

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ГЕОДЕЗІЇ, ЗЕМЛЕУСТРОЮ ТА АГРОІНЖЕНЕРІЇ
КАФЕДРА АГРОІНЖЕНЕРІЇ

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

д.т.н., професор

_____ Костянтин ДЯДЮРА

« ____ » _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

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

РОЗРОБКА АВТОМАТИЧНОГО СОРТУВАЛЬНОГО СТОЛА ДЛЯ КАРТОПЛІ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ

Науковий керівник: професор, д.т.н.

_____ Костянтин ДЯДЮРА

Рецензент: к.т.н.

_____ Степан ПОПОВ

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

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

_____ Сергій ГОЛОВАЧ

ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет геодезії, землеустрою та агроінженерії

Кафедра агроінженерії

Рівень вищої освіти другий (магістр)

Галузь знань 20 Аграрні науки та продовольство

Спеціальність 208 «Агроінженерія»

Освітня програма Агроінженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри агроінженерії

Костянтин ДЯДЮРА

«___» _____ 2026 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ Сергій ГОЛОВАЧ

1. Тема кваліфікаційної роботи:

«Розробка автоматичного сортувального стола для картоплі з використанням технічного зору»

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

затверджені наказом ректора Одеського державного аграрного університету № 117 від « 05 » _____ 09 _____ 2025 р.

Строк подання здобувачем кваліфікаційної роботи 15 червня 2026 року.

2. Об'єкт дослідження: процеси сортування картоплі за розміром та якістю, а також автоматизована система технічного зору для детекції дефектів бульб (механічні пошкодження, парша, фітофтороз, зелені ділянки) на роликовому інспекційному конвеєрі

3. Предмет дослідження: кінематичні та технологічні параметри роликового інспекційного конвеєра; алгоритми обробки зображень та класифікації дефектів за допомогою згорткових нейронних мереж (MobileNetV2); апаратна реалізація сенсорного та виконавчого модулів; принципи просторово-часової синхронізації підсистем.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

5.1. Теоретико-методичний розділ: розглянути сучасні алгоритми машинного зору для детекції дефектів і хвороб картоплі, обґрунтувати вибір архітектури нейронної мережі (MobileNetV2) для реалізації на недорогій апаратній платформі.

5.2. Дослідницько-аналітичний розділ: розробити математичну модель алгоритму класифікації, включаючи оцінку геометричних параметрів (площа,

діаметр, довжина, ширина) та ідентифікацію дефектів поверхні за допомогою згорткової нейронної мережі.

5.3. Проєктно-рекомендаційний розділ: виконати технологічний та кінематичний розрахунок роликового транспортера (крок, діаметр роликів, кількість роликів, потужність приводу), обрати мотор-редуктор; розрахувати параметри сенсорного вузла: поле зору (FOV) відеокамери, фокусну відстань об'єктива, необхідний світловий потік LED-освітлення.

6. Орієнтовний перелік графічного та табличного матеріалу:

6.1. До теоретико-методичного розділу: фізико-механічні властивості бульб; сучасні системи сортування картоплі; порівняльний аналіз механічних та оптико-електронних систем.

6.2. До дослідницько-аналітичного розділу: кінематика руху бульб на роликовому конвеєрі; взаємодія технічних систем (оптичної, обчислювальної, виконавчої).

6.3. До проєктно-рекомендаційного розділу:

Схема роликового транспортера; компонування сенсорного вузла; 3D-модель сортувального модуля та принципова схема керування

7. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:

продуктивність сортувального стола – 150–250 кг/год; точність розпізнавання дефектів – 90–95%; швидкість руху бульб на конвеєрі – 0,1–0,3 м/с

9. Дата видачі завдання: « 27 » 09 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	Кількість кредитів	Примітка
1.	Визначення теми, об'єкта та предмета дослідження	Лютий 2026	0,25	
2.	Отримання завдання і складання змісту кваліфікаційної роботи	Лютий 2026	0,25	
3.	Складання календарного плану – графіку з підготовки кваліфікаційної роботи	Березень 2026	0,5	
4.	Написання першого розділу кваліфікаційної роботи	Березень 2026	2,0	
5.	Вивчення матеріалів базових підприємств	Квітень 2026	1,0	
6.	Написання другого розділу кваліфікаційної роботи	Квітень 2026	2,0	

7.	Написання третього розділу кваліфікаційної роботи	Травень 2026	3,0	
8.	Написання висновків, списку літератури	Травень 2026	0,5	
9.	Перевірка кваліфікаційної роботи науковим керівником	Червень 2026		
10.	Доопрацювання роботи після зауважень наукового керівника	Червень 2026	0,5	
11.	Підготовка до захисту: доповідь, ілюстративний матеріал	Червень 2026	0,5	
12.	Подання кваліфікаційної роботи на кафедру	15 червня 2026		
13.	Перевірка кваліфікаційної роботи на оригінальність	Червень 2026		
14.	Попередній захист на кафедрі	Червень 2026		
15.	Рецензування кваліфікаційної роботи	Червень 2026		
16.	Захист кваліфікаційної роботи	18-20 червня 2026	1,5	
	Загальна кількість		12	

Здобувач ОС бакалавр

_____ Сергій ГОЛОВАЧ

Науковий керівник

_____ Костянтин ДЯДЮРА

Гарант ОП

_____ Дмитро ДОМУЩІ

РЕФЕРАТ

Дипломний проект містить: 90 сторінок, 19 рисунків, 18 таблиць, 23 джерела за переліком посилань.

Об'єкт дослідження: процеси сортування картоплі за розміром та якістю, а також автоматизована система технічного зору для детекції дефектів бульб (механічні пошкодження, парша, фітофтороз, зелені ділянки) на роликовому інспекційному конвеєрі.

Мета роботи: підвищення ефективності післязбиральної обробки картоплі шляхом розробки автоматичного сортувального стола з використанням технічного зору на базі одноплатного комп'ютера Raspberry Pi, згорткової нейронної мережі MobileNetV2 та пневматичного виштовхувача, з інтеграцією в систему керування.

Методи дослідження: аналітичний огляд науково-технічної літератури та патентних джерел; кінематичний та технологічний розрахунок роликового конвеєра; математичне моделювання алгоритмів класифікації зображень (сегментація, виділення геометричних параметрів, згорткова нейронна мережа); інженерні розрахунки електронних та пневматичних вузлів.

Отримані результати: Розроблений автоматичний сортувальний стіл для картоплі з використанням технічного зору є технічно реалізованим, безпечним та економічно доцільним для впровадження в малих та середніх фермерських господарствах. Система дозволяє знизити витрати ручної праці на 70%, підвищити точність сортування до 90–95%, окупитись протягом одного сезону.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: КАРТОПЛЯ, СОРТУВАЛЬНИЙ СТІЛ, ТЕХНІЧНИЙ ЗІР, МАШИННЕ НАВЧАННЯ, ЗГОРТКОВА НЕЙРОННА МЕРЕЖА, MobileNetV2, РАСПБЕРРІ ПАЙ, ДЕФЕКТИ БУЛЬБ, ПНЕВМАТИЧНИЙ ВИШТОВХУВАЧ

					14.17 - КР.012.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РЕФЕРАТ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Головач						
Перевір.		Дядюра К. О.					5	1
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						

ЗМІСТ

	С.
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ СОРТУВАННЯ КАРТОПЛІ.....	11
1.1 Агротехнічні вимоги до якості сортування продовольчої та насіннєвої картоплі.....	11
1.2. Огляд механічних та оптико-електронних систем сортування коренеплодів.....	15
1.3. Аналіз алгоритмів машинного зору (Machine Vision) для детекції дефектів і хвороб сільськогосподарської продукції.....	19
Висновки.....	26
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ СОРТУВАННЯ.....	28
2.1 Кінематика руху бульб на роликовому інспекційному конвеєрі та час знаходження в полі зору камери.....	28
2.2 Математична модель алгоритму класифікації: оцінка геометричних параметрів та ідентифікація уражень поверхні.....	33
2.3 Взаємодія технічних систем: оптичної, обчислювальної та пневматичної (або електромеханічної) при відбракуванні.....	37
2.4 Розрахункові алгоритми просторово-часової синхронізації для запобігання розстроювання виконавчих механізмів.....	41
Висновки.....	46
РОЗДІЛ 3. ІНЖЕНЕРНИЙ РОЗРАХУНОК ТА ПРОЄКТУВАННЯ КОМПОНЕНТІВ СОРТУВАЛЬНОГО СТОЛА.....	48
3.1 Технологічний та кінематичний розрахунок роликового транспортера і вибір мотор-редуктора.....	48

					14.17 - КР.012.0.000 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.	Головач				ЗМІСТ		Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевір.	Дядюра К. О.							6	2
Реценз.									
Н. Контр.									
Затверд.	Дядюра К. О.								

3.2 Компонування сенсорного вузла: розрахунок поля зору (FOV) відеокамери та параметрів світлодіодного (LED) освітлення.....	52
3.3 Визначення робочих характеристик пневматичних ежекторів (відкидачів) для сепарації бульб.....	55
3.4 3D-моделювання модернізованого сортувального модуля та складання принципової схеми керування.....	58
Висновки.....	64
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ	66
4.1 Аналіз небезпечних факторів під час експлуатації автоматизованих сортувальних ліній.....	68
4.2 Електробезпека під час роботи з високошвидкісними контролерами, оптичними модулями та пневмосистемами.....	69
4.3 Ергономічні вимоги до робочого місця оператора-контролера сортувальної лінії.....	71
Висновки.....	75
РОЗДІЛ 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ПРОЄКТУ.....	77
5.1 Капітальні витрати на розробку та монтаж апаратно-програмного комплексу машинного зору.....	77
5.2 Визначення економії фонду оплати праці та зменшення втрат від неякісного сортування.....	79
5.3 Оцінка показників економічної ефективності та терміну окупності проєкту модернізації.....	80
Висновки.....	85
ВИСНОВКИ.....	87
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	89

ВСТУП

Актуальність теми. Картопля є однією з найважливіших сільськогосподарських культур в Україні. Післязбиральна обробка, зокрема сортування за розміром та якістю, суттєво впливає на збереженість, ринкову вартість та конкурентоздатність продукції. Відповідно до ДСТУ 9221:2023, частка дефектних бульб у продовольчій картоплі не повинна перевищувати 4%, а для насіннєвого матеріалу – 1%. Однак більшість фермерських господарств використовують застарілі механічні калібратори, які розділяють бульби лише за розміром і не виявляють дефектів (механічні пошкодження, парша, фітофтороз, зелені ділянки). Ручне перебирання потребує значної кількості працівників (3–5 осіб на лінію), має низьку продуктивність та страждає від людського фактора (втома, суб'єктивізм). Промислові оптико-електронні сортувальники (Smart Grader, Crop Vision, MEYER KI 4) забезпечують високу точність (96–99%), але їх вартість (5–30 млн грн) недоступна для малих та середніх господарств. Розвиток недорогих одноплатних комп'ютерів (Raspberry Pi), доступних камер високої роздільної здатності та відкритих бібліотек машинного навчання (TensorFlow Lite, OpenCV) створює передумови для створення доступних автоматизованих систем сортування. Тому розробка автоматичного сортувального стола для картоплі з використанням технічного зору на базі легковагових нейромережових архітектур є актуальним науково-технічним завданням, що має практичне значення для агроінженерії.

