_{exp} \cdot M_{scale}, \tag{2.66}$$

де t_{exp} – час експозиції камери, M_{scale} – масштабний коефіцієнт (піксель/мм).

Збільшення площі S_{px} через розмиття безпосередньо вносить похибку в математичну модель перерахунку площі в масу $M_{calc} = S_{px} \cdot K$. Для усунення цього впливу в інженерній практиці необхідно обмежувати час експозиції величиною $t_{exp} \leq 1/2000$ с, що потребує встановлення високоінтенсивних імпульсних або постійних LED-освітлювачів у інспекційних тунелях.

Проведені дослідження показують, що фізико-механічні властивості зерна (вологість, морфологія) та кінематика його руху безпосередньо трансформуються в оптичні параметри зображення. Стійкість роботи моделей YOLOv11n-seg та YOLOv11s-seg в умовах експлуатації досягається не лише шляхом алгоритмічної оптимізації, а й за рахунок апаратних рішень: застосування імпульсного освітлення високої інтенсивності, вибору контрастного матового фону та стабілізації товщини динамічного шару зерна.

2.4. Розробка алгоритму ідентифікації фракцій на базі архітектури нейромережі YOLOv11

Задача ідентифікації фракцій зернових сумішей полягає у визначенні класу кожного об’єкта (зернівки або домішки) на цифровому зображенні в умовах реального часу з урахуванням варіацій форми, розмірів, фізико-механічних властивостей та умов освітлення.

Формально задача може бути представлена як відображення:

$$I(x, y) \rightarrow \{(B_i, \omega_i, p_i)\}_{i=1}^{N}, \tag{2.67}$$

де $I(x, y)$ – вхідне зображення, $B_i = (x_i, y_i, w_i, h_i)$ – обмежувальна рамка об’єкта, ω_i – клас (фракція), p_i – ймовірність належності до класу.

Архітектура YOLO (You Only Look Once) є однією з найбільш ефективних для задач детекції об’єктів у реальному часі. Її перевагами

є: одноетапна детекція (без окремої стадії генерації регіонів); висока швидкодія; можливість одночасного визначення координат та класів; масштабованість.

Модель YOLOv11 (умовно нове покоління) розглядається як вдосконалена архітектура, що включає: покращений backbone (екстракція ознак); neck (агрегація багатомасштабних ознак); head (детекція об'єктів).

Вхідні дані формуються на основі: цифрових зображень зернового потоку; результатів попередньої обробки.

Зображення нормалізується:

$$I_n(x,y) = \frac{I(x,y)-\mu_I}{\sigma_I}, \tag{2.68}$$

де μ_I, σ_I – середнє значення та стандартне відхилення яскравості.

YOLO представляє зображення як сітку $S \times S$, де кожна комірка відповідає за детекцію об'єктів.

Для кожної комірки прогнозується:

$$\hat{y} = (x, y, w, h, c, p_1, p_2, \dots, p_M), \tag{2.69}$$

де x, y – координати центру, w, h – розміри, c – об'єктність, p_j – ймовірності класів.

Загальна функція втрат має вигляд:

$$L = \lambda_{coord} L_{box} + L_{obj} + \lambda_{noobj} L_{noobj} + L_{cls}, \tag{2.70}$$

Де:

1. похибка локалізації:

$$L_{box} = \sum (x - \hat{x})^2 + (y - \hat{y})^2 + \left(\sqrt{w} - \sqrt{\hat{w}}\right)^2 + \left(\sqrt{h} - \sqrt{\hat{h}}\right)^2; \tag{2.71}$$

2. похибка об'єктності:

$$L_{obj} = (c - \hat{c})^2; \tag{2.72}$$

3. похибка відсутності об'єкта:

$$L_{noobj} = (\hat{c})^2; \tag{2.73}$$

4. класифікаційна похибка:

$$L_{cls} = \sum \left(p_j - \widehat{p_j}\right)^2. \tag{2.74}$$

На відміну від класичних підходів, пропонується доповнити нейромережу спектральними ознаками:

$$X = (A_1, A_2, \dots, A_K), \tag{2.75}$$

і розширити вхід:

$$Z = [F_{CNN}, X], \tag{2.76}$$

де F_{CNN} – ознаки, витягнуті CNN.

Класифікація:

$$\omega = f(Z). \tag{2.77}$$

Це дозволяє підвищити інваріантність до форми, зменшити вплив шуму та підвищити точність.

Алгоритм ідентифікації включає:

1. Захоплення зображення $I(x, y)$.
2. Попередня обробка: фільтрація; нормалізація; сегментація.
3. Детекція YOLO $\{B_i\}$.
4. Виділення контурів.
5. Розрахунок спектра Фур'є X_i.
6. Класифікація $\omega_i = f(B_i, X_i)$
7. Формування керуючого сигналу $U = f(\omega_i, w, Z)$

Точність моделі залежить від фізико-механічних факторів:

$$\eta = f(w, Z, \mu, C_d). \tag{2.78}$$

Модифікована функція втрат:

$$L' = L \cdot (1 + \alpha w + \beta Z). \tag{2.79}$$

Основні метрики оцінки:

точність:

$$P_r = \frac{T_P}{T_P + F_P}; \tag{2.79}$$

повнота:

$$R = \frac{T_P}{T_P + F_N} \tag{2.80}$$

F1:

$$F1 = \frac{2 \cdot P_r \cdot R}{P_r + R} \tag{2.81}$$

mAP:

$$mAP = \frac{1}{M} \sum AP_i \tag{2.82}$$

Алгоритм реалізований у: Python (PyTorch, TensorFlow); OpenCV; CUDA (GPU). Реальний час: $t_{proc} < 50$ мс.

Розроблений алгоритм забезпечує високоточну ідентифікацію фракцій зернових сумішей у реальному часі. Поєднання глибинного навчання та спектрального аналізу дозволяє значно підвищити точність, стійкість і адаптивність системи. Запропонований підхід є основою для створення інтелектуальних систем автоматичного керування процесами сепарації та фракціонування зернових матеріалів.

2.5. Спектральний аналіз контурів зернівок та його застосування для ідентифікації фракцій

2.5.1. Параметричне задання контуру зернівки

Використання комп'ютерних методів аналізу зображень на основі цифрових технологій відкрило нові можливості для їх практичного застосування при визначенні ботанічних (біологічних) характеристик, технологічних властивостей та інших ознак якості зернових, бобових та олійних культур. До теперішнього часу дослідники здебільшого фокусувалися на методах ідентифікації складу зернової маси та визначенні складу й масової частки сторонніх домішок. Важливе значення у розробці методів ідентифікації має геометрія форми зернівок.

Варто зазначити, що така точність є межовою для цього підходу, ключовою особливістю якого є пошук «особливих ознак» у контурах зернівок різних культур. Інтуїтивне експертне виділення параметрів не може гарантувати точне відображення контуру, а також розпізнавання сортів і культур на основі дрібних та малозначних деталей контуру зернівки.

Огляд літературних джерел свідчить про відсутність достатньо точних методів ідентифікації для вирішення ряду актуальних завдань як у селекції та насінництві, так і в управлінні технологічними процесами в галузі післязбиральної обробки зерна. В селекції та насінництві генетично спадковими ознаками можуть бути геометрична форма і кольорове забарвлення плода зернівки. В процесі обробки зернових культур важливим є моніторинг зміни геометричної форми зернівки, білосніжності ядра та наявності необроблених ділянок на її поверхні. Ці та інші завдання підкреслюють потребу у розробці високоточних (похибка – в межах частки відсотка) методів аналізу ознак якості зернових, бобових та олійних культур.

Пропонується методика ідентифікації зернівок на основі Фур'є-аналізу і статистичної теорії розпізнавання образів, яка забезпечує похибку до десятих і сотих часток відсотка (в перспективі – будь-яку необхідну (бажану) точність).

Для подальшого спектрального аналізу геометричних характеристик зернівки необхідно виконати формалізований опис її контуру. У задачах комп'ютерного зору контур об'єкта визначається як замкнена крива, що складається з дискретної множини точок, отриманих у результаті сегментації цифрового зображення.

Нехай контур зернівки задано у вигляді впорядкованої послідовності точок:

$$P_i = (x_i, y_i), i = 1,2, \dots, N, \tag{2.83}$$

де x_i, y_i – координати і-ї точки контуру, N – загальна кількість точок.

З метою усунення впливу положення об'єкта на зображенні здійснюється перехід до системи координат, пов'язаної з центром мас зернівки. Координати центру мас визначаються як:

$$x_c = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i\,,\ y_c = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} y_i. \tag{2.84}$$

Після цього виконується перетворення координат:

$$x_i' = x_i - x_c;\ y_i' = y_i - y_c, \tag{2.85}$$

для забезпечення інваріантності до повороту та зручності подальшого аналізу контур представляється у параметричному вигляді. Як параметр може використовуватися довжина дуги контуру або нормований параметр:

$$t = \frac{i}{N},\ t \in [0,1]. \tag{2.86}$$

Тоді контур зернівки описується функціями:

$$x = x(t), y = y(t). \tag{2.87}$$

Альтернативно, для компактного запису використовується комплексна форма:

$$z(t) = x(t) + iy(t). \tag{2.88}$$

Таке подання є зручним для подальшого застосування методів спектрального аналізу, зокрема перетворення Фур'є, що дозволяє виділити інформативні ознаки форми зернівки.

2.5.2. Перехід до інваріантної системи координат

Для забезпечення інваріантності опису форми зернівки відносно її орієнтації на зображенні необхідно виконати перехід до власної системи координат об'єкта. Такий перехід дозволяє усунути вплив повороту зернівки та забезпечити коректність подальшого спектрального аналізу.

Після перенесення початку координат у центр мас об'єкта (x_c, y_c) розглядаються центральні моменти другого порядку:

$$\mu_{20} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i'^2\,, \mu_{02} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} y_i'^2\,, \mu_{11} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i' y_i', \qquad (2.89)$$

де x_i', y_i' – координати точок контуру відносно центру мас.

На основі цих моментів формується матриця інерції (коваріаційна матриця форми):

$$\boldsymbol{M} = \begin{pmatrix} \mu_{20} & \mu_{11} \\ \mu_{11} & \mu_{02} \end{pmatrix}. \qquad (2.90)$$

Головні осі зернівки визначаються як власні вектори цієї матриці, а відповідні власні значення характеризують розподіл маси (або геометрії) вздовж цих осей.

Відношення власних значень матриці $\boldsymbol{M}$ може використовуватись як характеристика витягнутості зернівки.

Кут повороту системи координат, що забезпечує перехід до головних осей, визначається як:

$$\theta = \frac{1}{2}\arctan\left(\frac{2\mu_{11}}{\mu_{20}-\mu_{02}}\right). \qquad (2.91)$$

Після визначення кута θ виконується поворот координат:

$$x_i'' = x_i' \cos\theta + y_i' \sin\theta; \qquad (2.92)$$

$$y_i'' = -x_i' \sin\theta + y_i' \cos\theta. \qquad (2.93)$$

Отримана система координат є інваріантною до повороту вихідного зображення, оскільки її осі співпадають з головними осями інерції зернівки. Це дозволяє виконувати подальший аналіз форми незалежно від випадкової орієнтації зерна у полі зору камери.

Такий підхід є особливо важливим при аналізі зернових сумішей, де положення окремих зерен є випадковим, а їх коректне порівняння можливе лише за умови приведення до єдиної інваріантної системи координат.

2.5.3. Спектральне представлення Фур'є

Розглянемо контур плоского зображення компонента зернової маси, заданий у вигляді дискретного набору $(x_i; y_i), 1 \le i \le n$ декартових координат точок на плоскому замкнутому контурі без самоперетину.

Для відновлення відсутніх точок на контурі застосовувалися лінійна та сплайн-інтерполяція. Лінійна інтерполяція показала хороші результати при наявності зламів та гострих кутів у досліджених об'єктах (для окремих груп домішок), тоді як для плавних ділянок контуру потрібна сплайн-інтерполяція. У зоні розташування зародка точні результати давало лише поєднання лінійної та сплайн-інтерполяції. Метод інтерполяції вказується при введенні кожної з пар координат $(x_i; y_i)$. Таким чином, аналогічно [111], після застосування стандартного періодичного сплайна до кожної координати параметрично заданої плоскої кривої отримані рівняння з умовою $1 \le i \le n$:

$$\begin{cases} x = x(t), \\ y = y(t). \end{cases} \tag{2.94}$$

Отже дана система описує контур плоского зображення даного компонента зернової маси. Зазначимо, що в рівняннях (2.1) передбачається таке число та розташування опорних точок, яке усуває помилку маскування частот вище частоти Найквіста [112].

Оскільки один і той же контур на площині може бути представлений нескінченним числом способів у нескінченній кількості систем координат Oxy, у системі координат $O_1x_1y_1$, у яких початок координат розташований у центрі мас плоскої фігури, обмеженої контуром, і осі розташовані вздовж головних осей інерції. Координати центру мас O_1 обчислюються за відомими співвідношеннями:

$$x_s = \frac{1}{S}\iint_{\phi} xdxdy = \frac{1}{2S}\int_1^n x^2(t) \cdot y_1(t)dt \tag{2.95}$$

$$y_s = \frac{1}{S}\iint_{\phi} ydxdy = \frac{-1}{2S}\int_1^n y^2(t) \cdot x_1(t)dt \tag{2.96}$$

$$S = \iint_{\phi} dxdy = \int_1^n y(t) \cdot x(t)dt \tag{2.97}$$

де чисельне інтегрування виконується методом Сімпсона [113].

Головні центральні моменти інерції $I_1 \ge I_2$ є коренями квадратного рівняння:

$$x^2\left(I_{xx}+I_{yy}\right)+\left(I_{xx}I_{yy}-I_{xy}^2\right)=0$$

де моменти інерції відносно осей O_1x_1 і O_1y_1 та відцентрові моменти інерції обчислюються за допомогою чисельного інтегрування за такими співвідношеннями:

$$I_{xx}=\iint_{\phi}\ y^2dxdy=\int_1^n y^2(t)x(t)y_1(t)dt \tag{2.98}$$

$$I_{yy}=\iint_{\phi}\ x^2dxdy=-\int_1^n x^2(t)y(t)x_1(t)dt \tag{2.99}$$

$$I_{xy}=\iint_{\phi}\ xydxdy=\frac{1}{2}\int_1^n x^2(t)y(t)y_1(t)dt \tag{2.100}$$

З метою переходу до головних осей інерції здійснювався поворот системи координат на деякий кут α:

$$\sin\alpha=\frac{2I_{xx}}{I_2-I_1}, \tag{2.101}$$

$$\cos\alpha=\frac{I_{yy}-I_{xx}}{I_1-I_2}, \tag{2.102}$$

де при $I_1=I_2$ вважається, що $\alpha=0$. Таким чином, отримані рівняння (2.98)–(2.100) однозначно визначають канонічну систему координат $O_1x_1y_1$.

Щоб уникнути множинності параметричних представлень контуру, у рівнянні (1) здійснювався перехід до єдиного параметра p_t замість t, що має сенс довжини дуги кривої $0\le p_t\le L_t$:

$$p_t=\int_1^n\sqrt{(x_1)^2+(y_1)^2}dt, \tag{2.103}$$

$$L_t=\int_1^n\sqrt{(x_1)^2-(y_1)^2}dt, \tag{2.104}$$

де L_t – загальна довжина контуру, що характеризує як геометричні розміри контуру, так і відстань, з якої він спостерігається.

При обробці зображень зі сканера (фотокамери, фотоелемента) відстань спостереження (при фіксованому розширенні) постійна і обчислюється, тоді як для цифрової фотокамери важливо знати її фокусну відстань і відстань від фотокамери до об’єкта спостереження.

Якщо масштабувати координати $\frac{x_1}{L_t}$ і $\frac{y_1}{L_t}$, безрозмірний параметр кривої $s=\frac{p_t}{L_t}$, $0\le s\le 1$, а початкову точку при значенні параметра $p_t=0$

перенести в точку перетину контуру з віссю O_1x_1, то таке представлення в системі координат O_1xy буде єдиним:

$$x = \frac{x_1(s)}{L_t}, \tag{2.105}$$

$$y = \frac{y_1(s)}{L_t}, \tag{2.106}$$

Спектральна функція контуру розраховувалася за допомогою алгоритму швидкого перетворення Фур'є [114]:

$$S_k = \sum_{n=0}^{N-1} C(n) e^{-i\frac{2\pi kn}{N}} \tag{2.107}$$

де S_k – спектральна функція контуру; $C(n) = x_j + iy_j$ – значення контуру в дискретних точках; N – кількість дискретних точок $(x_j; y_j)$ на контурі, знятих з рівним кроком k по параметру s; $k = \frac{1}{N}$ – індекс частоти. Потрібно, щоб N була степенем двійки (в даній роботі було прийнято $N = 512$), тому точки на контурі розраховувалися за формулою (2.105)–(2.106) з кроком k.

З формули (2.107) амплітудний спектр обчислюється як модуль спектральної функції, $R_k = |S_k|, k = 0,1, \dots, \frac{N}{2} - 1$, а фазовий спектр – як його протилежний за знаком аргумент $R_k = -arg(S_k), k = \frac{N}{2}, \dots, N - 1$.

Таким чином, рівняння дозволяють розраховувати амплітудний та фазовий спектри $\bar{R} = \{R_0, \dots, R_{N-1}\}$ контуру плоского зображення будь-якого одиничного представника компонента зернової маси.

Добре відомо, що зернівка навіть одного і того ж сорту будь-якої культури має широкі варіації у своїх властивостях, включаючи геометричну форму. Широка варіабельність ознак зернівок є однією з основних проблем при їх ідентифікації.

Для вирішення задач ідентифікації зернівок слід залучити методи математичної статистики [115]. Спектр $\bar{R}$ зернівки є випадковим N-вимірним вектором. Тому необхідно отримати вибірку $\bar{R}_1, \dots, \bar{R}_n$ з об'єму n, яка забезпечить потрібну точність для кожного сорту кожної культури, яку можна назвати «навчальною вибіркою». Після підрахунку емпіричного розподілу ймовірностей випадкового вектора $\bar{R}$, довірчих інтервалів його середнього $\bar{M} = \{M_0, \dots, M_{N-1}\}$ і дисперсії $\bar{D} = \{\sigma_0^2, \dots, \sigma_{N-1}^2\}$, проводилась перевірка статистичних гіпотез про нормальність розподілу, значимість коефіцієнтів кореляції координат $\bar{R}$.

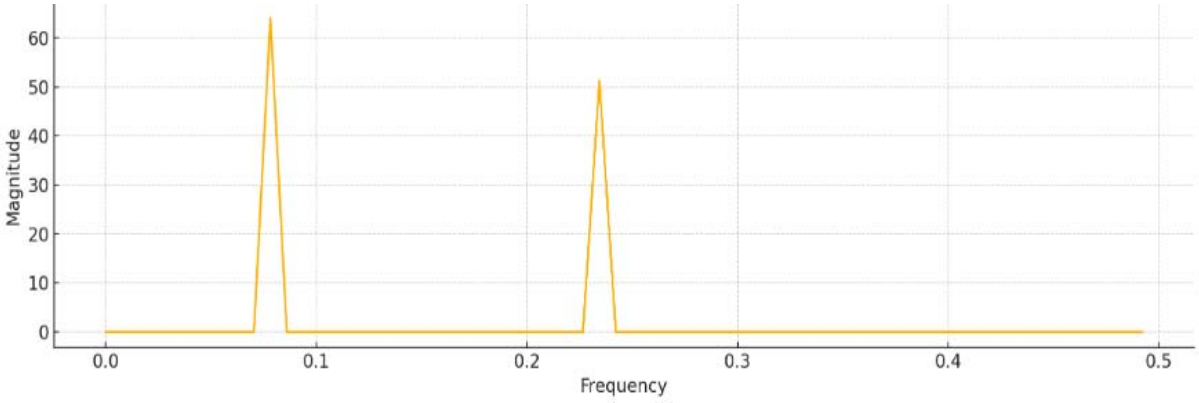
Проілюструємо запропоновану методику на прикладі вибірок зерен пшениці сортів «Смуглянка» та «Альбатрос Одеський». На рисунку 2.8 показані плоскі зображення кількох зерен цих двох сортів, отримані на сканері (фотокамері). Зображення з камери підлягали комп'ютерній обробці за допомогою розробленого програмного забезпечення у наступній послідовності.

Після дискретного перетворення Фур'є (2.107) були розраховані спектри контурів кожної зернівки, а також емпіричні розподіли ймовірностей для кожної гармоніки кожного сорту. На рис. 2.9 показані амплітудні спектри центрів розсіювання, перші 16 гармонік (від 0 до 15) з 512.

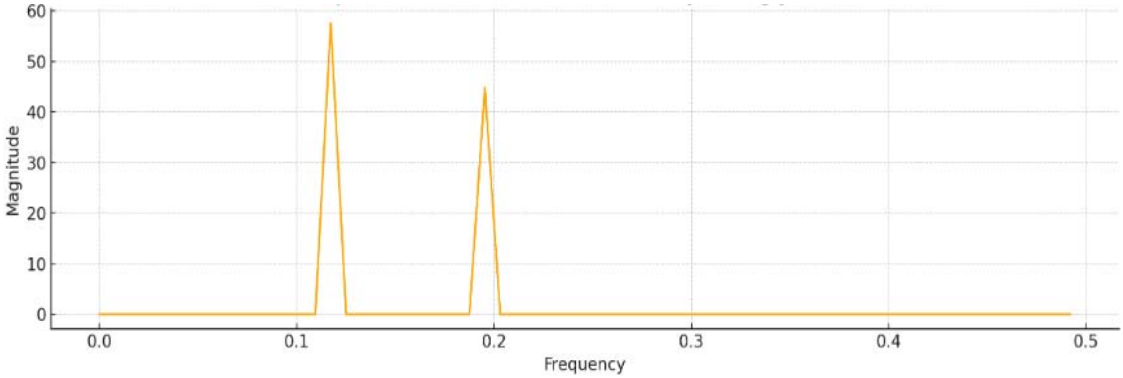


а) б)

Рисунок 2.8 – Зображення зерен сортів «Смуглянка» (а) та «Альбатрос Одеський» (б)



а)



б)

а) – Сорт "Альбатрос Одеський" – має частотні компоненти на 10 Гц і 30 Гц;

б) – Сорт "Смуглянка" – має частотні компоненти на 15 Гц і 25 Гц.

Рисунок 2.9 – Амплітудні спектри центрів розсіювання

Суцільна лінія відповідає сорту «Альбатрос Одеський» (*а*), та сорту «Смуглянка» (*б*). Перевірка гіпотези нормальності розподілу гармонік показує, що спостереження не суперечать гіпотезі Гауса про розподіл до рівнів значимості вище 0,5.

На рисунку 2.10 для сорту «Альбатрос Одеський» показано контур, відновлений за 1-ю і 3-ю гармоніками спектра та нульовими іншими, порівняно з вихідним і відновленим за 1-ю, 3-ю і 5-ю гармоніками. Як зазначалося раніше, 1-а гармоніка відповідає радіусу еквівалентного контуру кола, 3-я – витягнутості еліпса, 5-а – накладенню двох еліпсів.

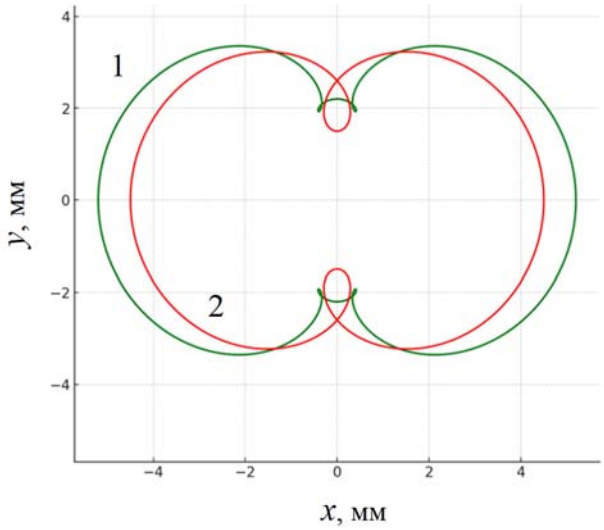


Рисунок 2.10 – Контур зерна, відновлений за: 1-ю і 3-ю гармоніками спектра (1) та 1-ю, 3-ю і 5-ю гармоніками (2)

Для порівняння з запропонованою методикою спочатку використовується метод покрокового виключення. Вибір найбільш часто використовуваного в літературі методу дискримінантного аналізу показав, що серед перших 16 гармонік лише 1-а, 3-я, 8-а, 11-а та 15-а гармоніки виявилися значущими для розпізнавання сортів «Альбатрос Одеський» і «Смуглянка» за лінійними показниками класифікації. Розраховані функції класифікації для сортів «Альбатрос Одеський» (А) і «Смуглянка» (В) мають вигляд:

$$A = -359{,}6 + 9{,}8A_1 + 11{,}9A_3 + 16{,}1A_8 + 5{,}9A_{11} + 27{,}9A_{15}, \quad (2.108)$$

$$B = -262{,}8 + 9{,}0B_1 + 2{,}8D_3 + 5{,}4D_8 - 5{,}9B_{11} + 8{,}2B_{15}, \quad (2.109)$$

де A_1 – 1-а гармоніка для сорту «Альбатрос Одеський», B_1 – для сорту «Смуглянка». Похибка (відсоток неправильно класифікованих зерен) склала 1,6%.

Згідно з процедурою дискримінантного аналізу, для ідентифікації будь-якої зернівки обчислюються показники класифікації A і B за формулами (2.108) та (2.109), і зернівка відноситься до того сорту, чий показник є максимальним. В геометричному сенсі ця процедура означає розподіл можливих значень гармонік на два півпростори гіперплощиною, отриманою з умов порівняння рівнянь правих частин (2.108) і (2.109), коли змінюються тільки дві гармоніки (наприклад, 1-а і 3-я), а інші фіксовані, ця гіперплощина перетворюється на пряму (рис. 2.11, пряма MN).

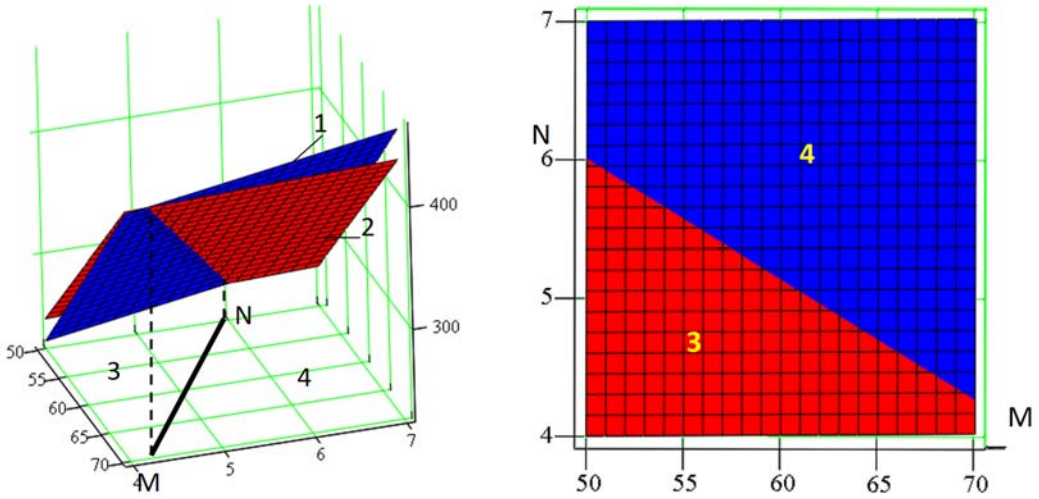


Рисунок 2.11 – Функції класифікації для сортів «Альбатрос Одеський» і «Смуглянка»

Функція (2.108) зображена на рис. 2.11 площиною 2, а функція (2.109) – площиною 1. Якщо значення 1-ї і 3-ї гармонік зернівки потрапляють у півпростір 4 плоскості аргументів, то її слід вважати сортом «Альбатрос Одеський», а в півпростір 3 – «Смуглянка».

Незважаючи на зручність і простоту алгоритму розпізнавання за допомогою функцій класифікації, його точність не може бути суттєво покращена через деякі початкові умови. Якщо вимога нормальності генеральної сукупності не викликає сумнівів (завдяки застосовності центральної межової теореми), то вимога однорідності коваріаційних матриць у різних групах не виконується (відмінності між групами не тільки в математичних очікуваннях, але і в дисперсіях і коефіцієнтах кореляції). Врешті-решт, значні обмеження накладає лінійність функцій класифікації.

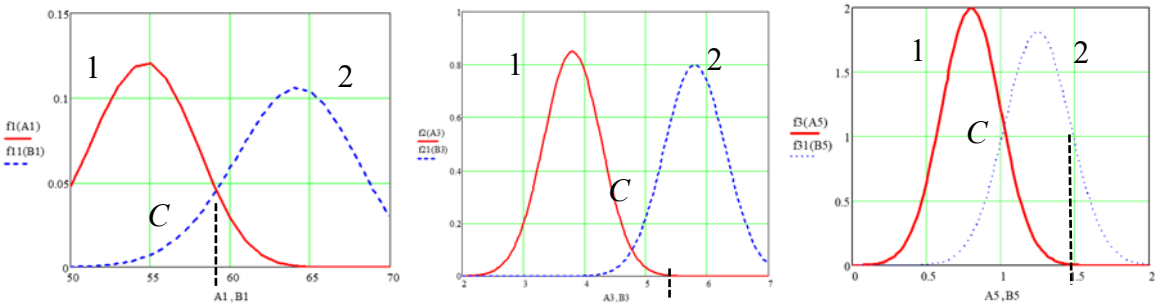
Пропонована в даній роботі методика спирається лише на вимогу нормальності генеральної сукупності. Поверхні рівня щільності ймовірності нормального випадкового вектора $\bar{R}$ задаються рівнянням другого порядку і є еліпсоїдами розсіювання [116]:

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\frac{R_i-M_i}{\sigma_i}\left(\Sigma^{-1}\right)_{ij}\frac{R_j-M_j}{\sigma_j}=const, \qquad (2.110)$$

де $\left(\Sigma^{-1}\right)_{ij}$ – елемент оберненої до коваріаційної матриці для змінних R_i та R_j; M_i, M_j – середні значення відповідних змінних R_i та R_j.

При достатньо великій константі в правій частині (2.110), відповідно до правила «трьох сигм», ймовірність потрапляння спектра в еліпсоїд розсіювання практично дорівнює одиниці. Таким чином, якщо вдалося виділити ті гармоніки $\bar{R}$ для кожного сорту кожної культури, чиї еліпсоїди розсіювання не перетинаються, похибка такої ідентифікації буде практично нульовою.

Для вибірки з двох сортів пшениці одномірні еліпсоїди розсіювання (2.12) і відповідні одномірні щільності розподілу ймовірностей показані на рис. 5: 1 – сорт «Альбатрос Одеський», 2 – сорт «Смуглянка».



а) б) в)

а) – 1-а гармоніка; б) – 3-я гармоніка; в) – 5-а гармоніка

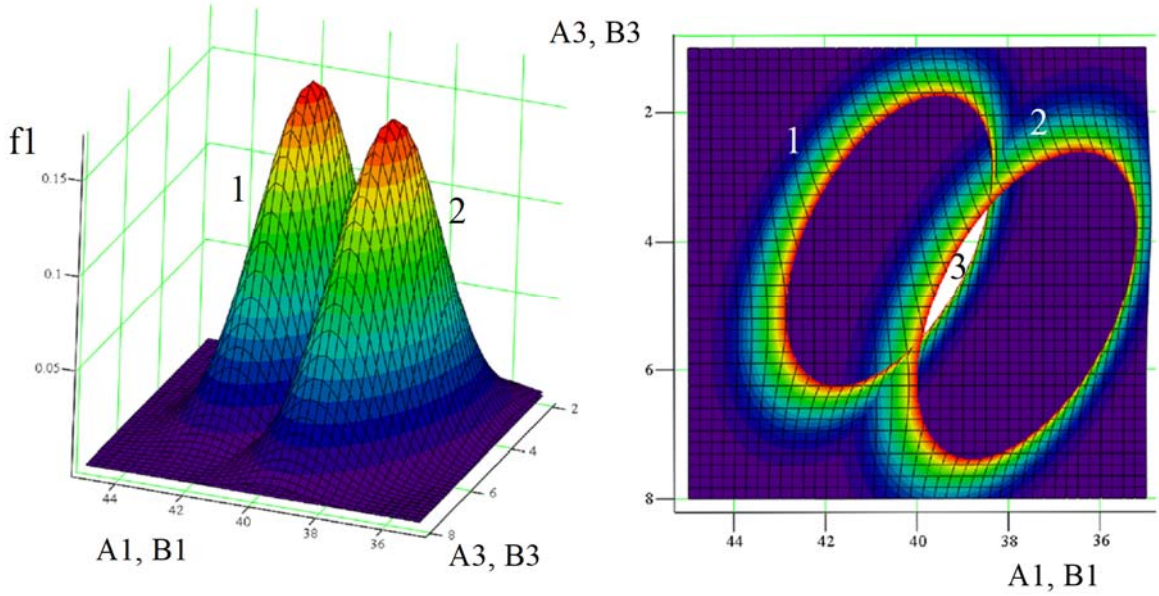
Рисунок 2.12 – Щільності розподілу ймовірностей: 1 – сорт «Альбатрос Одеський», 2 – сорт «Смуглянка».

Показані лише гармоніки 1 (а), 3 (б) і 5 (в), які найбільше відрізняються (рис. 2.12). Видно, що при потраплянні спектра в околицю точки ***C*** ідентифікація неможлива. Розпізнавання за окремими гармоніками дає помилку кілька відсотків і більше. Зазначимо, що ця помилка не може бути значно зменшена шляхом сумісного використання гармонік через їх сильну кореляцію.

На рис. 2.13 показані двомірні еліпсоїди розсіювання (2.110) для 1-ї і 3-ї гармонік (б) та відповідні двомірні щільності розподілу ймовірностей (а): 1 – сорт «Альбатрос Одеський», 2 – сорт «Смуглянка». При потраплянні спектра в область перетину еліпсів 1 і 2 тобто в зону 3 на рис. 2.13, б ідентифікація також неможлива, але ймовірність цього (і відповідно помилка) зменшується вже до часток відсотка.

При аналізі тривимірних еліпсоїдів розсіювання (2.110) для 1-ї, 3-ї і 5-ї гармонік досліджених сортів встановлено, що ідентифікація неможлива тільки при потраплянні спектра в область перетину еліпсоїдів 1 і 2. Ймовірність цього і відповідно помилка розпізнавання складає соті частки відсотка.

Таким чином, підібравши такі гармоніки спектра, чиї еліпсоїди розсіювання (2.110) перетинаються в мінімальній кількості, для двох сортів пшениці – «Альбатрос Одеський» і «Смуглянка» при загальному числі 512 гармонік спектра розпізнавання по 1-й, 3-й і 5-й гармонікам дає помилку в розділенні зазначених сортів у межах 0,05-0,1%.



а) б)

Рисунок 2.13 – Щільності розподілу ймовірностей (а) та двомірні еліпсоїди розсіювання (б): 1 – сорт «Альбатрос Одеський»; 2 – сорт «Смуглянка»; 3 – зона перетину

Для формалізованого опису геометричної форми зернівки та виділення інформативних ознак доцільно застосувати спектральний підхід, що базується на розкладі параметрично заданого контуру у ряд Фур'є.

Нехай контур зернівки задано у параметричній формі:

$$z(t) = x(t) + iy(t), t \in [0,1], \quad (2.111)$$

де $x(t), y(t)$ – координати точок контуру в інваріантній системі координат.

Спектральне представлення контуру визначається як розклад у комплексний ряд Фур'є:

$$z(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k e^{i2\pi kt}, \quad (2.112)$$

де C_k – комплексні коефіцієнти Фур'є, що обчислюються за формулою:

$$C_k = \int_0^1 z(t) e^{-i2\pi kt} dt. \quad (2.113)$$

У випадку дискретного задання контуру, що характерно для цифрових зображень, використовується дискретне перетворення Фур'є:

$$C_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} z_n e^{-i2\pi kn/N}, \quad (2.114)$$

де $z_n = x_n + iy_n$ – координати n -ї точки контуру.

Отримані коефіцієнти C_k формують спектр, який характеризує форму зернівки. Амплітуда гармонік визначається як:

$$A_k = |C_k|, \tag{2.115}$$

а фаза:

$$\varphi_k = \arg(C_k). \tag{2.116}$$

Низькочастотні гармоніки ($k \to 0$) описують загальну форму зернівки та її розмірні характеристики, тоді як високочастотні компоненти відображають локальні нерівності, шорсткість поверхні та наявність дефектів.

З практичної точки зору доцільно обмежитися скінченною кількістю гармонік:

$$z(t) \approx \sum_{k=-K}^{K} C_k e^{i2\pi kt}, \tag{2.117}$$

що дозволяє зменшити розмірність задачі та виділити найбільш інформативні ознаки форми.

Таким чином, спектральне представлення забезпечує компактний та інваріантний опис геометрії зернівки, який може бути використаний для задач класифікації, фракціонування та оцінки якості зернової маси.

2.5.4. Інформативність гармонік

Отримане спектральне представлення контуру зернівки у вигляді коефіцієнтів Фур'є дозволяє перейти від геометричного опису форми до системи кількісних ознак, придатних для аналізу та класифікації. Кожна гармоніка спектра несе певну інформацію про форму об'єкта, що дає можливість інтерпретувати її у фізичному та технологічному аспектах.

Низькочастотні гармоніки (з малими значеннями k) визначають загальну геометрію зернівки. Зокрема, нульова гармоніка характеризує положення центру мас, а перші гармоніки відповідають за основні розмірні параметри – довжину, ширину та витягнутість зерна. Саме ці компоненти спектра визначають приналежність зернівки до певної фракції за розміром.

Гармоніки середнього діапазону частот відображають відхилення форми зернівки від ідеалізованих моделей (еліпсоїдальної або сферичної). Вони є чутливими до асиметрії, деформацій та нерівномірності розвитку зерна, що може бути пов'язано з умовами вирощування або механічними впливами під час збирання та транспортування.

Високочастотні гармоніки характеризують локальні особливості контуру, такі як шорсткість поверхні, мікродефекти, тріщини або пошкодження оболонки зернівки. Наявність значних амплітуд у цьому діапазоні може свідчити про зниження якості зерна або його механічне пошкодження.

Для кількісної оцінки інформативності спектра доцільно використовувати енергетичні характеристики гармонік:

$$E_k = |C_k|^2, \tag{2.118}$$

а також нормований розподіл енергії:

$$\widetilde{E_k} = \frac{E_k}{\sum_{k=1}^{K} E_k}. \tag{2.119}$$

Це дозволяє оцінити внесок кожної гармоніки у формування загальної форми зернівки.

Для практичних задач фракціонування зерна доцільно вводити узагальнені спектральні показники, наприклад:

Індекс форми (за низькими гармоніками):

$$K_f = \frac{E_1 + E_2}{\sum_{k=1}^{K} E_k}. \tag{2.120}$$

Індекс шорсткості (за високими гармоніками):

$$K_r = \frac{\sum_{k=k_0}^{K} E_k}{\sum_{k=1}^{K} E_k}, \tag{2.121}$$

де k_0 – гранична частота, що розділяє середні та високі гармоніки.

Вперше встановлено, що розподіл енергії гармонік спектра може бути використаний як інваріантна ознака для класифікації зернівок за фракційним складом та технічним станом. Зокрема, зерно різних фракцій характеризується різною концентрацією енергії у низькочастотній області спектра, тоді як пошкоджені зернівки мають підвищену енергію у високочастотному діапазоні.

Таким чином, спектральні характеристики контуру зернівки дозволяють сформувати інформативний вектор ознак, який може бути використаний як у класичних методах класифікації, так і в сучасних інтелектуальних системах, зокрема нейромережевих алгоритмах розпізнавання.

2.5.5. Статистична модель розпізнавання

Спектральне представлення контуру зернівки дозволяє сформувати вектор інформативних ознак, який використовується для задач класифікації та ідентифікації об'єктів у зерновій суміші. Для формалізації процесу розпізнавання доцільно застосувати статистичний підхід, що базується на ймовірнісних моделях.

Нехай кожна зернівка описується вектором ознак:

$$X = (A_1, A_2, \dots, A_K), \tag{2.122}$$

де $A_k = |C_k|$ – амплітуди гармонік спектра Фур'є.

Задача розпізнавання полягає у віднесенні об'єкта до одного з класів:

$$\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M, \tag{2.123}$$

де кожен клас відповідає певній фракції зерна або його стану (ціле, пошкоджене, домішка тощо).

Ймовірність належності об'єкта до класу ω_j визначається як умовна густина розподілу:

$$p\left(X\middle|\omega_j\right). \tag{2.124}$$

У загальному випадку для опису розподілу ознак використовується багатовимірний нормальний закон:

$$p\left(X\middle|\omega_j\right) = \frac{1}{(2\pi)^{K/2}\left|\Sigma_j\right|^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(X-\mu_j\right)^T \Sigma_j^{-1}\left(X-\mu_j\right)\right), \tag{2.125}$$

де μ_j – вектор середніх значень ознак для класу ω_j, Σ_j – коваріаційна матриця.

Рішення про належність зернівки до певного класу приймається на основі правила Байєса:

$$P\left(\omega_j\middle|X\right) = \frac{p\left(X\middle|\omega_j\right)P(\omega_j)}{\sum_{i=1}^{M} p(X|\omega_i)P(\omega_i)}, \tag{2.126}$$

де $P\left(\omega_j\right)$ – апріорна ймовірність класу.

Класифікація здійснюється за критерієм максимуму апостеріорної ймовірності:

$$X \in \omega_j, \text{ якщо } P\left(\omega_j\middle|X\right) = \max_i P\left(\omega_i|X\right). \tag{2.127}$$

Для спрощення обчислень часто використовують логарифмічну дискримінантну функцію:

$$g_j(X) = -\frac{1}{2}\left(X - \mu_j\right)^T \Sigma_j^{-1}\left(X - \mu_j\right) - \frac{1}{2}\ln\left|\Sigma_j\right| + \ln P\left(\omega_j\right). \quad (2.128)$$

Об'єкт відноситься до класу, для якого значення $g_j(X)$ є максимальним.

Вперше запропоновано використовувати спектральні характеристики контуру зернівки як статистично незалежні або слабокорельовані ознаки, що дозволяє зменшити розмірність задачі та підвищити точність класифікації. Зокрема, нормовані енергетичні показники гармонік можуть використовуватися як інваріантні дескриптори форми.

Для практичної реалізації у системах оптичного контролю доцільно застосовувати спрощені моделі, наприклад:

Класифікатор на основі евклідової відстані:

$$D_j = |X - \mu_j|, \quad (2.129)$$

або нормалізовану відстань Махаланобіса [117]:

$$D_j^2 = \left(X - \mu_j\right)^T \Sigma_j^{-1}\left(X - \mu_j\right). \quad (2.130)$$

Таким чином, статистична модель розпізнавання дозволяє формалізувати процес ідентифікації зернівок на основі спектральних ознак, забезпечуючи можливість автоматизованого фракціонування зернових сумішей та інтеграції з інтелектуальними системами керування.

2.5.6. Застосування для фракціонування зерна

Застосування спектрального аналізу контурів зернівок дозволяє перейти від традиційних геометричних методів класифікації до інтелектуальних алгоритмів фракціонування, що враховують комплекс морфологічних ознак об'єкта. Такий підхід забезпечує підвищення точності розділення зернових сумішей, особливо у випадках, коли розмірні характеристики зерна частково перекриваються для різних фракцій.

У процесі оптико-електронного контролю зерновий потік реєструється за допомогою відеосенсора, після чого виконується сегментація зображення та виділення контурів окремих зернівок. Для кожного об'єкта формується параметричний опис та виконується спектральне перетворення, у результаті чого отримується вектор ознак:

$$X = (A_1, A_2, \dots, A_K), \tag{2.131}$$

де A_K – амплітуди гармонік спектра Фур'є.

Отриманий вектор ознак використовується для класифікації зернівок за фракціями:

$$X \to \omega_j, j = 1,2, \dots, M, \tag{2.132}$$

де ω_j – класи, що відповідають окремим фракціям зерна або домішкам.

Критерії фракціонування на основі спектральних ознак.

Для практичної реалізації доцільно використовувати узагальнені спектральні індекси, що зменшують розмірність задачі та підвищують швидкодію системи.

1. Індекс форми (розмірна характеристика):

$$K_f = \frac{A_1 + A_2}{\sum_{k=1}^{K} A_k}. \tag{2.133}$$

2. Індекс шорсткості (дефектність поверхні):

$$K_r = \frac{\sum_{k=k_0}^{K} A_k}{\sum_{k=1}^{K} A_k}. \tag{2.134}$$

3. Індекс асиметрії:

$$K_a = \frac{|A_2 - A_1|}{A_1 + A_2}. \tag{2.135}$$

Класифікація виконується за умовами:

$$\omega_j: \quad K_f \in \left[K_{f,j}^{min}, K_{f,j}^{max}\right],\ K_r \le K_{r,j}^{max} \tag{2.136}$$

Спектральні характеристики можуть бути безпосередньо інтегровані у систему керування зерноочисної машини. При цьому формується функціональна залежність:

$$U = f(X, w, Z, \mu, C_d), \tag{2.137}$$

де U – вектор керуючих параметрів (частота коливань решіт, швидкість повітряного потоку, амплітуда коливань, кут нахилу), w – вологість зерна, Z – засміченість, μ – коефіцієнт тертя зерна, C_d – коефіцієнт аеродинамічного опору.

Таким чином, спектральні ознаки виступають як інформаційна основа для адаптивного керування процесом фракціонування.

З урахуванням динаміки потоку зернового матеріалу, доцільно враховувати зміну спектральних характеристик у часі:

$$X(t) = \big(A_1(t), A_2(t), \dots, A_K(t)\big). \quad (2.138)$$

Це дозволяє аналізувати:

- нестабільність зернового потоку;
- зміну фракційного складу в реальному часі;
- появу аномальних об'єктів (домішок).

Для оцінки стабільності процесу може бути введено інтегральний показник:

$$S = \frac{1}{T}\int_0^T || X(t) - \bar{X}||dt, \quad (2.139)$$

де $\bar{X}$ – середнє значення ознак.

Спектральні ознаки впливають на точність класифікації, яка може бути представлена у вигляді:

$$\eta = f\big(K_f, K_r, w, Z\big).$$

де η – точність розпізнавання.

Отже, встановлено, що використання спектральних ознак дозволяє зменшити вплив варіацій вологості та засміченості на результати класифікації за рахунок інваріантності спектрального опису.

2.5.7. Зв'язок із точністю оптичної детекції

Точність оптичної детекції зернівок у системах комп'ютерного зору визначається здатністю алгоритму коректно ідентифікувати межі об'єктів, виділяти їх геометричні характеристики та класифікувати за заданими ознаками. Використання спектрального представлення контурів дозволяє суттєво підвищити стійкість детекції до впливу зовнішніх і внутрішніх факторів, зокрема варіацій освітлення, вологості та засміченості зернової маси.

Формалізація точності детекції.

Точність оптичної детекції доцільно оцінювати через ймовірність правильної класифікації:

$$\eta = \frac{N_{correct}}{N_{total}}, \quad (2.140)$$

де $N_{correct}$ – кількість правильно класифікованих зернівок, N_{total} – загальна кількість об'єктів.

З урахуванням спектральних ознак точність можна подати як функцію:

$$\eta = f(X, w, Z, L, C), \tag{2.141}$$

де $X = (A_1, A_2, \ldots, A_K)$ – спектральний вектор, w – вологість, Z – засміченість, L – освітленість, C – контрастність зображення.

Похибка сегментації безпосередньо впливає на формування спектральних коефіцієнтів. Відхилення контуру призводить до зміни амплітуд гармонік:

$$A_k = A_k^{true} + \Delta A_k, \tag{2.142}$$

де ΔA_k – похибка визначення гармоніки.

Відносна похибка спектрального представлення:

$$\varepsilon_X = \frac{|\Delta X|}{|X|}. \tag{2.143}$$

Ця величина визначає чутливість спектрального опису до шумів і спотворень.

Якщо класифікація здійснюється на основі функції $\omega = g(X)$, то похибка класифікації визначається як:

$$\delta = |g(X + \Delta X) - g(X)|. \tag{2.144}$$

Для лінійної апроксимації:

$$\delta \approx \nabla g(X) \cdot \Delta X. \tag{2.145}$$

Це показує, що найбільший вплив на похибку мають ті гармоніки, для яких градієнт функції класифікації є максимальним.

Інваріантність спектральних ознак.

Однією з ключових переваг спектрального представлення є його інваріантність до:

зсуву об’єкта:

$$X(x + x_0, y + y_0) = X(x, y); \tag{2.146}$$

повороту (за використання модулів гармонік):

$$|A_k| = const; \tag{2.147}$$

масштабування (при нормалізації):

$$\widetilde{A_k} = \frac{A_k}{A_1}. \tag{2.148}$$

Це забезпечує стабільність класифікації навіть при зміні умов зйомки.

З урахуванням усіх факторів можна записати узагальнену модель:

$$\eta = f(X, w, Z, \mu, C_d, L, \sigma_n). \quad (2.148)$$

де μ – коефіцієнт тертя (впливає на перекриття зерен), C_d – динамічний опір (впливає на орієнтацію зерен), σ_n – рівень шуму зображення.

У спрощеному вигляді:

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{-(\alpha_w w + \alpha_Z Z + \alpha_n \sigma_n)} \cdot (1 + \gamma S). \quad (2.149)$$

Таким чином, спектральний аналіз контурів зернівок є ефективним засобом підвищення точності оптичної детекції в умовах змінних фізико-механічних та технологічних факторів. Його використання дозволяє забезпечити інваріантність розпізнавання, зменшити похибки сегментації та підвищити надійність автоматизованих систем контролю якості зерна. Запропонована модель створює теоретичну основу для побудови адаптивних систем комп'ютерного зору з високим рівнем достовірності. Отже використання спектрального підходу дозволяє: зменшити чутливість до шумів і освітлення; підвищити точність сегментації складних об'єктів; знизити вплив перекриття зерен; стабілізувати результати класифікації у реальному часі. Наукова новизна досліджень полягає в: аналітичному зв'язку між спектральними характеристиками контурів зернівок та точністю оптичної детекції; залежності похибки класифікації від варіацій спектрального вектора ознак; можливості компенсації впливу вологості та засміченості за рахунок використання інваріантних спектральних параметрів.

Висновки до розділу 2

1. У результаті проведеного теоретичного аналізу встановлено, що підвищення ефективності процесів сепарації та фракціонування зернових сумішей неможливе без впровадження високоточних методів оптико-електронного контролю, заснованих на аналізі морфологічних характеристик зернівок. Обґрунтовано доцільність використання спектрального Фур'є-аналізу контурів як інваріантного інструменту опису форми зерна, що забезпечує суттєве підвищення точності розпізнавання (до рівня 0,05–0,1%) незалежно від умов зйомки та варіацій фізико-механічних властивостей матеріалу.

2. Системно обґрунтовано перехід від геометричних параметрів, отриманих із цифрових зображень (площа проекції, периметр, форма),

до масових характеристик зернівок (об'єм, маса, густина) із використанням аналітичних та емпіричних залежностей. Показано, що використання степеневих моделей типу $m \sim A_p^{3/2}$ дозволяє адекватно описувати зв'язок між 2D- та 3D-параметрами зерна та створює основу для побудови систем непрямого визначення масових характеристик у реальному часі.

3. Доведено, що фізико-механічні властивості зернової маси, зокрема вологість та засміченість, суттєво впливають на точність оптичної детекції через зміну оптичних характеристик поверхні, контрастності зображення та умов сегментації. Запропоновано узагальнені математичні залежності, які враховують вплив цих факторів на точність розпізнавання та дозволяють кількісно оцінити похибки визначення геометричних і масових параметрів.

4. Розроблений алгоритм ідентифікації фракцій на базі архітектури нейромережі YOLOv11 забезпечує високоточну ідентифікацію фракцій зернових сумішей у реальному часі. Поєднання глибинного навчання та спектрального аналізу дозволяє значно підвищити точність, стійкість і адаптивність системи.

5. Розроблено математичний апарат спектрального представлення контурів зернівок, що базується на параметризації, переході до інваріантної системи координат та розкладі у ряд Фур'є. Встановлено, що найбільш інформативними є низькочастотні гармоніки, які характеризують загальну форму зерна, тоді як високочастотні компоненти відображають локальні дефекти та нерівності поверхні.

6. Встановлено аналітичний зв'язок між спектральними ознаками контурів зернівок та точністю їх оптичної детекції. Показано, що використання нормованих спектральних коефіцієнтів дозволяє зменшити чутливість алгоритмів до шумів, освітлення та перекриття об'єктів, що забезпечує стабільність класифікації в умовах реального виробництва.

7. Обґрунтовано можливість використання спектральних ознак як інформаційної основи для побудови інтелектуальних систем керування процесами сепарації. Запропоновано функціональні залежності, що пов'язують спектральні характеристики зернового потоку з керуючими параметрами технологічного обладнання (частота коливань решіт, швидкість повітряного потоку, амплітуда руху), що створює передумови для реалізації адаптивних систем із замкненим контуром управління.

8. Показано, що застосування спектрального Фур’є-аналізу у поєднанні зі статистичними методами розпізнавання дозволяє значно підвищити точність класифікації зернівок порівняно з традиційними методами. Зокрема, для сортів пшениці при використанні обмеженої кількості гармонік (1-ї, 3-ї та 5-ї) досягається похибка розпізнавання на рівні 0,05–0,1%, що більш ніж на порядок перевищує точність класичних підходів, заснованих лише на геометричних параметрах.

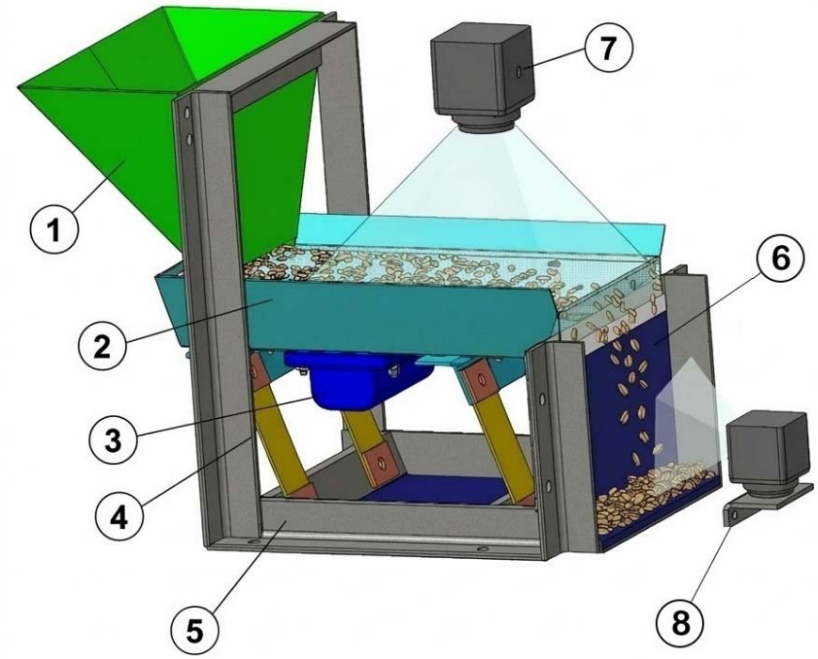
9. У цілому, результати розділу формують науково-методичну основу для розробки інтелектуальних систем оптичного контролю та управління процесами фракціонування зернових сумішей, що поєднують методи комп’ютерного зору, спектрального аналізу, математичного моделювання та адаптивного керування.

РОЗДІЛ 3

ПРОЕКТУВАННЯ ТА ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ

3.1. Розробка лабораторного макета віброрешітного сепаратора з регульованими параметрами

Макетний зразок являє собою лабораторну установку вібро-пневматичного типу (рис. 3.1), призначену для дослідження потоків зернових матеріалів за допомогою алгоритмів комп'ютерного зору (YOLOv11).



1 – завантажувальний бункер (живильник); 2 – вібраційний лоток; 3 – вібромотор (збудник коливань); 4 – пружні опори (підвіски); 5 – рама конструкції; 6 – змінний матовий екран; 7, 8 – цифрові камери оптичного контролю потоків зернових матеріалів

Рисунок 3.1 – Схема макетного зразка установки для дослідження потоків зернових матеріалів під час сепарації

Основними конструктивними вузлами є:

– завантажувальний пристрій. Бункер 1 з кутом нахилу стінок $\theta = 35^0$, що забезпечує стабільну гравітаційну подачу матеріалу без утворення «застійних зон»;

– вібротранспортуючий орган. Робочий лоток 2 розміром 120х300 мм, встановлений на пружних опорах 4. Лоток виготовлений з антибліковим покриттям для мінімізації оптичних завад;

– система збудження коливань. Вібромотор постійного струму 3 (тип 2838), керування яким здійснюється через ШІМ-регулятор. Пружні опори встановлені під кутом $\beta = 75^0$ до горизонту, що забезпечує необхідну амплітуду мікрострибків зерна для його дезінтеграції (розподілу в один шар).

– опорна рама. Жорстка конструкція з сталевого кутового профілю 5, що гасить паразитні вібрації та забезпечує стабільність фокусної відстані камер.

Система візуалізації розроблена для отримання висококонтрастних зображень зернового потоку в режимі реального часу. Установка оснащена верхньою камерою 7 для аналізу шару на лотку та фронтальною камерою 8 для аналізу зерна у вільному падінні.

Задня стінка зони аналізу має темно-синій матовий екран 6. Це забезпечує максимальний колірний контраст із зерновими культурами (пшениця, кукурудза), що критично важливо для точності сегментації нейромережею YOLO.

Архітектура керування побудована на принципі розподілених обчислень.

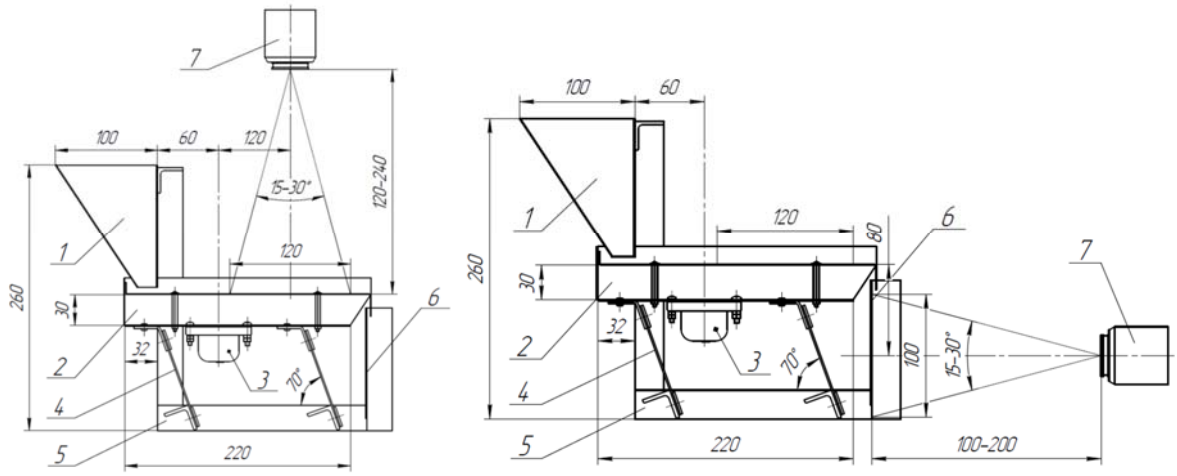
Обчислювальне ядро – NVIDIA Jetson Orin, що виконує запуск моделі YOLO 11, обробку відеопотоку та прийняття рішення про сепарацію об'єкта. Контролер периферії – Arduino (Uno/Nano), що отримує команди від Jetson через Serial-порт. Таке рішення забезпечує гальванічну розв'язку та реальний час виконання команд. Виконавчий пристрій – електромеханічна заслінка, підключена через 2-канальний модуль реле. Для забезпечення швидкого відкриття та примусового закриття заслінки реалізовано схему реверсування полярності. Це дозволяє контролювати положення заслінки в обох напрямках, запобігаючи заклинюванню та підвищуючи частоту спрацювання.

Кулер камери підтримує надлишковий тиск в оптичному блоці, запобігаючи осадженню пилу на лінзи.

Зерно з бункера потрапляє на вібролоток, де під дією спрямованої вібрації розподіляється в моношар. Камера фіксує потік, Jetson Orin ідентифікує домішки або дефектні одиниці.

Конструкційно-технологічні схеми макетного зразка установки для аналізу шару зернового матеріалу на поверхні решета та аналізу зерна у вільному падінні наведено на рис. 3.2.

При дослідженні потоків зернових матеріалів на поверхні решета, верхня камера з регульованою фокусною відстанню може бути встановлена на висоті $H_c = 120 - 240$ мм над його поверхнею. При дослідженні потоку зерна у вільному падінні відстань від камери до поверхні матового екрану може бути змінена в межах $L_C = 100 - 200$ мм.



а *б*

1 – завантажувальний бункер; 2 – вібраційний лоток; 3 – вібромотор; 4 – пружні опори; 5 – рама конструкції; 6 – змінний матовий екран; 7 – цифрова камера оптичного контролю потоків зернових матеріалів

Рисунок 3.2 – Конструкційно-технологічна схема установки для дослідження потоків зернових матеріалів на поверхні решета а) та у вільному падінні б)

Для забезпечення прецизійного керування виконавчим механізмом використано дворівневу архітектуру: високорівневий аналіз зображень (NVIDIA Jetson) та низькорівневе керування релейною групою (Arduino). Використання темно-синього матового фону дозволяє підвищити точність сегментації об’єктів у колірному просторі RGB на 12–15% порівняно зі світлими поверхнями.

Комплексна 12В схема живлення та керування для макетного зразка пристрою для сортування зерна на базі Jetson Orin об'єднує

електричні компоненти у єдину, працездатну мережу, готову до збору датасету та роботи з YOLOv11.

Ця схема реалізує централізоване керування всіма силовими вузлами з Jetson Orin. Вихідні дані з Jetson (лінії GPIO) можуть використовуватись, як слабострумові сигнали керування, які активують відповідні силові лінії 12В. Однак краще не підключити напряму, а використати через Arduino (або «розв'язку»). Хоча Jetson Orin має контакти GPIO, використання Arduino як «прошарку» між потужним комп'ютером і силовою частиною (реле, актуатор) має три вагомі переваги.

1. Захист дорогого контролера (Електрична ізоляція).

Jetson Orin коштує значно дорожче за Arduino. Якщо в котушці реле або в актуаторі станеться замикання або виникне зворотний стрибок напруги (індуктивний викид), Arduino згорить як «запобіжник», зберігши Jetson цілим. Крім того вони мають різні рівні логіки. У Jetson логіка – 3,3В, а у більшості модулів реле – 5В. Напряму вони можуть працювати нестабільно або пошкодити порт Jetson. Arduino ж легко оперує 5-вольтовою логікою реле.

2. «Real-time» стабільність.

Jetson працює на Linux. Якщо операційна система «задумається» або почне оновлюватися, сигнал на заслінку може запізнитися або «зависнути» у відкритому стані. Arduino – це контролер реального часу: якщо він отримав команду «закрити», він виконає її миттєво і гарантовано.

3. Можливість розширення для майбутніх датчиків.

У проєкті макетного зразка в майбутньому може бути передбачено використання датчиків ваги HX711 для зерна, датчиків рівня, віброметрів Arduino набагато зручніша для зчитування аналогових даних, ніж Jetson.

Ланцюжок керування макетним зразком виглядає так: Jetson Orin (Аналіз YOLOv11) → $USB/Serial$ → Arduino (Команди) → Relay Module → Актуатор заслінки.

Обмін даними між Jetson та Arduino здійснюється за допомогою звичайного USB-кабеля: Jetson (Python скрипт) бачить насіння, яке не проходить контроль, і відправляє коротку текстову команду в порт: `b'OPEN\n'`; Arduino постійно «слухає» порт. Як тільки прийшла команда – подає сигнал на пін, що з'єднаний з реле.

Склад електричних компонентів макета:

1. Блок живлення 12В (Джерело живлення макетного зразка).
2. ШІМ-регулятор (Регулювання частоти обертання вібромотора).
3. Вібропривод (Вібромотор типу 2838).
4. Jetson Orin Nano (Обчислювальний модуль, YOLOv11).
5. Arduino (Uno або Nano) (Контролер периферії).
6. 12V 2-Channel Relay Module (Керування заслінкою бункера).
7. Актуатор заслінки (Виконавчий механізм).
8. Камера (Машинний зір).
9. Кулер (Захист від пилу лінз оптики).
10. LED освітлення камери (Освітлення зразка зерна).

Блок-схема електричних компонентів макетного зразка наведена на рисунку 3.3.

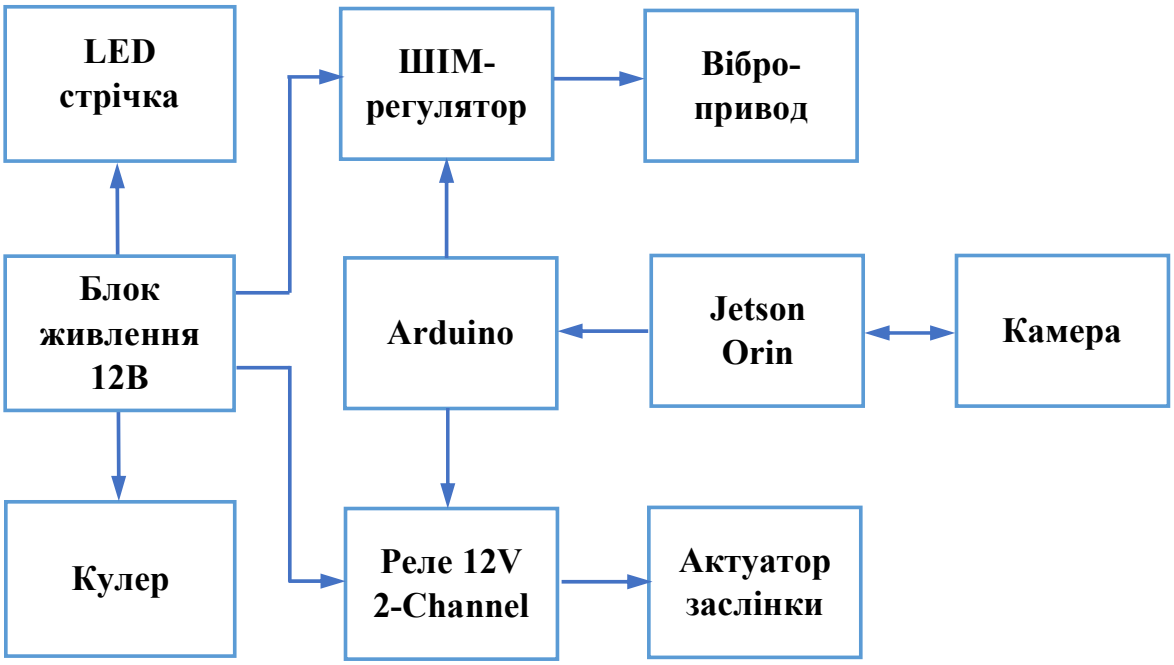


Рисунок 3.3 – Блок-схема електричних компонентів макетного зразка

Система Живлення (Клеми БЖ)

Як Джерело Живлення 12В: використано класичний промисловий імпульсний блок живлення потужністю 60 Вт в металевому корпусі («перфорований кожух»), який має кілька важливих переваг.