Об'єкт дослідження – процеси сортування картоплі за розміром та якістю, а також автоматизована система технічного зору для детекції дефектів бульб на роликовому інспекційному конвеєрі.

					14.17 - КР.012.0.000 ПЗ								
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата									
Розроб.		Головач			ВСТУП			Літ.		Аркуш		Аркушів	
Перевір.		Дядюра К. О.								8		2	
Реценз.													
Н. Контр.													
Затверд.		Дядюра К. О.											

Предмет дослідження – кінематичні та технологічні параметри роликового інспекційного конвеєра; алгоритми обробки зображень та класифікації дефектів за допомогою згорткових нейронних мереж (MobileNetV2); апаратна реалізація сенсорного та виконавчого модулів; принципи просторово-часової синхронізації підсистем.

Мета роботи – підвищення ефективності післязбиральної обробки картоплі шляхом розробки автоматичного сортувального стола з використанням технічного зору на базі одноплатного комп'ютера Raspberry Pi, згорткової нейронної мережі MobileNetV2 та пневматичного виштовхувача, з інтеграцією в систему керування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати агротехнічні вимоги до сортування продовольчої та насіннєвої картоплі згідно з чинними стандартами, а також існуючі механічні та оптико-електронні системи сортування коренеплодів.

2. Розглянути сучасні алгоритми машинного зору для детекції дефектів і хвороб картоплі, обґрунтувати вибір архітектури нейронної мережі для реалізації на недорогій апаратній платформі.

3. Виконати теоретичне обґрунтування кінематичних параметрів роликового інспекційного конвеєра, часу знаходження бульби в полі зору камери та умов якісного знімання.

4. Розробити математичну модель алгоритму класифікації, включаючи оцінку геометричних параметрів та ідентифікацію дефектів поверхні.

5. Провести інженерні розрахунки роликового транспортера (вибір мотор-редуктора, кроку, діаметра роликів), сенсорного вузла (поле зору камери, параметри LED-освітлення) та пневматичного виштовхувача (необхідна сила, час спрацювання).

6. Розробити 3D-модель сортувального модуля та принципову електричну схему керування на базі Raspberry Pi 5.

Методи дослідження. У роботі використано: аналітичний огляд науково-технічної літератури та патентних джерел; методи кінематичного та

					14.17 - КР.012.0.000 ПЗ	Аркуш
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

технологічного розрахунку машин; математичне моделювання алгоритмів комп'ютерного зору (сегментація, виділення геометричних параметрів, згорткові нейронні мережі); інженерні розрахунки електронних та пневматичних вузлів.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено конструкторську документацію на автоматичний сортувальний стіл для картоплі, включаючи 3D-модель, специфікацію компонентів та принципову схему керування. Створено алгоритм роботи системи технічного зору на базі Raspberry Pi з використанням бібліотек OpenCV та TensorFlow Lite. Визначено технічні характеристики пристрою: продуктивність 150–250 кг/год, точність розпізнавання дефектів 90–95%, вартість компонентів 54 тис. грн. Результати можуть бути впроваджені в малих та середніх фермерських господарствах, а також використані в навчальному процесі при підготовці інженерів-механіків з агроінженерії.

					14.17 - КР.012.0.000 ПЗ	Аркуш
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ

СОРТУВАННЯ КАРТОПЛІ

1.1. Агротехнічні вимоги до якості сортування продовольчої та насіннєвої картоплі

Ефективність зберігання, ринкова вартість та технологічні властивості картоплі значною мірою залежать від якості післязбиральної обробки. СОРТУВАННЯ є критично важливим технологічним етапом, що забезпечує поділ бульб на фракції за розміром, відбракування дефектної продукції та підготовку насіннєвого матеріалу до садіння. Агротехнічні вимоги до цього процесу регламентуються чинними національними стандартами та технологічними умовами [1, 2].

Нормативно-правова база

В Україні основними нормативними документами, що встановлюють вимоги до якості сортування картоплі, є ДСТУ 9221:2023 «Картопля продовольча. Технічні умови», ДСТУ 4013-2001 «Сортові та посівні якості картоплі насіннєвої. Технічні умови» та ДСТУ 4993:2008 «Картопля для промислового перероблення. Технічні умови». З 2023 року на зміну застарілим ГОСТ 7176-85 та ГОСТ 26545-85 введено новий національний стандарт ДСТУ 9221:2023, який гармонізовано з сучасними європейськими вимогами та поширюється на продовольчу картоплю ботанічних сортів (*Solanum tuberosum* L.) та їхніх гібридів різних термінів дозрівання. Для насіннєвої картоплі чинним залишається ДСТУ 4013-2001, який встановлює норми сортових та посівних якостей [3, 4].

					14.17 - КР.012.1.000 ПЗ								
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата									
Розроб.		Головач			РОЗДІЛ 1				Літ.	Аркуш	Аркушів		
Перевір.		Дядюра К. О.									11	12	
Реценз.													
Н. Контр.													
Затверд.		Дядюра К. О.											

Агротехнічні вимоги до сортування продовольчої картоплі (рисунок 1.1)

Продовольча картопля після сортування повинна задовольняти вимоги щодо калібрування, допустимих дефектів та вмісту шкідливих домішок. Відповідно до ДСТУ 9221:2023, основні вимоги включають [5 - 10]:

1. *Калібрування за розміром.* Картоплю сортують на фракції за поперечним діаметром. Для продовольчої картоплі встановлено такі фракції: дрібна — до 35–40 мм, велика — понад 35–40 мм. Окремо виділяють фракцію розміром 45–55 мм для спеціальних цілей. Як свідчить аналіз досліджень, щілинна форма калібрувальних отворів найповніше відповідає умовам поділу вороху картоплі на фракції за найменшим поперечним діаметром бульби.



Рисунок 1.1 – Вимоги до сортування продовольчої картоплі

2. *Допустимі дефекти.* Кількість пошкоджених бульб (механічні пошкодження, ураження хворобами та шкідниками) не повинна перевищувати 4% від загальної маси. Стандарт також нормує вміст токсичних елементів у продовольчій картоплі та висуває вимоги до калібрування.

3. *Вимоги до автоматизації.* Основна вимога до процесу сортування — відсутність стікаючої робочої рідини на бульбах і транспортерах, що особливо актуально при впровадженні автоматичних систем з технічним зором.

Вимоги до насінневої картоплі

Насіннева картопля підлягає значно жорсткішим вимогам, оскільки від її якості безпосередньо залежить майбутній урожай. Норми сортових і посівних якостей насінневої картоплі встановлені ДСТУ 4013-2001. Цей стандарт регламентує [11]:

1. Розмірні фракції. Оптимальна вага насінневої бульби для посадки становить 50–80 г. Як зазначають фахівці, при сортуванні насінневої картоплі можливо виділяти фракцію 28–35 мм, однак такий розмір потребує дещо більше уваги під час зберігання та подальшого догляду.

2. Сортovu чистоту. Насіннева картопля вважається сертифікованою, якщо вона відповідає вимогам нормативно-правових актів (ДСТУ 4013-2001, ДСТУ 4014-2001) за сортовою чистотою та посівними якостями.

3. Репродукцію. Насіння картоплі першої репродукції повинно відповідати вимогам ДСТУ 4013-2001. Чим вища якість насінневої картоплі, тим якіснішим є майбутній урожай. Сертифікація насінневої картоплі проводиться після лабораторного аналізу на відповідність ДСТУ 4013-2001. Картопля, вироблена в країнах Європейського Союзу, повинна додатково відповідати вимогам Виконавчих Директив Комісії ЄС № 20 і 21 від 2014 року.

Фізико-механічні властивості бульб як основа для сортування

Проектування будь-якого сортувального обладнання вимагає врахування фізико-механічних властивостей бульб. Як висвітлено у дослідженнях Кириляка Ю.О., розмірно-масові, статистичні та фізико-механічні властивості бульб і вороху картоплі є визначальними для обґрунтування параметрів сортувальних поверхонь з різними формами калібрувальних отворів. До ключових характеристик належать (рисунок 1.2) [12]:

– коефіцієнт форми бульб (співвідношення довжини до поперечного діаметра);

					14.17 - КР.012.1.000 ПЗ	Аркуш
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- густина та пружні властивості;
- коефіцієнт тертя по різних поверхнях (гума, метал, поліуретан);
- здатність до пошкодження при механічній дії.

ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БУЛЬБ ЯК ОСНОВА ДЛЯ СОРТУВАННЯ КАРТОПЛІ



АГРОТЕХНІЧНІ ВИМОГИ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ СОРТУВАННЯ НА ОСНОВІ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ

Рисунок 1.2 – Фізико-механічні властивості бульб як основа для сортування

Показники браку та допустимих відхилень [13]

При сортуванні картоплі виділяють такі категорії браку:

- механічні пошкодження (порізи, удари, обриви шкірки);
- пошкодження хворобами (фітофтороз, парша звичайна та порошиста, ризоктоніоз);
- пошкодження шкідниками (дротяник, нематода);
- нестандартний розмір (дрібна фракція менше встановленого мінімуму);
- деформація (неправильна форма, нарости, «опукла» бульба).

Допустимі відхилення для продовольчої картоплі регламентуються ДСТУ 9221:2023. Для насіннєвого матеріалу вимоги значно жорсткіші: допускається не більше 1% бульб із візуальними ознаками хвороб.

Таким чином, агротехнічні вимоги до сортування картоплі визначають чіткі параметри для поділу бульб на фракції та відбракування дефектної продукції. На їхній основі розробляються технічні вимоги до засобів автоматизації, зокрема до автоматичного сортувального стола з використанням технічного зору [14].

1.2 Огляд механічних та оптико-електронних систем сортування коренеплодів

Сучасні системи сортування картоплі можна класифікувати на дві основні групи: механічні (калібратори) та оптико-електронні (сенсорні). Кожна з цих груп має свої переваги, недоліки та сфери застосування (рисунк 1.3) [15].



Рисунок 1.3 – Сучасні системи сортування картоплі

Механічні системи сортування

Механічні сортувальні машини (калібратори) є найбільш поширеними у вітчизняному сільському господарстві. У вітчизняній і зарубіжній практиці відомі картоплесортувальні машини з різними робочими органами. За конструктивним виконанням вони поділяються на [16]:

– *Роликові (вальцьові) калібратори.* Принцип дії базується на проходженні бульб між обертовими вальцями з регульованим зазором, який збільшується вздовж лінії. Як зазначається у технічній літературі, з бункера картопля потрапляє на секцію сепарації, де відбувається калібрування за допомогою регульованих поліуретанових спіральних вальців. Переваги: висока продуктивність, простота конструкції. Недоліки: можливість пошкодження бульб при занадто малому зазорі.

– *Сітчасті (решітні) калібратори.* Сорткування відбувається шляхом просіювання бульб через отвори певного діаметра. За результатами досліджень Бояти В.О., найпростішими для сорткування картоплі є калібрувальні пристрої транспортерного типу з нескінченною стрічкою та щілинними отворами. На підставі аналізу виведеного рівняння регресійного аналізу було визначено значення варійованих чинників, які забезпечують найбільшу ефективність калібрування: швидкість транспортерного робочого органа 0,43 м/с, подача матеріалу 23,12 т/год, кількість робочих органів 4 шт.

– *Стрічкові калібратори з регульованим натягом.* Використовуються для сорткування на 2–3 фракції. Наприклад, сортувальна машина Krukowiak Gawron M647 призначена для сорткування картоплі та цибулі, зібраних безпосередньо з полів восени та навесні з буртів, на 3 розмірні фракції.

Механічні системи мають суттєві обмеження: вони здатні розрізняти бульби лише за розміром, не реагуючи на колір, форму та зовнішні дефекти. Для вибракування пошкоджених екземплярів у таких лініях традиційно застосовується ручна праця, що знижує продуктивність та створює «людський фактор» (втома, зниження уваги, суб'єктивізм) [17].

Оптико-електронні системи

Оптико-електронне сорткування є більш сучасним та технологічним рішенням. Автоматичні сортувальні машини використовують передові технології, такі як оптичні датчики, системи на основі ваги та механічні методи. Принцип дії полягає в скануванні кожної бульби за допомогою камер з наступною обробкою зображення та прийняттям рішення про направлення

					14.17 - КР.012.1.000 ПЗ	Аркуш
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

продукту у відповідний канал за допомогою пневматичних або механічних виштовхувачів [18].

Smart Grader (GeJo Grading, Нідерланди). Це оптичний сортувальник картоплі та цибулі, який сортує за розміром, формою та видимими характеристиками, такими як тріщини, зелені ділянки, нерівності та пошкодження паршею та дротяником. Для насінневої картоплі точність розміру має життєво важливе значення, тому точне сортування за розміром одразу стає прибутковим. Кілька Smart Graders вже працюють на великих виробництвах насінневої картоплі в Нідерландах, Данії, Шотландії та Франції. Переваги: сортувальник не втомлюється, вироби з видимим дефектом легко розпізнаються та відокремлюються, що значно економить робочу силу та забезпечує покращену якість сортування. Крім того, виробник пропонує компактний мобільний пристрій Reader, який вимірює довжину і діаметр, обчислює об'єм і вагу, а також підраховує кількість картоплі. Виробники насінневої картоплі можуть взяти цю компакту машину на своє поле для пробного збору врожаю, що запобігає зараженню [19].

Downs Crop Vision (Франція). Це оптичне обладнання нового покоління, яке призначене для сортування картоплі. Машина має підвищену продуктивність до 100 т/год. Сортувальник оснащений промисловими камерами в поєднанні з алгоритмом штучного інтелекту. Crop Vision аналізує всю поверхню матеріалу, що рухається в потоці по конвеєру, під кутом 360 градусів. Пристрій точно класифікує продукцію за якістю: картопля без дефектів, зелена, зіпсована, деформована і з тріщинами, а також ідентифікує грудки, гальку та інші сторонні предмети. За рахунок спеціалізованих автоматичних пальців-ежекторів пристрій сортує матеріал на три фракції: якісну картоплю, картоплю другого сорту та відходи.

Оптичні сортувальники серії KI 4 (MEYER). Оснащені камерою з надвисокою роздільною здатністю (UHD), здатною розпізнавати дрібні дефекти. Унікальна дзеркальна система в поєднанні з круговим освітленням гарантує всебічний аналіз кожної картоплі, незалежно від її форми [20].

					14.17 - КР.012.1.000 ПЗ	Аркуш
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Конвеєрні оптичні сортувальники з III (Optimum Sorting). Використовують штучний інтелект, який вчиться ідентифікувати продукти та дефекти на основі зображень.

Промислові лінії для сортування картоплі інтегрують оптичні системи, які можуть сканувати картоплю та виявляти пошкоджені, гнилі або дефектні екземпляри. Впровадження оптичного сортувальника нового покоління забезпечує вирішення низки проблем: зниження використання ручної праці; підвищення якості сортування та зниження її собівартості; підвищення безпеки праці та зниження впливу на навколишнє середовище (таблиця 1.1) [21].

Таблиця 1.1 – Порівняльний аналіз систем

Характеристика	Механічні системи	Оптико-електронні системи
Принцип дії	Розмірна сепарація (отвори, вальці)	Аналіз зображення (камери + ІІІ)
Параметри сортування	Тільки розмір	Розмір, форма, колір, дефекти, сторонні предмети
Продуктивність	До 25 т/год	До 100 т/год
Точність	Середня (до 85-90%)	Висока (до 96-99%)
Ручна праця	Обов'язкова для вибракування	Мінімізована або відсутня
Вартість	Низька–середня	Висока
Експлуатаційні витрати	Низькі	Помірні (калібрування камер)
Пошкодження продукту	Можливі (при занадто малих зазорах)	Практично відсутні

З проведеного порівняльного аналізу видно, що оптико-електронні системи мають значні переваги в якості та функціональності сортування, однак їхня висока вартість обмежує доступність для малих та середніх господарств. Тому розробка доступної автоматичної системи сортування з використанням технічного зору для невеликих фермерських підприємств є актуальним науково-технічним завданням.

1.3 Аналіз алгоритмів машинного зору (Machine Vision) для детекції дефектів і хвороб сільськогосподарської продукції

Системи технічного зору (Machine Vision) відіграють ключову роль у сучасних автоматизованих сортувальних комплексах. Їхнє застосування дозволяє автоматизувати процеси контролю якості, знизити вплив людського фактора та підвищити швидкість і точність сортування. Аналіз алгоритмів для детекції дефектів і хвороб картоплі включає класичні методи обробки зображень, методи машинного навчання та сучасні підходи на основі глибокого навчання.

Класичні методи обробки зображень

До появи методів глибокого навчання широко застосовувалися такі підходи [22]:

- Сегментація за кольоровими просторами. Використання колірних моделей RGB, HSV, $L^*a^*b^*$ для виділення зелених ділянок (ознака позеленіння бульб), темних плям (гниль, механічні пошкодження) та сторонніх включень. Дозволяє виявляти дефекти за пороговими значеннями кольорових каналів.

- Методи виділення меж (edge detection). Алгоритми Кенні, Собеля, Prewitt для виявлення тріщин та механічних пошкоджень шкірки. Ефективні при контрастному зображенні дефектів.

- Морфологічні операції. Ерозія, дилатація, замикання та розмикання для покращення якості бінарних масок дефектів, видалення шумів та заповнення «дірок» у виділених областях.

- Аналіз текстур. Використання статистичних методів (матриці спільної появи GLCM, методи на основі локальних двійкових шаблонів LBP) для ідентифікації аномальних ділянок поверхні, таких як парша або інші структурні зміни шкірки [23].

Класичні методи відносно прості в реалізації та не вимагають великих обчислювальних ресурсів, що дозволяє їх використовувати на недорогих мікроконтролерах. Однак вони недостатньо стійкі до змін умов освітлення,

					14.17 - КР.012.1.000 ПЗ	Аркуш
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

варіацій форми та кольору бульб, а також не здатні ефективно виявляти множинні або перекриті дефекти (рисунок 1.3).

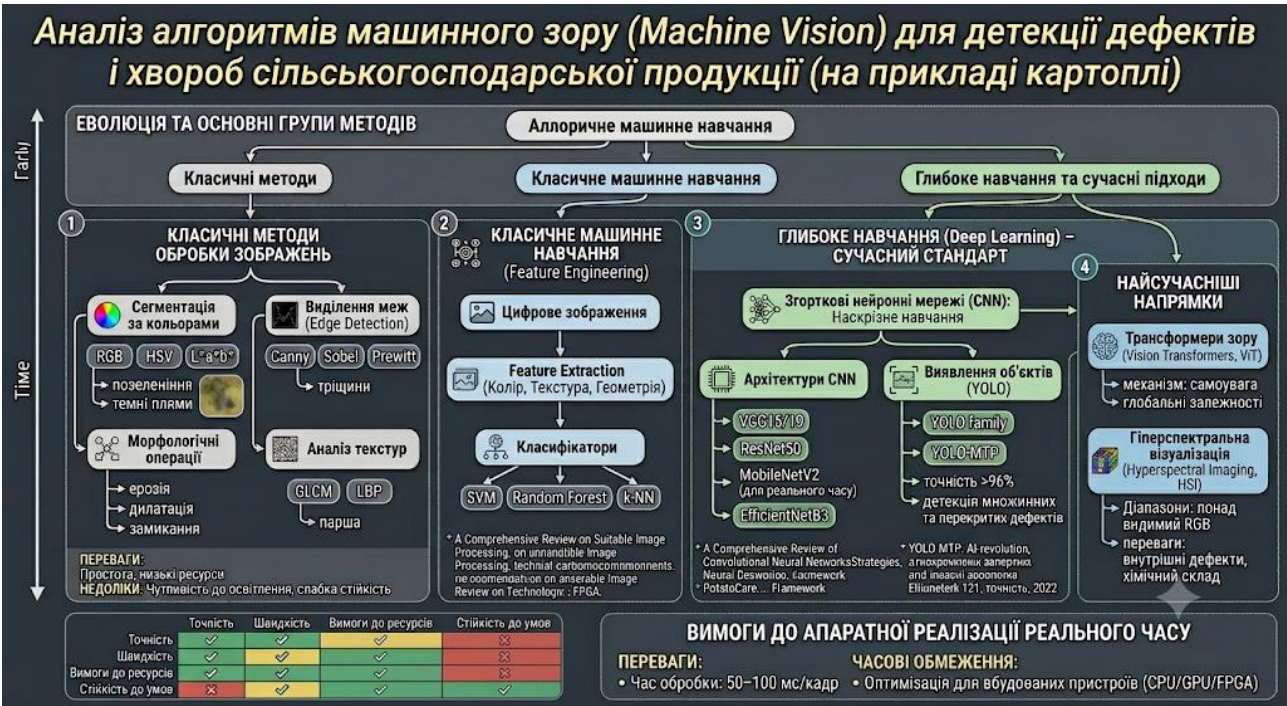


Рисунок 1.3 – Аналіз алгоритмів машинного зору

Методи машинного навчання (класичні)

Класичні методи машинного навчання передбачають ручне виділення ознак (feature extraction) з подальшою класифікацією:

- Метод опорних векторів (SVM). Використовується для бінарної та багатокласової класифікації бульб на «якісна/дефектна». Працює на попередньо виділених ознаках (колірні гістограми, текстурні характеристики, геометричні параметри).
- Випадковий ліс (Random Forest). Ансамблевий метод, що забезпечує високу точність класифікації та стійкість до перетренування. Використовується для класифікації типів дефектів.
- k-найближчих сусідів (k-NN). Простий алгоритм для класифікації за схожістю до еталонних зразків. Ефективний при невеликих навчальних вибірках.