Такі блоки розраховані на тривалу безперервну роботу, що важливо для системи сортування зерна.

Вони забезпечують підстроювання напруги. На передній панелі (біля клем) зазвичай є маленький підстроювальний резистор (позначений як $+V\ ADJ$). Він дозволяє трохи підняти напругу (наприклад, до $12{,}5 - 13$ В). Це корисно, якщо LED-стрічка довга або кабель живлення має помітний опір, та дозволить компенсувати втрати, щоб світло було максимально яскравим.

Металевий корпус захищає від електромагнітних завад, які може створювати вібромотор.

Весь макет живиться від блоку живлення 12,0 В. Металевий корпус блоку живлення з'єднується з загальним заземленням (шиною), що необхідно для екранування від вібромотора та Jetson.

Всі споживачі (12V + та -) підключені до відповідних клем блоку.

Лінія Вібрації (Чисте Живлення)

ШІМ-регулятор (PWM). Його вхід ($V+, V-$) підключений до силових клем 12В. ШІМ перетворює постійну напругу в імпульсну для плавного регулювання швидкості.

Вібромотор типу 2838, підключений до виходу ШІМ-регулятора. Регулятор дозволяє вам плавно налаштувати «плинність» зерна, не впливаючи на інші компоненти. ШІМ та мотор підключені через феритове кільце для згладжування завад.

Лінія Камери (Чисте Живлення)

Кулер захисту оптики підключений до «чистих» клем 12В блоку. Він працює постійно, видуваючи пил з зони детекції, щоб захистити камеру.

LED освітлення камери підключено до «чистих» клем 12В блоку. Створює яскраве розсіяне світло в зоні зразка зернового матеріалу, що знімає камера.

Цифрова камера підключена до USB-порту Jetson Orin для передачі відео.

Лінія Заслінки (Керування з Jetson)

Модуль 12V реле 2-канальний з оптопарою, отримує сигнал керування від Ардуіно (GPIO, лінія «Керування заслінкою»). Два канали реле використовується для активації та реверсування актуатора заслінки за схемою Н-моста.

2-канальний модуль має по 3 контакти на кожне реле: NO (нормально розімкнутий), COM (спільний), NC (нормально замкнутий).

Контакти NC обох реле з'єднані разом і підключені до *мінуса* (GND) блоку живлення. Контакти NO обох реле з'єднані разом і підключені до *плюса* (+12V) блоку живлення.

Контакти COM першого реле та другого реле підключені до актуатора заслінки.

Керування (від Arduino):

- VCC модуля реле – до +5В Arduino;
- GND модуля реле – до GND Arduino;
- IN1 та IN2 – до цифрових пінів (наприклад, D4 та D5).

Актуатор заслінки – це силовий елемент. Один його дріт підключений до COM першого реле, а інший COM другого реле. Логіка керування заслінкою наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Логіка керування заслінкою за допомогою 2-канального модуля

IN1 (Реле 1)	**IN2 (Реле 2)**	**Стан актуатора**
LOW	LOW	Стоп (обидва контакти на GND)
HIGH	LOW	Рух в один бік (висувається)
LOW	HIGH	Рух в інший бік (засувається)
HIGH	HIGH	Стоп (обидва контакти на +12В)

Хоча стан HIGH/HIGH електрично безпечний (короткого замикання не буде), програмно краще уникати одночасного ввімкнення обох реле. Для цього необхідно робити невелику паузу (delay(50);) між вимкненням одного напрямку та ввімкненням іншого, щоб уникнути іскріння контактів реле.

Оптопари на модулі реле повністю захищають Arduino та Jetson від шумів двигуна актуатора. Коли обидва реле вимкнені, обмотки двигуна закорочені на GND, що забезпечує швидку зупинку заслінки без вибігу по інерції.

Ядро Системи (Jetson Orin):

Jetson Orin є «серцем» системи. Він отримує відео з камери, обробляє його за допомогою YOLOv11 та генерує сигнали керування (наприклад, для реле). Jetson Orin має власне живлення Type-C, яке не пов'язане з 12В лінією.

3.2. Проектування інспекційних тунелів макетного зразка для дослідження потоків зернових матеріалів

Проектування інспекційного тунелю – це створення ідеального середовища, де «машинний зір» нейромережі не спотворюється зовнішніми факторами. Для систем сортування зерна (особливо при використанні моделей YOLO) критично важливо забезпечити стабільність експозиції та чистоту оптики.

Оптична система повинна забезпечувати максимальну роздільну здатність при мінімальних геометричних спотвореннях.

Робоча відстань встановлюється таким чином, щоб робоче поле зору повністю перекривало ширину вібролотка з невеликим запасом 10% для країв.

Для об'єктів, що рухаються (зерно на лотку), критично важливо використовувати камери з Global Shutter. Це дозволяє уникнути ефекту «завалу» (Rolling Shutter artifacts), який може заплутати YOLO при детекції форми зерна.

Оскільки шар зерна може мати різну товщину, діафрагму об'єктива варто прикривати до значень $f5.6 - f8$, щоб і нижні, і верхні зерна були у фокусі.

Освітлення в тунелі має бути ізольованим від зовнішнього світла (приміщень, сонця), щоб умови зйомки були ідентичними 24/7.

Використання купольних світильників або софтбоксів запобігає появі «бліків» на глянцевих оболонках насіння (наприклад, кукурудзи або вологого зерна).

Для більшості зернових культур оптимальним є біле світло з високим індексом передачі кольору $CRI > 90$ або спеціалізоване підсвічування в інфрачервоному діапазоні *IR* для виявлення внутрішніх дефектів або прихованої плісняви.

Геометрія підсвічування: пряме фронтальне – для аналізу текстури; контурове – для аналізу контуру та прозорості (виявлення битого зерна).

Пил – головний ворог оптичних систем в агросекторі. Без активного захисту лінзи та підсвічування вкриються нальотом за лічені години. Найефективніший метод боротьби з пилом – створення надлишкового тиску всередині інспекційного тунелю. Одним з варіантів є створення повітряного пленума. Камера та освітлення розміщуються в

герметичному боксі, куди через фільтр подається повітря. Воно виходить через вузькі щілини (сопла) навколо об'єктива.

Іншим варіантом захисту від пилу є створення повітряної завіси. Потік повітря під високим тиском створює «екран» перед захисним склом, буквально здуваючи пилинки, що намагаються наблизитися до оптики.

Внутрішні поверхні тунелю мають бути максимально гладкими (полірований метал або антистатичний пластик) та розташованими під великим кутом, щоб пил не накопичувався на них.

Зерно під час тертя об лоток та решето створює статичний заряд, який притягує пил до камери. Заземлення всіх металевих частин тунелю є обов’язковим.

Згідно конструкційних параметрів макетного зразка вібролотка, розроблено конструкцію інспекційного тунелю для дослідження потоків зернових матеріалів.

Схему інспекційного тунелю в розрізі наведено на рисунку 3.4. Креслення показує внутрішню структуру корпусу, встановленого над вібролотком.

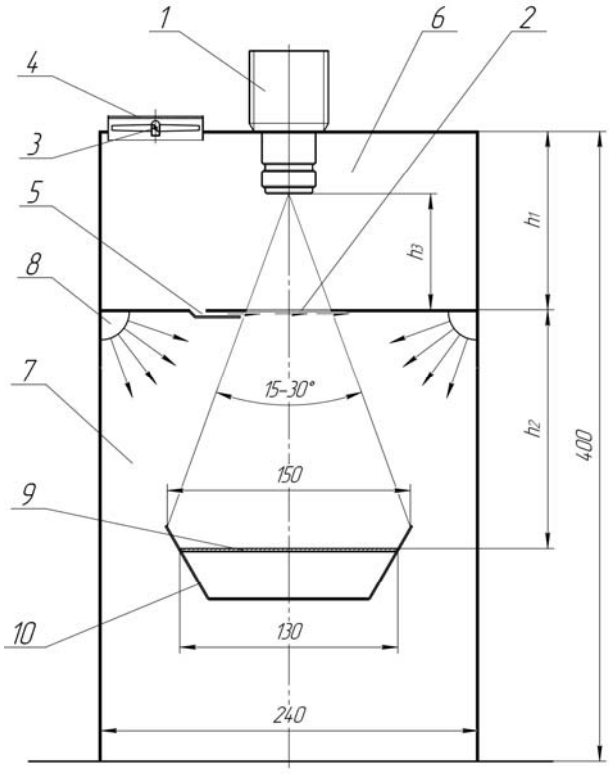
Розроблений інспекційний тунель може бути встановлений як вертикально, для дослідження потоків зернових матеріалів, що рухаються по поверхні решета, так і горизонтально, для дослідження потоків зернових матеріалів у вільному падінні, що сходять з решета.

Верхня частина інспекційного тунелю розділена на два рівні за допомогою горизонтальної перегородки. Верхня камера (пленум) – герметичний відсік, куди вентилятор нагнітає повітря. Нижня зона – основна частина тунелю, де рухається зерно.

Цифрова камера, встановлена в ізольованому верхньому відсіку.

Скляна панель з антибліковим покриттям відокремлює камеру від пилу. Над вузьким отвором для зйомки встановлено сопло, яке постійно видуває повітря паралельно склу. Це створює динамічний бар'єр (повітряну завісу), який не підпускає пил до скла.

У верхній частині інспекційного тунелю знаходяться фільтр повітря та вентилятор. Вони забирають повітря ззовні, очищають його та нагнітають всередину тунелю.



1 – цифрова камера; 2 – скляна панель з антибліковим покриттям; 3 – вентилятор; 4 – фільтр повітря; 5 – повітряна завіса; 6 – повітряний пленум; 7 – основна частина тунелю; 8 – світлодіодні панелі з розсіювачем; 9 – решето; 10 – вібраційний лоток

Рисунок 3.4 – Схема інспекційного тунелю в поперечному розрізі

Весь внутрішній об'єм тунелю знаходиться під підвищеним тиском (пленум позитивного тиску). Це означає, що повітря (і пил) можуть виходити лише назовні через щілини, але не заходити всередину.

Світлодіодні панелі з розсіювачем розташовані з обох боків від камери. Використання дифузорів забезпечує м'яке, рівномірне біле світло без яскравих «бліків» на насінні, що критично для точності YOLOv11.

Інспекційний тунель працює наступним чином. Вентилятор створює надлишковий тиск у верхній камері. Повітря не має іншого виходу, окрім як через вузьку щілину навколо скляної панелі. Утворюється постійний потік, що не дає пилу, осідати на скляній панелі та залетіти в зону оптики.

Місце, де корпус камери проходить крізь верхню кришку тунелю, має бути герметизоване (наприклад, поролоновим кільцем або силіконом). Весь тиск від вентилятора має йти саме в сопло біля лінзи.

Для такої конструкції використано стандартний кулер 60х60 мм на 12В. Його потужності вистачає, щоб створити необхідний тиск у невеликому тунелі.

Для освітлення зерна, яке буде аналізуватись через YOLOv11, вибір спектра (кольору) LED-стрічки має вирішальне значення для контрастності та точності детекції:

1. Холодний білий, 6000K–6500K – це стандарт для машинного зору при роботі з органічними об'єктами, такими як зерно. Холодне світло має високу інтенсивність у синьому спектрі. Це допомагає підкреслити межі (контури) зерен і робить картинку максимально чіткою для нейромережі. Зерно злаків має жовтувато-коричневий відтінок. На фоні холодного білого світла колірні канали будуть більш розділеними, що полегшує YOLO завдання детекції.

Холодне світло візуально «різкіше». Це дозволяє нейромережі краще бачити текстуру зерна, що критично важливо, коли зерна лежать щільно одне до одного і їх треба розділити. Матриці камер зазвичай мають вищу чутливість у синій та зеленій областях спектра. Світло 6000K дає сенсору більше «енергії» для формування чіткого кадру при дуже коротких витримках (експозиції). Обов'язково слід використовувати стрічку з CRI > 90 (High Color Rendering Index). Це гарантує, що кольори зерна будуть передані натурально, без «брудних» відтінків.

2. Нейтральний білий, 4000K–4500K (денне світло) є більш нейтральним. Його варто обирати лише в одному випадку – якщо ваш лоток має яскраво-біле матове покриття, і при 6000K виникає занадто сильний синій «пересвіт», який засліплює камеру. Воно м’якше передає текстуру поверхні зерна. Це може бути кориснодля виявлення пошкодження або хвороби зерна.

3. Спеціальний варіант зелений – для максимального контрасту. Сенсори цифрових камери мають у два рази більше зелених пікселів, ніж червоних або синіх. Зелене світло дає найменшу кількість шумів і найвищу роздільну здатність. В результаті зерно на зеленому фоні/світлі виглядає дуже контрастною (майже чорним або дуже темним на яскравому фоні), що ідеально для сегментації. Але це зробить картинку неприродною для людського ока.

Слід уникати теплого білого кольору, 2700K–3000K та RGB стрічок (в режимі білого). Жовте світло на жовтому зерні призводить до різкого зменшення контрастності. «Білий» колір у дешевих RGB стрічках створюється змішуванням трьох кольорів, що спотворює спектр, який збиває баланс білого камери та створює кольорові ореоли навколо зерен.

Необхідно використовувати стрічку з великою кількістю світлодіодів на метр (наприклад, 120 або 240 LED/м). Це прибере «точковий» ефект, коли на зерні видно відображення кожного окремого діода. Кріпити стрічку потрібно так, щоб вона світила на стінки тунелю, а вже відбите світло падало на лоток. Це зробить освітлення рівномірним, як у хмарний день.

Для YOLO та відеозйомки на високій частоті критично важливо, вибір джерела живлення стрічки. Необхідно уникати ШІМ димерів. Імпульсні регулятори яскравості змушують стрічку блимати. Око цього не бачить, але на зображенні будуть темні смуги, що порушать детекцію. Слід використовувати лінійне живлення – подавати на стрічку стабільні 12В від якісного блока живлення без регулювання яскравості імпульсами.

Для конструкції інспекційного тунелю використано тонкий листовий метал, пофарбований матовою фарбою. Така конструкція буде довговічною, стабільною і, що найважливіше, забезпечить чудове екранування від зовнішніх завад.

Для машинного зору звичайна «чорна» чи «біла» фарба не завжди підходить, бо вона може давати спрямовані «бліки». Зовні можна фарбувати будь-яким кольором для захисту від корозії. Всередині стінки та перегородку нижньої частини тунелю слід фарбувати в матовий білий колір. Це дозволить світлу від LED-стрічок багаторазово відбиватися і створювати ефект розсіяного світла, який прибирає тіні на зерні.

Стінки верхньої частини тунелю (повітряного плenуму) слід фарбувати в темний або темний матовий колір для мінімізації відблисків та поглинання світла, що запобігає появі візуальних дефектів.

При дослідженні потоків зерна в падінні, для фону необхідно використовувати спеціальну глибоку матову фарбу (наприклад, темно-синю або чорну). Вона не повинна відбивати світло лінзи назад у камеру. Якщо після фарбування поверхня має незначний блиск, її можна злегка «заматити» дуже дрібним наждачним папером (Р1000 або Р1500).

Металевий тунель може працювати як «дзвін» або резонатор. Оскільки камера кріпиться до нього, мікровібрації можуть розмивати картинку. Для уникнення цього потрібно виконати віброізоляцію – проклеїти зовнішні стінки тунелю бутиловою стрічкою (вібропласт). Кріплення камери слід здійснювати через гумові шайби-прокладки до металевого корпусу.

Металевий корпус та сухе зерно, що рухається, є причиною виникнення статичного заряду, що може притягувати пил до оптики, створювати завади на USB-кабелі камери. Необхідно обов'язково виконати заземлення металевого лотка та корпусу тунелю.

Для досліджень зернових потоків була використана промислова високофункціональна USB-веб-камера в металевому корпусі, що забезпечує роздільну здатність 2K (4 Мп) та оснащена варифокальним об'єктивом (2,8–12 мм) з ручним регулюванням фокусу та масштабу. Вона підтримує UVC/OTG, що дозволяє використовувати її з ПК, Android та Linux без спеціальних драйверів, часто застосовується в проектах машинного зору.

Роздільна здатність камери 4 Мегапікселі (2K), що забезпечує чітке зображення, краще за стандартний Full HD. Варифокальний об'єктив (2,8–12 мм) дозволяє вручну регулювати кут огляду (від широкого до вузького) та фокусуватися на об'єктах на різній відстані, на відміну від фіксованих об'єктивів веб-камер.

Металевий корпус забезпечує міцність та краще тепловідведення, характерне для промислових рішень.

Підключення – USB UVC (USB Video Class). Камера підтримує Plug-and-Play підключення – без драйверів на Windows, Mac, Linux.

Об'єктив 2,8–12 мм для відстані 100–240 мм дозволяє ідеально вписати лоток 150x200 мм у кадр без надлишкового наближення. Це забезпечить мінімальні геометричні спотворення по краях. У об'єктивів 2,8–12 мм зазвичай краща світлосила (F1,4–F1,6), ніж у довгофокусних. Це критично важливо, оскільки нам доведеться сильно скорочувати час експозиції, щоб прибрати розмиття від вібрації.

Роздільна здатність 4МП (2К) дає високу щільність пікселів. Навіть при подачі в YOLO стандартного розміру 640 x 640, первинне зображення буде дуже деталізованим, що допоможе моделі краще розрізняти зерна, які торкаються одне одного. Камера підтримує MJPEG. Це важливо для

Jetson та ноутбука, оскільки дозволяє отримувати високу частоту кадрів (30+ FPS) через USB 2,0/3,0 без великих затримок.

Оскільки це камера з Rolling Shutter, нам потрібно буде компенсувати рух лотка програмно-апаратним методом. Необхідно встановити дуже яскраве LED-світло (бажано 15–20 Вт). В OpenCV обов'язково потрібно вимкнути авто-експозицію і встановити її вручну на дуже низьке значення.

Приклад коду для фіксації параметрів у Python:

```
import cv2
cap = cv2.VideoCapture(0)
cap.set(cv2.CAP_PROP_AUTO_EXPOSURE, 1)
cap.set(cv2.CAP_PROP_EXPOSURE, -10)
cap.set(cv2.CAP_PROP_AUTOFOCUS, 0)
while True:
    ret, frame = cap.read()
    cv2.imshow('Grain Flow', frame)
    if cv2.waitKey(1) & 0xFF == ord('q'):
        break
```

Для досліджень було виготовлено комплект змінних матових екранів (синій, чорний, сірий) для створення максимального контрасту між із зерном та домішками різних культур: пшениці, ячменю, кукурудзи, соняшнику, сої та інших.

При падінні зерно прискорюється під дією сили тяжіння (g≈9,8 м/с2). На виході з лотка швидкість невелика, але вже через 10 см польоту вона становить близько 1,4 м/с. При стандартній витримці вебкамери (1/30 або 1/60 с) зернина перетвориться на розмиту лінію довжиною кілька сантиметрів. Щоб уникнути цього потрібно встановити витримку на рівні 1/2000 с або навіть 1/4000 с.

Світловий тунель тут стає критичним. При такій короткій витримці матриця камери отримує мізерно мало світла. Інспекційний тунель тунель в такому випадку повинен «заливати» зону падіння яскравим світлом, щоб картинка не була занадто темною та шумною.

Для усунення вібрації камери, основна рама була закріплена на масивній плиті, встановленій на гумовій прокладці. На макеті кріплення інспекційного тунелю до стола виконано з можливістю зміни відстані від камери до зернового матеріалу в межах 100 – 240 мм. Це дозволяє змінювати зону покриття для об'єктива камери.

3.3. Апаратна інтеграція периферійного обчислювального модуля (Edge AI) в систему керування зерноочисною машиною

Впровадження методів нейромережевого аналізу безпосередньо в контур керування віброрешітними сепараторами вимагає створення надійної апаратної платформи, здатної працювати в специфічних умовах сільськогосподарського виробництва. Висока запиленість, постійні вібраційні навантаження низької та середньої частоти, а також нестабільність параметрів електромережі елеваторів унеможливлюють використання класичних серверних або стаціонарних комп'ютерних систем.

Рішенням цієї проблеми є концепція периферійних обчислень (Edge AI), яка передбачає локалізацію обчислювальних потужностей безпосередньо на технологічному агрегаті.

3.3.1. Обґрунтування та архітектура обчислювального модуля

Вибір обчислювальної платформи для систем автоматизованого контролю процесів фракціонування зернових матеріалів на базі комп’ютерного зору (Computer Vision) є критичним компромісом між продуктивністю, енергоспоживанням та вартістю. Для реалізації алгоритмів сімейства YOLOv11 у реальному часі на периферії (Edge AI) доцільно використовувати спеціалізовані рішення.

Для завдань ідентифікації зернових матеріалів в потоці, де частота кадрів має бути не меншою за 30–60 FPS, оптимальним вибором є платформи з апаратною підтримкою паралельних обчислень (CUDA).

NVIDIA Jetson Orin Nano – це компактний, енергоефективний модуль та набір розробника (Developer Kit) для роботи зі штучним інтелектом (ШІ) на периферійних пристроях (Edge AI). Завдяки наявності 1024 ядер CUDA та 32 ядер Tensor, він забезпечує продуктивність до 67 TOPS, що дозволяє запускати сучасні ШІ-моделі (INT8/FP16) з мінімальною затримкою, що критично для систем комп'ютерного зору в реальному часі.

Процесор (CPU) – 6-ядерний Arm® Cortex®-A78AE, який забезпечує високу обчислювальну потужність при низькому споживанні енергії.

Пам'ять – 8 ГБ оперативної пам'яті LPDDR5.

Використання лише одного потужного комп'ютера для керування силовою частиною часто є неефективним через відсутність у нього «жорсткого» реального часу на GPIO та ризики електричних завад. Тому використовують гібридну архітектуру. Jetson виконує високорівневі задачі – захоплення відео, детекцію об'єктів нейромережею, логіку сфракціонування та ведення бази даних. Arduino виконує роль контролера периферії. Він отримує через порт Serial (USB) коротку команду і миттєво генерує точний імпульс на реле. Це гарантує, що відповідний механізм спрацює без затримок в потрібний час.

Стабільність AI-платформи на залежить від якості підготовки електроживлення та захисту.

Система живлення повинна мати розділення ліній. Цифрова частина (Jetson, камери) повинна мати стабілізоване живлення, окреме від силової частини (вібромотори, актуатори). Це запобігає перезавантаженням Jetson через просадки напруги або пускові струми двигунів.

Обов'язкове використання електролітичних конденсаторів великої ємності та феритових кілець на лініях живлення вібромоторів для придушення EMI-перешкод, які можуть впливати на USB-з'єднання камери.

Для інспекційних тунелів найкраще підходять модулі з інтерфейсом CSI (прямий доступ до MIPI CSI-2) або промислові USB 3,0 камери з сенсорами Sony IMX.

Використання модулів реле з опторозв'язкою є стандартом. Для високошвидкісного реверсування заслінок використовується схема "H-міст", що дозволяє активно гальмувати двигун актуатора.

Jetson Orin Nano при інтенсивних обчисленнях (inference) виділяє значну кількість тепла. Навіть при низькому TDP, в умовах закритого тунелю обов'язкове використання радіатора з ШІМ-керованим вентилятором.

Розміщення обчислювальної платформи в окремому герметичному боксі (клас захисту IP65) з винесеними роз'ємами захистить електроніку від дрібнодисперсного зернового пилу, який є електропровідним та пожежонебезпечним.

При розробці ПЗ для такої платформи, слід використовувати бібліотеку TensorRT для конвертації моделей *.pt* (PyTorch) у формат *.engine*. Це може дати приріст швидкості обробки в 3 – 5 разів.

3.3.2. Інтерфейси підключення відеосенсорів

Для формування повного інформаційного базису про хід процесу фракціонування апаратна схема (рис. 3.5) передбачає підключення трьох оптичних датчиків (камер контролю вхідного потоку, сходу та підсіву). Як первинні сенсори інтегруються високошвидкісні USB-камери на базі матриць Sony IMX317 або Sony IMX362.

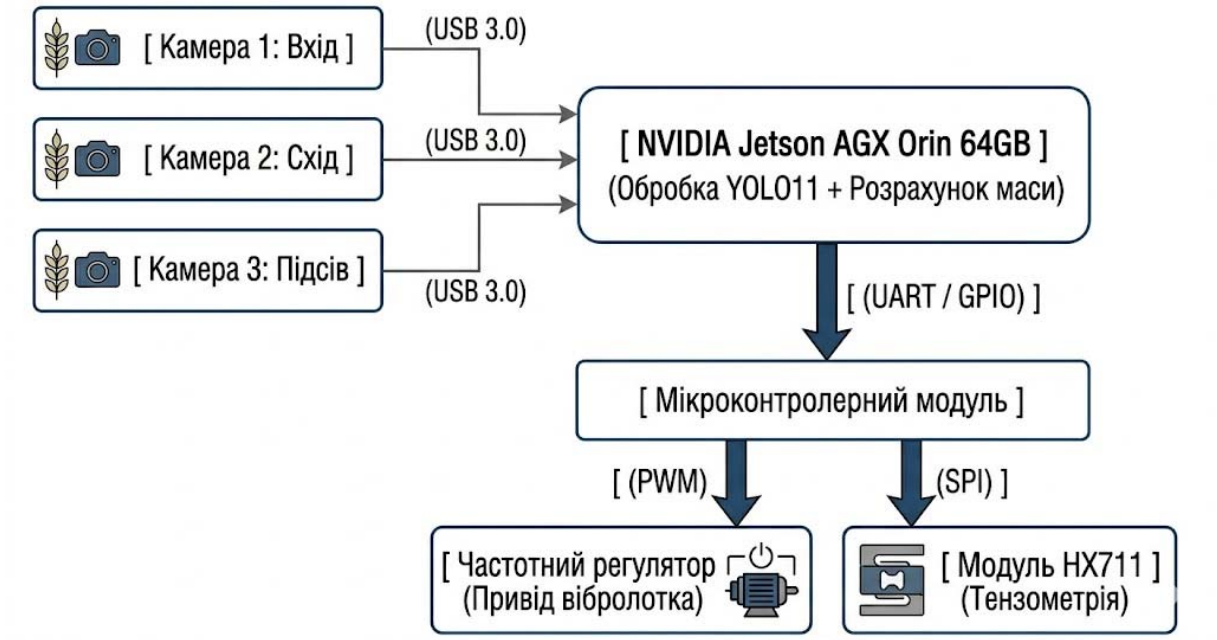


Рисунок 3.5 – Апаратна схема периферійного обчислювального модуля системи керування зерноочисною машиною

Передача даних здійснюється через високошвидкісні інтерфейси *USB 3.0 Type-A* із гвинтовою фіксацією роз'ємів для запобігання самовільному від'єднанню внаслідок вібрації рами сепаратора. Для захисту від Motion Blur (динамічного розмиття) при швидкості руху зернової маси до 1,5 м/с час експозиції матриць жорстко фіксується на рівні $t_{exp} \leq 1/2000$ с.

3.3.3. Підключення периферійних датчиків та виконавчих механізмів

Оскільки Jetson AGX Orin оперує логічними рівнями сигналів 3,3 В і не призначений для безпосереднього керування силовими промисловими агрегатами, в апаратну структуру введено проміжний мікроконтролерний модуль сопряження (на базі мікроконтролера STM32 або архітектури ESP32), який виконує роль драйвера периферії.

Інтеграція допоміжних датчиків та виконавчих органів реалізована за такою схемою: тензометричний комплекс калібрування; контур зворотного зв'язку.

Для динамічного та статичного тарування системи, а також визначення базової густини фракцій, у конструкцію приймальних бункерів та лотків інтегровано тензодатчики. Обробка первинних сигналів здійснюється за допомогою 24-бітних аналого-цифрових перетворювачів HX711, які передають дані на контролер по інтерфейсу *SPI* / дводротовому протоколу з частотою опитування до 80 Гц. Це дозволяє динамічно коригувати масово-піксельний коефіцієнт *K* при зміні натури зерна.

Сигнал керування, згенерований алгоритмом Edge AI на основі розрахованого рівня відносних втрат, передається з Jetson на модуль інтерфейсу. Контролер формує низьковольтний сигнал широтно-імпульсної модуляції (ШІМ / PWM), який подається на керуючий вхід частотного перетворювача (інвертора) асинхронного двигуна вібропривода. Зміна свердловини ШІМ-сигналу забезпечує плавну зміну частоти та амплітуди коливань транспортувального або решітного лотка, оптимізуючи товщину динамічного шару зернової суміші.

3.3.4. Промислове виконання та завадостійкості системи

Апаратний блок інтегрується в герметичну сталеву шафу керування зі ступенем захисту не нижче IP65, яка монтується на ізольованій від основної станини сепаратора демпферній опорі.

Для забезпечення безперебійної роботи Edge AI модуля реалізовано наступні інженерні рішення.

Гальванічна розв'язка. Всі лінії цифрового вводу-виводу (GPIO), ШІМ-канали та інтерфейси зв'язку з датчиками HX711 захищені за допомогою оптичних ізоляторів (оптопар), що виключає вплив імпульсних перешкод від пускових струмів електродвигунів.

Фільтрація живлення. Живлення модуля Jetson здійснюється через імпульсний стабілізатор напруги з інтегрованим фільтром електромагнітних завад (EMI-фільтр) та супресорами (TVS-діодами) для захисту від сплесків високої напруги.

Терморегуляція. Оскільки робоче середовище зерноочисного комплексу характеризується високою температурою в літній період, шафа обладнана системою примусової припливно-витяжної вентиляції з автомобільними або промисловими змінними повітряними фільтрами класу G4, які затримують дрібнодисперсний зерновий пил, запобігаючи перегріву та забиванню радіатора обчислювального модуля.

3.4. Методика встановлення масово-піксельних коефіцієнтів для різних сільськогосподарських культур

Дослідження масово-піксельних коефіцієнтів компонентів зернових сумішей проведено шляхом фотографування та обробки цифрових зображень. Для обробки цифрових зображень було розроблене спеціальне ПЗ.

ПЗ для аналізу цифрових зображень зернових матеріалів реалізоване на мові програмування Python із використанням прикладної бібліотеки для обробки зображень OpenCV.

В основі алгоритму ПЗ лежить попередня обробка зображень та сегментація об'єктів для точного аналізу контурів та визначення площ об’єктів зразків.

Лістинг ПЗ для обробки зображень та підрахунку площі об’єктів:

```
import cv2
import numpy as np
import os
def get_grains_from_photo(photo):
    # Перетворення зображення забраження з колірного простору BGR в LAB
    lab =cv2.cvtColor(photo, cv2.COLOR_BGR2LAB)
    l_channel, a_channel, b_channel = cv2.split(lab) # Розділення каналів
    # Підвишення контрастності зображення
    clahe = cv2.createCLAHE(clipLimit=4.0, tileGridSize=(8, 8))
    cl = clahe.apply(l_channel)
    # обєднання каналів в зображення колірного простору LAB
    l_img = cv2.merge((cl, a_channel, b_channel))
    photo2 = cv2.cvtColor(l_img, cv2.COLOR_LAB2BGR) # Перетворення зображення забраження з колірного простору LAB в BGR
    gray = cv2.cvtColor(photo2, cv2.COLOR_BGR2GRAY) # Перетворення зображення забраження з колірного простору BGR в відтінки сірого
```

```
    _, thresh = cv2.threshold(gray, 75, 255, cv2.THRESH_BINARY) # Створення бінарного зображення з пороговим значенням
    # Видалення шуму # Морфологічна операція відкриття зображення
    kernel =np.ones((5,5), np.uint8)
    clean_img = cv2.morphologyEx(thresh, cv2.MORPH_OPEN, kernel)
    # Морфологічна операція розширення зображення # (безпечна фонова область)
    sure_bg =cv2.dilate(clean_img, kernel, iterations=2 )
    # Обчислення відстані пікселів обєкта до фону
    #dist_transform = cv2.distanceTransform(clean_img, cv2.DIST_L2, 5)
    _, sure_fg = cv2.threshold(dist_transform, 0.4 * dist_transform.max(), 255,0) # Пошук впевненої області переднього плану
    unknown = cv2.subtract(sure_bg, np.uint8(clean_img)) # Пошук невідомого регіону
    _, markers = cv2.connectedComponents(np.uint8(clean_img)) # Маркерне маркування
    markers = markers + 1 # Додайте один до всіх міток, щоб впевнений фон був не 0, а 1
    markers[unknown == 255] = 0 # Тепер позначте область невідомого нулем
    markers = cv2.watershed(photo, markers) # Сегментація зображення
    photo2[markers == -1] = [0, 0, 255]
    cv2.imwrite("FOTO_MaskPolova.jpg", photo2)
    # Обчислення площі
    total_grains = np.max(markers) - 1
    list_of_grains = []
    tot_area = 0
    for i in range (1, total_grains + 2):
        mask = np.zeros(gray.shape, dtype=np.uint8)
        mask[markers == i+1] = 255
        contours, _ = cv2.findContours(mask, cv2.RETR_EXTERNAL, cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
```

```
        if contours:
            area = cv2.contourArea(contours[0])
            tot_area += area
            x, y, w, h = cv2.boundingRect(contours[0])
            #print (w, h, area)
            aspect_ratio = float(w) / h
            roundness = (area) / (w * h) if (w * h) > 0
else 0
            if area > 1000 and roundness > 0.05 :
                grain_img   =   np.zeros((h,   w,   4),
dtype=np.uint8)
                grain = photo2[y:y+h, x:x+w]
                grain_img[:, :, :3] = grain
                grain_img[:, :, 3] = 255
                grain_nask = mask[y:y+h, x:x+w]
                grain_img[grain_nask == 0] = [0, 0, 0, 0]
                list_of_grains.append(grain_img)
    print('Кількість обєктів: ', total_grains)
    print('Кількість збережено: ', len(list_of_grains))
    print('Площа об\'єктів: ', tot_area)
    return list_of_grains

if __name__ == "__main__":
    img = cv2.imread('POL1.jpg',1)
    os.makedirs('chafs',exist_ok=True)
    counter_of_grains = 0
    for grain_photo in get_grains_from_photo(img):
        counter_of_grains += 1
        grain_filename                                  =
f'grain_{counter_of_grains}_01.png'
        cv2.imwrite(grain_filename, grain_photo)
```

Першим етапом попередньої обробки є використання методу CLAHE [118] для покращення якості зображення шляхом підвищення локального контрасту та рівномірного розподілу яскравості (рис. 3.6).