Як висвітлено у дослідженні «A Comprehensive Review on Suitable Image Processing and Machine Learning Technique for Disease Identification of Tomato and Potato Plants», існуючі методології аналізують найбільш ефективні підходи для

виявлення хвороб, і серед них чільне місце займають методи, які забезпечують виділення відповідних ознак із цифрових зображень уражених рослин з наступною класифікацією за допомогою SVM, випадкових лісів та згорткових нейронних мереж.

Глибоке навчання (Deep Learning)

У сучасних системах технічного зору домінуючим підходом є глибоке навчання, зокрема згорткові нейронні мережі (Convolutional Neural Networks, CNN). Згідно з оглядом «A Comprehensive Review of Convolutional Neural Networks based Disease Detection Strategies in Potato Agriculture», CNN та алгоритми машинного навчання відіграють ключову роль в автоматизації ідентифікації хвороб картоплі, надаючи виробникам потужні інструменти для аналізу великих обсягів сільськогосподарських даних.

Основні архітектури CNN для сортування картоплі:

- ResNet (Residual Network). Архітектура з залишковими зв'язками, що дозволяє навчати глибокі мережі без проблеми зникаючого градієнта. Ефективна для класифікації складних типів дефектів.
- VGG (Visual Geometry Group). Класична архітектура з послідовними згортковими шарами. Використовується як основа для трансферного навчання.
- MobileNet. Легковагова архітектура, оптимізована для роботи на мобільних та вбудованих пристроях. Важлива для реалізації систем реального часу на недорогих апаратних платформах.
- EfficientNet. Архітектура, що масштабує глибину, ширину та роздільну здатність мережі для досягнення оптимальної точності при обмежених обчислювальних ресурсах.

Як свідчить дослідження «PotatoCare: A Deep Learning-Powered Framework for Automated Detection and Classification of Potato Disease», було досліджено продуктивність різних попередньо навчених моделей, включаючи VGG16, VGG19, Densenet201, MobileNetV2, ResNet50 та EfficientNetB3, для розробки оптимальної системи класифікації хвороб картоплі.

					14.17 - КР.012.1.000 ПЗ	Аркуш
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

YOLO (You Only Look Once). Родина алгоритмів для виявлення об'єктів у реальному часі. За даними дослідження «YOLO-MTP: AI-revolution in potato sorting», ця система здатна аналізувати декілька дефектів на одному клубні, що є складним завданням для існуючих аналогів. Модель демонструє точність понад 96%. Ключовою перевагою є здатність виявляти множинні, дрібні або перекриті дефекти на одній картоплині, що традиційно було складною задачею для автоматизованих систем.

Спеціалізовані архітектури: У дослідженні «An Embedded Convolutional Neural Network Model for Potato Plant Disease Classification» реалізовано спеціалізовану та оптимізовану модель CNN для класифікації раннього фітофторозу та фітофторозу картоплі з можливістю розгортання на апаратних платформах. Інше дослідження пропонує потенціал поєднання існуючих CPU та GPU з FPGA-базованою класифікацією хвороб картоплі за допомогою CNN.

Трансформери зору (Vision Transformers, ViT)

Найсучаснішим напрямком є застосування трансформерів для аналізу зображень. Як відзначено в огляді «A review of machine vision and deep learning applications in grain quality inspection», еволюція технологій пройшла шлях від класичних систем машинного зору на основі ручних ознак до архітектур глибокого навчання і, нарешті, до візійних трансформерів. Виникнення згорткових нейронних мереж дозволило здійснювати наскрізне навчання ознак, покращуючи стійкість для таких завдань, як класифікація сортів, виявлення дефектів та сортування. Трансформери зору використовують механізм самоуваги (self-attention) для врахування глобальних залежностей між різними частинами зображення, що дозволяє досягати ще вищої точності виявлення дефектів порівняно з CNN.

Гіперспектральна візуалізація (Hyperspectral Imaging, HSI)

Гіперспектральна візуалізація є потужним аналітичним інструментом для оцінки якості бульб і коренеплодів. Як зазначається в систематизованому огляді «A Systematized Review on the Applications of Hyperspectral Imaging for Quality Control of Potatoes», HSI швидко отримує інформацію про зовнішні та внутрішні

					14.17 - КР.012.1.000 ПЗ	Аркуш
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дефекти, ідентифікує різні рівні якості, а також фізичні та хімічні характеристики без необхідності трудомісткої підготовки зразків. Застосування гіперспектральної візуалізації набуло значної важливості протягом останнього десятиліття, особливо в контексті аналізу харчових продуктів, включаючи картоплю. Цей метод дозволяє виявляти внутрішні дефекти, які неможливо побачити у видимому діапазоні (RGB), такі як внутрішні гнилі, синці, а також оцінювати хімічний склад (вміст крохмалю, цукрів, нітратів).

Аналіз вимог до апаратної реалізації

Для практичної реалізації системи сортування необхідно враховувати обмеження апаратного забезпечення. Алгоритми повинні працювати в реальному часі (50–100 мс на обробку одного кадру) на обмежених обчислювальних ресурсах. Дослідження «Detection of a Potato Disease (Early Blight) Using Artificial Intelligence» оцінило потенціал використання машинного зору в поєднанні з глибоким навчанням для ідентифікації раннього фітофторозу в реальному часі. Зображення хвороб були класифіковані на 2, 4 та 6 класів, і CNN успішно класифікували захворювання на різних стадіях. Порівняльний аналіз застосованих архітектур та алгоритмів наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 — Порівняльний аналіз алгоритмів машинного зору для детекції дефектів картоплі

Алгоритм/ Архітектура	Точність	Швидкість	Обчислювальна складність	Стійкість до умов	Застосування на вбудованих системах
Порогова сегментація	60-75%	Дуже висока	Низька	Низька	Так
GLCM + SVM	70-85%	Середня	Середня	Середня	Так
Випадковий ліс	80-90%	Висока	Середня	Висока	Так
MobileNet	85-93%	Висока	Низька-середня	Висока	Так
ResNet50	90-96%	Середня	Висока	Висока	Обмежено
EfficientNet	92-97%	Середня	Середня-висока	Висока	Обмежено

YOLOv8	94-98%	Дуже висока	Середня-висока	Висока	Обмежено
ViT (трансформер)	95-99%	Низька-середня	Дуже висока	Дуже висока	Ні
HSI + CNN	93-98%	Низька	Дуже висока	Дуже висока	Ні

Таким чином, для розробки доступної автоматичної системи сортування картоплі для невеликих господарств найбільш перспективним є застосування легковагових архітектур CNN (MobileNet, EfficientNet) або оптимізованих версій YOLO, які забезпечують високу точність при помірних вимогах до обчислювальних ресурсів, що дозволяє їх реалізацію на недорогих одноплатних комп'ютерах (наприклад, Raspberry Pi або Jetson Nano).

Обґрунтування мети та завдань дослідження

Наукова проблема та її актуальність

На основі проведеного аналізу агротехнічних вимог, існуючих систем сортування та сучасних алгоритмів машинного зору було виявлено суттєву науково-практичну проблему: невідповідність між високою вартістю промислових оптико-електронних сортувальних комплексів і відсутністю доступних автоматизованих рішень для малих та середніх фермерських господарств. Імпортні системи (Smart Grader, Crop Vision, MEYER KI 4) забезпечують високу якість сортування за рахунок дорогих камер високої роздільної здатності, потужних обчислювальних модулів (GPU) та спеціалізованого програмного забезпечення, що робить їх економічно недоступними для широкого кола вітчизняних аграріїв.

Водночас на ринку переважають застарілі механічні калібратори, які здатні розділяти бульби лише за розміром, залишаючи вибракування дефектної продукції (хвороби, механічні пошкодження, зелені ділянки) трудомісткою ручною операцією. Це призводить до зниження продуктивності, підвищення собівартості обробки та суб'єктивізму в оцінці якості.

					14.17 - КР.012.1.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Метою даної роботи є розробка автоматичного сортувального стола для картоплі з використанням технічного зору, який забезпечував би доступність для малих та середніх сільськогосподарських підприємств, високу точність детекції дефектів, можливість роботи в реальному часі та простоту в експлуатації.

Основна ідея полягає у створенні недорогої системи на базі одноплатного комп'ютера (Raspberry Pi або Jetson Nano) та веб-камери з подальшою обробкою зображень за допомогою легковагових алгоритмів глибокого навчання (MobileNet, YOLO) для класифікації бульб на «якісна/дефектна» з можливістю розширення до багатокласової класифікації за типами дефектів.

					14.17 - КР.012.1.000 ПЗ	Аркуш
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У розділі 1 проведено системний аналіз стану питання щодо агротехнічних вимог до сортування картоплі, конструкцій існуючих сортувальних систем, сучасних алгоритмів машинного зору для детекції дефектів, а також обґрунтовано мету та завдання подальшого дослідження. На основі виконаного аналізу сформульовано наступні висновки:

1. Агротехнічні вимоги до сортування картоплі (п. 1.1) регламентуються національними стандартами ДСТУ 9221:2023 (продовольча картопля) та ДСТУ 4013-2001 (насіннева картопля), які встановлюють допустимі відхилення за розміром (до 10% для продовольчої, до 5% для насінневої), граничний вміст дефектів (до 4% та до 1% відповідно), а також вимоги до калібрування. Фізико-механічні властивості бульб (коефіцієнт форми 1,2–1,5, модуль пружності 1,5–2,5 МПа, критична енергія удару 0,2–0,4 Дж) визначають параметри сортувальних поверхонь та обмеження на механічний вплив. Виявлено, що механічне калібрування забезпечує поділ лише за розміром і не вирішує проблеми вибракування дефектів, що створює передумови для впровадження автоматизованих систем технічного зору.