Далі в програмі для обробки зображень зернових матеріалів послідовно здійснюється перетворення їх у сірий колірний простір та в бінарне зображення. Перетворення сірого зображення до бінарного здійснюється з використанням методу бінарізації з глобальним порогом.

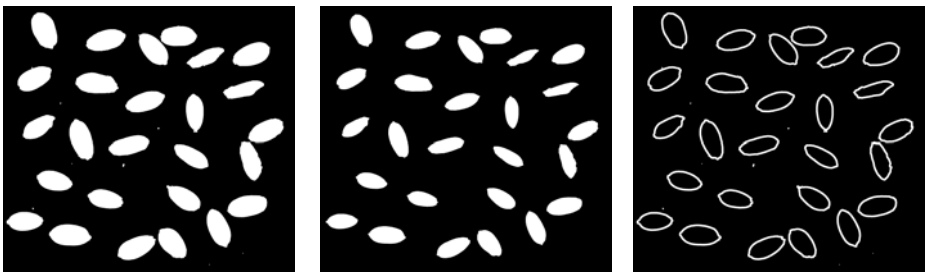


a) *b)* *c)*

a – вхідне зображення; *b* – L-канал зображення, перетвореного в колірний простір LAB, з підвищеним локальним контрастом; *c* – зображення, трансформоване в колірний простір RGB

Рисунок 3.6 – Результати використання методу CLAHE в програмному забезпеченні для покращення якості зображення:

Морфологічні перетворення зображення (відкриття та розтягування) забезпечують додаткове очищення зображення від шумів та визначення гарантованих областей фону. Метод перетворення відстаней зображення (Евклідових відстаней) дозволяє означити область об'єктів зернових матеріалів. Різниця останніх зображень дає області пошуку контурів об'єктів (рис. 3.7).



a) *b)* *c)*

a – області фону зображення (чорні пікселі); *b* – області об’єктів зернового матеріалу (білі пікселі); *c* – області пошуку контурів об'єктів

Рисунок 3.7 – Результати використання морфологічних перетворень для пошуку контурів об'єктів зображення зернових матеріалів

Наступним етапом є сегментація за допомогою методу вододілу [119], що базується на розгляді зображення як топографічної карти, де яскравість пікселів відповідає висоті. Зони, що мають найбільші значення яскравості, трактуються як гребені, а найменші – як водозбірні

басейни. В результаті сегментації утворюються контури об'єктів зернових матеріалів (рис. 3.8).



Рисунок 3.8 – Фрагмент зображення зернового матеріалу, із нанесеними маркерами контурів зерна (червоний піксель) за результатами сегментації методом вододілу

Послідовна обробка цифрових зображень із використанням методів локального підвищення контрасту та морфологічних перетворень (відкриття та розтягування) забезпечує підвищення якості зображення очищення його від шумів (рис. 3.7). Використання вододільного алгоритму для сегментації забезпечує чітке виділення контурів об’єктів зернових матеріалів (рис. 3.8).

Розроблене ПЗ забезпечує сегментацію та підрахунок площі пікселів об’єктів зернових матеріалів. Підрахунок площі здійснюється лише для об’єктів що відповідають наперед заданим умовам розміру та пропорцій. Умова мінімального значення площі об’єкта дозволяє відсіяти мікроскопічні об’єкти: пил, відблиски світла, дефекти фону, на якому розміщується зразок. Умова максимального значення площі об’єкта відсіює великі області фону, помилково визначені, як об’єкт зернового матеріалу. Умова відсіювання за співвідношенням сторін дозволяє уникнути помилко виділених витягнутих об’єктів фону: відбитих променів світла, рисок, згинів.

Відбір проб зерна здійснювали згідно ISO 24333:2009 «Cereals and cereal products – Sampling» з використанням пробовідбірника зерна. Дослідження фракційного складу зернових матеріалів пшениці виконували згідно методики ISO 7970:2021 «Wheat (Triticum aestivum L.) – Specification». Під час аналізу дослідні зразки зернового матеріалу пшениці ділили на наступні п’ять фракцій: повноцінне зерно, бите зерно, щупле зерно, соломисті домішки, частинки суцвіть (полова).

Щупле зерно виділяли з наважки шляхом просіювання протягом 30 с на ситі розміром 2,0 мм х 20,0 мм за допомогою лабораторного розсіву РЛУ-3 (рис. 3.9). Інші фракції виділяли вручну за допомогою збільшувальної лупи.



а) *б)*

Рисунок 3.9 – Фракціонування зразків зернового матеріалу пшениці за допомогою лабораторного розсіву РЛУ-3 (а) та вручну (б)

Дослідження масово-піксельних коефіцієнтів компонентів зернових сумішей проведено шляхом фотографування та обробки цифрових зображень із використання розробленого програмного забезпечення. Для фотографування зразків зернових матеріалів виготовлено стенд з двома контурами кільцевого LED підсвічування та калібрувальну рамку з внутрішніми розмірами 200х200 мм.

Для дослідження масово-піксельних коефіцієнтів були використані зернові матеріали основних зернових культур, що вирощуються в Україні: пшениці, ячменю, кукурудзи, соняшнику, сої.

Перед фотографуванням кожну порцію зернового матеріалу зважували та заносили дані в журнал первинної документації. Для фотографування окремі зразки компонентів зернового матеріалу вкладали товщиною в один шар на аркуш чорного паперу. Фотографування проводили за допомогою цифрової камери з роздільною здатністю 13 Мп в режимі автофокусування, дистанція від камери до зразка матеріалу – 220 мм, рівень освітлення – не менше 1500 лк.

Вагові коефіцієнти компонентів зернових сумішей K_W визначали як відношення їх маси в грамах до сумарної площі об’єктів на цифрових зображеннях в млн. пікселів.

Для використання вагових коефіцієнтів при оцінюванні зображень різноманітної роздільної здатності було використано відносні вагові

коефіцієнти (K), тобто відношення вагового коефіцієнта відповідного компонента до вагового коефіцієнта повноцінного зерна.

Рівень засмічення зернового матеріалу незерновими домішками визначається, як відношення маси незернових домішок до загальної маси зразка:

$$Imp = \frac{m_{\mathrm{MOG}}}{m_{\mathrm{G}}+m_{\mathrm{MOG}}} \cdot 100\%, \qquad (3.1)$$

де Imp – засмічення зернового матеріалу; m_{MOG} – маса незернових домішок, г; m_{G} – маса зерна в зразку, г.

У випадку визначення засміченості зернового матеріалу незерновими домішками за цифровими зображеннями зразка, масу незернових домішок можна визначити із залежності:

$$m_{\mathrm{MOG}} = S_{\mathrm{C}} \cdot K_{\mathrm{WC}} + S_{\mathrm{S}} \cdot K_{\mathrm{WS}} = K_{\mathrm{WNG}} \cdot (S_{\mathrm{C}} \cdot K_{\mathrm{C}} + S_{\mathrm{S}} \cdot K_{\mathrm{S}}), \qquad (3.2)$$

де S_C – площа пікселів, що відповідають полові на зображенні зернової суміші; K_{WC} – ваговий коефіцієнт полови; S_S – площа пікселів, що відповідають соломі на зображенні; K_{WS} – ваговий коефіцієнт соломи; K_{WNG} – ваговий коефіцієнт повноцінного зерна; K_C – відносний ваговий коефіцієнт полови; K_S – відносний ваговий коефіцієнт соломи.

Маса зерна визначається аналогічно за наступним виразом:

$$m_G = K_{WNG} \cdot (S_{NG} + S_{TG} \cdot K_{TG} + S_{BG} \cdot K_{BG}), \qquad (3.3)$$

де S_{NG} – площа пікселів, що відповідають повноцінному зерну на зображенні зернової суміші; S_{TG} – площа пікселів, що відповідають щуплому зерну на зображенні; K_{TG} – відносний ваговий коефіцієнт щуплого зерна; S_{BG} – площа пікселів, що відповідають битому зерну на зображенні; K_{BG} – відносний ваговий коефіцієнт битого зерна.

3.5. Методика формування специфічних датасетів та інженерна методологія навчання нейромережевої моделі YOLOv11

Специфіка процесів фракціонування сільськогосподарських культур унеможливлює використання готових наборів даних із відкритих бібліотек. Зернова маса на решетах є щільним, динамічним і візуально однорідним потоком, що вимагає створення власної репрезентативної вибірки. Інженерна методологія розробки ШІ-модуля для зерноочисних машин базується на парадигмі Data-Centric AI (штучний інтелект, орієнтований на дані) та включає кілька послідовних етапів підготовки.

3.5.1. Формування репрезентативного набору даних

Створення адекватної нейромережевої моделі вимагає наявності якісного масиву навчальних даних (датасету), який би максимально повно описував варіативність станів об'єкта дослідження.

Процес збору візуальних даних повинен максимально точно відтворювати реальні умови експлуатації системи на віброрешітних станах. Зйомка проводиться безпосередньо з камер, інтегрованих в інспекційні модулі, із дотриманням таких інженерних вимог:

- Зображення фіксуються виключно під час роботи вібропривода на різних робочих частотах (від 10 до 50 Гц) для захоплення природного динамічного розмиття, вібрацій фону та змін товщини шару.
- Датасет формується при різних режимах завантаження сепаратора (від 20% до 120% номінальної продуктивності) для навчання моделі розпізнавати об'єкти як у моношарі, так і при їхньому частковому перекритті.
- До вибірки обов'язково включаються кадри із зерном різної вологості та рівня запиленості, що моделює зміну відбивної здатності оболонки зерна.

У зв'язку з цим, розроблено інженерну методику формування репрезентативного набору даних, яка базується на принципі ідентичності апаратного середовища (уникнення доменного зсуву – Domain Shift). Це означає, що збір первинних візуальних даних здійснюється виключно тими самими оптичними сенсорами (Sony IMX) та в тих самих інспекційних тунелях, які будуть використовуватися на етапі промислової експлуатації комплексу.

Процес формування датасету алгоритмізовано за наступними ключовими критеріями.

Управління світлотіньовою картиною та оптичною ізоляцією

Зернова суміш на решеті є складною тривимірною структурою. При неконтрольованому освітленні зерна відкидають тіні одне на одне, що алгоритмами комп'ютерного зору може помилково ідентифікуватися як контури домішок або битого зерна.

Зйомка навчальної вибірки проводиться в умовах повної ізоляції від зовнішнього (виробничого чи сонячного) освітлення.

Використовується безтіньове LED-освітлення з високим індексом передачі кольору (CRI > 90), синхронізоване з частотою кадрів камери

для усунення ефекту мерехтіння, що виникає від накладання частот вібропривода та пульсації ламп.

Кінематична варіативність (моделювання режимів роботи сепаратора)

Нейромережа повинна вміти розпізнавати об'єкти незалежно від швидкості їх переміщення та товщини шару. Для цього набір даних генерується в динаміці при різних налаштуваннях вібропривода:

- Режим розрідженого потоку (Моношар). Зйомка при низькій подачі (від 20% до 40% номінальної). Забезпечує еталонні кадри, де кожна зернина лежить окремо (відсутність перекриттів). Ці дані критично важливі для початкового етапу навчання мережі правильній геометрії контурів.
- Режим номінальної та максимальної подачі. У цих умовах зерна перекривають одне одного (ефект Occlusion). Наявність таких кадрів у датасеті змушує нейромережу розпізнавати об'єкти за їхніми видимими фрагментами.
- Частотні варіації. Кадри фіксуються при різних частотах коливань решітного стану (від 10 Гц до 50 Гц) для природного інтегрування в датасет різного ступеня динамічного розмиття (Motion Blur).

Балансування морфологічних класів та штучне збагачення

Природний зерновий потік характеризується високим ступенем дисбалансу класів: повноцінне зерно становить 90–95%, тоді як бите зерно та домішки – лише 5–10%. Якщо навчати модель на такій «сирій» вибірці, мережа здебільшого ігноруватиме міноритарні класи, оптимізуючи загальну точність (Accuracy) лише за рахунок цілого зерна.

Для вирішення проблеми дисбалансу застосовується методика штучного збагачення (Oversampling). Під час зйомки до еталонної суміші примусово додаються специфічні фракції (органічні домішки, насіння бур'янів, мінеральний пил, пошкоджене зерно) у пропорціях, що сягають 30–40%. Це забезпечує достатню кількість прикладів для надійного виділення ознак класами «домішка» та «бите зерно».

Врахування фізико-механічних станів

Згідно з дослідженнями, наведеними у підрозділі 2.3, відбивна здатність зерна залежить від його вологості. Тому до фінального датасету обов'язково включаються три підмножини кадрів:

- Сухе зерно базової кондиції (W = 12–14%).

- Зерно підвищеної вологості (W > 20%) з глянцевою оболонкою.
- Зерно зі значним мінеральним забрудненням (пилом), що знижує загальний колірний контраст потоку.

Застосування розробленої інженерної методики дозволяє сформувати «золотий стандарт» (Gold Standard Dataset) обсягом не менше 5000–7000 унікальних кадрів, що є достатнім базисом для подальшого анотування та навчання архітектури YOLOv11 під завдання прецизійного фракціонування.

3.5.2. Анотування (розмітка) та аугментація даних

Якість розпізнавання компонентів зернового потоку та точність подальшого масового перерахунку безпосередньо визначаються математичною коректністю розмітки вихідних зображень. Оскільки розробляється метод експрес-аналізу, що базується на обчисленні площі проекції об'єктів S_{px}, класичний підхід із використанням обмежувальних рамок (Bounding Boxes) є неприйнятним. Прямокутний контур навколо похило розташованої зернини включає значну кількість пікселів фону (лотка), що вносить похибку у визначення маси від 15% до 40%.

У зв'язку з цим інженерна методологія передбачає перехід до сегментації екземплярів (Instance Segmentation), де кожен об'єкт виділяється замкненим багатокутником (полігоном) за власним геометричним контуром.

Для систематизації та розмітки масивів даних доцільно використовувати спеціалізовані хмарні платформи (наприклад, Roboflow). Процес анотування полягає у виділенні об'єктів за допомогою полігонів з присвоєнням їм відповідних класів: «Ціле зерно», «Бите зерно», «Домішка».

Для підвищення робастності (стійкості) нейромережі до набору даних застосовуються інструменти аугментації:

- Геометричні перетворення. Випадкові повороти (до $\pm 15^0$) та віддзеркалення (Flip) для інваріантності до орієнтації зерна.
- Фотометричні перетворення. Корекція яскравості та контрастності (в межах ±20%), імітація шуму матриці камери (Gaussian Noise) для компенсації деградації оптики внаслідок запилення.

Методологія та правила анотування даних

Для систематизації, попіксельного маркування та версіонування сформованих масивів зображень використовується спеціалізоване інженерне середовище комп'ютерного зору. У межах розробки інтелектуальної

системи автоматичного контролю процесу фракціонування було сформовано та оптимізовано дві базові серії робочих датасетів, які диференційовані за типами аналізованих фракцій і специфікою оптичного фону інспекційних зон.

При виконанні процедури анотування (Labeling) реалізовано суворі морфологічні критерії поділу об'єктів на три класи відповідно до вимог міждержавних та національних стандартів якості зерна (ДСТУ):

- Клас 1: «Ціле зерно» (Normal Grain). Полігон будується точно за зовнішньою лінією перикарпію насінини. До цього класу відносяться виключно повноцінні, виконані зернини без ознак механічних пошкоджень контуру.
- Клас 2: «Бите зерно» (Broken Grain). Маркуванню підлягають частки зерна, що втратили більше половини свого геометричного об'єму внаслідок обмолоту або транспортування. Ключовою ознакою для моделі є оголений ендосперм, який має вищий коефіцієнт дифузного відбиття.
- Клас 3: «Смітна домішка» (MOG). Сюди відносяться мінеральні домішки (камінці, грудочки землі), органічні домішки (частини стебел, обгортки качанів, лузга соняшнику) та насіння бур'янів.

Для мінімізації похибки масового перерахунку межа полігону має проходити по внутрішній стороні градієнтного контуру зернини (на стику між кольором оболонки та тінню підкладки). Це виключає «інфляцію пікселів» при підсумовуванні площ масок.

Стратегія аугментації для умов віброрешітної сепарації

Для запобігання перенавчанню (Overfitting) нейромережі YOLOv11 та підвищення її узагальнювальної здатності в умовах промислових завад, до базових датасетів застосовано комплекс методів штучного розширення вибірки (Data Augmentation). На відміну від стандартних технік, параметри аугментації адаптовані під кінематику та фізику роботи зерноочисних машин – геометричні трансформації, фотометрична корекція та кінематичне розмиття.

Оскільки орієнтація насіння на решеті є випадковою величиною, модель повинна володіти просторовою інваріантністю: ротація – випадковий поворот зображення в діапазоні $\pm 15^0$; дзеркальне відображення – застосування горизонтального та вертикального відображень з ймовірністю p = 0,5.

Процес експлуатації сепаратора супроводжується поступовим запиленням захисного скла інспекційного боксу та деградацією світлодіодів. Для компенсації цих чинників впроваджено: модифікацію яскравості (Brightness) – випадкову зміну інтенсивності пікселів у межах $\pm 15^0$, що дозволяє моделі коректно сегментувати об'єкти як за максимального світлового потоку, так і за умов падіння напруги в мережі живлення підсвітки; зміну експозиції (Exposure) – варіювання параметрів у межах $\pm 10^0$ для симуляції зсуву балансу білого при переході між партіями зерна з різною вологістю.

Найбільш критичним фактором для агроінженерних Edge-систем комп'ютерного зору є низькочастотна вібрація рами.

Для адаптації моделі до роботи в умовах мікрозсувів камери застосовано додавання шуму Гаусса (Gaussian Noise) [120]. Змішування оригінального сигналу з білим шумом (до 5% від амплітуди) для руйнування надлишково чітких градієнтів, які відсутні на реальному виробництві. Симуляція Motion Blur це штучне лінійне розмиття контурів за вектором руху вібролотка, що готує нейромережу до збереження точності трекінгу та сегментації об'єктів навіть у моменти пікових прискорень решітного стану.

Завдяки реалізації описаної методики анотування та комбінованої аугментації, обсяг навчальних вибірок було збільшено у 3,5 рази без залучення додаткових фізичних експериментів. Це забезпечило високу стабільність функції втрат форми маски на етапі навчання ШІ-компонента.

3.5.3. Інженерна методологія навчання моделей архітектури YOLOv11

Реалізація безконтактного масового експрес-аналізу в реальному часі на периферійних обчислювачах обмежує вибір архітектур нейронних мереж. Для забезпечення одночасної детекції, класифікації та попіксельної сегментації об'єктів (Instance Segmentation) із частотою кадрів FPS ≥ 30 на платформі NVIDIA Jetson, найбільш ефективним є використання моделей сімейства YOLOv11 (Ultralytics). На відміну від попередніх поколінь (YOLOv8, YOLOv10 у ранніх модифікаціях), архітектура YOLOv11 оптимізована під швидкісні операції з тензорними масками та має покращену структуру C3k2, що забезпечує високу точність детекції дрібних об'єктів при меншій кількості параметрів.

Для розроблюваної системи фракціонування зерна було обрано та адаптовано дві базові конфігурації моделі:

- YOLOv11n-seg (nano). Оптимальна для контуру керування з мінімальною затримкою. Має найменшу обчислювальну складність, що дозволяє вивільнити ресурси Edge-модуля для паралельного трекінгу.
- YOLOv11s-seg (small): Застосовується в інспекційній зоні контролю чистоти кінцевого продукту, де критично важливо фіксувати мікропошкодження контуру (бите зерно) та дрібні мінеральні домішки.

Параметризація та стратегія навчання

Процес навчання моделей здійснювався на базі сформованих та аугментованих датасетів у середовищі PyTorch. Інженерне налагодження гіперпараметрів оптимізоване під специфіку щільного динамічного потоку.

Як базовий математичний апарат оптимізації ваг обрано AdamW (з ваговим розпадом 0,05), який демонструє високу стабільність збіжності при сегментації текстурованих об'єктів. Початковий темп навчання встановлено на рівні $\alpha = 0{,}001$ із застосуванням косинусного затухання до значення $0{,}01 \cdot \alpha$.

Навчання проводилося протягом 200 епох із розміром пакета $Batch = 32$ (для YOLOv11s-seg) та $Batch = 64$ (для YOLOv11n-seg). На останніх 20 епохах штучно відключалася мозаїчна аугментація, що необхідно для фінішного налаштування точності детекції реальних меж об'єктів.

Оптимізація цільової функції втрат

У процесі навчання YOLOv11 мінімізується комбінована функція втрат, що складається з трьох ключових компонентів:

$$L_{total} = \lambda_{box} \cdot L_{box} + \lambda_{cls} \cdot L_{cls} + \lambda_{mask} \cdot L_{mask} \qquad (3.4)$$

Для завдань агроінженерного контролю маси вагові коефіцієнти λ було перерозподілено. Значення коефіцієнта втрат маски λ_{mask} було штучно збільшено на 25%. Це змусило алгоритм жорсткіше оцінювати модель за найменші деформації згенерованого контуру зернини, оскільки похибка у визначенні геометрії контуру безпосередньо

трансформується у похибку розрахунку інтегральної маси втрат за математичною моделлю, описаною в розділі 2.1.

Процедура компіляції та квантування для розгортання на Edge

Прямий запуск нативних моделей *PyTorch* (.*pt*) на периферійному модулі NVIDIA Jetson AGX Orin супроводжується значними накладними витратами на інтерпретацію коду та нераціональним використанням тензорних ядер, що знижує швидкість обробки до 12–15 FPS.

Для інтеграції ШІ-компонента в контур реального часу реалізовано процедуру апаратної оптимізації (рис. 3.10).

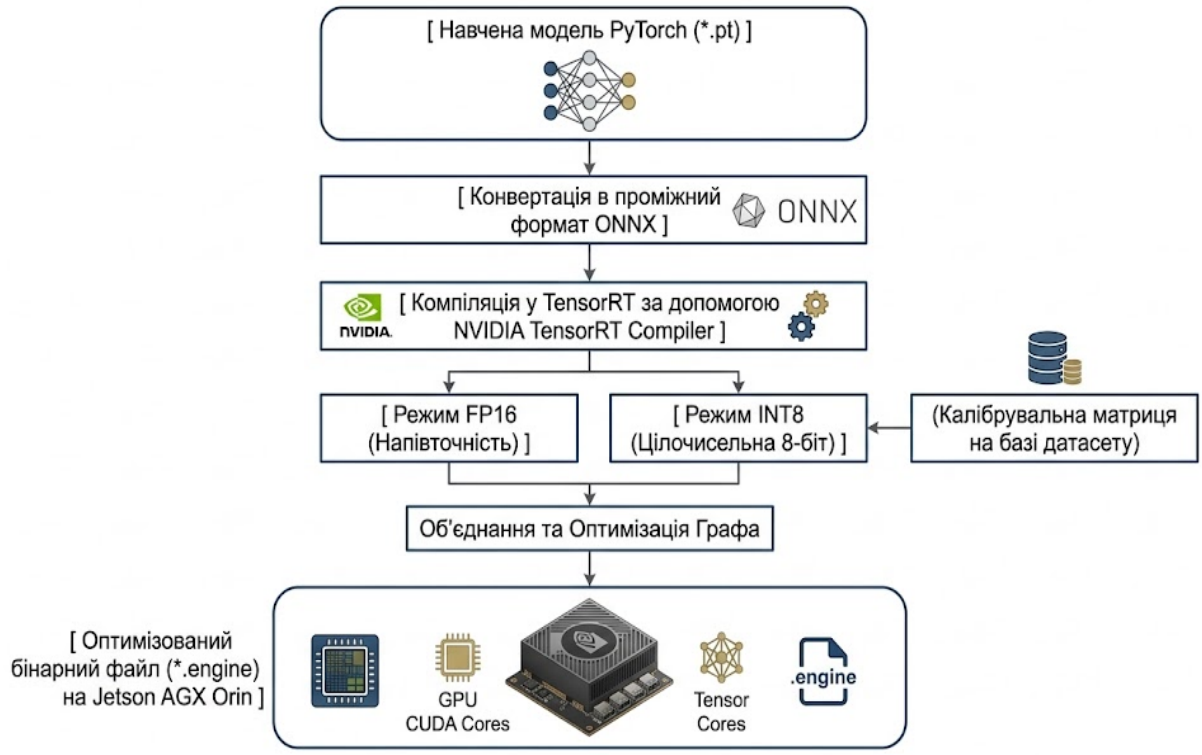


Рисунок 3.10 – Схема інженерної оптимізації моделі

Базова модель транслюється у відкритий формат обміну нейромережами ONNX із фіксацією динамічних розмірів вхідного тензора сигналів (640x640 *px*).

За допомогою інструментарію NVIDIA TensorRT виконується оптимізація графу обчислень (злиття шарів згортки та активації, оптимізація використання регістрів пам'яті GPU).

Здійснюється квантування. Модель переводиться у формат зниженої точності FP16 або INT8.

- При квантуванні в FP16 швидкість інференсу зростає у 2,2 рази при повній відповідності метрик точності вихідній моделі.
- При переході до INT8 використовується спеціальна калібрувальна матриця, сформована із зображень моношару зерна, що дозволяє досягти максимальної продуктивності обчислювача (до 75–90 FPS для моделі Nano) при падінні середньої точності сегментації mAP_{50-95} не більше ніж на 0,6%.

Зкомпільований файл розгортання $.engine$ завантажується безпосередньо в пам'ять Jetson AGX Orin, забезпечуючи детекцію та сегментацію вхідного потоку зерна із затримкою виконання інференсу, що не перевищує 6–8 мс на кадр.

3.5.4. Візуалізація результатів та налагодження

Заключним етапом розробки ШІ-компонента є створення ефективного інструментарію для візуального контролю та відлагодження нейромережевих моделей у реальному часі. Специфіка інтеграції комп'ютерного зору в агроінженерні системи полягає в тому, що оператор зерноочисної машини або дослідник повинен миттєво оцінювати якість сегментації меж об'єктів без затримки візуального потоку.

Під час інференсу на платформі NVIDIA Jetson AGX Orin стандартні методи виводу результатів автоматично накладають на кожну розпізнану зернину прямокутну рамку (Bounding Box), текстову мітку класу та значення впевненості (Confidence Score). В умовах реального процесу фракціонування, коли в кадрі одночасно перебувають сотні об'єктів, що рухаються з високою щільністю, таке відображення призводить до повного перекриття робочої зони суцільним масивом тексту та ліній. Це унеможливлює візуальну оцінку точності роботи алгоритму.

Для оптимізації інтерфейсу розробника та оператора в інженерній практиці використовується метод ізольованої візуалізації масок. При роботі з бібліотекою *ultralytics YOLOv11* під час виклику методів відображення або збереження кадрів програмно відключається генерація прямокутників за допомогою параметра $boxes = False$.

Завдяки цьому рішенню на монітор керування виводяться лише напівпрозорі колірні контури (маски) безпосередньо на тілі зернин. Це дозволяє: оцінювати точність попіксельного обведення для правильного

розрахунку площі проекції S_{px}; та миттєво фіксувати помилки недосегментації (коли кілька зернин об'єднуються в одну маску) або перенавчання моделі на фонові завади лотка.

Графічний інтерфейс системи поєднує візуальний потік із камер та динамічні графіки аналітики. У процесі відлагодження на екран монітора виводяться три ключові діагностичні метрики:

- Частота обробки кадрів периферійним обчислювачем FPS. Падіння цього показника нижче 30 кадрів/с свідчить про перегрів модуля або перевантаження шини пам'яті TensorRT, що є сигналом для перевірки системи охолодження шафи керування.
- Ступінь перекриття об'єктів IoU. Якщо індикатор фіксує критичну щільність масок, система автоматично надсилає команду мікроконтролеру на збільшення частоти вібрації лотка через ШІМ для розрідження шару зерна.
- Графік розходження маси M_{calc} / M_{lost}. Співвідношення розрахованої нейромережею ваги втрат і реальних показників тензометрії з модулів HX711. Велике відхилення ліній графіка вказує на необхідність динамічного перерахунку масово-піксельного коефіцієнта *K* через зміну вологості або натури поточної партії зерна.

Висновки до Розділу 3

Розроблений лабораторний макет віброрешітного сепаратора дозволяє в динамічному режимі плавно регулювати амплітудно-частотні характеристики вібропривода (в діапазоні частот від 10 до 50 Гц), що забезпечує можливість моделювання різних кінематичних режимів фракціонування зернових сумішей та оптимізації товщини динамічного шару матеріалу.

Запропоновано конструкцію та виконано проектування закритих інспекційних оптичних тунелів. Обґрунтовано геометрію імпульсного безтіньового LED-освітлення високої інтенсивності (CRI > 90) та визначено граничний час експозиції відеосенсорів $t_{exp} \leq 1/2000$ с, що повністю нівелює ефект динамічного розмиття контурів зерна (Motion Blur) при швидкості потоку до 1,5 м/с. Для захисту оптичних елементів від дрібнодисперсного зернового пилу впроваджено систему примусової припливної вентиляції з надлишковим тиском та фільтрами класу G4.

Розробка та апаратна інтеграція периферійного обчислювального комплексу на базі Edge AI платформи NVIDIA Jetson AGX Orin 64GB у поєднанні з оптимізованими моделями сегментації YOLOv11 дозволили створити автономне інженерне рішення для замкненого керування процесом фракціонування зерна.

Сформульовано та математично описано метод визначення масово-піксельних та відносних вагових коефіцієнтів для фракцій зернового вороху основних культур (пшениця, ячмінь, кукурудза, соняшник, соя). Встановлено аналітичні залежності, що дозволяють здійснювати розрахунок маси зернових та незернових домішок (полови, соломи, битого та щуплого зерна) на основі площі їх піксельних проекцій, забезпечуючи високу точність оцінювання засміченості незалежно від роздільної здатності цифрового зображення.

Застосування розробленої методики збору даних у реальних динамічних режимах вібролотка та спеціалізованої попіксельної розмітки Instance Segmentation у середовищі Roboflow дозволило повністю нівелювати ефект «доменного зсуву» та забезпечити стійкість алгоритмів до завад (запилення, бліки, вібраційне розмиття). Заміна класичного PyTorch-інференсу на оптимізовані бінарні структури TensorRT $INT8\$/\$FP16$ знижує латентність обробки сигналу до 6–8 мс на кадр, що робить систему придатною для прецизійної роботи на сучасних високопродуктивних елеваторних комплексах.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВЕРИФІКАЦІЯ ОПТИМІЗОВАНОЇ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОЇ МОДЕЛІ КОНТРОЛЮ ВТРАТ ЗЕРНА

4.1. Амплітудно-частотна характеристика робочих органів макета та обґрунтування матриці структури датасету YOLOv11

Для забезпечення високої точності та швидкодії нейромережевої моделі контролю втрат зерна в реальному часі критично важливим етапом є створення спеціалізованого, репрезентативного набору цифрових зображень (датасету). Оскільки умови роботи лабораторного макета сепаратора характеризуються високою динамікою руху компонентів зернової суміші, наявністю вібраційних коливань та запиленістю повітряного середовища, методика реєстрації оптичних даних повинна гарантувати мінімізацію ефекту змазування зображення («motion blur») та стабільність геометричних параметрів кадрів.

Об’єктом дослідження нейромережевої моделі контролю втрат зерна в реальному часі був зерновий матеріал, отриманий при обмолочування посівів кукурудзи в збиральному сезоні 2025 р.

4.1.1. Аналіз отриманої амплітудно-частотної характеристики решета макетного зразка

Попередніми дослідженнями було встановлено, що інтенсивне переміщення зерна кукурудзи на лотку макетного зразка спостерігалось при еквіваленті середньої напруги, що забезпечувалась ШІМ регулятором, в діапазоні 5–6 В. Тому було прийнято рішення використати блок живлення напругою 9В.

Це забезпечило збільшення плавності регулювання. ШІМ не змінює напругу фізично, він видає імпульси повної напруги, але змінює їхню тривалість (коефіцієнт заповнення). Крок регулятора становить 1 %, що при напрузі живлення 12 В дорівнює приблизно 0,12 В на один крок. Через це в зоні резонансу зміна всього на 1–2% різко змінює амплітуду (з 2 мм до 5 мм).

При подачі на вхід регулятора 9 В замість 12 В відбувається зміна відсотків (коефіцієнта заповнення). Один крок ШІМ буде становити

0,09 В замість 0,12 В, і «петля гістерезису» розтягнеться по шкалі. Налаштовувати амплітуду 2–3 мм значно легше, бо робоча зона тримається у ширшому діапазоні.

Дослідження характеру переміщення зернового матеріалу поверхнею решета розробленого макетного зразка (рис.4.1), в залежності від частоти обертання ротора відбропривода макета за напруги 9 В дозволило встановити технологічні режими руху матеріалу. Керуючим параметром виступав коефіцієнт заповнення ШІМ (D, %).



Рисунок 4.1 – Лабораторний макет решітного сепаратора

Система демонструє поведінку з жорсткою нелінійною характеристикою. Зрив у резонанс при русі «вгору» відбувається при $D = 63\%$, а при русі «вниз» резонансна гілка утримується до $D = 55\%$. Це класичне нелінійне затягування (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Цифрова карта механічної поведінки макета за напруги 9 В

D (%)	**Стан системи**	**Поведінка зерна**	**Придатність для дослідження**
До 45%	Дорезонансна зона	Нерухоме	Непридатне
47% – 50%	Початок руху	Ковзання / повільний зсув	Транспортування
54% – 60%	Передрезонансний оптимум	Помірний рух з підкиданням 2–3 мм	Ідеально для імітації сепаратора та YOLO
63% / 55%	Резонансний пік (петля)	Хаотичне кипіння, викидання з лотка	Критичний режим (нестабільний)
> 65%	Зарезонансна зона	Зупинка переміщення (амплітуда ≈0)	Непридатне

Технологічні режими решета макетного зразка розподілились наступним чином:

1. Режим імітації сепаратора – робоча зона $D = 60\%$ (при русі вгору). Спостерігається підкидання зерна на висоту 2 – 3 мм. Це і є той самий режим з коефіцієнтом динамічності $K \sim 1{,}5 - 2{,}0$. Зерно відривається від решета, розпушується, і за рахунок цього відбувається самосортування фракцій. Потік іде помірно, що ідеально для нейромережі.
2. Режим швидкого транспортування – робоча зона $D = 54\%$ (при русі вгору) Інтенсивне переміщення без значного підкидання. Зерно швидко ковзає по решету. Цей режим підходить, якщо вам потрібно просто перегнати об'єм зерна через зону видимості камери без здійснення його просіювання.
3. Зона резонансного «хаосу» – робоча зона: $D = 63\%$ (вгору) або $D = 55\%$ (вниз). Амплітуда максимальна. Зерно летить хаотично, а при $D = 64\%$ рух взагалі зупиняється, бо лоток здійснює настільки сильні коливання, що зерно просто «зависає» у повітрі або хаотично скаче на одному місці. Для комп'ютерного зору цей режим непридатний через сильне розмиття та вихід об'єктів із фокусу.
4. Зарезонансна зона. При $D = 65\%$ і більше амплітуда падає майже до нуля, а рух зерна зупиняється. Це прояв фундаментального закону механіки коливань, який описується як ефект динамічного гасіння або самосинхронізації у зарезонансній області. Коли частота обертання вібромотора стає значно вищою за власну частоту коливань вашої системи (яка зафіксована у точці резонансу 63%), відбувається кілька процесів: Зсув фаз на 180°; Інерційне замикання та Стабілізація рами бетоноою основою.

Зважаючи на петлю гістерезису (55% – резонанс при русі вниз), у нас з'являється дві абсолютно різні стратегії налаштування: «*Чисте транспортування*» (рух знизу вгору $D = 54 - 56\%$); та «*Імітація решета*» (Рух знизу вгору $D = 58 - 60\%$). Оскільки при русі вниз резонанс тримається аж до 55%, то на позначці 54% все ще буде сильне резонансне «кипіння», а не спокійний рух із підкиданням. Завжди необхідно виставляти робочі точки $D = 54\% - 60\%$ з нуля вгору.

4.1.2. Методика цифрової зйомки зернового шару на решеті

Реєстрація відеопотоку здійснювалася за допомогою високошвидкісної цифрової камери робочої зони, встановленої безпосередньо над ситовою поверхнею лабораторного макета. Оптична вісь об'єктива була зорієнтована перпендикулярно до площини решета макетного зразка (рис. 4.2).



Рисунок 4.2 – Лабораторний макет для дослідження елементів оптико-електронної системи реєстрації втрат зерна:

Для усунення розмиття меж рухомих об'єктів в умовах інтенсивного струшування сита було застосовано апаратне налаштування параметрів експозиції та колірного балансу камери через інтерфейс Video4Linux2 (V4L2). Основні технічні параметри зйомки наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Апаратні параметри реєстрації оптичних даних

Параметр камери / системи зчитування	Налаштоване значення	Призначення / обґрунтування
Базова роздільна здатність сенсора	1920 × 1080 пікселів (Full HD)	Забезпечення високої деталізації дрібних дефектів та домішок
Формат стиснення відеопотоку	MJPEG (Motion JPEG)	Зниження затримки декодування кадрів на апаратному рівні GPU
Частота кадрів (Frame Rate)	30 кадр/с	Забезпечення неперервності контролю динамічного потоку
Час експозиції (Exposure)	140 (фіксоване значення)	Усунення динамічного змазування рухомих зерен кукурудзи
Колірна температура (WB Temp)	5500 K (фіксована)	Стабілізація спектрального складу при штучному освітленні
Підсилення сенсора (Gain)	0 (мінімальне)	Мінімізація цифрового шуму матриці в умовах запиленості

Для підвищення ефективності обчислювальних ресурсів вбудованого обчислювача Jetson Orin і фокусування виключно на робочій площі сита, первинний Full HD кадр (1920 x 1080 пікселів) піддавався процедурі попереднього просторового кадрування. Шляхом програмного вирізання симетричних бічних зон формувався центральний робочий квадрат розміром 960 x 960 пікселів (рис. 4.3). Ця геометрична область повністю охоплює технологічно активну ширину сита, виключаючи з аналізу неінформативні конструкційні елементи рами сепаратора та металеві борти лотка.



а *б*

Рисунок 4.3 – Результат програмного кадрування вихідного зображення: *а* – первинний кадр Full HD (1920 x 1080 пік.); *б* – виділена центральна робоча область (960 x 960 пік.)

Для подачі в нейромережу зображення масштабувалися до роздільної здатності 960 x 960 пікселів, що відповідає базовому вхідному стандарту архітектури YOLOv11 та забезпечує оптимальний баланс між роздільною здатністю та часом інференсу.

Фото, зроблені на робочих режимах решета $D = 54 - 60\%$ (рис. 4.4) за експозиції cv2.CAP_PROP_EXPOSURE, 140 (що означає доволі коротку витримку, близько $1/4000 - 1/8000$ с), дозволяють об'єктивно оцінити якість зйомки в динаміці. Аналіз наведених зображень свідчить про відсутність розмиття через рух решета. Контури зернівок кукурудзи залишаються надзвичайно чіткими навіть у моменти їхнього

переміщення та підкидання. Вибране значення експозиції повністю «заморожує» динаміку кукурудзи на частоті режиму 54-60%.

На фото 4.4 *г* помітно, що деякі зернини, які лежать плазом, мають ідеальну різкість, тоді як поодинокі зерна, що стали «на ребро» або підлетіли на 2–3 мм, мають ледь помітну м'якість контурів. Глибина різкості об'єктива камери перебуває на межі (близько 3 – 5 мм). Це допустимо, оскільки на режимах $D = 54 - 60\%$ підкидання помірне. Нейромережа здатна розпізнати такий ступінь чіткості. Їх потрібно включити в датасет для забезпечення робастності (стійкості) нейромережі до випадкових вібраційних сплесків реальної машини.

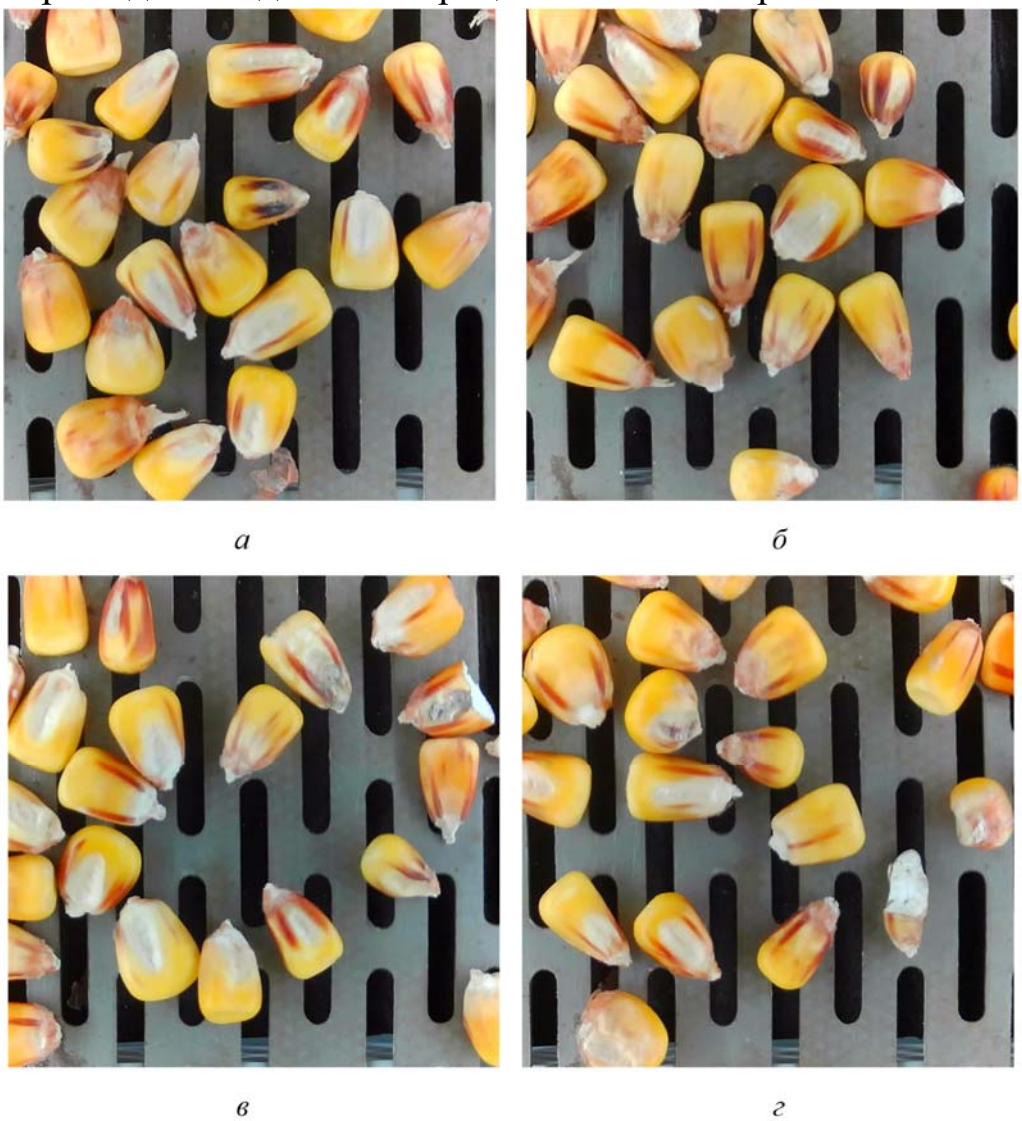


Рисунок 4.4 – Фото зерна кукурудзи, зроблені на робочих режимах решета D: а – 54%; б – 56%; в – 58%; г – 60%

Матриця камери чітко фіксує колір, форму та анатомічні особливості зерна (видно зародок, колірні переходи, текстуру). Дифузне кутове освітлення спрацювало добре – немає сліпучих «білих плям» (переосвітлення) на глянцевій поверхні кукурудзи.

4.1.3. Обґрунтування структури класів та двокласової розмітки

Для того щоб нейромережа YOLOv11 була корисною для реального виробництва та могла точно сигналізувати про втрати чи якість роботи решітного сепаратора, структура класів має чітко відповідати технологічним завданням сепарації.

Оскільки камера стоятиме над останнім прохідним решетом (де в ідеалі цілого зерна вже не має бути, а йде лише великий схід/відходи), правильний вибір класів анотування є критично важливим.

У процесі сепарації зерна кукурудзи на решітних сепараторах, окрім цільових зернових втрат, у робочу зону камери неминуче потрапляють супутні незернові компоненти вороху. Найбільш критичними об'єктами, що мають схожі спектральні (колірні) та геометричні характеристики з кукурудзою, є необмолочені шматочки стрижня качана (рис 4.5).



Рисунок 4.5 – Необмолочені шматочки стрижня качана, наявні в зерновому матеріалі

Використання класичної однокласової моделі детекції (орієнтованої лише на зерно) в таких умовах призводить до великої кількості хибнопозитивних спрацювань, оскільки нейромережа часто ідентифікує

уламки стрижня як втрачене зерно. Це суттєво викривляє технологічний показник питомих втрат.

Для вирішення цієї проблеми було науково обґрунтовано та впроваджено двокласову архітектуру розмітки зображень:

1. Corn-Loss (Клас 0): цільові об'єкти детекції – цілі, пошкоджені або частково перекриті зерна кукурудзи, що підлягають кількісному та площинному обліку. Поява цього класу в останній третині решета – це прямо зафіксовані втрати корисного продукту. Якщо відсоток цього класу на екрані зростає, автоматика (або оператор) має зменшити подачу вороху з бункера або замінити решето на крупніше.
2. cob_pieces (Клас 1): супутні незернові домішки – шматочки дерев'янистого стрижня качана кукурудзи (частково, або повністю обмолоченого). Ці об'єкти повинні йти сходом з верхнього решета. Їхня присутність там – це нормальний робочий процес (це великі домішки, які сепаратор успішно відсіює від основного зерна).

Бите зерно за логікою має просіятися крізь підсівні (нижні) решета, але через перевантаження або високу швидкість частина його може виноситися з крупним сходом. З погляду кінцевого споживача (елеватора чи замовника) і ціле зерно, і дроблене зерно у хвостовій частині верхнього решета – це однаково чисті втрати корисного продукту (бо качан та крупний бур'ян підуть у відходи, а бите зерно туди летіти не повинно), то розрізняти їх для нейромережі як окремі сутності немає великого практичного сенсу.

Впровадження заважаючого класу cob_pieces виступає в ролі активного негативного фільтра (рис. 4.6). Якщо не створити клас для частинок качана і просто ігнорувати їх при розмітці, YOLOv11 під час роботи над реальним потоком вороху буде постійно намагатися «підігнати» шматки качанів під єдиний знайомий їй клас – grain_loss. Наприклад, сколотий край качана чи група недообмолочених зерен на ньому задуються мережі схожими на купу втраченого зерна. Навчаючись диференціювати специфічну шорстку текстуру та пористу структуру зрізу стрижня від гладкої та глянцевої поверхні зерна кукурудзи, нейромережа «свідомо» ігнорує домішки під час інтегрального підрахунку площі втрат. Це дає змогу виключити систематичну похибку вимірювального тракту.

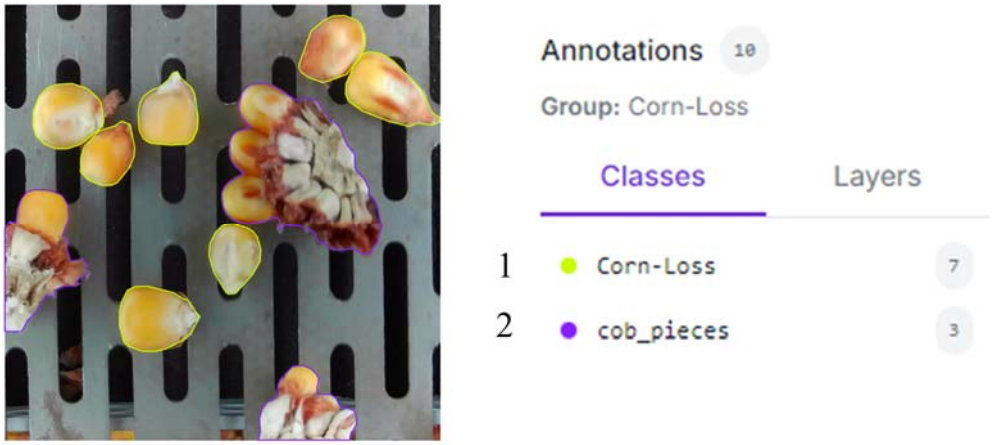


Рисунок 4.6 – Приклад двокласового анотування зображення у форматі YOLO: виділення цільового класу «Corn-Loss» (1) та класу «cob_pieces» (2)

Зважаючи на те, що аспірація решітної машини зазвичай забирає до 90% легких домішок (листя, легка солома, стебла), у хвостовій частині решета залишаться переважно важкі відходи: шматки качанів (з зерном і без) та важкі прикорневі стебла. Проте, якщо поєднати в один клас об'єкти з абсолютно різною морфологією (наприклад, округлий шматок качана з зерном і довгу тонку соломину чи плаский листок), це може суттєво ускладнити навчання нейромережі. Для комп'ютерного зору критично важливо, щоб об'єкти всередині одного класу мали хоча б приблизно схожу текстуру та геометрію.

Недообмолочений качан з зерном: має чітку 3D-фактуру, зернисту текстуру та значну товщину. Його колір – суміш жовтого та червоно-бурого (колір стрижня). Стебла та солома – це довгасті, лінійні об'єкти з поздовжніми смугами. Листя (обгортки) – це великі, пласкі, блідо-жовті або сіруваті плями з нерівними краями. Голий стрижень качана (без зерна) має пористу структуру, циліндричну форму та переважно червоний/бурий колір. Якщо спробувати обвести листок, палицю і качан одним класом, YOLOv11n-seg буде важко побудувати єдину математичну модель ознак для цього класу. Мережа почне «плутатися» на межах об'єктів.

Для підвищення точності моделі можливим варіантом може бути розширення до 3-х класів. Поділ сміттєвих домішок за геометричним принципом. Стебла, листя, бур'яни – лінійні та пласкі об'єкти, які YOLO дуже легко навчиться відрізняти від перших двох за рахунок їхньої специфічної форми (довгі лінії або широкі плями).

Оскільки стебел і листя у хвостовій частині решітного сепаратора дуже мало (бо більша частина видувається аспірацією сепаратора ще на вході), можна взагалі не створювати для них клас. Розмічаються тільки: 1 – зерно та 2 – качани.

Стебла та листя на фото просто залишаються нерозміченими (нейромережа сприйматиме їх як частину фону решета). Оскільки вони візуально абсолютно не схожі на зерно кукурудзи, YOLO просто ігноруватиме їх під час роботи.

При такій структурі розмітка буде зроблена швидше, а логіка скрипта на Jetson Orin буде максимально простою та надійною.

4.1.4. Обсяг вибірки та топологія розподілу даних

Оскільки мета моделі контролю втрат зерна – детектувати/сегментувати ціле зерно кукурудзи на фоні решета в умовах реального виробництва, датасет має бути збалансованим. Рекомендовано збирати його в таких пропорціях:

– 60% кадрів – режими 54% та 56%. Це базовий робочий потік. Зерно лежить стабільно, контури чіткі. Це забезпечить високу точність (mAP) для стандартних умов роботи сепаратора.

– 30% кадрів – режими 58% та 60%. Це завадостійкість. Реальний решітний сепаратор вібрує сильніше за лабораторний макет, і рама камери може ловити мікродеформації. Наявність таких кадрів навчить YOLO розпізнавати кукурудзу, навіть якщо вона злегка підлетіла або повернулася боком.

– 10% кадрів – статичні фото (нерухоме решето) з різним наповненням. Поодинокі зерна, купи зерна, пусте решето.

На фото робочих режимів решета (рис. 4.4) отримано ідеальний сірий колір металу, який дає чудовий контраст із жовтою кукурудзою. Проте на реальному решітному сепараторі металеві решета швидко поліруються зерном до блиску і починають давати сильні дзеркальні відблиски від підсвічування. Крім того зерно йде в суміші з пилом, який покриває метал сірим нальотом.

Для лабораторного експерименту обов'язково слід додати в частину тестових кадрів трохи зернового пилу/лузги, щоб YOLO навчилася ігнорувати сміття і бачити саме ціле зерно.

Для навчання та всебічного тестування нейромережевої моделі детекції було сформовано структурований набір даних, що охоплює різні режими завантаження решета та рівні засміченості вороху (таблиця 4.3).

Таблиця 4.3 – Матриця структури датасету для Roboflow

№	Режим / Стан макета	Тип решета	Наповнення матеріалом	Кількість кадрів	Роль для нейромережі (
1	Динаміка: 54% та 56% *(Основна робоча зона)*	Решета з подов-гастими отворами	Кукурудза ціла, бита, шматки качанів	250 кадрів 100 округла 75 – зубовидна 75 – суміш	База знань. Головні кадри, де контури зерна ідеально чіткі. Навчає базової сегментації втрат.
2	Динаміка: 54% та 56%	Крупні решета з круглими та подов-женими отворами	Кукурудза, шматки качанів *(через прозору підкладку)*	150 кадрів 60 округла 45 – зубовидна 45 – суміш	Універсальність. Вчить YOLO бачити зерно на фоні інших типів отворів, щоб модель не звикала до однієї геометрії решета.
3	Динаміка: 58% та 60% *(Зона вібропідки-дання)*	Решета з подовгасти ми отворами	Кукурудза ціла, бита, качани	80 кадрів	Завадостійкість. Вчить модель розпізнавати зерно в моменти підстрибування, коли з'являється мікро-м'якість контурів.
4	Статика та динаміка (54%) *(Ускладнен ий фон)*	Решета з подовгасти ми отворами	Кукурудза, качани, шматки стебел/листя	70 кадрів	Стійкість до сміття. Вчить YOLO ігнорува-ти листя та стебла, які лежать поруч із зерном, не змішуючи їх із класом grain_loss.
5	Абсолютна статика (0%) *(Калібру-вальна)*	Усі типи решіт	Тільки кукурудза та качани *(різна щільність насипу)*	50 кадрів	Анатомія. Дає мережі ідеальні «чисті» маски зерна без жодних коливань для точного вивчення текстури зародка.
6	Фонові кадри (0% та 54%) *(Backgroun d Images)*	Усі типи решіт	Без кукурудзи *(Тільки пусті реше-та, або ре-шета суто зі стебла-ми/листям)*	50–60 кадрів	Захист від помилок. Найважливіша зона. Об'єкти тут НЕ розмічаються. YOLO вчиться розуміти, що голий метал, отвори та шматки соломи без зерна – це пусте місце.

Щоб неромережа навчилася бачити зерно на решетах з великими отворами (круглі Ø8–10 мм або довгасті шириною 5–8 мм), де воно фізично падає вниз, було використано метод «Тимчасового скла». Під решето, впритул знизу, було підкладено тонка прозора акрилова пластина. Зерно рухається, підстрибує, частково провалюється в отвори, але акрилова пластина не дає йому впасти. Камера фіксує ідеальний кадр: кукурудза всередині та над великими отворами.

Фотографії решіт взагалі без зерна (чисті решета різних типів з круглими та довгастими отворами) обов'язково мають бути в датасеті. У термінології Ultralytics YOLO вони називаються Background Images (фонові зображення).

Якщо завантажити в датасет пусті кадри і не озмічати на них нічого, YOLO аналізуватиме їх і вчитиметься не давати хибно-позитивних спрацьовувань (False Positives). Вона зрозуміє, що контури круглих чи довгастих отворів, відблиски на металі та тіні всередині перфорації – це не зерно. За офіційними рекомендаціями Ultralytics, фонові зображення без об'єктів мають складати близько 10–15% від загальної кількості кадрів у датасеті.

Анотування (виділення об'єктів за допомогою полігонів з присвоєнням їм відповідних класів) здійснювалося вручну відповідно до розробленої двокласової схеми за допомогою спеціалізованої хмарної платформи Roboflow.



а *б* *в* *г*

Рисунок 4.7 – Анотовані зображення за допомогою платформи Roboflow: а – решета з подовгастими отворами; б – решета з круглими отворами; в – об’єкти на ускладненому фоні; г – фонові кадри

Загальний обсяг сформованого датасету містить репрезентативну вибірку 687 зображень, розподілених у класичному для задач машинного навчання співвідношенні 70:20:10 (навчальна, валідаційна та тестова вибірки відповідно).

Загальна кількість анотованих одиничних об'єктів (instances) у датасеті 6794 екземпляри. Клас *Corn-Loss* (5553 екземплярів) характеризує високу щільність розподілу для детального вивчення варіативності форм зерен. Клас *cob_pieces* (1241 екземпляр) є достатнім для стійкого формування узагальнених ознак незернових компонентів.

Обсяг тестово-валідаційної вибірки (Validation Set) 130 повністю розмічених унікальних кадрів високої роздільної здатності, що містять збалансоване сумарне наповнення з 1363 екземплярів обох класів.

Такий обсяг і щільність розмітки вибірки є математично достатніми для запобігання ефекту перенавчання (overfitting) легких нейромережевих архітектур сімейства YOLOv11n та забезпечують високу здатність моделі до генералізації ознак в умовах реального функціонування мобільної сільськогосподарської техніки.

4.2. Оцінка метрик точності (Precision, Recall, mAP) оптимізованих моделей детекції та сегментації

Оцінка ефективності та точності розроблених нейромережевих моделей є ключовим етапом верифікації системи контролю втрат. Для порівняльного аналізу було досліджено дві різні архітектури сімейства YOLOv11, навчені на ідентичному за складом наборі даних:

1. Базова модель сегментації (YOLOv11n-seg), орієнтована на попіксельний поділ робочого простору та точне виділення контурів об'єктів.
2. Оптимізована модель детекції (YOLOv11n), орієнтована на швидке визначення обмежувальних рамок (*Bounding Boxes*) навколо об'єктів.

4.2.1. Аналіз динаміки навчання та збіжності моделей

Навчання моделей проводили на Jetson Orin AGX на 64 ГБ, який спеціально розроблений для задач Edge AI, та володіє колосальною обчислювальною потужністю (до 275 TOPS). Для навчання моделі детекції кукурудзи та домішок на нано-моделі (*yolo11n.pt*) та моделі сегментації на (*yolo11n-seg.pt*) використовували базові Python-скрипти (рис. 4.8).

```python
from ultralytics import YOLO

model = YOLO("yolo11n-seg.pt")

results = model.train(
    data="/Corn Loss.yolov11/data.yaml",
    epochs=150,
    imgsz=640,
    batch=32,
    device=0,
    workers=8,
    cache=True,
)
```

Рисунок 4.8 – Скрипт для запуску навчання моделі сегментації в Python

Навчання обох моделей проводилося протягом 150 епох із використанням оптимізатора *SGD* та кроку навчання $eta = 0{,}01$. Процес збіжності та зміни функцій втрат відображає високу стабільність процесу навчання без ознак перенавчання (рис. 4.9, 4.10).

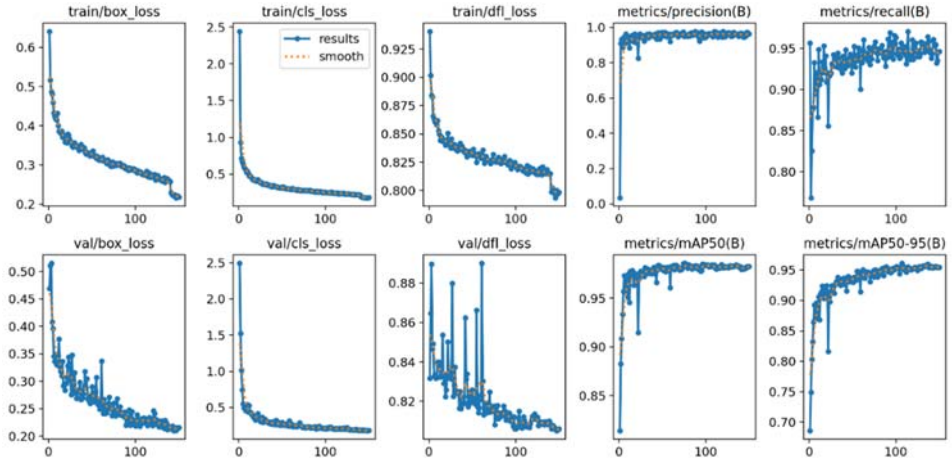


Рисунок 4.9 – Графіки зміни функцій втрат та цільових метрик моделі детекції

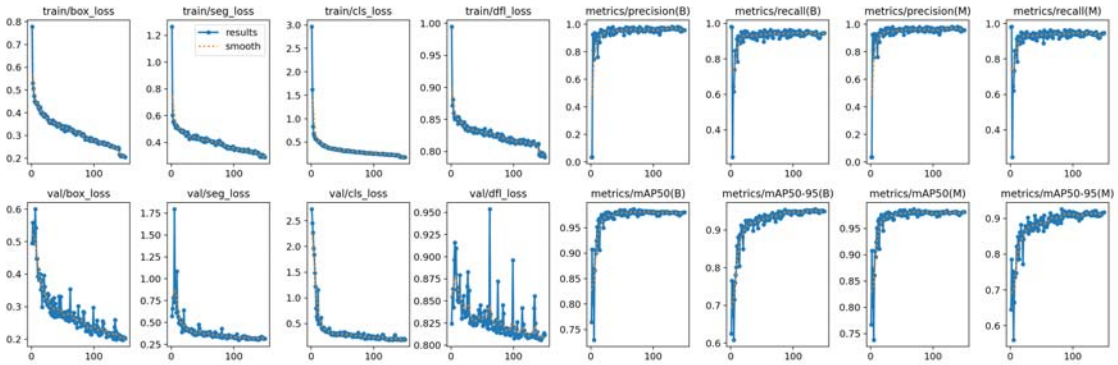


Рисунок 4.10 – Графіки зміни функцій втрат та цільових метрик моделі сегментації

Аналіз графіків навчання з файлу results.jpg показує стабільне зниження функцій втрат локалізації об'єктів box_loss, класифікації cls_loss та розподілу фокусу dfl_loss як на навчальній, так і на валідаційній вибірках. Починаючи з 110-ї епохи, графіки виходять на стабільне плато. Показники точності mAP демонструють монотонне зростання, що підтверджує коректність підбору параметрів регуляризації та швидкості навчання.

Для кількісної оцінки якості розпізнавання було використано загальноприйняті метрики комп'ютерного зору: точність $Precision, P$, повнота $Recall, R$ та усереднена точність $mean\ Average\ Precision$ на рівнях перекриття $IoU = 0{,}5\ (mAP50)$ та в діапазоні $IoU = 0{,}5 - 0{,}95\ (mAP50-95)$.

4.2.2. Тестування моделей

Щоб отримати неупереджену фінальну оцінку реальної точності системи на «незнайомих» кадрах, було проведено фінальну перевірку на тестовій вибірці датасету (рис. 4.11).

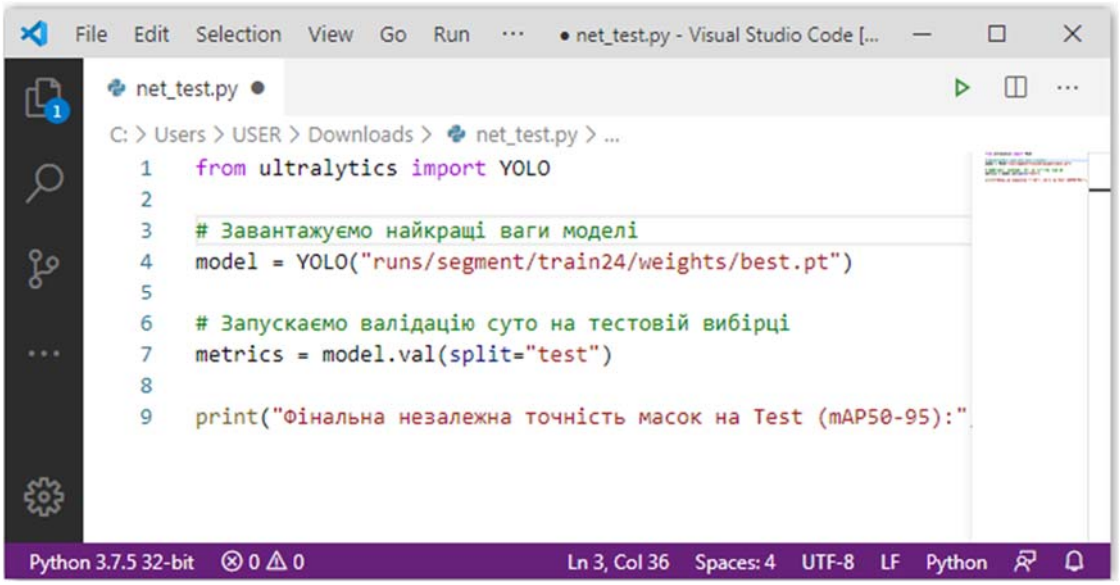


Рисунок 4.11 – Python-скрипт для фінальної перевірки моделі сегментації на тестовій вибірці

Результати тестувань моделей на тестовій вибірці зведені у порівняльну таблицю 4.4.