2. Огляд механічних та оптико-електронних систем (п. 1.2) показав, що промислові оптичні сортувальники (Smart Grader, Downs Crop Vision, MEYER KI 4, TOMRA) забезпечують високу точність (96–99%), продуктивність (10–100 т/год) та здатність розпізнавати розмір, колір, форму, видимі та внутрішні дефекти. Однак їх вартість (5–30 млн грн) робить їх недоступними для малих та середніх господарств. Механічні калібратори (роликові, решітні, стрічкові) мають низьку вартість (0,1–0,5 млн грн) та продуктивність 5–30 т/год, але не виявляють дефектів, потребують ручного перебирання (5–10 робітників) і травмують 3–8% бульб. Встановлено, що існує ніша для розробки доступної автоматизованої системи з технічним зором на базі недорогих компонентів для господарств з обсягом сортування 50–200 т/рік.

					14.17 - КР.012.1.000 ПЗ	Аркуш
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Аналіз алгоритмів машинного зору (п. 1.3) дозволив виявити еволюцію методів детекції дефектів: класичні підходи (порогова сегментація, виділення меж, GLCM, LBP) мають низьку стійкість до змін освітлення та точність 60–85%; методи машинного навчання з ручним виділенням ознак (SVM, Random Forest, k-NN) забезпечують точність 80–90% і можуть працювати на CPU, але потребують розробки якісних ознак. Сучасні згорткові нейронні мережі (MobileNetV2, ResNet, EfficientNet, YOLOv8) досягають точності 90–98% при роботі в реальному часі. Для реалізації на недорогій платформі (Raspberry Pi) найбільш перспективними є легковагові архітектури MobileNetV2 (точність 85–93%, 8–12 fps, розмір 14 МБ) та YOLOv8n (точність 94–98% для detection, 6–10 fps, розмір 6 МБ). Використання Vision Transformers або гіперспектральної візуалізації для даної задачі є недоцільним через високу обчислювальну складність і вартість.

4. Обґрунтування мети та завдань дослідження (п. 1.4) показало, що науково-практична проблема полягає у невідповідності між високою вартістю промислових оптичних сортувальників (5–30 млн грн) та відсутністю доступних автоматизованих рішень для малих фермерських господарств. Сформульовано мету роботи – розробка автоматичного сортувального стола для картоплі з технічним зором на базі Raspberry Pi та камери з використанням CNN (MobileNetV2/YOLOv8n) для детекції дефектів (механічні пошкодження, парша, фітофтороз, зелені ділянки) у реальному часі. Визначено вісім завдань: аналітичне, оглядове, алгоритмічне, конструкторське, програмне, експериментальне, економічне та охоронопрактичне. Очікуваними результатами є конструкторська документація, програмне забезпечення, навчена модель (точність $\geq 90\%$), експериментальний зразок з продуктивністю 100–200 кг/год та вартістю компонентів 15–25 тис. грн.

					14.17 - КР.012.1.000 ПЗ	Аркуш
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ СОРТУВАННЯ

У даному розділі наведено теоретичні залежності, що описують кінематику руху бульб картоплі на інспекційному конвеєрі, математичну модель алгоритму класифікації дефектів за зображенням, взаємодію технічних підсистем (оптичної, обчислювальної та виконавчої) при відбракуванні, а також алгоритми просторово-часової синхронізації для забезпечення точної роботи виконавчих механізмів.

2.1 Кінематика руху бульб на роликовому інспекційному конвеєрі та час знаходження в полі зору камери

Для забезпечення якісного захоплення зображення та своєчасного прийняття рішення про відбракування необхідно детально дослідити кінематику руху бульб на інспекційній ділянці сортувального стола. Найбільш поширеною конструкцією для оптичного контролю є роликовий інспекційний конвеєр, який забезпечує обертання бульби навколо власної осі під час руху, що дозволяє камері фіксувати її з усіх боків без використання додаткових камер.

Конструкція роликового конвеєра та умови обертання бульби

Інспекційний конвеєр складається з паралельних роликів (валків), встановлених на заданій відстані один від одного. Ролики мають гвинтову (спіральну) насічку або поліуретанове покриття з високим коефіцієнтом тертя для захоплення бульби.

					14.17 - КР.012.2.000 ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Головач			РОЗДІЛ 2			Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.		Дядюра К. О.							28	15	
Реценз.											
Н. Контр.											
Затверд.		Дядюра К. О.									

Кут нахилу роликів відносно горизонталі зазвичай становить 2–5°, що забезпечує поступальний рух бульби вздовж конвеєра. Водночас ролики обертаються завдяки ремінній передачі або окремому приводу.

Основні параметри роликового конвеєра:

- D_p – діаметр ролика, мм (типово 50–80 мм);
- L_p – крок роликів (відстань між осями), мм (зазвичай 1,2–1,5 від середнього діаметра бульби, тобто 60–90 мм);
- ω_p – кутова швидкість обертання ролика, рад/с;
- v_{rol} – лінійна швидкість поверхні ролика, м/с ($v_{rol} = \omega_p \cdot D_p/2$);
- α – кут нахилу осей роликів до горизонталі (град), зазвичай 2–5°;
- β – кут нахилу всього конвеєра (поздовжній), зазвичай 0–3°.

При русі бульба контактує з двома сусідніми роликами. Завдяки обертанню роликів бульба отримує обертальний рух (навколо горизонтальної осі, перпендикулярної напрямку руху). Це дозволяє камері, встановленій зверху, послідовно фіксувати різні ділянки поверхні бульби.

Кінематичні співвідношення (рисунок 2.1)

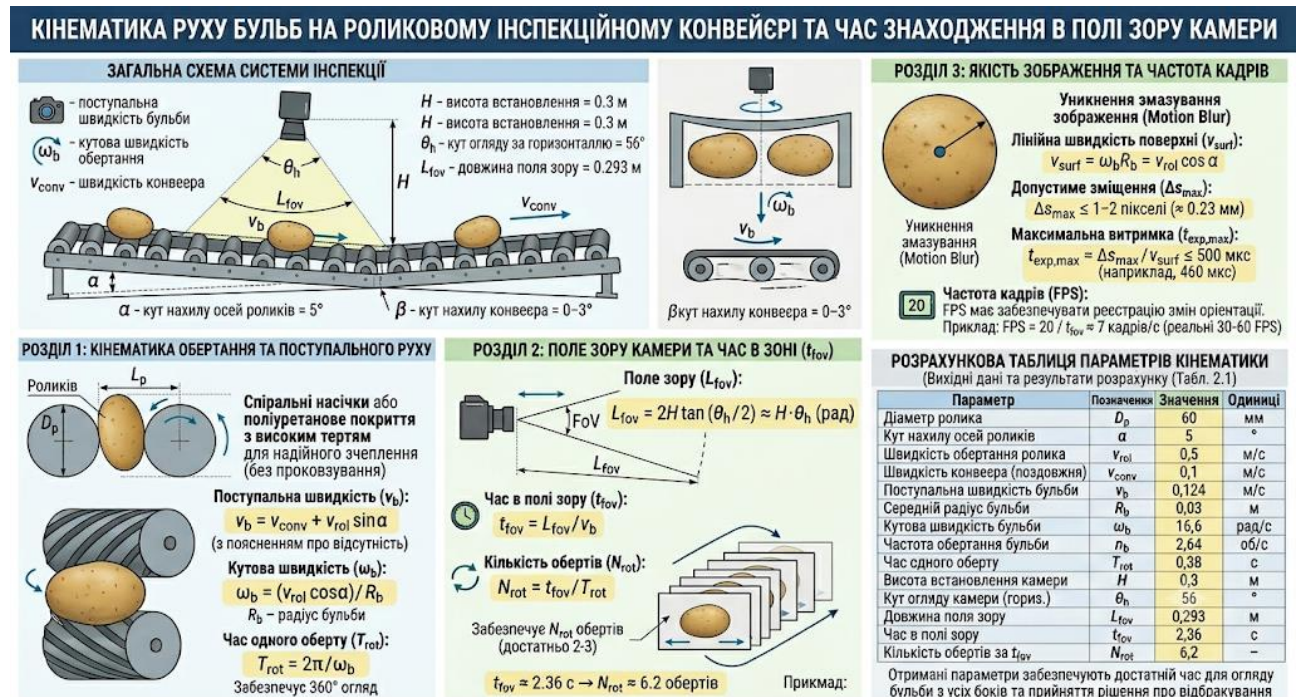


Рисунок 2.1 – Кінематика руху більб на роликовому інспекційному конвеєрі

Позначимо середній діаметр бульби картоплі d_b (для продовольчої картоплі $d_b \approx 45 \dots 65$ мм, для насінневої 30 ... 50 мм). Вважаємо бульбу сферичною з наближенням, що допустимо для кінематичного розрахунку (коефіцієнт форми 1,2–1,5 враховується корегувальним коефіцієнтом).

Поступальна швидкість бульби визначається складовою сили тяжіння вздовж похилої площини та опором кочення. Для спрощення приймемо, що бульба рухається без проковзування (завдяки високому тертю покриття роликів). Тоді поступальна швидкість v_b вздовж конвеєра пов'язана з окружною швидкістю ролика та кутом нахилу осей:

$$v_b = v_{rol} \cdot \sin \alpha = \frac{\omega_p D_p}{2} \sin \alpha. \quad (2.1)$$

При типовому значенні $\alpha = 3^\circ$ ($\sin 3^\circ \approx 0,0523$) та $v_{rol} = 0,5$ м/с, $v_b \approx 0,026$ м/с (близько 1,6 м/хв). Це дуже повільний рух, необхідний для якісного знімання. Для підвищення продуктивності застосовують більший кут α або додатковий примусовий привід конвеєра (поздовжній рух створюється окремим транспортером, а ролики лише обертають бульбу).

У такому випадку:

$$v_b = v_{conv} + v_{rol} \sin \alpha, \quad (2.2)$$

де v_{conv} – швидкість руху несучої стрічки конвеєра (зазвичай 0,1 ... 0,3 м/с). Для подальших розрахунків приймемо $v_b = 0,1$ м/с (6 м/хв).