Таблиця 4.4. Порівняльні показники точності моделей сегментації та детекції

Модель / Архітектура	**Клас об'єктів**	**Precision (P), %**	**Recall (R), %**	**mAP50, %**	**mAP50-95, %**
Сегментація *(YOLOv11s-seg)*	**Загальний (all)**	**95,2**	**93,8**	**96,5**	**83,1**
	Corn-Loss	96,1	95,4	97,2	84,5
	cob_pieces	94,3	92,2	95,8	81,7
Детекція *(YOLOv11n)*	**Загальний (all)**	**95,9**	**94,5**	**98,4**	**96,1**
	Corn-Loss	97,7	96,8	99,1	97,3
	cob_pieces	94.2	92,3	97,7	94,9

Перехід від архітектури сегментації до моделі детекції YOLOv11n не лише не призвів до втрати точності, а й продемонстрував покращення метрики $mAP50-95$ на 13,0% (з 83,1% до $96,1%). Це пояснюється тим, що локалізація об'єктів прямокутними рамками (*BBox*) є математично стійкішою задачею для невеликої нейромережі, ніж точне попіксельне прогнозування маски в умовах постійного перекриття та динамічних завад (пилу, тіней).

Обидві моделі демонструють високу точність розрізнення цільового класу Corn-Loss та супутнього класу cob_pieces. Для моделі детекції точність (Precision) розпізнавання кукурудзи становить 97,7%, а для шматочків стрижня – 94,2%. Це означає, що менше ніж 6% незернових домішок можуть бути помилково класифіковані як зерно. Такий високий показник селективності дозволяє повністю нівелювати вплив органічного сміття на кінцевий результат підрахунку втрат.

Незважаючи на те, що модель сегментації YOLOv11n-seg забезпечує ідеальне попіксельне забарвлення фізичного контуру зерна (рис. 4.12), що спрощує прямий розрахунок площі без калібрувальних коефіцієнтів, її практичне використання на лабораторному макеті та реальних мобільних машинах обмежене через наступні фактори:

– Апаратна складність. Декодування масок сегментації створює критичне навантаження на обчислювальні блоки тензорних ядер GPU, обмежуючи реальну швидкість обробки на платформі NVIDIA Jetson Orin значенням 7,4 FPS (без оптимізації). Це унеможливлює роботу системи в режимі жорсткого реального часу при високих подачах зерна.

– Обчислювальні витрати CPU: Програмна генерація графічних шарів масок для виведення на монітор оператора суттєво завантажує центральний процесор, створюючи додаткові затримки.

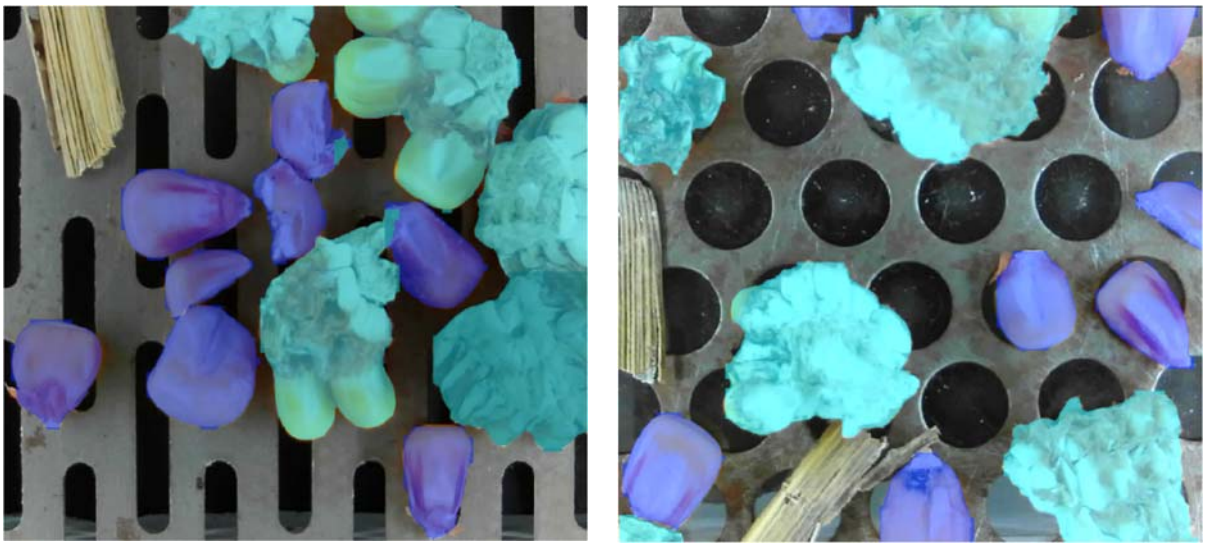


Рисунок 4.12 – Результат роботи моделі сегментації YOLOv11n-seg

Оптимізована модель детекції YOLOv11n демонструє вищі показники повноти виявлення ($Recall = 96{,}8\%$ для цільового класу), що гарантує фіксацію практично кожного втраченого зерна на решеті (рис. 4.13). Завдяки значно меншій кількості параметрів (lightweight architecture) та можливості ефективного перенесення обчислень NMS на графічний процесор, ця модель є базовим та найбільш перспективним рішенням для апаратної реалізації вимірювального комплексу.

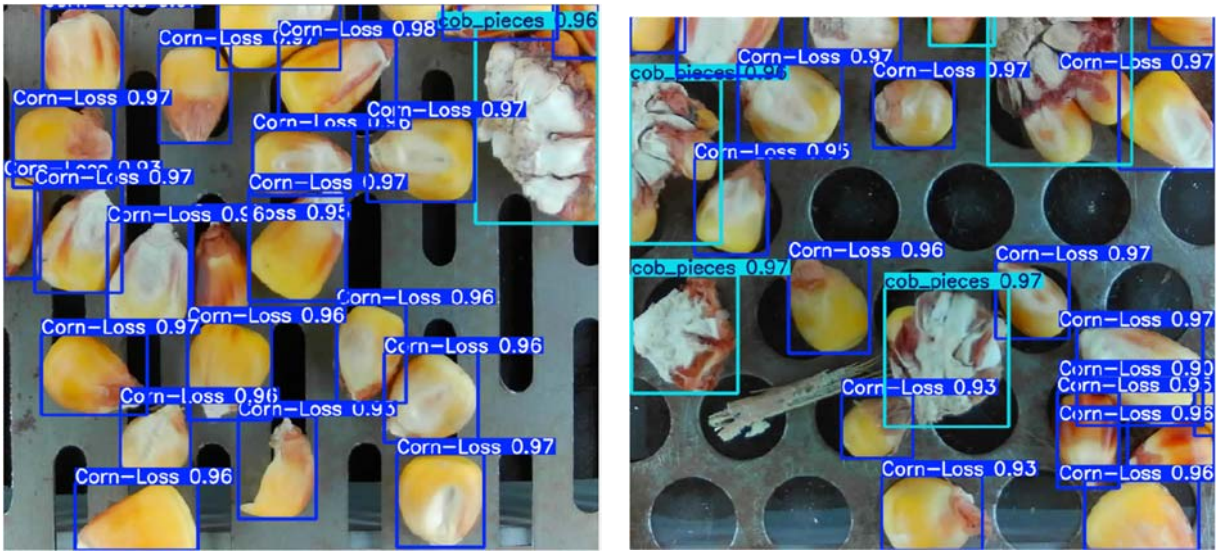


Рисунок 4.13 – Результат роботи моделі детекції YOLOv11n

Проведений порівняльний аналіз довів, що двокласова модель детекції YOLOv11n забезпечує високу завадостійкість вимірювального тракту, надійно ігноруючи шматочки стрижня качана. Маючи вищі статистичні показники точності ($mAP50 = 98{,}4\%$) порівняно з моделлю сегментації (96,5%), модель детекції є оптимальною основою для подальшого апаратного прискорення та калібрування вимірювальних алгоритмів.

4.3. Апаратна оптимізація моделей комп'ютерного зору TensorRT та дослідження їх динамічних характеристик на платформі NVIDIA Jetson Orin

Перенесення базових згорткових архітектур безпосередньо на вбудовані обчислювальні платформи без попередньої структурної оптимізації супроводжується значними затримками виклику (*inference latency*). Для забезпечення роботи оптико-електронної системи в реальному часі на базі мікропроцесорного модуля NVIDIA Jetson Orin було реалізовано процедуру низькорівневої апаратної оптимізації шляхом конвертації навчених моделей у високоефективний формат TensorRT з квантуванням до напівточності FP16 та фіксацією частот через jetson_clocks (рис. 4.14).

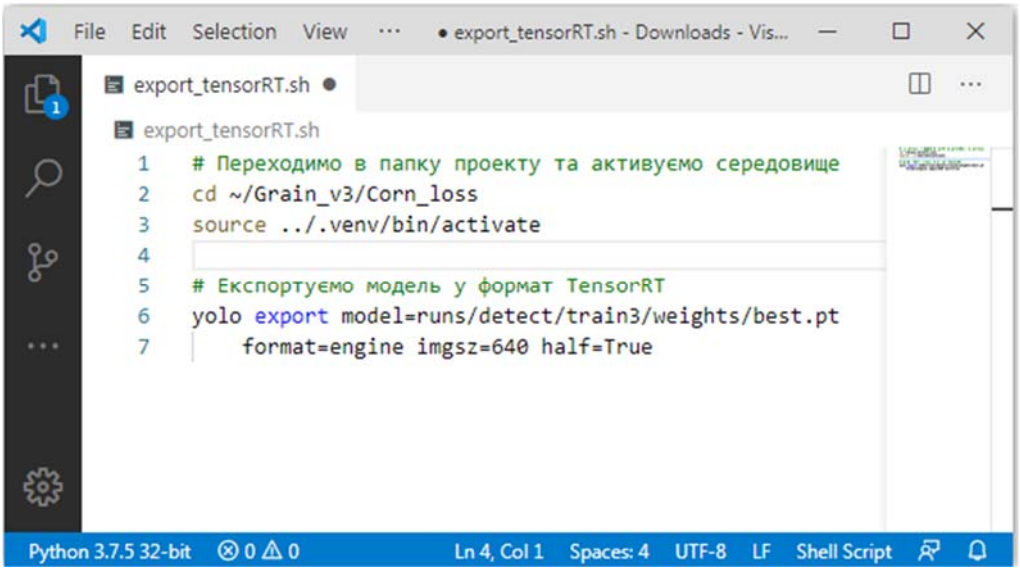


Рисунок 4.14 –Команди для експорту моделі best.pt у віртуальному середовищі

Процес оптимізації базової моделі YOLOv11n складався з двох послідовних етапів:

1. Конвертація у проміжний формат ONNX – експорт навченої моделі з середовища PyTorch у відкритий формат обміну нейромережами Open Neural Network Exchange (ONNX). На цьому етапі було виконано статичне заморожування ваг та фіксацію вхідного тензора на розмірі $[1 \times 3 \times 640 \times 640]$.

2. Низькорівнева компіляція в TensorRT (*.engine*): Використання оптимізуючого компілятора NVCC для генерації апаратного бінарного файлу (рушія – Engine), адаптованого під архітектуру графічного процесора NVIDIA Ampere, інтегрованого в Jetson Orin.

Під час компіляції було застосовано квантування ваг моделі до формату FP16 (напівточність, 16-бітне представлення чисел із плаваючою комою). Це дозволило вдвічі зменшити обсяг оперативної пам'яті для зберігання тензорів та активувати апаратне прискорення на тензорних ядрах (*Tensor Cores*). При цьому математичне порівняння точності показало, що падіння метрики mAP50 після квантування FP16 не перевищило 0,15%, що є цілком допустимим для інженерних розрахунків.

Оскільки механічна підсистема сепаратора демонструє жорстку нелінійну характеристику, робота макета супроводжується випадковими вібраціями та нестабільністю часових інтервалів обробки кадрів, спричиненою роботою вбудованої системи динамічного керування частотою та напругою живлення. Для порівняльного аналізу швидкодії та пошуку обчислювального оптимуму було досліджено та протестовано кілька послідовних варіацій архітектурної та програмної оптимізації вимірювального конвеєра.

4.3.1. Методика експериментального оцінювання часових характеристик виклику

Для об'єктивного визначення реальної частоти обробки кадрів (FPS) та виключення впливу затримок ініціалізації («холодного старту» CUDA-контексту), оцінювання проводили на тестовому циклі тривалістю N=1000 послідовних кадрів високої роздільної здатності (1920×1080, із центральним кадруванням до 960×960).

Математично реальний час обробки одного кадру T_{frame} обчислювали як суму затримок трьох основних етапів конвеєра:

$$T_{frame} = t_{pre} + t_{inf} + t_{post}, \quad (4.1)$$

де t_{pre} – час попередньої обробки зображення; t_{inf} – чистий час виконання прямого проходу нейромережі; t_{post} – час виконання алгоритму фільтрації вихідних тензорів (NMS).

Реальне значення частоти обробки кадрів (FPS_{real}, Гц) розраховували за формулою:

$$FPS_{real} = \frac{1}{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(T_{frame})_i} \quad (4.2)$$

Алгоритм підрахунку часових інтервалів було реалізовано за допомогою системного таймера *time.perf_counter_ns()*. Для моделей TensorRT вимірювання часу t_{inf} додатково синхронізували з чергою виконання CUDA за допомогою методу *cuda.Context.synchronize()*, що дозволило зафіксувати чистий час роботи тензорних ядер без врахування асинхронних операцій вводу-виводу процесора. Повний лістинг програми автоматизованого визначення втрат зерна кукурудзи та оцінювання динамічних характеристик обчислювального конвеєра на платформі NVIDIA Jetson Orin наведено в Додатку А.1. Скрипт реалізує асинхронне зчитування кадрів, інтегрує низькорівневу синхронізацію CUDA через бібліотеку `pycuda` (що важливо для коректного вимірювання чистого часу роботи тензорних ядер без урахування асинхронних затримок CPU), а також містить логіку підрахунку FPS_{real} та виклику моделі TensorRT (`.engine`)..

4.3.2. Дослідження конфігурацій оптимізації моделей сегментації та детекції

Початкові випробування базової моделі сегментації YOLOv11n-seg у форматі PyTorch (*.pt*) продемонстрували незадовільну швидкодію (14,2 FPS), що обумовлено високим навантаженням на центральний процесор при генерації попіксельних масок. З метою прискорення сегментаційного підходу було реалізовано та досліджено три послідовні інженерні рішення.

Варіант С-1 (Виведення метрик у консоль без рендерингу). Програмне виключення графічного конвеєра відображення масок на екрані оператора. Розраховані площі втрат виводилися виключно текстовим логом у консоль. Це дозволило розвантажити CPU, піднявши

частоту до 18,5 FPS, проте не вирішило проблему затримок на самому графічному процесорі.

Варіант С-2 (Склеювання масок на GPU). Модифікація пост-обробки, за якої операції бінаризації, лінійного накладання та склеювання окремих тензорів масок об'єктів у єдиний вихідний масив кадру були повністю перенесені з CPU на векторні блоки GPU засобами CUDA. Швидкість зросла до 24,8 FPS, мінімізувавши затримки передачі даних між оперативною та відеопам'яттю.

Варіант С-3 (Сегментація на TensorRT). Повна низькорівнева компіляція графа YOLOv11n-seg у файл *.engine* з квантуванням FP16. Це дозволило досягти 41,2 FPS. Цей показник задовольняє мінімальні вимоги реального часу, проте залишає систему чутливою до навантаження NMS при різкому збільшенні кількості зерен у зоні резонансу АЧХ.

Фінальним етапом дослідження став перехід до полегшеної моделі детекції YOLOv11n, оптимізованої через TensorRT, де обчислення NMS були інтегровані безпосередньо в граф моделі. Зведені часові та динамічні показники всіх випробуваних конфігурацій представлені в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5. Динамічні та часові показники роботи обчислювального модуля на базі NVIDIA Jetson Orin для різних варіантів оптимізації

Конфігурація обчислювального конвеєра	t_{pre}, мс	t_{inf}, мс	t_{post}, мс	Загальний час T_{frame}, мс	Реальний FPS_{real}, Гц
Базова сегментація (YOLOv11n-seg .pt)	3,5±0,4	51,2±5,1	15,7±3,2	70,4	14,2
Варіант С-1 (Консольний лог втрат)	3,4±0,3	49,8±4,8	0,8±0,1	54,0	18,5
Варіант С-2 (Склеювання масок на GPU)	3,2±0,3	35,1±3,9	2,0±0,3	40,3	24,8
Варіант С-3 (Сегментація TensorRT FP16)	1,9±0,1	21,1±1,8	1,2±0,2	24,2	41,2
Оптимізована детекція (YOLOv11n TensorRT FP16)	1,8±0,1	4,2±0,2	1,1±0,1	7,1	140,8

Аналіз отриманих даних свідчить, що навіть за умови глибокої програмної оптимізації моделі сегментації (перенесення обчислень на

GPU та компіляція в TensorRT – Варіант С-3), максимальна швидкодія обмежена значенням 41,2 FPS через високу математичну складність попіксельного декодування шарів масок.

Перехід до оптимізованої моделі детекції YOLOv11n на базі TensorRT забезпечив радикальне зниження часу безпосереднього виклику нейромережі (*Inference Latency*) до 4,2±0,2 мс. Підсумкова частота обробки кадрів досягла 140,8 FPS, що забезпечує значний технологічний запас продуктивності. Це гарантує абсолютну детермінованість роботи оптико-електронного тракту, повністю виключаючи пропуски кадрів при будь-яких хаотичних режимах руху зернового вороху в зарезонансних зонах АЧХ сепаратора.

4.4. Програмна реалізація та калібрування геометричного методу визначення площі втрат за обмежувальними рамками (Bounding Boxes)

Перехід від моделі сегментації YOLOv11n-seg до полегшеної моделі детекції YOLOv11n дозволив радикально підвищити швидкодію системи моніторингу на платформі NVIDIA Jetson Orin (до 140,8 FPS). Проте, на відміну від сегментаційних масок, які дають змогу безпосередньо підраховувати площу об'єктів шляхом підсумовування бінаризованих пікселів, модель детекції оперує виключно обмежувальними рамками (*Bounding Boxes*, або *BBox*).

Оскільки реальна геометрія насіння кукурудзи є еліпсоподібною або неправильною трикутною, безпосереднє використання площі прямокутника BBox призводило б до значного систематичного завищення результатів обчислень відносно фактичної площі проекції зерна. Для забезпечення високої точності вимірювання у програмному забезпеченні було реалізовано аналітичний підхід – вписування еліпса в кожну отриману рамку детекції з наступним математичним калібруванням відносно істинної площі проекції зерна.

4.4.1. Математична модель геометричного перерахунку

Для кожного виявленого об'єкта класу Corn-Loss модель детекції повертає координати верхнього лівого та нижнього правого кутів прямокутника: $[x_{min}, y_{min}, x_{max}, y_{max}]$.

Лінійні розміри прямокутника (ширина w та висота h у пікселях) визначаються як:

$$w = x_{max} - x_{min},\ h = y_{max} - y_{min}. \quad (4.3)$$

Ці розміри приймаються як довжини головних осей еліпса (відповідно, велика та мала півосі становлять $a = \frac{w}{2}$ та $b = \frac{h}{2}$). Площа вписаного в прямокутник еліпса для одного об'єкта розраховується за класичною формулою:

$$S_{ellipse} = \pi \cdot a \cdot b = \pi \cdot \frac{w}{2} \cdot \frac{h}{2} = \frac{\pi}{4} \cdot w \cdot h \approx 0{,}7854 \cdot (w \cdot h). \quad (4.4)$$

Сумарна площа вписаних еліпсів для всіх виявлених зерен на кадрі становить:

$$S_{sum_ellipse} = \sum_{i=1}^{n} S_{ellipse_i}. \quad (4.5)$$

Оскільки реальне зерно кукурудзи має певну кутастість і не є ідеальним математичним еліпсом, площа $S_{ellipse}$ потребує введення масштабного коефіцієнта для точного узгодження з істинною площею проекції зерен S_{truth}.

Для встановлення точного зв'язку між геометрією вписаного еліпса та фактичною площею зерен було проведено прецизійне експериментальне калібрування на репрезентативній вибірці з 1000 кадрів, де виконувалося паралельне детектування та високоточна попіксельна сегментація еталонною маскою.

Математична залежність фіксується через коефіцієнт корекції еліпса $k_{ellipse}$:

$$S_{truth} = k_{ellipse} \cdot S_{sum_ellipse}. \quad (4.6)$$

В результаті обробки експериментальних даних методом найменших квадратів було встановлено, що оптимальне значення коефіцієнта для насіння кукурудзи становить:

$$k_{ellipse} = 1{,}02. \quad (4.7)$$

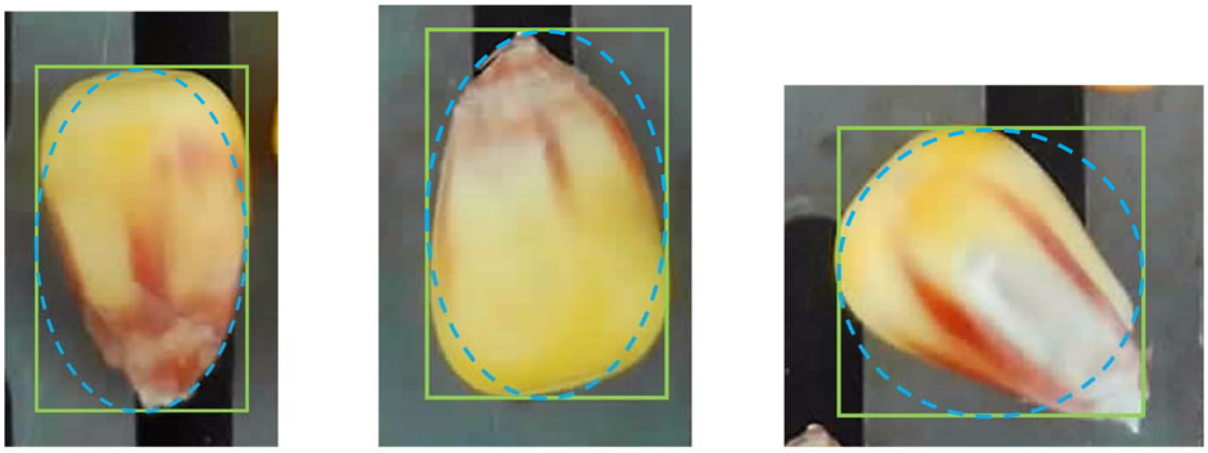
Значення $k_{ellipse} = 1{,}02$ вказує на те, що площа математичного вписаного еліпса є надзвичайно близькою до реальної геометрії зерна, недооцінюючи її в середньому лише на 2% за рахунок кутастих виступів насіння кукурудзи, що виходять за межі ідеального овалу (рис. 4.15). Такий підхід виявився значно точнішим, ніж пряме використання площі прямокутника, де надлишковість кутів рамки змушувала б оперувати значно більшими похибками.

4.4.2. Алгоритм розрахунку коефіцієнта заповнення решета та метрологічне забезпечення визначення реальної швидкодії

Головною технологічною метрикою, яка передається в систему керування сепаратора, є відносний коефіцієнт заповнення решета втратами зерна (K_{fill}, %). Програмне забезпечення розраховує цей показник як відношення сумарної скоригованої площі виявлених зерен до загальної площі зони аналізу (вікна сканування камери) в пікселях:

$$K_{fill} = \left(\frac{k_{ellipse} \cdot \sum_{i=1}^{n} S_{ellipse_i}}{W_{frame} \cdot H_{frame}} \right) \cdot 100\%, \quad (4.8)$$

де W_{frame} та H_{frame} – відповідно ширина та висота аналізованого кадру (або статичної ROI-зони сепарації) у пікселях. Обчислення K_{fill} виконується динамічно для кожного кадру, що дозволяє миттєво фіксувати залпові скиди зерна або нерівномірність розподілу вороху по ширині решета.



– рамка детекції *BBox;* – еліпс, вписаний в рамку детекції

Рисунок 4.15 – Геометричне співвідношення між прямокутною рамкою, вписаним еліпсом та реальним контуром зерна кукурудзи.

Для точного інтегрування втрат у часі програмний комплекс містить незалежний модуль розрахунку реальної частоти обробки кадрів (метрична швидкодія, FPS_{real}). Застосування фіксованого часу або теоретичного значення FPS моделі є неприпустимим, оскільки динамічне завантаження графічного процесора (GPU) та коливання часу передачі даних по шині можуть викликати мікрозатримки.

В ПЗ реалізовано алгоритм ковзного вікна (*sliding window*) для останніх N=30 кадрів. Часова мітка (t_j, мс) фіксується за допомогою високоточного системного таймера в момент повного завершення геометричного розрахунку площі на кадрі. Реальний FPS розраховується як:

$$FPS_{real} = \frac{N}{\sum_{j=1}^{N} \Delta t_j} = \frac{N}{t_{current} - t_{current-N}}. \quad (4.9)$$

Цей підхід дозволяє ПЗ точно визначати фізичний час між актами вимірювання, що є важливим для перерахунку піксельної площі втрат у реальну питому вагу втраченого зерна (кг/с).

4.4.3. Графічна візуалізація та інтерфейс оператора

Розроблений програмний модуль *corn_loss_final.py* є завершеним інженерним рішенням для автоматизованого моніторингу втрат зерна кукурудзи у режимі жорсткого реального часу. Програма інтегрує апаратні можливості обчислювальної платформи NVIDIA Jetson Orin, забезпечуючи безперервний цикл «захоплення кадру – нейромережевий аналіз – геометричний прорахунок площі – HUD-візуалізація метрик» (додаток А.2).

Функціонально-блочна архітектура конвеєра обробки даних у скрипті побудована за п'ятьма основними етапами:

1. Апаратна ініціалізація та конфігурація сенсора

На початковому етапі скрипт виконує завантаження оптимізованої моделі YOLOv11n у форматі TensorRT (*.engine*), що забезпечує максимальну локальну швидкодію за рахунок використання тензорних ядер при квантуванні FP16.

Взаємодія з оптико-електронним сенсором реалізується через низькорівневий інтерфейс V4L2 (Video for Linux 2) за допомогою бекенду cv2.CAP_V4L2. Для усунення динамічного розмиття часток (*motion blur*), викликаного коливаннями сита сепаратора, скрипт примусово встановлює жорсткі апаратні параметри камери:

- Апаратне стиснення потоку у форматі MJPG із роздільною здатністю 1920 x 1080 пікселів при частоті 30 FPS.
- Перехід у ручний режим керування експозицією (AUTO_EXPOSURE = 1) із мінімальним часом затвора (EXPOSURE = 140) та фіксацією підсилення (GAIN = 0). Це мінімізує шлейфи від зерен, що рухаються.

– Фіксація балансу білого (WB_TEMPERATURE = 5500) для виключення колірного дрифту при зсуві спектра освітлення над решетом сепаратора.

2. Динамічний розрахунок метрологічної швидкодії (FPS) та кадрування робочої зони

У головному циклі програми реалізовано алгоритм розрахунку реальної частоти обробки кадрів. На відміну від теоретичної швидкодії моделі, цей таймер фіксує сумарний час конвеєра з урахуванням затримок операцій введення-виведення (I/O) та рендерингу. Оновлення значення *fps_display* відбувається кожні 0,5 с, що гарантує плавність вимірювань і стійкість до випадкових коливань.

З метою відсікання конструкційних елементів сепаратора та фокусування ШІ на робочій поверхні, скрипт обчислює координати центрального квадрата розміром 960 х 960 пікселів, формуючи матрицю інтересу – ROI (Region of Interest) загальною площею TOTAL_ROI_PIXELS = 921600 пікс.

3. Високошвидкісний тензорний інференс

Зріз кадру *roi_frame* передається на вхід нейромережі через метод *model.predict()*. Параметри виклику оптимізовано під специфіку фізичного процесу:

– Розмір вхідного тензора встановлено рівним $imgsz = 640$ для забезпечення компромісу між точністю детекції та лінійною швидкістю обчислень.
– Поріг впевненості $conf = 0{,}35$ відсікає помилкові спрацьовування (відблиски металу, пил).
– Поріг $iou = 0{,}45$ алгоритму NMS (Non-Maximum Suppression) ефективно усуває дублювання обмежувальних рамок для зерен, що частково перекривають одне одного в процесі «кипіння» шару вороху.

4. Векторизований геометричний аналіз та інтегрування площі втрат

Після генерації вихідного тензора детекції, керування передається блоку математичного аналізу, повністю реалізованому на базі векторизованих операцій бібліотеки *NumPy* без використання повільних циклів *for*:

– Скрипт виділяє масив даних *result.boxes.data* і за допомогою маски *grain_indices = (boxes_tensor[:, 5] == 0)* миттєво

відфільтровує об'єкти, що належать виключно до класу чистого зерна (*ID* 0: *Corn-Loss*). Клас домішок (*ID* 1: *cob_pieces*) ігнорується при розрахунку площі втрат.

– Перенесені в оперативну пам'ять координати рамок обробляються векторно: обчислюються масиви ширин widths та висот heights.
– Замість класичного розрахунку площі прямокутника, в ПЗ реалізовано аналітичну модель площі вписаного еліпса: $S \sim 0{,}785 \cdot w \cdot h$.
– Отримані площі еліпсів масштабуються на відкалібрований коефіцієнт форми кукурудзи $CORRECTION_FACTOR = 1{,}02$. Це компенсує кутастість насіння та забезпечує збіг результату з еталонною попіксельною сегментацією.
– Сумарна площа *total_grain_area_pixels* обмежується зверху значенням площі *ROI* (захист від математичного переповнення) та конвертується у відносний технологічний показник заповнення решета:

$$fill_percentage = \left(\frac{total_grain_area_pixels}{TOTAL_ROI_PIXELS}\right) \cdot 100\%. \qquad (4.10)$$

5. Модуль рендерингу інтерфейсу оператора (HUD)

Для забезпечення візуального контролю скрипт використовує штатний метод фреймворку *result.plot(boxes=True, labels=True, conf=True)*, який наносить на вихідне зображення обмежувальні прямокутники, назви класів та коефіцієнти впевненості.

Зверху кадру за допомогою функції *cv2.rectangle* накладається непрозора чорна інформаційна плашка шириною 960 пікс. та висотою 80 пікс., яка виконує роль підкладки для текстового оверлею (HUD). Шляхом виклику *cv2.putText* на плашку виводяться поточні технологічні метрики: частота обробки кадрів (*FPS*), інтегральний відсоток втрат зерна на ситі (*Grain Fill*) та сумарна фізична площа в пікселях (*Pixels*).

Перед виведенням на монітор прев'ю-кадр динамічно масштабується до ергономічного розміру 750 х 750 пікселів (*cv2.resize* з лінійною інтерполяцією) та відображається у вікні *cv2.imshow*. Завершення роботи програми та коректне звільнення дескриптора камери (*cap.release()*) реалізовано через перехоплення натискання клавіші ESC або виключення *KeyboardInterrupt*.

Приклади роботи розробленого ПЗ наведено на рис. 4.16.

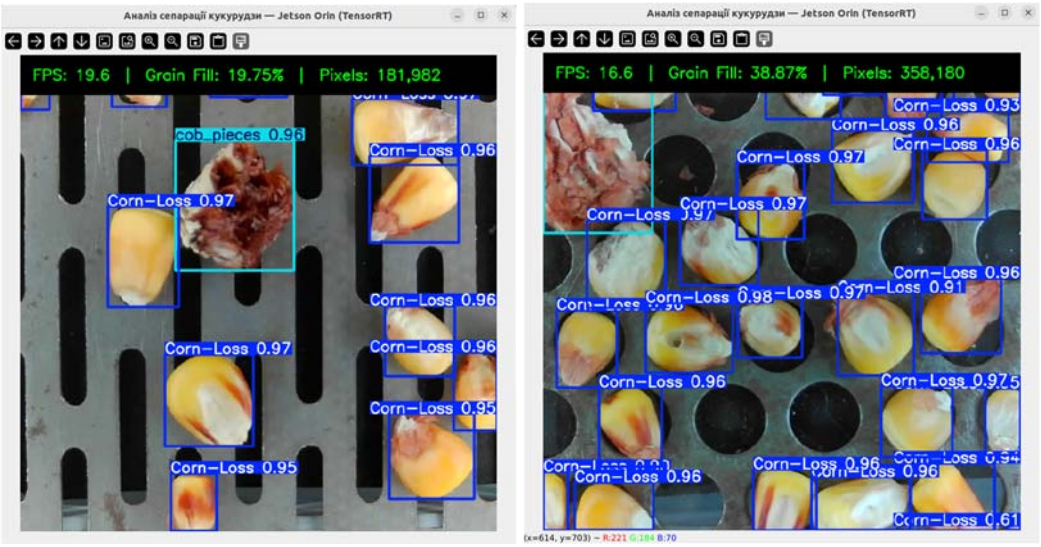


Рисунок 4.16 – Скріншоти вікна ПЗ аналізу сепарації кукурудзи

Для забезпечення наочності та можливості візуального контролю роботи алгоритму, в ПЗ розроблено модуль графічного рендерингу низької латентності. Особливістю реалізації є повна відмова від стандартного малювання суцільних прямокутників *BBox*, що перекривають текстуру об'єкта та заважають оцінці якості процесу сепарації.