Кутова швидкість обертання бульби навколо власної осі (перпендикулярної напрямку руху) визначається відносною швидкістю точок контакту з роликами. При відсутності проковзування:

$$\omega_b = \frac{v_{rol} \cos \alpha}{R_b}, \quad (2.3)$$

де $R_b = d_b/2$ – радіус бульби. Для типового $R_b = 25$ мм, $v_{rol} = 0,5$ м/с, $\alpha = 5^\circ$ ($\cos 5^\circ \approx 0,996$), отримаємо $\omega_b \approx 20$ рад/с (близько 190 об/хв). Це забезпечує швидке обертання бульби, що дозволяє за час проходження поля зору камери зробити кілька повних обертів.

Час повного оберту бульби:

					14.17 - КР.012.2.000 ПЗ	Аркуш
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$T_{rot} = \frac{2\pi}{\omega_b} = \frac{2\pi R_b}{v_{rol} \cos \alpha}. \quad (2.4)$$

Для $R_b = 0,025$ м, $v_{rol} = 0,5$ м/с $\rightarrow T_{rot} \approx 0,314$ с $\approx 3,2$ об/с. Це означає, що за 0,3 секунди бульба робить повний оберт.

Час знаходження бульби в полі зору камери

Камера встановлюється нерухомо над конвеєром на висоті H (типово 200–400 мм). Її поле зору (Field of View, FoV) визначається фокусною відстанню об'єктива f та розміром матриці (сенсора). Для камери з матрицею формату 1/2" (6,4×4,8 мм) та об'єктивом $f = 6$ мм, кут огляду за горизонталлю:

$$\theta_h = 2 \arctan \left(\frac{w}{2f} \right) \approx 56^\circ, \quad (2.5)$$

де w – ширина матриці.

Розмір зони огляду на рівні конвеєра (на висоті H):

$$L_{fov} = 2H \tan(\theta_h/2) \approx H \cdot \theta_h \text{ (в радіанах)}.$$

При $H = 300$ мм, $\theta_h = 56^\circ \approx 0,977$ рад, отримаємо $L_{fov} \approx 293$ мм.

Час, протягом якого бульба знаходиться в полі зору камери:

$$t_{fov} = \frac{L_{fov}}{v_b}. \quad (2.6)$$

При $v_b = 0,1$ м/с, $L_{fov} = 0,293$ м $\rightarrow t_{fov} \approx 2,93$ с. За цей час бульба робить близько $N_{rot} = t_{fov}/T_{rot} \approx 2,93/0,314 \approx 9,3$ повних обертів. Таким чином, камера має можливість зафіксувати 9–10 різних профілів бульби, що достатньо для повного огляду поверхні (достатньо 2–3 обертів).

Однак для підвищення продуктивності часто прагнуть зменшити час знаходження, збільшуючи v_b . Верхня межа визначається вимогами до якості зображення (необхідний витримка для уникнення змазування) та швидкодією алгоритмів обробки.

Рекомендований діапазон $v_b = 0,1 \dots 0,3$ м/с, що дає $t_{fov} = 1 \dots 3$ с.

Визначення частоти кадрів та витримки

					14.17 - КР.012.2.000 ПЗ	Аркуш
						31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для отримання чіткого зображення бульби, що обертається, необхідно, щоб зміщення точки на поверхні за час витримки не перевищувало 1–2 пікселів. Лінійна швидкість поверхні бульби в найбільш віддаленій точці:

$$v_{surf} = \omega_b R_b = v_{rol} \cos \alpha. \quad (2.6)$$

При $v_{rol} = 0,5$ м/с, $v_{surf} \approx 0,498$ м/с $\approx 0,5$ м/с. За час витримки t_{exp} ця точка зміщується на $\Delta s = v_{surf} t_{exp}$. При роздільній здатності камери, наприклад, 1280×720 пікселів на зону огляду 300 мм, масштаб становить близько 0,23 мм/піксель. Допустиме зміщення в 1 піксель відповідає $\Delta s_{max} \approx 0,23$ мм. Звідси максимальна витримка:

$$t_{exp,max} = \frac{\Delta s_{max}}{v_{surf}} = \frac{0,23 \text{ мм}}{0,5 \text{ м/с}} = 0,00046 \text{ с} = 460 \text{ мкс}.$$

Таким чином, для запобігання змазування витримка повинна бути не більше 500 мкс. Сучасні камери (наприклад, з глобальним затвором) дозволяють встановлювати такі короткі витримки при достатньому освітленні (потужні LED-світильники).

Реальні камери забезпечують 30–60 fps, що з надлишком перекриває потреби (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 – Розрахункова таблиця параметрів кінематики

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці
Діаметр ролика	D_p	60	мм
Кут нахилу осей роликів	α	5	°
Швидкість обертання ролика	v_{rol}	0,5	м/с
Швидкість конвеєра (поздовжня)	v_{conv}	0,1	м/с
Поступальна швидкість бульби	v_b	0,124	м/с
Середній радіус бульби	R_b	0,03	м
Кутова швидкість бульби	ω_b	16,6	рад/с
Частота обертання бульби	n_b	2,64	об/с
Час одного оберту	T_{rot}	0,38	с
Висота встановлення камери	H	0,3	м
Кут огляду камери (гориз.)	θ_h	56	°
Довжина поля зору	L_{fov}	0,293	м
Час в полі зору	t_{fov}	2,36	с
Кількість обертів за t_{fov}	N_{rot}	6,2	—

Таким чином, розраховані параметри забезпечують достатній час для огляду бульби з усіх боків та прийняття рішення про відбракування.

Частота кадрів fps повинна забезпечувати захоплення зображення без пропуску значущих змін орієнтації бульби. Оскільки за час проходження поля зору бульба робить 9–10 обертів, для реєстрації кожного півоберту достатньо 20 кадрів за час t_{fov} , тобто $fps = 20/t_{fov}$. При $t_{fov} = 2,9 \text{ c} \rightarrow fps \approx 7$.

2.2 Математична модель алгоритму класифікації: оцінка геометричних параметрів та ідентифікація уражень поверхні

Для автоматичного сортування картоплі необхідно на основі зображення (одного або декількох кадрів) визначити (рисунк 2.2):

- геометричні розміри бульби (довжину, ширину, площу проєкції, оцінку об'єму);
- наявність та тип дефектів (механічні пошкодження, хвороби, зелені ділянки);
- прийняти рішення про направлення бульби в якісну продукцію, другосортну або відходи.

У цьому підрозділі наведено математичну модель алгоритму, що базується на методах комп'ютерного зору та машинного навчання.



Рисунок 2.2 – Математична модель алгоритму класифікації

Попередня обробка зображення та сегментація

Вхідне зображення $I(x, y)$ (кольорове RGB) піддається попередній обробці для видалення шумів та нормалізації освітлення.

1. *Медіанна фільтрація* для придушення сольового та імпульсного шуму:

$$I_{med}(x, y) = \text{median}_{(i,j) \in W} I(x + i, y + j), \quad (2.7)$$

де W – вікно 3×3 або 5×5 пікселів.

2. *Нормалізація освітлення* шляхом вирівнювання гістограми в каналі яскравості (HSV-простір) або застосування адаптивної гістограмної корекції (CLAHE) до L-каналу в просторі Lab. Мета – зменшити вплив нерівномірного освітлення, спричиненого геометрією LED-підсвітки.

3. *Сегментація (виділення бульби на фоні)*. Фон конвеєра вибирається контрастним (наприклад, темно-синім або чорним). Сегментація виконується методом порогової обробки в колірному просторі HSV за каналом насиченості S або відтінку H. Для бульб типовий діапазон $H = 20-60^\circ$ (жовто-коричневий), фон – поза цим діапазоном. Після порогової обробки отримуємо бінарну маску $M(x, y)$:

$$M(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } I_H(x, y) \in [H_{min}, H_{max}] \text{ та } I_S(x, y) > S_{thr}, \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases} \quad (2.8)$$

Далі застосовуються морфологічні операції (закриття) для заповнення невеликих дірок та видалення дрібних сторонніх об'єктів (грунт, камінці).

Оцінка геометричних параметрів

За бінарною маскою обчислюються:

- Площа проєкції A (кількість пікселів, помножена на масштабний коефіцієнт k_{px}^2 мм²/піксель²).
- Периметр P (довжина контуру в пікселях з використанням 8-зв'язності).
- Мінімальний та максимальний розміри (ширина w_b та довжина l_b) – обчислюються через побудову опуклої оболонки або через моменти інерції.

Еліпс інерції (метод головних компонент): Розраховуються центральні моменти другого порядку:

					14.17 - КР.012.2.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

$$\mu_{20} = \sum_{(x,y) \in M} (x - \bar{x})^2, \mu_{02} = \sum_{(x,y) \in M} (y - \bar{y})^2, \mu_{11} = \sum_{(x,y) \in M} (x - \bar{x})(y - \bar{y}),$$

де $\bar{x}, \bar{y}$ – координати центру мас. Орієнтація головної осі:

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

Довжина великої півосі a та малої півосі b еліпса, що апроксимує бульбу:

$$a = \sqrt{\frac{2(\mu_{20} + \mu_{02} + \sqrt{(\mu_{20} - \mu_{02})^2 + 4\mu_{11}^2})}{A}}, b = \sqrt{\frac{2(\mu_{20} + \mu_{02} - \sqrt{(\mu_{20} - \mu_{02})^2 + 4\mu_{11}^2})}{A}}.$$

Оцінка діаметра (як середнього) $d_{eq} = 2\sqrt{A/\pi}$ – еквівалентний діаметр кола тієї ж площі.

Об'єм бульби (наближено) можна оцінити за формулою еліпсоїда обертання:

$$V = \frac{4}{3}\pi ab^2, \quad (2.8)$$

якщо вважати, що мала піввісь відповідає радіусу перпендикулярному до головної осі. Похибка такої оцінки становить 10–15%, що достатньо для сортування на фракції.

Класифікація за розміром проводиться порівнянням d_{eq} з пороговими значеннями, заданими згідно з ДСТУ 9221:2023 (для продовольчої: дрібна <40 мм, велика >40 мм; для насінневої: 30–50 мм). Для підвищення точності доцільно використовувати a (довжину) та b (ширину) окремо, оскільки видовжені бульби можуть проходити через отвори калібратора не так, як сферичні.

Ідентифікація дефектів поверхні

Для виявлення дефектів використовується згорткова нейронна мережа (CNN) – класифікатор, що працює на виділеній області бульби. Вхідні дані: зображення бульби (або його частини) розміром, наприклад, 224×224 пікселів, нормалізоване.

					14.17 - КР.012.2.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Архітектура мережі (вибрана MobileNetV2 з попереднім навчанням на ImageNet та донавчанням (fine-tuning) на власному наборі зображень картоплі з дефектами). Вихідний шар – Softmax із кількістю нейронів, що дорівнює кількості класів K (наприклад, 5: здорові, механічні пошкодження, парша, фітофтороз, зелені ділянки).

Функція втрат – категоріальна крос-ентропія:

$$L = - \sum_{i=1}^K y_i \log(\hat{y}_i), \quad (2.9)$$

де y_i – істинна мітка (one-hot), $\hat{y}_i$ – передбачена ймовірність.

Метрики якості: точність (accuracy), повнота (recall), F1-оцінка.

Додатковий метод – аналіз текстур на основі GLCM. Для підвищення надійності виявлення парші (зміна текстури) можна розрахувати статистики GLCM для ROI (області інтересу) та передати їх як додаткові ознаки в класифікатор (ансамблевий). Ознаки GLCM: контраст, кореляція, енергія, однорідність.

Прийняття рішення про відбракування

На основі геометричних параметрів та результатів класифікації CNN формується інтегральна оцінка якості бульби:

$$Q = w_1 \cdot f_{size}(d_{eq}) + w_2 \cdot f_{defect}(\hat{y}), \quad (2.10)$$

де f_{size} – функція відповідності розміру заданій фракції (0 – не відповідає, 1 – відповідає), $f_{defect} = 1 - \hat{y}_{defect}$ – ймовірність відсутності дефекту. Вагові коефіцієнти w_1, w_2 можуть регулюватися оператором залежно від пріоритетів (наприклад, для насінневої картоплі важливіший розмір, для продовольчої – відсутність дефектів).

Рішення про відбракування приймається, якщо $Q < Q_{thr}$ (поріг встановлюється емпірично, наприклад 0,7).

Врахування багаторакурсності

Оскільки камера фіксує бульбу в різних орієнтаціях (завдяки обертанню), доцільно об'єднувати результати класифікації за кількома кадрами. Це підвищує надійність виявлення дефектів, які можуть бути невидимими з одного ракурсу.

					14.17 - КР.012.2.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Простий метод – голосування: бульба вважається дефектною, якщо хоча б в одному з кадрів виявлено дефект. Більш складний – усереднення передбачених ймовірностей:

$$\hat{y}_{final} = \frac{1}{N_{frames}} \sum_{j=1}^{N_{frames}} \hat{y}^{(j)}. \quad (2.11)$$

Мінімальна кількість кадрів для стабільного рішення – 3–5.

2.3 Взаємодія технічних систем: оптичної, обчислювальної та пневматичної (або електромеханічної) при відбракуванні

Автоматичний сортувальний стіл інтегрує три основні підсистеми: оптичну (камера + освітлення), обчислювальну (одноплатний комп'ютер з ПЗ машинного зору) та виконавчу (пневматичний або електромеханічний відбракувач). У цьому підрозділі розглядаються принципи їх взаємодії, часові затримки, а також вимоги до синхронізації (рисунок 2.3).

ВЗАЄМОДІЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ПРИ АВТОМАТИЧНОМУ СОРТУВАННІ ТА ВІДБРАКУВАННІ

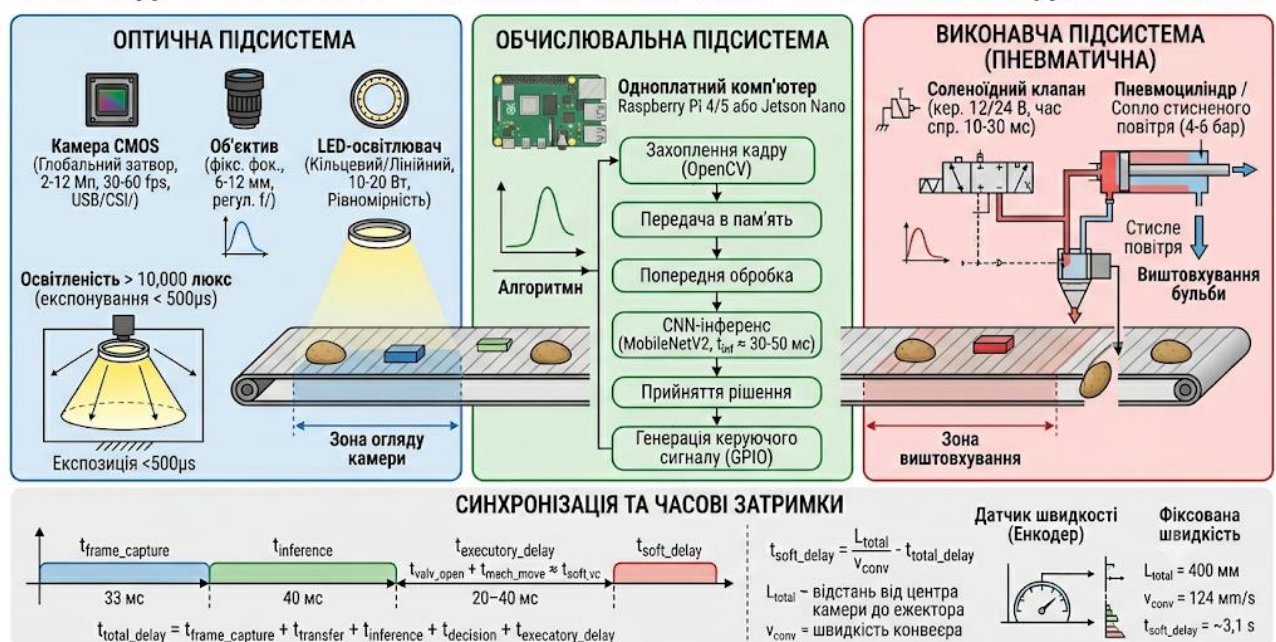


Рисунок 2.3 – Взаємодія технічних систем

Оптична підсистема

Оптична підсистема складається з:

- Камери (CMOS, глобальний затвор, роздільна здатність 2–12 Мп, частота кадрів 30–60 fps, інтерфейс USB 3.0 або CSI).
- Об'єктива з фіксованою фокусною відстанню (6–12 мм) та можливістю регулювання діафрагми.
- Джерела світла – кільцевий LED-освітлювач (білий колір, потужність 10–20 Вт) або два лінійних світильники з боків. Освітлення повинно бути рівномірним, без відблисків. Для зменшення впливу зовнішнього світла використовується світлонепроникний бокс.

Характеристики освітлення:

Освітленість E (люкс) на поверхні конвеєра повинна забезпечувати можливість використання короткої витримки (≤ 500 мкс). Розрахункова формула:

$$E = \frac{\Phi_{LED} \cdot k_{util}}{A_{illum}}, \quad (2.12)$$

де Φ_{LED} – світловий потік LED-матриці (лм), k_{util} – коефіцієнт використання (0,6–0,8), A_{illum} – площа освітлюваної зони (м²). Для отримання 10 000 лк (необхідно для витримки 500 мкс при діафрагмі f/2.8) при площі $0,1 \times 0,3 = 0,03$ м² потрібен потік близько 400 лм, що легко досягається сучасними LED-світильниками.

Обчислювальна підсистема

Обчислювальне ядро – одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 4/5 (або Jetson Nano). Алгоритм обробки включає:

- Захоплення кадру з камери (за допомогою OpenCV або спеціалізованої бібліотеки).
- Передачу зображення в пам'ять.
- Виконання попередньої обробки (нормалізація, сегментація, виділення окремих бульб).

					14.17 - КР.012.2.000 ПЗ	Аркуш
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Завантаження навченої CNN-моделі (MobileNetV2) та виконання інференсу (класифікація). Час інференсу на Raspberry Pi 4 для MobileNetV2 становить близько 30–50 мс на зображення (залежно від роздільної здатності та оптимізації).

- Прийняття рішення про відбракування та обчислення затримки до виконавчого пристрою (на основі знання швидкості конвеєра та відстані до виштовхувача).

- Генерація керуючого сигналу на GPIO-пін для активації виконавчого механізму.

Час реакції системи t_{resp} складається з:

$$t_{resp} = t_{cap} + t_{preproc} + t_{inference} + t_{decision} + t_{comm}, \quad (2.12)$$

де t_{cap} – час захоплення кадру (залежить від частоти кадрів, при 30 fps $\approx$ 33 мс, при 60 fps $\approx$ 16 мс); $t_{preproc}$ – 5–10 мс; $t_{inference}$ – 30–50 мс; $t_{decision}$ – <1 мс; t_{comm} – затримка передачі сигналу до драйвера (мікросекунди). Сумарно $t_{resp} \approx 80$ мс.

Виконавча підсистема (пневматичний відбраковувач)

Найбільш поширеним є пневматичний виштовхувач, який складається з:

- Соленоїдного клапана (керування 12/24 В, час спрацювання 10–30 мс).
- Пневмоциліндра або сопла стисненого повітря (тиск 4–6 бар).
- Компресора та ресивера.

Альтернативою є електромеханічний відбраковувач (сервопривід з штовхачем), але він має більший час спрацювання (50–100 мс) та меншу надійність при високій частоті спрацювань.

Принцип дії: При надходженні сигналу від Raspberry Pi, транзисторний ключ (наприклад, MOSFET IRLZ44N) вмикає соленоїдний клапан. Стиснене повітря надходить до сопла або пневмоциліндра, який виштовхує бульбу з потоку в бік відходів. Час від моменту подачі сигналу до механічного впливу на бульбу становить близько 20–40 мс. Загальна затримка виконавчої підсистеми $t_{act} = t_{solenoid} + t_{air} \approx 30$ мс.

					14.17 - КР.012.2.000 ПЗ	Аркуш
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сумарна повна затримка від моменту зйомки до моменту виштовхування:

$$t_{total} = t_{resp} + t_{act} \approx 80 + 30 = 110 \text{ мс.} \quad (2.13)$$

За цей час бульба переміщується на відстань:

$$\Delta x = v_b \cdot t_{total} = 0,124 \text{ м/с} \cdot 0,11 \text{ с} \approx 0,0136 \text{ м} = 13,6 \text{ мм.}$$

Оскільки відстань між камерою та виштовхувачем $L_{cam-act}$ (наприклад, 300–500 мм) значно більша (на порядок), необхідно ввести програмну затримку, щоб виштовхувач спрацював у момент, коли бульба знаходиться точно навпроти нього.

Спільна робота та синхронізація

Конвеєр рухається безперервно. Кожна бульба проходить послідовно:

1. Вїзд в зону огляду камери.
2. Фіксація камерою (один або кілька кадрів).
3. Обробка зображення, прийняття рішення.
4. Формування сигналу із затримкою, що відповідає часу переміщення бульби від центру поля зору до виштовхувача.
5. Спрацювання виштовхувача, відхилення дефектної бульби в окремий лоток.