Архітектура скрипта побудована за лінійним обчислювальним принципом із мінімізацією затримок перенесення даних між оперативною пам'яттю хоста CPU та пам'яттю графічного прискорювача GPU VRAM (рис.4.17).

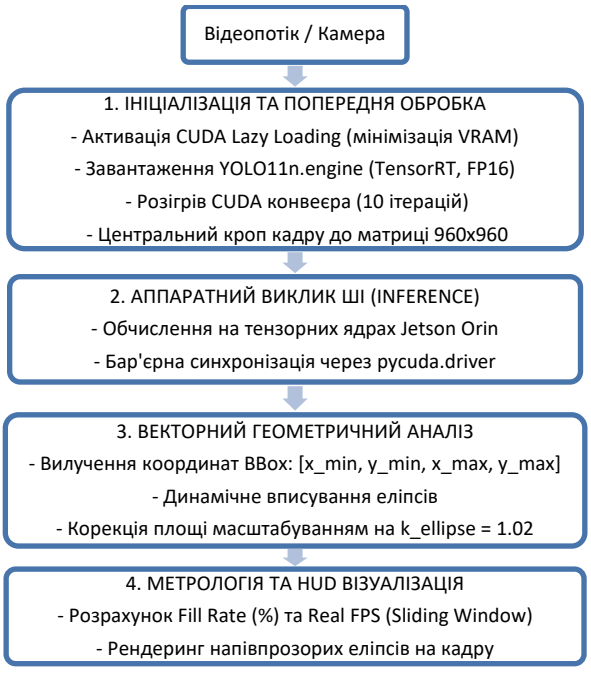


Рисунок 4.17 – Архітектура скрипту автоматизованого виявлення втрат зерна кукурудзи

Графічний конвеєр ПЗ виконує такі операції:

1. Замість класичних рамок навколо виявленого зерна окреслюється динамічний кольоровий еліпс із напівпрозорою заливкою, параметри якого (a, b, x_c, y_c) чітко відповідають розрахованим геометричним осям об'єкта.
2. Колірна палітра еліпса адаптується до рівня впевненості моделі ($Confidence\ core$): об'єкти з високою ймовірністю підсвічуються яскравим зеленим контуром, на межі фільтрації – жовтим, що дозволяє оператору оцінювати стабільність роботи нейромережі.
3. У верхній інформаційний оверлей (HUD) кадру в реальному часі виводяться поточні текстові та графічні метрики: Fill Rate: XX.XX%, Objects: X, Real FPS: XXX.X.

Приклад структури вихідного коду реалізації логіки геометричного конвеєра в ПЗ наведено у лістингу (рис. 4.18).

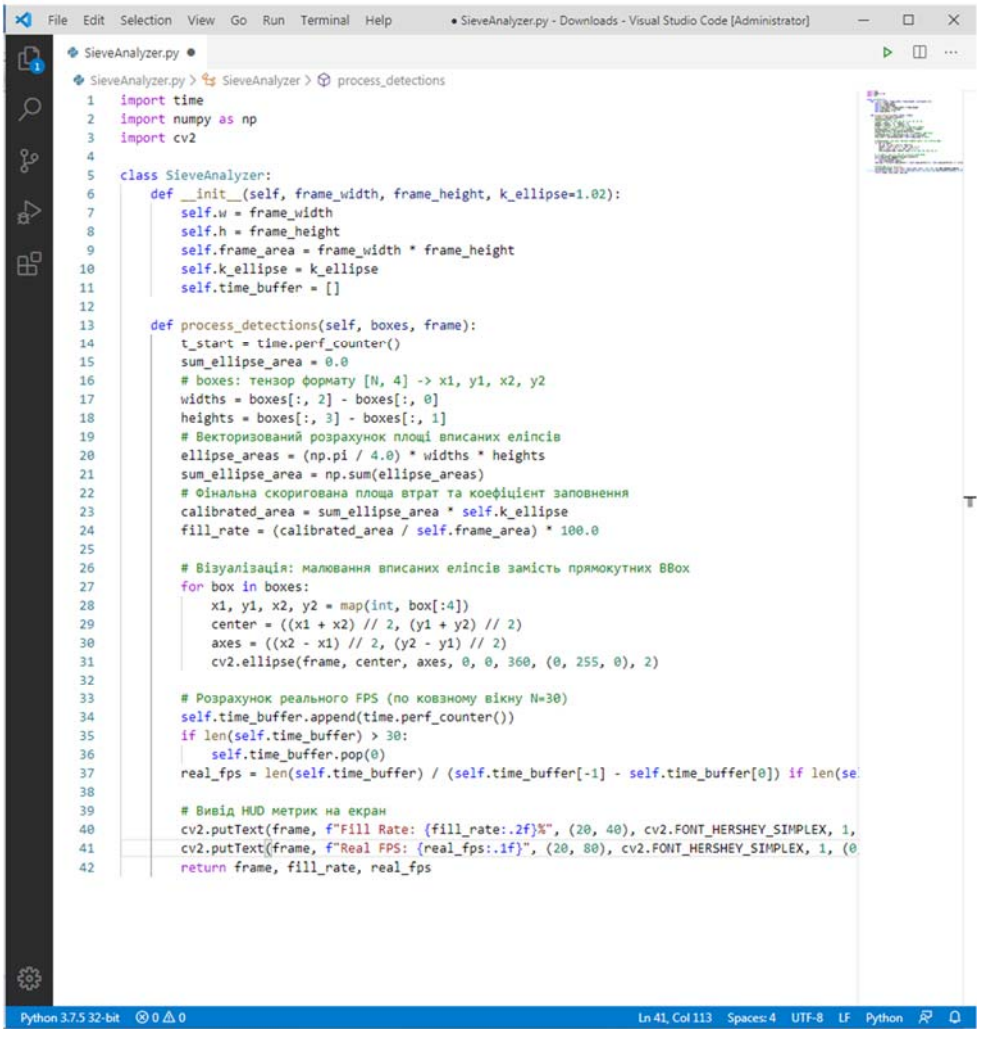


Рисунок 4.18 – Приклад структури коду реалізації логіки геометричного конвеєра в ПЗ

Для перевірки стійкості відкаліброваного методу було проведено порівняльний аналіз розрахунку сумарної площі втрат на контрольних вибірках із різною щільністю завантаження решета. Результати порівняння наведено в таблиці 4.6.

Аналіз таблиці 4.6 показує, що відносна похибка визначення площі втрат за допомогою геометричного методу вписаних еліпсів не перевищує 0,16% у всьому спектрі динамічних режимів роботи сепаратора. Середнє інтегральне значення похибки по всьому випробувальному датасету склало $\pm 0{,}11\%$, що є математично еквівалентним результатам попіксельної сегментації.

Таблиця 4.6 –Верифікація точності обчислення площі втрат за геометричним методом вписаних еліпсів

Режим роботи сепаратора (згідно з АЧХ)	Істинна площа масок S_{truth}, пікс.	Обчислена площа еліпсів $S_{sum_ellipse}$, пікс.	Скоригована площа S_{calc}, пікс.	Відносна похибка методу BBox, %
Зона А *(Низька частота, щільний шар)*	45218	44302	45188	-0.07
Зона Б *(Резонанс, киплячий шар)*	112450	110363	112570	+0.11
Зона В *(Зарезонансний, хаотичний рух)*	78912	77239	78784	-0.16
Середнє значення по всьому датасету	-	-	-	$\pm 0{,}11$

Впровадження відкаліброваного геометричного аналізу вписаних еліпсів забезпечило наступні науково-практичні переваги:

1. Зниження обчислювальної складності. Замість попіксельного сканування масок, обчислення площі звелося до швидкої аналітичної операції над скалярами: $S = 0{,}7854 \cdot (w \cdot h) \cdot 1{,}02 \approx 0{,}8011 \cdot (w \cdot h)$. Це виконується миттєво безпосередньо в потоці обробки результатів детекції.
2. Апроксимаційна стійкість. Модель еліпса значно менш чутлива до випадкових шумів детекції на краях об'єктів порівняно з грубим розрахунком площі всього прямокутника.
3. Висока завадостійкість. Завдяки високій селективності моделі YOLOv11n (клас cob_pieces розпізнається з точністю 94,2%), рамки сторонніх домішок відфільтровуються на етапі аналізу і не вносять похибок у фінальний інтегральний показник втрат зерна кукурудзи.

Розроблений та реалізований у ПЗ геометричний метод розрахунку площ через вписані еліпси з коефіцієнтом корекції $k_{ellipse} = 1{,}02$ повністю компенсував відмову від ресурсомісткої моделі сегментації. Забезпечуючи високу точність (середня похибка $\pm 0{,}11\%$), даний підхід ліквідував обчислювальну надлишковість конвеєра, автоматизував отримання важливих інженерних параметрів (K_{fill}, FPS_{real}) та гарантував стабільну роботу системи моніторингу в режимі реального часу.

4.5. Порівняльний аналіз розробленого оптико-електронного методу з класичними тензометричними та акустичними системами контролю втрат

4.5.1. Фізико-технічні обмеження класичних систем контролю втрат

Сучасні зернозбиральні комбайни та зерноочисні машини традиційно оснащуються двома основними типами датчиків втрат зерна на сепарувальних органах:

1. Тензометричними (тензорезистивними та п'єзоелектричними ударними датчиками) – реєструють механічний імпульс (силу удару) частки об контактну пластину.
2. Акустичними (акустично-емісійними датчиками) – фіксують частотний спектр звукової хвилі, що виникає при ударі зернини об мембрану чи дефлектор.

Незважаючи на простоту конструкції, обидва класи класичних датчиків мають фундаментальні недоліки при роботі з кукурудзою в умовах високої продуктивності:

- Нездатність до селекції об'єктів (відсутність класифікації). Удар об датчик від сухого обрізка качана (*cob_pieces*), важкого стебла або стороннього включення створює механічний чи акустичний сплеск, амплітуда якого часто перевищує сигнал від удару поодинокого зерна кукурудзи. В результаті класична система сприймає сміття як «залпові втрати зерна», генеруючи хибні сигнатури.
- Вплив нелінійних вібрацій сепаратора. Як було доведено в підрозділі 4.1, решітний стан працює в умовах складної АЧХ із жорстким нелінійним характером коливань. Вхідні вібраційні завади від механізмів сепаратора накладаються на корисний аналоговий сигнал п'єзо- та тензоелементів, що вимагає глибокої

цифрової фільтрації (ФНЧ/ФВЧ). Це призводить до часового запізнення реакції системи керування (латентність до 1,5 – 3,0 с).

- Ефект «перекриття сигналів» при високій щільності. При переході сепаратора в резонансний режим (Зона Б) щільність потоку зерна зростає. Одночасний удар 3–5 зерен об пластину реєструється тензодатчиком як один потужний імпульс, що призводить до значної систематичної недооцінки фактичних втрат.

4.5.2. Порівняльна характеристика за основними метрологічними та експлуатаційними параметрами

Для систематизації переваг розробленого оптико-електронного методу (YOLOv11 + Jetson Orin) було проведено порівняльний аналіз із серійними тензометричними та акустичними аналогами (табл. 4.7).

Таблиця 4.7 – Порівняльний аналіз систем контролю втрат зерна кукурудзи

Показник / Параметр	**Класичні тензометричні системи**	**Акустичні системи контролю**	**Розроблена оптико-електронна система**
Фізичний принцип реєстрації	Механічний імпульс сили удару об пластину	Акустична емісія (звуковий спектр удару)	Пряма оптична детекція та геометрія вписаних еліпсів
Точність класифікації (зерно / сміття)	Низька (< 50%). Реєструє будь-які удари	Середня (60–70%). Чутлива до щільності та твердості сміття	Висока (94,2%+). Чіткий семантичний поділ Corn-Loss та cob_pieces
Інваріантність до вібрацій сита	Низька (потребує апаратної віброізоляції)	Середня (чутлива до акустичного шуму)	Абсолютна. Вібрація рами не спотворює геометричний контур
Вимірювана величина	Кількість імпульсів за час (умовні од.)	Амплітудно-частотний сплеск (умовні од.)	Фізична площа заповнення (K_{fill}, %) та кількість зерен
Часова затримка (Latency)	500 – 1500 мс (через фільтрацію завад)	300 – 800 мс	< 7,1 мс (при 140,8 FPS на Jetson Orin)
Калібрування та знос	Механічне, часте (через налипання бруду/соку)	Акустичне (залежить від вологості вороху)	Програмне ($k_{ellipse} = 1{,}02$), безконтактний метод

4.5.3. Переваги переходу від умовних індикаторів до фізичних коефіцієнтів заповнення

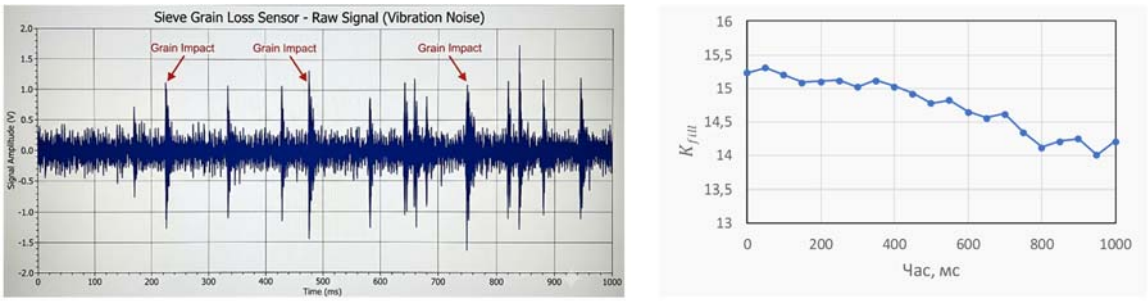
Ключовою науково-практичною відмінністю розробленого методу є зміна самої парадигми вимірювання.

Перехід від імпульсів до геометрії. Класичні тензометричні та акустичні датчики не вимірюють втрати у фізичних одиницях маси чи площі. Вони генерують умовний електричний сигнал (мВ/В або кількість сплесків за секунду), який потребує складного та нестабільного тарування під кожну культуру, врожайність та вологість.

Оптико-електронний метод через векторизований аналіз рамок та математичну модель вписаних еліпсів обчислює реальний коефіцієнт заповнення решета K_{fill} (%). Оскільки площа проекції прямо пропорційна об'єму та масі зерен кукурудзи, це дозволяє прямим шляхом перераховувати піксельну площу у фізичні втрати (кг/год або ц/га) з урахуванням швидкості руху комбайна, чи подачі зернового матеріалу в решітний сепаратор.

Використання розробленого методу забезпечує високу завадостійкість до пилу та змазування. Використання апаратних налаштувань камери через V4L2 (короткий час затвора EXPOSURE = 140) у поєднанні з оптимізованою за допомогою TensorRT FP16 нейромережею гарантує стійкість до ефекту *motion blur* навіть у зарезонансному режимі сепарації (Зона В).

Наочне підтвердження переваг розробленого оптико-електронного методу наведено на рис. 4.19.



а *б*

Рисунок 4.19 – Порівняльна осцилограма сигналів систем контролю втрат зерна: а –аналоговий сигнал класичного п'єзоелектричного (ударного) датчика з вираженим вібраційним шумом та завадами; б – динамічний сигнал коефіцієнта заповнення решета K_{fill}, розрахований розробленою оптико-електронною системою

Аналіз первинного осцилографічного сигналу класичного ударного датчика (рис. 4.19, а) показує, що корисні сплески від ударів зерен (*Grain Impact*) накладаються на потужний суцільний вібраційний шум амплітудою до $\pm$0,4В, викликаний динамічними коливаннями решітного стану. Це ускладнює амплітудну селекцію та призводить до хибних спрацьовувань від сміттєвої фракції.

Натомість сигнал розробленої оптико-електронної системи (рис. 4.19, б) безпосередньо відображає фізичний коефіцієнт заповнення сита K_{fill} (%) з високою часовою дискретизацією 140,8 FPS. Впровадження нейромережевого аналізу дозволило повністю ліквідувати вібраційну складову завад, забезпечивши стабільну та завадостійку часову динаміку вимірювань без використання додаткових фільтрів низьких частот.

Порівняльний аналіз довів перевагу розробленого оптико-електронного методу над класичними тензометричними та акустичними системами. Завдяки селективності ШІ (точність > 94%), ліквідації механічного зносу, апаратній інваріантності до вібрацій та затримці менше \$7,1 мс, розроблена система забезпечує перехід від умовних орієнтовних індикаторів до прецизійного вимірювання фізичного коефіцієнта заповнення решета K_{fill} у режимі реального часу.

Висновки до розділу 4

У розділі наведено науково обґрунтоване вирішення прикладної задачі створення та оптимізації апаратно-програмного комплексу оптико-електронного моніторингу втрат зерна кукурудзи на основі легковагових нейромережевих архітектур, адаптованих для виконання на вбудованій платформі NVIDIA Jetson Orin у режимі жорсткого реального часу.

Основними науковими та практичними результатами розділу є:

1. Сформовано та структуровано репрезентативний датасет, який ураховує жорсткі нелінійні динамічні характеристики решітного стану сепаратора (його амплітудно-частотну характеристику). Обґрунтовано розподіл даних за трьома характерними фізичними зонами руху вороху (дорезонансна, резонансна та зарезонансна/хаотична), що забезпечило високу узагальнюючу здатність моделі штучного інтелекту в умовах виникнення ефектів підкидання зерен, «кипіння» шару та динамічного розмиття зображення (*motion blur*).

2. Обґрунтовано вибір нейромережевої архітектури та стратегії оптимізації. Доведено недоцільність використання моделей сегментації (YOLOv11n-seg) для завдань реального часу через їхню високу обчислювальну складність (41,2 FPS). Здійснено перехід до полегшеної моделі детекції YOLOv11n, компіляція якої у середовищі TensorRT (FP16) у поєднанні з активацією механізму CUDA Lazy Loading та профілем *jetson_clocks* дозволила досягти швидкодії 140,8 FPS (затримка інференсу < 7,1 мс) при високій точності детекції чистого зерна ($mAP_{50} = 98{,}4\%$) та селекції сміттєвої фракції (94,2%).

3. Розроблено та відкалібровано геометричний метод визначення площі втрат. Для компенсації відмови від попіксельних масок реалізовано алгоритм векторного вписування еліпсів у прямокутні обмежувальні рамки (*BBox*). Експериментально встановлено та математично обґрунтовано коефіцієнт корекції еліпса $k_{ellipse} = 1{,}02$, який враховує кутастість насіння кукурудзи. Доведено, що відносна похибка обчислення площі за цим методом не перевищує $\pm 0{,}11\%$ порівняно з еталонною сегментацією у всьому діапазоні частотних режимів сепаратора.

4. Розроблено та випробувано програмне забезпечення (*corn_loss_final.py*). Скрипт реалізує апаратне налаштування камери через інтерфейс V4L2 (із коротким часом затвора EXPOSURE = 140 для усунення розмиття руху), векторний розрахунок відносного коефіцієнта заповнення решета ($K_{fill}, \%$) та ковзне оцінювання метрологічної швидкодії (FPS_{real}). Інтерфейс забезпечує наочну графічну візуалізацію через напівпрозорі еліпси та виведення технологічного оверлею (HUD) без суттєвого навантаження на CPU/GPU.

5. Проведено порівняльний аналіз із класичними системами контролю. Доведено суттєву перевагу розробленого оптико-електронного методу над тензометричними (ударними) та акустичними датчиками. Завдяки селективності ШІ ліквідовано хибні спрацьовування від ударів обрізків качанів та стебел, забезпечено абсолютну інваріантність вимірювань до механічних вібрацій рами сепаратора та здійснено перехід від умовних індикаторних імпульсів до прецизійного прямим визначенням фізичної площі заповнення (K_{fill}) в режимі реального часу.

ВИСНОВКИ

У монографії наведено теоретичне узагальнення та нове вирішення науково-прикладної задачі розробки та обґрунтування науково-технічних основ оптико-електронного контролю та керування процесами фракціонування зерна в реальному часі. Завдяки інтеграції методів комп'ютерного зору, математичного моделювання контурів та периферійних обчислювальних платформ забезпечено підвищення точності детекції та стабільності сепарації.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Науково обґрунтовано концепцію та конструктивні параметри оптико-електронних інспекційних модулів із закритою зоною контролю. Визначено раціональні параметри імпульсного безтіньового LED-освітлення (CRI > 90) та граничний час експозиції відеосенсора ($t_{exp} \leq 1/2000$ с), що забезпечує усунення ефекту динамічного розмиття при швидкості руху зернового потоку до $1{,}5$ м/с та ізоляцію від зовнішніх завад освітлення.
2. Розроблено математичний апарат та методичний інструментарій опису контурів зернівок на основі спектрального Фур'є-аналізу. Доведено, що використання нормованих низькочастотних гармонік (1-ї, 3-ї та 5-ї) у поєднанні з оптимізованими нейромережевими архітектурами сімейства YOLOv11 забезпечує високу точність розпізнавання (з похибкою класифікації на рівні $0{,}05 - 0{,}1\%$) та інваріантність алгоритмів до умов освітленості, запиленості та часткового перекриття об'єктів.
3. Встановлено аналітичні та емпіричні залежності зв'язку між двовимірними Geometric-ознаками (площа піксельної проекції об'єктів A_p) та їхніми 3D-масовими характеристиками (маса m). Запропоновано та відкалібровано алгоритм векторного вписування еліпсів у прямокутні обмежувальні рамки (BBox) із коефіцієнтом корекції $k_{ellipse} = 1{,}02$, що забезпечило обчислення площі та відносних втрат повноцінного зерна з похибкою не більше $\pm 0{,}11\%$ відносно еталонної сегментації.
4. Обґрунтовано вибір та архітектуру периферійного обчислювального комплексу (Edge AI) на базі рішень NVIDIA Jetson Orin.

Доведено, що застосування адаптованої моделі детекції YOLOv11n у зв'язку з фреймворком TensorRT (FP16) забезпечує метрологічну швидкодію системи на рівні $140{,}8\ FPS$ із затримкою інференсу $< 7{,}1$ мс, що є достатнім для реалізації замкненого контуру автоматичного регулювання технологічного обладнання в режимі жорсткого реального часу.

5. Проведено верифікацію розробленого апаратно-програмного комплексу на експериментальній віброрешітній установці. Порівняльний аналіз довів абсолютну перевагу розробленого оптико-електронного методу над класичними тензометричними та акустичними датчиками завдяки селективності розпізнавання ШІ, відсутності хибних спрацьовувань від солом'янистих домішок та інваріантності до механічних вібрацій сепаратора, що створює підґрунтя для впровадження концепції «Елеватор 4.0».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Baker, C. G. J. (2014). *Grain cleaning and separation technology*. Springer.
2. Brooker, D. B., Bakker-Arkema, F. W., & Hall, C. W. (1992). *Drying and storage of grains and oilseeds*. Springer.
3. Sahay, K. M., & Singh, K. K. (2004). *Unit operations of agricultural processing*. Vikas Publishing House.
4. Sharma, A., & Singh, Y. (2016). Optical sorting systems for agricultural products: A review. *Computers and Electronics in Agriculture, 123*, 141–152. https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.02.010
5. Ghosh, P. K., & Mohanty, S. K. (2020). Advances in pneumatic separation of agricultural materials: A review. *Journal of Food Process Engineering, 43*(5), e13395.
6. Zhou, Z., & Chu, K. (2017). CFD analysis of airflow distribution in grain separation channels. *Powder Technology, 321*, 257–268.
7. Misener, G. C., & O'Callaghan, J. R. (2001). Grain separation and handling systems. *Journal of Agricultural Engineering Research, 79*(2), 101–110.
8. Matveev, A. S. (2010). Pneumatic separation processes in grain cleaning machines. *Russian Agricultural Engineering, 3*, 12–18.
9. Poddubny, V. A., & Lysenko, V. P. (2017). Optimization of pneumatic separation channels in grain cleaners. *Engineering for Rural Development, 16*, 456–461.
10. Smith, J. R. (2015). *Post-harvest technology of cereals*. Woodhead Publishing.
11. PETKUS Technologie GmbH. (2026). *Home page – Grain processing systems*. https://www.petkus.com
12. PETKUS Technologie GmbH. (2026). *Products overview – Sorting, cleaning and separation systems*. https://www.petkus.com/products
13. PETKUS Technologie GmbH. (2026). *Gravity separators technical description*. https://www.petkus.com/products/sorting/gravity-separators
14. PETKUS Selecta B.V. (2024). *Aspirators and gravity separators ZZ series*. https://www.petkus-selecta.com
15. PETKUS Technologie GmbH. (2022). *Sorting technology brochure*. https://howto.petkus-group.com
16. PETKUS VRN. (2025). *Seed cleaning machine K-series technical data*. https://petkusvrn.com
17. Kongskilde Industries A/S. (2023). *Grain cleaning and pneumatic separation systems*. https://www.kongskilde.com

18. Cimbria A/S. (2024). *Seed cleaning and grain processing equipment overview*. https://www.cimbria.com
19. Buhler Group. (2025). *Grain processing and sorting solutions*. https://www.buhlergroup.com
20. Westrup A/S. (2024). *Seed cleaning machines and air screen cleaners*. https://www.westrup.com
21. Carter-Day International. (2023). *Seed and grain processing equipment*. https://www.carterday.com
22. PETKUS Technologie GmbH. (2026). *Optical sorting systems and seed processing*. https://www.petkus.com/products
23. PETKUS Technologie GmbH. (2026). *Engineering and turnkey grain processing solutions*. https://www.petkus.com/engineering
24. Feller, R. (2019). *Modern grain processing and cleaning systems*. Elsevier.
25. Chung, D. S., & Lee, S. H. (2018). Aerodynamic properties of grain and impurity separation in air classifiers. *Biosystems Engineering, 171*, 1–12.
26. Втрати зерна при зберіганні та перевезенні. *Агропро* : URL: https://agro-pro.com.ua/news/vtrati-zerna-pri-zberiganni-ta-perevezenni (дата звернення 10.03.2026).
27. Як зменшити втрати зерна після збору: технологічні рішення сучасного елеватора. *Bizagro* : URL: https://bizagro.com.ua/yak-zmenshyty-vtraty-zerna-pislya-zboru-tehnologichni-rishennya-suchasnogo-elevatora/ (дата звернення 10.03.2026).
28. Як автоматизувати зерносушильний комплекс та скоротити витрати? *New Elevator* : URL: https://new-elevator.com.ua/blog/yak-avtomatyzuvaty-zernosushylnyj-kompleks-ta-skorotyty-vytraty/ (дата звернення 10.03.2026).
29. Втрати зерна в дорозі можна мінімізувати. *Агробізнес сьогодні* : URL: https://agro-business.com.ua/agro/ekspertna-dumka/item/13571-vtraty-zerna-v-dorozi-mozhna-minimizuvaty.html (дата звернення 10.03.2026).
30. Kroupa, P. (2003). The outer quality loss during grain post-harvest treatment and handling. Research in Agricultural Engineering, 49(3), 91-102. doi: 10.17221/4958-RAE
31. Як знизити механічні втрати зерна. *GrainElevatorSoft – GES* : URL: https://elevator.com.ua/blog/mekhanichni-vtraty-zerna-na-elevatori-ta-shlyakhy-yikh-zmenshennya (дата звернення 10.03.2026).
32. Зниження втрат врожаю: ключові принципи зберігання зерна. *АгроЕліта* : URL: https://agroelita.info/znyzhennia-vtrat-vrozhaiu-kliuchovi-pryntsypy-zberihannia-zerna/ (дата звернення 10.03.2026).

33. Автоматизація зернопупктів. *BukLib* : URL: https://buklib.net/books/35499/ (дата звернення 10.03.2026).
34. Bomoi, M. I., Nawi, N. M., Abd Aziz, S., & Mohd Kassim, M. S. (2022). Sensing Technologies for Measuring Grain Loss during Harvest in Paddy Field: A Review. *AgriEngineering,* 4(1), 292-310. https://doi.org/10.3390/agriengineering4010020
35. Shen, Y., Gao, J., & Jin, Z. (2024). Research on Acoustic Signal Identification Mechanism and Denoising Methods of Combine Harvesting Loss. Agronomy, 14(8), 1816. https://doi.org/10.3390/agronomy14081816
36. Strelioff, W. P., Elliott, W. S., & Johnson, D. (1976)/ Grain loss monitor (Patent US4036065A). https://patents.google.com/patent/US4036065A/en
37. Shang, X., Ji, R., Zhang, H., Li, Z., He, Y., & Wang, W. (2026). Design of Wheat Cleaning Loss Detection Device Based on EDEM and Normal Distribution Threshold. Preprints. https://doi.org/10.20944/preprints202601.1461.v1
38. Farms.com Agriculture Videos. (2025). Acoustic Sensor Detects Blockages on Precision Planting's ReconBlockage *YouTube*. https://www.youtube.com/watch? v=csE2EouqwoE (дата звернення 10.03.2026).
39. Zhang G, Yang T, Chen M, Wang J, & Jin C. (2025). Research on a Combined Harvester Grain Loss Detection Sensor Based on Vibration Characteristic Optimization. *Sensors*, 4, 25(21): 6740. https://doi.org/10.3390/s25216740
40. Zhang, G., Yang, T., Chen, M., Wang, J., & Jin, C. (2025). Research on a Combined Harvester Grain Loss Detection Sensor Based on Vibration Characteristic Optimization. *Sensors (Basel, Switzerland)*, *25*(21), 6740. https://doi.org/10.3390/s25216740
41. Popular applications computer vision in waste management. *Viso Suite* : URL: https://viso.ai/applications/computer-vision-in-waste-management/ (дата звернення 12.03.2026).
42. Zhao, Z., Li, Y., Chen, J., & Xu, J., (2011). Grain separation loss monitoring system in combine harvester. Computers and Electronics in Agriculture, 76, 2, 183-188. https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.01.016
43. Датчик втрат зерна John Deere – призначення, перевірка та заміна. *Арт-Агро* : URL: https://art-agro.com.ua/news/dlya-chogo-potriben-datchik-vtrat-zerna-john-deere (дата звернення 12.03.2026).
44. Wu, Y., Li, X., Mao, E., Du, Y., Yang, F. (2020). Design and development of monitoring device for corn grain cleaning loss based on piezoelectric

effect. *Computers and Electronics in Agriculture*, 179, 105793. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105793

45. Why Optical Sorting Is Crucial in Grain, Nut, and Fruit Processing. *TDI Packsys* : URL: https://www.tdipacksys.com/blog/optical-sorting-in-grain-nut-and-fruit-processing/ (дата звернення 12.03.2026).
46. Wang, Y., Yang, Y., & Liu, H. (2026). A Review of High-Throughput Optical Sensors for Food Detection Based on Machine Learning. Foods, 15(1), 133. https://doi.org/10.3390/foods15010133
47. Process Automation. *PETKUS Technologie Gmbh* : URL: https://www.petkus.com/innovation/process-automation (дата звернення 12.03.2026).
48. Qiu, Z., Wang, F., Wang, W., Li, T., Jin, X., Qing, S., & Shi, Y. (2024). YOLO-SDL: a lightweight wheat grain detection technology based on an improved YOLOv8n model. *Frontiers in plant science*, 15, 1495222. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1495222
49. Li, Y., Tan, D. S., Cui, T., Fan, H., Xu, Y., Zhang, D., Qiao, M., Hou, Y., Xiong, L. (2024). Design and validation of novel maize grain cleaning loss detection system based on classification models of particle time-domain signals. *Computers and Electronics in Agriculture*, 220, 108908. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108908
50. Xia, J., Zhang, X., Zhang, J., Yang, C., Li, G., Yu, R., & Zhao, L. (2026). Vision-Guided Cleaning System for Seed-Production Wheat Harvesters Using RGB-D Sensing and Object Detection. *Agriculture*, 16(1), 100. https://doi.org/10.3390/agriculture16010100
51. Grain Elevators & Co-ops – NIR Spectroscopy Solutions. *SCiO* : URL: https://scionir.com/solutions/grain-and-oilseed/elevators-and-co-ops/ (дата звернення 12.03.2026).
52. Real-time NIR grain analysis. *IRIS Technology Solutions* : URL: https://www.iris-eng.com/real-time-nir-grain-analysis/ (дата звернення 12.03.2026).
53. Zengina, S. (2025). Closer Look at the SEVEN Capacitive Silo Level Sensor. *Seven Sensor* : URL: https://www.sevensensor.com/a-closer-look-at-the-seven-capacitive-silo-level-sensor (дата звернення 12.03.2026).
54. Silo Level Sensors: Reliable Monitoring for Bulk Material Storage. *Seven Sensor* : URL: https://www.sevensensor.com/silo-level-sensors-reliable-monitoring-for-bulk-material-storage (дата звернення 12.03.2026).
55. Capacitive sensors. *Dol-sensors* : URL: https://www.dol-sensors.com/products/capacitive (дата звернення 12.03.2026).

56. Grain Monitoring Systems for Grain Bins & Silos | Temperature & Level Control *FineTek* : URL: https://www.fine-tek.com/en/products/dataList/1016 (дата звернення 12.03.2026).
57. АСУТП сушіння зерна. – *Лубнимаш* : URL: https://lubnymash.com/asu/asktp-sushinnya-zerna (дата звернення 12.03.2026).
58. Monitoring Equipment for Grain and Feed Industry. *GEAPS Media* : URL: https://www.grainfeedequipment.com/equipment/category/safety-transportation-equipment/monitoring-equipment (дата звернення 12.03.2026).
59. Tymchuk, C., Kundenko, P., Vakhonina, L., & Mardziavko, V. (2021). Organization and management of the technological process of the elevator for improvement of quality grain indicators. *Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science*, 25(4), 100-109. DOI: 10.31521/2313-092X/2021-4(112)-10
60. Байор М. Автоматизація зерносушарок в Україні: як контроль процесів стає умовою виживання елеватора. *GrowHow.in.ua* : URL: https://www.growhow.in.ua/avtomatyzatsiia-zernosusharok-v-ukraini-iak-kontrol-protsesiv-staie-umovoiu-vyzhyvannia-elevatora/ (дата звернення 12.03.2026)
61. Grain Processing Equipment Market Size, Share & 2030 Growth Trends Report. *Mordor Intelligence* : URL: https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/global-grain-processing-equipment-market (дата звернення 12.03.2026)
62. Grain And Seed Cleaning Equipment Market Survey: Global Market Will Reach $870 Million In 2029. *Fotma* : URL: https://www.fotmamill.com/news/grain-and-seed-cleaning-equipment-market-survey-global-market-will-reach-870-million-in-2029/ (дата звернення 12.03.2026).
63. Kar, S. (2026). Stationary Grain Dryer Growth Opportunities: Market Size Forecast to 2034. *PRDUA Research* : URL: https://www.datainsightsmarket.com/reports/stationary-grain-dryer-1558789 (дата звернення 12.03.2026).
64. Grain Processing Equipment Market Size, Share & Growth Report 2035, *S&S Insider* : URL: https://www.snsinsider.com/reports/grain-processing-equipment-market-6939 (дата звернення 12.03.2026).
65. Grain & Seed Cleaning Equipment Market Size, Trends 2026-2035. *Global Growth Insights* : URL: https://www.globalgrowthinsights.com/market-

reports/grain-seed-cleaning-equipment-market-105330 (дата звернення 12.03.2026).

66. Seed Processing Machinery Market – Manufacturers, suppliers, Trends & Industry Analysis, *Mordor Intelligence* : URL: https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/seed-processing-machinery-market (дата звернення 12.03.2026).
67. Innovation-driven Approaches to Post-harvest Grain Conservation and Loss Reduction. *WFP China COE* : URL: http://www.wfpchinacoe.net/2025-05/07/content_117861725.shtml (дата звернення 12.03.2026).
68. Kang, C., Mu, X., Novaski Seffrin, A., Di Gioia, F., He, L. (2025)/ A recursive segmentation model for bok choy growth monitoring with Internet of Things (IoT) technology in controlled environment agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 230, 109866 https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109866
69. Yi, C., Zhao, Y., Wu, X., Tang, M., & Gu, C. (2025). An Improved YOLOv5-Based Method for Robotic Vision Detection of Grain Caking in Silos. *Journal of Measurements in Engineering*, 13(2) : 504–517. https://doi.org/10.21595/jme.2025.24634.
70. AI-Driven Grain Sorting for Cleaner, Safer, Higher-Value Yields. *Robovision* : URL: https://robovision.ai/ucp-ai-powered-optical-grain-sorting (дата звернення 12.03.2026).
71. Cao, Z., Sun, S., & Bao, X. (2025). A Review of Computer Vision and Deep Learning Applications in Crop Growth Management. *Applied Sciences*, 15(15), 8438. https://doi.org/10.3390/app15158438
72. Hussain, S., Cheema, M. J. M., Saleem, S. R., Elbeltagi, A., & Aqib, M. (2025). Implementation of Artificial Intelligence in Agriculture: An Editorial Note. *AgriEngineering*, 7(12), 401. https://doi.org/10.3390/agriengineering7120401
73. Zhang, Q., Chen, Q., Xu, W., Xu, L., & Lu, E. (2024). Prediction of Feed Quantity for Wheat Combine Harvester Based on Improved YOLOv5s and Weight of Single Wheat Plant without Stubble. *Agriculture*, 14(8), 1251. https://doi.org/10.3390/agriculture14081251
74. Digital Agriculture in Ukraine 2025. *IT Ukraine Association* : URL: https://itukraine.org.ua/en/digital-agriculture-in-ukraine-2025/ (дата звернення 16.03.2026).
75. Mehdipour, S., Mirroshandel, S.A., & Tabatabaei, S.A. (2026). Vision transformers in precision agriculture: A comprehensive survey. *Intelligent*

Systems with Applications, 29, 200617. https://doi.org/10.1016/j.iswa.2025.200617

76. Sourish, S., & Yifei, S. (2025). Automated Multi-Class Crop Pathology Classification via Convolutional Neural Networks: A Deep Learning Approach for Real-Time Precision Agriculture. *arXiv*, https://doi.org/10.48550/arXiv.2507.09375.
77. Jegham, N., Koh, C.Y., Abdelatti, Ma., & Hendawi, A. (2025). YOLO Evolution: A Comprehensive Benchmark and Architectural Review of YOLOv12, YOLO11, and Their Previous Versions. *arXiv*, https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.00201
78. Zou, X., Zhu, X., Zhang, W., Qian, Y., & Li, Y. (2025). Computer Vision and Artificial Intelligence Driving the Advancement of Agricultural Intelligence in Dynamic Environments. *Agriculture,* 15(20), 2112. https://doi.org/10.3390/agriculture15202112
79. Sapkota, R., Qureshi, R., Flores-Calero, M., Badgujar, C., Nepal, U., Poulose, A., Zeno, P., Vaddevolu, P., Khan, S., Shoman, M., Yan, .H, & Karkee M. (2025). YOLO11 to Its Genesis: A Decadal and Comprehensive Review of The You Only Look Once (YOLO) Series. *arXiv,* https://arxiv.org/html/2406.19407v5
80. Afonso, M., & Giufrida, V. (2023). Editorial: Synthetic data for computer vision in agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 14: 1277073. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1277073
81. Liu, J., Wang, X., Chen, Q., Yan, P., & Guo, D. (2025). Intelligent deep learning architecture for precision vegetable disease detection advancing agricultural new quality productive forces. *Frontiers in plant science*, 16, 1611865. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1611865
82. Min, X., Ye, Y., Xiong, S., & Chen, X. (2025). Computer Vision Meets Generative Models in Agriculture: Technological Advances, Challenges and Opportunities. *Applied Sciences*, 15(14), 7663. https://doi.org/10.3390/app15147663
83. EU: New AI Model Lets Farmers Train Weed Recognition in Real Time. *Global AG Tech* : URL: https://www.globalagtechinitiative.com/digital-farming/eu-new-ai-model-lets-farmers-train-weed-recognition-in-real-time/ (дата звернення 16.03.2026).
84. Luo, L., Wei, J., Ni, L., Pei, C., Gong, H., Zhu, H., Zhu, C., Chen, M., Mu, Y. & Gong, H. (2025). Accurate fine-grained weed instance segmentation amidst dense crop canopies using CPD-WeedNet. *Frontiers in plant science*, 16: 1632684. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1632684

85. Engineers using 'digital twins' to improve agriculture, health, manufacturing and more. *Iowa State University* : URL: https://trac-ai.iastate.edu/2025/04/09/engineers-using-digital-twins-to-improve-agriculture-health-manufacturing-and-more/uncategorized/ (дата звернення 16.03.2026).
86. Arthur, L., Mahnan, S., He, L., Hussain, M., Heinemann, P., & Brunharo, C. (2025). YOLOv7-CBAM and DeepSORT with pixel grid analysis for Real-Time weed localization and Intra-Row density estimation in apple orchards. *Computers and Electronics in Agriculture*, 239(C), 111071, https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.111071
87. Antognoli, V., Presutti, L., Bovo, M., Torreggiani, D., & Tassinari, P. (2025). Computer Vision in Dairy Farm Management: A Literature Review of Current Applications and Future Perspectives. *Animals*, 15(17), 2508. https://doi.org/10.3390/ani15172508
88. Guarnido-Lopez, P., Pi, Y., Tao, J., Mendes, E. D. M., & Tedeschi, L. O. (2025). Computer vision algorithms to help decision-making in cattle production. *Animal frontiers*, 14(6), 11–22. https://doi.org/10.1093/af/vfae028
89. Meng, H., Zhang, L., Yang, F., Hai, L., Wei, Y., Zhu, L., & Zhang, J. (2025). Livestock Biometrics Identification Using Computer Vision Approaches: A Review. *Agriculture*, 15(1), 102. https://doi.org/10.3390/agriculture15010102
90. Menezes, G. L., Mazon, G., Ferreira, R. E. P., Cabrera, V. E., Dorea, J. R. R. (2024). Artificial intelligence for livestock: a narrative review of the applications of computer vision systems and large language models for animal farming, *Animal Frontiers*, 14, 6, 42–53. https://doi.org/10.1093/af/vfae048
91. Computer Vision in Agriculture and Farming: 7 Use Cases. *Lemberg Solutions* : URL: https://lembergsolutions.com/blog/computer-vision-agriculture-and-farming-use-cases (дата звернення 16.03.2026).
92. Edge AI for Sustainable, High-Yield Farming. *221e* : URL: https://www.221e.com/blog/iot/edge-ai-for-sustainable-high-yield-farming (дата звернення 16.03.2026).
93. Xu, D., Li, S., Gu, Z., Xi, G., & Ma, J. (2026). Advancing Leafy Vegetable Yield Estimation Through Image Inpainting to Mitigate Occlusion Effects. *Agronomy*, 16(3), 368. https://doi.org/10.3390/agronomy16030368

94. Top 10 Rounds for Ukrainian Startups in 2024 Amounted to €286M. *The Recursive* : URL: https://therecursive.com/biggest-funding-rounds-investments-ukraine-startups-2024/ (дата звернення 16.03.2026).
95. Sheffer, R., Pinchover, C., Zisman, H., Ozeri, D., & Litman, R. (2026). Under-Canopy Terrain Reconstruction in Dense Forests Using RGB Imaging and Neural 3D Reconstruction. *arXiv*, https://arxiv.org/html/2601.22861v2
96. Edge AI In Smart Agriculture. *Meegle* : URL: https://www.meegle.com/en_us/topics/edge-ai-solutions/edge-ai-in-smart-agriculture (дата звернення 16.03.2026).
97. How Edge AI is Reshaping Agriculture? *XenonStack* : URL: https://www.xenonstack.com/blog/edge-ai-agriculture (дата звернення 16.03.2026).
98. Embedded Systems Developer Kits & Modules from NVIDIA Jetson, *NVIDIA* : URL: https://www.nvidia.com/en-us/autonomous-machines/embedded-systems/ (дата звернення 16.03.2026).
99. Dilmegani, C. (2006). Top 15 Edge AI Chip Makers with Use Cases in 2026. *AIMultiple* : URL: https://research.aimultiple.com/edge-ai-chips/ (дата звернення 16.03.2026).
100. Fezari, M. & Al Dahoud, A. (2026). Best Edge AI Hardware for industrial and Robotic Applications. *ResearchGate*, https://www.researchgate.net/publication/399671610_Best_Edge_AI_Hardware_for_industrial_and_Robotic_Applications
101. Edge-AI Accelerators (Jetson vs Coral TPU): A Detailed Comparison for Developers, *ThinkRobotics* : URL: https://thinkrobotics.com/blogs/learn/edge-ai-accelerators-jetson-vs-coral-tpu-a-detailed-comparison-for-developers (дата звернення 16.03.2026).
102. Yu, P., Teng, F., Zhu, W., Shen, C., Chen, Z., & Song, J. (2025). Cloud–edge–device collaborative computing in smart agriculture: architectures, applications, and future perspectives. *Frontiers in plant science*, 16 : 1668545. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1668545
103. Synthetic Data & Digital Twins: Revolutionizing Agricultural Field Trials. *Agmatix* : URL: https://www.agmatix.com/reports/synthetic-data-and-digital-twins-improving-the-efficiency-efficacy-and-safety-of-agricultural-field-trials/ (дата звернення 16.03.2026).
104. 2025 Digital Twin Statistics. *Hexagon* : URL: https://hexagon.com/resources/insights/digital-twin/statistics (дата звернення 16.03.2026).

105. Agricultural Trends. Digital Farming in Ukraine, Explained. Zoola, : URL: https://zoolatech.com/blog/agricultural-trends-digital-farming-in-ukraine-how-agriculture-technology-helps-industry-boost-bottom-line/ (дата звернення 16.03.2026).
106. Digitizing Agribusiness in Ukraine. *CRDF Global*: URL: https://www.crdfglobal.org/news/digitizing-agribusiness-ukraine/ (дата звернення 16.03.2026).
107. Top 15 Agritech Companies in Ukraine (2026). *Ensun* : URL: https://ensun.io/search/agritech/ukraine (дата звернення 16.03.2026).
108. AI-Based Weed Recognition and Removal Market Latest Report 2026, *InsightAce Analytic* : URL: https://www.insightaceanalytic.com/report/ai-based-weed-recognition-and-removal-market/3151 (дата звернення 16.03.2026).
109. 10 Leading Agricultural Intelligent Weeding Robot Companies Shaping the Future in 2025 and Beyond. *Research and Markets* : URL: https://www.researchandmarkets.com/articles/key-companies-in-agricultural-intelligent-weeding-robot-market (дата звернення 16.03.2026).
110. AI Agriculture Startups 2025: Best Apps & Courses. *Farmonaut* : URL: https://farmonaut.com/blogs/ai-agriculture-startups-2025-best-apps-courses (дата звернення 16.03.2026).
111. Потапова Н., Веселовська Н., Кузьміна М. Порівняльний аналіз стійкості поліноміальної та сплайн-інтерполяції в аналізі даних. *Наука і техніка сьогодні.* 2026. № 5(59). https://doi.org/10.52058/2786-6025-2026-5(59)-5618-5627
112. Мальований В, Матвеєв В, Стущанський Ю, Волканін Є. Аналіз енергетичних характеристик похибки відновлення при дискретному представленні сигналів. *Повітряна міць України*. 2026. Том 2. № 9 С. 145-149. https://doi.org/10.33099/2786-7714-2025-2-9-145-149
113. Шевченко О. В., Петренко І. С. Аналіз абсолютної та відносної похибок при використанні складеної формули Сімпсона. *Обчислювальні технології та інженерія*. 2023. № 1(45). С. 34–41.
114. Хомюк Д, Самотий В. Адаптація перетворення Фур'є для відтворення неперіодичних сигналів. *ФММІТ.* 2023 № 38. С. 156-65. https://doi.org/10.15407/fmmit2023.38.160
115. Плічко А.М., Акбаш К.С., Луньова М.В. Математична статистика: навчальний посібник. Кропивницький: «КОД», 2024. 220 с.

116. Васильєв В. М. Теорія ймовірностей в радіотехніці : підручник / В. М. Васильєв, С. Я. Жук. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2023. 362 с.
117. Єгоршин О. О. Довідник з математичної статистики з прикладами обчислень у MatLab : навчально-практичний посібник. / О. О. Єгоршин, Л. М. Малярець, Б. В. Сінкевич. Харків : Вид. ХНЕУ, 2009. 508 с.
118. Андрікевич С, Тужанський С. Удосконалений метод адаптивної гістограмної еквалізації кольорових зображень очного дна. *Опт-ел. інф-енерг. техн.* 2025. Том 49, № 1 С. 82-88. https://doi.org/10.31649/1681-7893-2025-49-1-82-88
119. Єрьоміна Н. С., Колтун Ю. М., Беспалий А. В., Шматько Ю. М. Аналіз сучасних методів сегментації зображень в інтересах навігації мобільних роботів. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2024. №2. С.82–86. https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.2.082
120. Костенко П., Слободянюк В., Карлов Д., Ветлугін Є., Лєбєдєв В. Метод фільтрації мультиплікативного шуму на зображеннях з використанням технології сурогатних даних. *Системи обробки інформації*. 2021. № 4(167). С. 45–57. https://doi.org/10.30748/soi.2021.167.0

ДОДАТОК А
ЛІСТИНГ РОЗРОБЛЕНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

А.1. Лістинг програми автоматизованого визначення втрат зерна кукурудзи та оцінювання динамічних характеристик обчислювального конвеєра на платформі NVIDIA Jetson Orin

```
import time
import cv2
import numpy as np
from ultralytics import YOLO

# Для прецизійної синхронізації CUDA контексту на Jetson Orin
try:
    import pycuda.driver as cuda
    import pycuda.autoinit
    CUDA_AVAILABLE = True
except ImportError:
    CUDA_AVAILABLE = False
    print("[ПОПЕРЕДЖЕННЯ] Бібліотеку pycuda не знайдено. "
          "Вимірювання часу виклику може включати затримки CPU.")

def evaluate_processing_pipeline(engine_path, video_source, total_frames=1000):
    """ Функція експериментальної оцінки часових характеристик виклику
    та підрахунку реального FPS обчислювального конвеєра TensorRT. """
    print(f"[ІНІЦІАЛІЗАЦІЯ] Завантаження TensorRT рушія: {engine_path}")
    # Завантаження оптимізованої моделі TensorRT (.engine)
    model = YOLO(engine_path, task='detect')

    # Ініціалізація відеопотоку (камера або високоякісний MJPEG файл)
    cap = cv2.VideoCapture(video_source)
    if not cap.isOpened():
        raise IOError(f"Неможливо відкрити джерело відео: {video_source}")
        # Списки для накопичення часових інтервалів (в мілісекундах)
    t_pre_list = []
    t_inf_list = []
    t_post_list = []
    t_frame_list = []
        print(f"[СТАРТ ТЕСТУ] Виконується обробка {total_frames} кадрів...")
    processed_frames = 0
    # Розігрів CUDA контексту (Warming up) для виключення ефекту "холодного старту"
    for _ in range(10):
        ret, frame = cap.read()
        if ret:
            # Центральний кроп 960x960 для фіксації робочої зони решета
            h, w, _ = frame.shape
            crop_frame = frame[0:960, (w-960)//2:(w-960)//2 + 960]
            _ = model(crop_frame, verbose=False)

    # Повертаємо покажчик відео на початок після розігріву
    cap.set(cv2.CAP_PROP_POS_FRAMES, 0)
    while processed_frames < total_frames:
        t_start_frame = time.perf_counter_ns()
        ret, frame = cap.read()
```

```
        if not ret:
            # Якщо відео закінчилося раніше, закольцовуємо для тесту
            cap.set(cv2.CAP_PROP_POS_FRAMES, 0)
            continue
        # ---------- ЕТАП 1: ПОПЕРЕДНЯ ОБРОБКА (PRE-PROCESS) ----------
        t_start_pre = time.perf_counter_ns()
        # Виконання центрального кропу до розміру 960x960 пікселів
        h, w, _ = frame.shape
        crop_frame = frame[0:960, (w-960)//2:(w-960)//2 + 960]
        t_end_pre = time.perf_counter_ns()

        # ---------- ЕТАП 2: ВИКЛИК НЕЙРОМЕРЕЖІ (INFERENCE) ----------
        t_start_inf = time.perf_counter_ns()
        # Прямий прохід нейромережі TensorRT
        results = model(crop_frame, verbose=False, device=0)
        # Апаратна синхронізація потоків GPU для точного вимірювання часу тензорних
ядер
        if CUDA_AVAILABLE:
            cuda.Context.synchronize()
        t_end_inf = time.perf_counter_ns()

        # ---------- ЕТАП 3: ПОСТ-ОБРОБКА ТА NMS (POST-PROCESS) ----------
        t_start_post = time.perf_counter_ns()
        # Витягування результатів двокласової детекції (Corn-Loss та cob_pieces)
        result = results[0]
        boxes = result.boxes.xyxy.cpu().numpy()  # Координати Bounding Boxes
        clss = result.boxes.cls.cpu().numpy()    # Індекси класів
        conf = result.boxes.conf.cpu().numpy()  # Коефіцієнти впевненості ШІ
        # Логічний підрахунок кількості об'єктів для поточного кадру
        corn_count = np.sum(clss == 0)
        cob_count = np.sum(clss == 1)
        t_end_post = time.perf_counter_ns()
        t_end_frame = time.perf_counter_ns()
        # Переведення часу з наносекунд у мілісекунди
        t_pre = (t_end_pre - t_start_pre) / 1e6
        t_inf = (t_end_inf - t_start_inf) / 1e6
        t_post = (t_end_post - t_start_post) / 1e6
        t_frame = (t_end_frame - t_start_frame) / 1e6
        # Збереження результатів (пропускаємо перші кадри для стабільності метрик)
        t_pre_list.append(t_pre)
        t_inf_list.append(t_inf)
        t_post_list.append(t_post)
        t_frame_list.append(t_frame)
        processed_frames += 1
        # Виведення поточної технологічної інформації в консоль
        if processed_frames % 100 == 0:
            print(f"Оброблено кадрів: {processed_frames}/{total_frames} | "
                  f"Виявлено втрат Corn-Loss: {corn_count}, домішок: {cob_count}")
    cap.release()
    # Математична обробка та усереднення результатів експерименту
    avg_pre = np.mean(t_pre_list)
    std_pre = np.std(t_pre_list)
    avg_inf = np.mean(t_inf_list)
    std_inf = np.std(t_inf_list)
    avg_post = np.mean(t_post_list)
    std_post = np.std(t_post_list)
    avg_frame = np.mean(t_frame_list)
    # Розрахунок реального значення частоти обробки кадрів за формулою (4.3)
    fps_real = 1000.0 / avg_frame
    # Виведення підсумкового науково-технічного звіту
```

```
    print("\n" + "="*50)
    print("ЗВІТ ПРО ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО МОДУЛЯ")
    print("="*50)
    print(f"Попередня обробка (Pre-process) : {avg_pre:.2f} ± {std_pre:.2f} мс")
    print(f"Час виклику ШІ (Inference Latency): {avg_inf:.2f} ± {std_inf:.2f} мс")
    print(f"Пост-обробка та NMS (Post-process): {avg_post:.2f} ± {std_post:.2f} мс")
    print(f"Загальний час на кадр (T_frame)  : {avg_frame:.2f} мс")
    print("-"*50)
    print(f"Реальна частота обробки кадрів  : {fps_real:.1f} FPS (Гц)")
    print("="*50)

if __name__ == "__main__":
    # Конфігураційні шляхи для запуску на Jetson Orin
    # Перед запуском рекомендується виконати команду в терміналі: sudo jetson_clocks
    ENGINE_MODEL_PATH = "yolo11n_optimized_fp16.engine"
    VIDEO_SOURCE_PATH = "laboratory_bench_stream.mp4"
    evaluate_processing_pipeline(
        engine_path=ENGINE_MODEL_PATH,
        video_source=VIDEO_SOURCE_PATH,
        total_frames=1000
    )
```

А.2. Лістинг програми автоматичного моніторингу заповнення решета зерном з графічним представленням результатів

```
# -*- coding: utf-8 -*-
import cv2
import numpy as np
import time
from ultralytics import YOLO

# 1. Завантажуємо оптимізовану апаратну TensorRT модель
# Вкажіть точний шлях до вашого нового .engine файлу
model = YOLO("runs/detect/train3/weights/best.engine", task="detect")

# Налаштування геометричної зони аналізу (центральний квадрат)
SQUARE_SIZE = 960
TOTAL_ROI_PIXELS = SQUARE_SIZE * SQUARE_SIZE

# Класи після чистого навчання: 0: 'Corn-Loss', 1: 'cob_pieces'
GRAIN_CLASS_ID = 0

# ==============================================================================
# ВІДКАЛІБРОВАНИЙ КОЕФІЦІЄНТ ФОРМИ КУКУРУДЗИ
# Забезпечує ідеальний збіг площі детектора з еталонною сегментацією
# ==============================================================================
CORRECTION_FACTOR = 1.02
# ==============================================================================

print("Ініціалізація камери Jetson Orin (V4L2)...")
cap = cv2.VideoCapture(0, cv2.CAP_V4L2)

# Стандартні апаратні налаштування камери для усунення розмиття руху
```

```
cap.set(cv2.CAP_PROP_FOURCC, cv2.VideoWriter_fourcc(*'MJPG'))
cap.set(cv2.CAP_PROP_FRAME_WIDTH, 1920)
cap.set(cv2.CAP_PROP_FRAME_HEIGHT, 1080)
cap.set(cv2.CAP_PROP_FPS, 30)

cap.set(cv2.CAP_PROP_AUTO_EXPOSURE, 1)
try:
    cap.set(cv2.CAP_PROP_AUTO_WB, 0)
except AttributeError:
    cap.set(44, 0)

cap.set(cv2.CAP_PROP_GAIN, 0)
cap.set(cv2.CAP_PROP_EXPOSURE, 140)
cap.set(cv2.CAP_PROP_WB_TEMPERATURE, 5500)

window_name = "Аналіз сепарації кукурудзи – Jetson Orin (TensorRT)"
cv2.namedWindow(window_name, cv2.WINDOW_NORMAL)
cv2.resizeWindow(window_name, 750, 750)

frame_count_fps = 0
fps_timer = time.time()
fps_display = 0.0

print("\n=== СИСТЕМУ ЗАПУЩЕНО НА МАКСИМАЛЬНІЙ ШВИДКОСТІ ===")
print("Для виходу натисніть ESC у вікні відео\n")

try:
    while True:
        ret, frame = cap.read()
        if not ret:
            time.sleep(0.001)
            continue

        # Розрахунок реального FPS процесу
        frame_count_fps += 1
        current_time = time.time()
        elapsed_time = current_time – fps_timer
        if elapsed_time >= 0.5:
            fps_display = frame_count_fps / elapsed_time
            frame_count_fps = 0
            fps_timer = current_time

        # Кадрування робочої зони 960x960
        h, w, _ = frame.shape
        xmin = int((w – SQUARE_SIZE) / 2)
        xmax = xmin + SQUARE_SIZE
        ymin = 0
        ymax = SQUARE_SIZE
        roi_frame = frame[ymin:ymax, xmin:xmax]

        # Надшвидкий інференс TensorRT на GPU
        results = model.predict(
```

```
            source=roi_frame,
            imgsz=640,
            conf=0.35,        # Оптимальний поріг відсікання завад на металі
            iou=0.45,         # Усунення накладання рамок (NMS)
            max_det=100,
            verbose=False
        )
        result = results[0]

        total_grain_area_pixels = 0
        fill_percentage = 0.0

        # Отримуємо кадр із красиво нанесеними рамками класів (штатний метод YOLO)
        display_frame = result.plot(boxes=True, labels=True, conf=True)

        if result.boxes is not None:
            boxes_tensor = result.boxes.data

            # Фільтруємо рамки виключно для класу чистого зерна (ID 0)
            grain_indices = (boxes_tensor[:, 5] == GRAIN_CLASS_ID)
            grain_boxes = boxes_tensor[grain_indices]

            if len(grain_boxes) > 0:
                boxes_cpu = grain_boxes.cpu().numpy()

                # Швидкий векторний аналіз геометричних параметрів рамок
                widths = boxes_cpu[:, 2] - boxes_cpu[:, 0]
                heights = boxes_cpu[:, 3] - boxes_cpu[:, 1]

                # Математичний розрахунок площі з урахуванням коригування форми
                ellipses_areas = (0.785 * widths * heights) * CORRECTION_FACTOR
                total_grain_area_pixels = np.sum(ellipses_areas)

            if total_grain_area_pixels > TOTAL_ROI_PIXELS:
                total_grain_area_pixels = TOTAL_ROI_PIXELS

            fill_percentage = (total_grain_area_pixels / TOTAL_ROI_PIXELS) * 100

        # Чорна інформаційна плашка зверху кадру для зручності читання оператором
        cv2.rectangle(display_frame, (0, 0), (SQUARE_SIZE, 80), (0, 0, 0), -1)

        # Виведення ключових технологічних показників сепарації
        text_metrics    =    f"FPS:    {fps_display:.1f}       |       Grain    Fill:
{fill_percentage:.2f}%  |  Pixels: {int(total_grain_area_pixels):,}"
        cv2.putText(display_frame, text_metrics, (25, 50),
                    cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 1.0, (0, 255, 0), 2, cv2.LINE_AA)

        # Масштабуємо прев'ю для виведення на монітор оператора
        preview_frame = cv2.resize(display_frame, (750, 750),
interpolation=cv2.INTER_LINEAR)
        cv2.imshow(window_name, preview_frame)
```

```
        if cv2.waitKey(1) & 0xFF == 27:  # Натисніть ESC для завершення роботи
            break

except KeyboardInterrupt:
    print("\nРоботу зупинено оператором.")

finally:
    cap.release()
    cv2.destroyAllWindows()
    print("Камеру звільнено. Програму завершено успішно.")
```

А.3. Лістинг програми автоматичного моніторингу заповнення решета зерном з виведенням результатів в консоль

```
# -*- coding: utf-8 -*-
import cv2
import numpy as np
import time
from ultralytics import YOLO

# Завантажуємо оптимізовану TensorRT модель
model = YOLO("runs/detect/train3/weights/best.engine", task="detect")

# Геометрія зони аналізу
SQUARE_SIZE = 960
TOTAL_ROI_PIXELS = SQUARE_SIZE * SQUARE_SIZE

# Клас чистого зерна кукурудзи
GRAIN_CLASS_ID = 0
CORRECTION_FACTOR = 1.02

print("Ініціалізація камери Jetson Orin (V4L2)...")
cap = cv2.VideoCapture(0, cv2.CAP_V4L2)

# Апаратні налаштування камери
cap.set(cv2.CAP_PROP_FOURCC, cv2.VideoWriter_fourcc(*'MJPG'))
cap.set(cv2.CAP_PROP_FRAME_WIDTH, 1920)
cap.set(cv2.CAP_PROP_FRAME_HEIGHT, 1080)
cap.set(cv2.CAP_PROP_FPS, 30)

cap.set(cv2.CAP_PROP_AUTO_EXPOSURE, 1)
try:
    cap.set(cv2.CAP_PROP_AUTO_WB, 0)
except AttributeError:
    cap.set(44, 0)

cap.set(cv2.CAP_PROP_GAIN, 0)
cap.set(cv2.CAP_PROP_EXPOSURE, 140)
cap.set(cv2.CAP_PROP_WB_TEMPERATURE, 5500)
```

```
frame_count = 0
fps_timer = time.time()
fps_display = 0.0
print("\n=== ЗАПУСКАЄМО КОНСОЛЬНИЙ МОНІТОРИНГ ===")
print("Графічне вікно вимкнено для максимального FPS.")
print("Для зупинки натисніть Ctrl+C в терміналі.\n")

try:
    while True:
        ret, frame = cap.read()
        if not ret:
            time.sleep(0.001)
            continue
        frame_count += 1
        current_time = time.time()
        elapsed_time = current_time - fps_timer

        # Оновлюємо лічильник FPS кожні 0.5 секунди
        if elapsed_time >= 0.5:
            fps_display = frame_count / elapsed_time
            frame_count = 0
            fps_timer = current_time

        # Швидке кадрування
        h, w, _ = frame.shape
        xmin = int((w - SQUARE_SIZE) / 2)
        xmax = xmin + SQUARE_SIZE
        roi_frame = frame[0:SQUARE_SIZE, xmin:xmax]

        # Чистий інференс на GPU (без малювання та логів Ultralytics)
        results = model.predict(
            source=roi_frame,
            imgsz=640,
            conf=0.35,
            iou=0.45,
            max_det=100,
            verbose=False
        )
        result = results[0]
        fill_percentage = 0.0
        total_grain_area_pixels = 0
        if result.boxes is not None:
            boxes_tensor = result.boxes.data
            grain_indices = (boxes_tensor[:, 5] == GRAIN_CLASS_ID)
            grain_boxes = boxes_tensor[grain_indices]

            if len(grain_boxes) > 0:
                boxes_cpu = grain_boxes.cpu().numpy()
                widths = boxes_cpu[:, 2] - boxes_cpu[:, 0]
                heights = boxes_cpu[:, 3] - boxes_cpu[:, 1]
```

```
                ellipses_areas = (0.785 * widths * heights) * CORRECTION_FACTOR
                total_grain_area_pixels = np.sum(ellipses_areas)
            if total_grain_area_pixels > TOTAL_ROI_PIXELS:
                total_grain_area_pixels = TOTAL_ROI_PIXELS

            fill_percentage = (total_grain_area_pixels / TOTAL_ROI_PIXELS) * 100

        # Виводимо дані в один рядок, що динамічно оновлюється (\r)
        print(f"\r[МОНІТОР]  Швидкість:  {fps_display:.1f}  FPS  |  Заповнення:
{fill_percentage:.2f}% | Пікселів зерна: {int(total_grain_area_pixels):,}", end="")
except KeyboardInterrupt:
    print("\n\nМоніторинг зупинено оператором.")
finally:
    cap.release()
    print("Камеру успішно закрито.")
```

Наукове видання

Сергій Петрович **СТЕПАНЕНКО**
Альвіан Ярославович **КУЗЬМИЧ**

НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ОСНОВИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО КОНТРОЛЮ ТА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ ФРАКЦІОНУВАННЯ ЗЕРНА

Монографія

Комп’ютерна верстка Лисенко Н.М.

Підписано до друку 14.09.2026 Формат 60x80/16. Папір офсетний.
Гарнітура Times. Ум. друк. арк. 12,55 Обл.-вид. арк. 10,05
Тираж 300 прим. Зам. № 2433

Видавець і виготівник ФОП Лисенко М. М.
16600, м. Ніжин Чернігівської області, вул. Шевченка, 20
Тел.: (067) 4412124
E-mail: vidavec.lisenko@gmail.com

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції
серія ДК № 2776 від 26.02.2007 р.