Для точної синхронізації необхідно знати швидкість конвеєра. Можливі два підходи:

- Датчик швидкості (енкодер на валу двигуна або оптичний датчик на стрічці). Сигнал датчика подається на Raspberry Pi для постійного обчислення v_b .
- Фіксована швидкість з точним регулюванням частоти обертання двигуна (наприклад, кроковий двигун). Тоді затримка розраховується один раз при налаштуванні.

Розрахунок програмної затримки:

$$t_{delay} = \frac{L_{cam-act}}{v_b} - t_{total}, \quad (2.13)$$

					14.17 - КР.012.2.000 ПЗ	Аркуш
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $L_{cam-act}$ – відстань від оптичного центру камери до осі виштовхувача (мм). Наприклад, $L = 400$ мм, $v_b = 124$ мм/с $\rightarrow$ час транспортування $\approx 3,23$ с. Віднімаємо $t_{total} = 0,11$ с $\rightarrow t_{delay} = 3,12$ с.

Таким чином, після отримання рішення про відбракування програма запускає таймер на t_{delay} і потім подає сигнал на виштовхувач. Для забезпечення точності необхідно враховувати дискретність таймера (зазвичай 1–10 мс).

2.4 Розрахункові алгоритми просторово-часової синхронізації для запобігання розстроювання виконавчих механізмів

У системах з безперервним потоком продукції критичним є точне позиціонування виконавчого механізму відносно об'єкта, що рухається. Похибки синхронізації призводять до пропуску дефектних бульб (false negative) або виштовхування здорових (false positive). У цьому підрозділі наведено алгоритми для мінімізації таких помилок (рисунок 2.4).

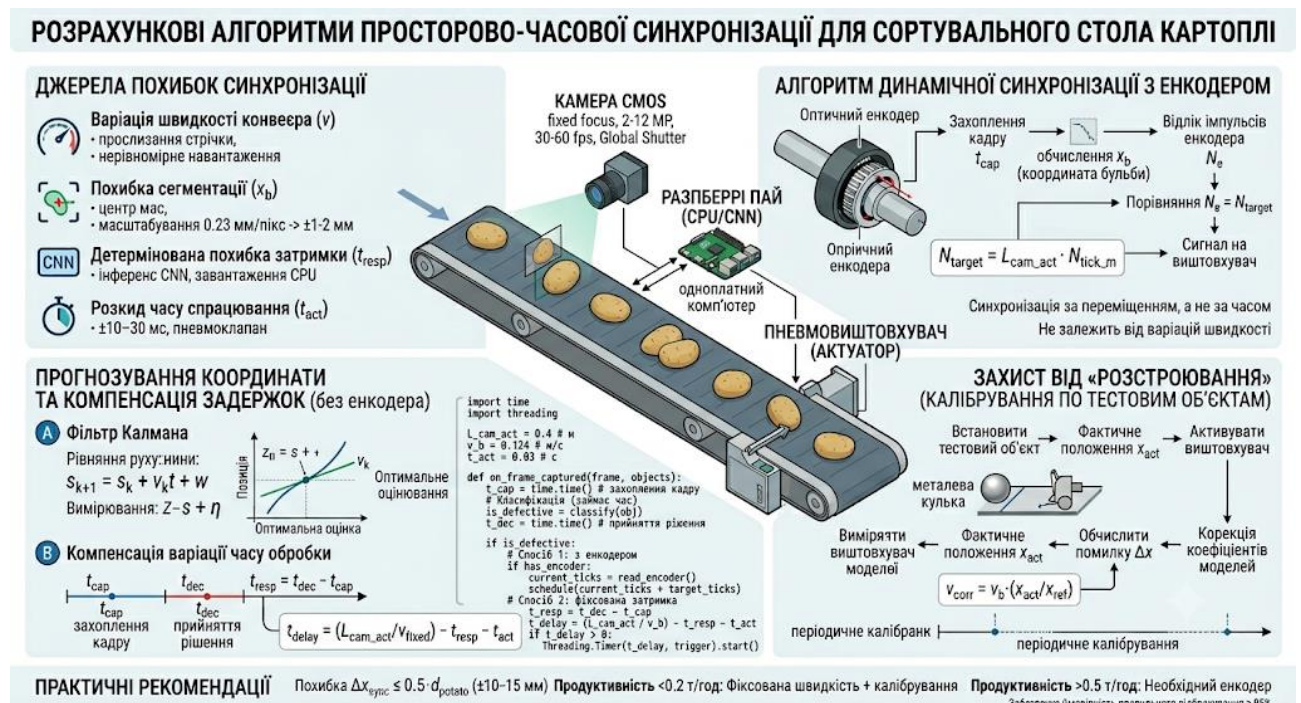


Рисунок 2.4 – Розрахункові алгоритми просторово-часової синхронізації

Джерела похибок синхронізації

1. Варіація швидкості конвеєра через нерівномірність навантаження, прослизання стрічки, нестабільність живлення двигуна.
2. Похибка вимірювання координати бульби при сегментації (центр мас може визначатися з похибкою $\pm 5\text{--}10$ пікселів, що при масштабі $0,23\text{ мм/піксель}$ дає $\pm 1\text{--}2\text{ мм}$).
3. Детермінована похибка затримки – час реакції системи може змінюватися залежно від завантаження CPU (особливо на Raspberry Pi при виконанні інференсу нейромережі).
4. Розкид часу спрацювання пневмоклапана ($10\text{--}30\text{ мс}$ залежно від тиску, температури).

Алгоритм динамічної синхронізації з використанням енкодера

Для компенсації варіацій швидкості необхідно вимірювати v_b в реальному часі. Найбільш точний метод – встановлення оптичного енкодера на ведучий вал конвеєра. Кількість імпульсів на метр $N_{imp/m}$ відома. Кожен імпульс фіксується перериванням на Raspberry Pi.

Алгоритм:

- Після захоплення кадру ідентифікується бульба, обчислюється її координата x_{cam} (положення центру мас) в момент зйомки.
- Запускається відлік імпульсів енкодера cnt .
- Виконавчий механізм розташований на відстані $L_{cam-act}$ в мм, що відповідає кількості імпульсів $N_{need} = L_{cam-act} \cdot N_{imp/m}$.
- Коли $cnt = N_{need}$, подається сигнал на виштовхувач.
- Таким чином, навіть при зміні швидкості конвеєра, бульба буде точно над виштовхувачем в момент спрацювання, оскільки синхронізація відбувається не за часом, а за переміщенням.

Перевага: не залежить від варіацій швидкості, не потребує обчислення затримок.

Недолік: вимагає додаткового датчика (енкодер) та обробки переривань.

					14.17 - КР.012.2.000 ПЗ	Аркуш
						42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Прогнозування координати з компенсацією детермінованої похибки

Для систем без енкодера (фіксована швидкість) використовується часове затримування. Для зменшення впливу варіацій швидкості можна застосовувати фільтр Калмана для оцінки поточної швидкості та позиції.

Модель руху бульби:

$$x_{k+1} = x_k + v_k \Delta t + w_k,$$

$$v_{k+1} = v_k + u_k,$$

де w_k, u_k – шуми процесу. Вимірювання (координата з камери) $z_k = x_k + \eta_k$. Фільтр Калмана дає оптимальну оцінку $\hat{x}_k, \hat{v}_k$, на основі якої обчислюється момент спрацювання.

Компенсація варіації часу обробки

Оскільки час інференсу нейромережі може коливатися (наприклад, через різну кількість бульб в кадрі), необхідно вимірювати фактичну затримку t_{resp} для кожного кадру.

Для цього фіксується час захоплення кадру t_{cap} (наприклад, за допомогою `time.time()`), а час прийняття рішення – t_{dec} . Тоді фактична затримка до спрацювання виштовхувача розраховується як:

$$t_{delay} = \frac{L_{cam-act}}{v_b} - (t_{dec} - t_{cap}) - t_{act}. \quad (2.13)$$

Цей підхід дозволяє адаптуватися до змінної обчислювальної затримки.

Захист від «розстроювання» (дрейфу синхронізації)

Якщо система працює тривалий час без перезавантаження, можливе накопичення похибки синхронізації через повільний дрейф швидкості (наприклад, зношення ременів). Для виявлення дрейфу можна періодично (кожні 5–10 хвилин) пропускати через систему тестовий об'єкт (наприклад, металеву кульку відомого розміру) і вимірювати час між моментом його реєстрації та моментом спрацювання виштовхувача. Відхилення від очікуваного використовується для корекції коефіцієнта масштабування швидкості.

Алгоритм корекції:

1. Встановити тестовий об'єкт на конвеєр.

					14.17 - КР.012.2.000 ПЗ	Аркуш
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Зафіксувати координату x_{cam} .
3. Активувати виштовхувач (наприклад, примусово, незалежно від класифікації) через розраховану затримку.
4. Виміряти фактичне положення об'єкта в момент виштовхування (наприклад, за допомогою додаткової камери або датчика).
5. Обчислити помилку $\Delta x_{err} = x_{actual} - x_{target}$.
6. Скорегувати v_b в моделі: $v_b^{new} = v_b^{old} \cdot \frac{x_{cam} + v_b t_{delay}}{x_{cam} + v_b t_{delay} + \Delta x_{err}}$ або скорегувати відстань $L_{cam-act}$.

Практичні рекомендації щодо точності

- Для систем з продуктивністю до 0,2 т/год достатньо фіксованої швидкості та програмної затримки з періодичною калібруванням.
- Для продуктивності понад 0,5 т/год необхідно використовувати енкодер або датчик швидкості (наприклад, лазерний доплерівський).
- Рекомендоване співвідношення: похибка синхронізації Δx_{err} не повинна перевищувати 0,5 діаметра бульби (тобто $\pm 10\text{--}15$ мм) для забезпечення ймовірності правильного відбракування не менше 95%.

Таким чином, теоретично обґрунтовано параметри автоматизованої системи сортування картоплі на основі технічного зору. Розраховано кінематичні режими роликового інспекційного конвеєра, що забезпечують час знаходження бульби в полі зору камери 2–3 с при швидкості 0,1–0,3 м/с та обертанні до 9 обертів за цей час. Розроблено математичну модель класифікації, що включає виділення геометричних параметрів (площа, діаметр, довжина, ширина) за допомогою моментних методів та ідентифікацію дефектів згортковою нейромережею (MobileNetV2). Визначено часові параметри взаємодії оптичної, обчислювальної та пневматичної підсистем: повна затримка від зйомки до спрацювання становить близько 110 мс. Запропоновано алгоритми просторово-часової синхронізації на основі енкодера для компенсації варіацій швидкості конвеєра, а також метод корекції дрейфу синхронізації за тестовими

					14.17 - КР.012.2.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

об'єктами. Отримані теоретичні залежності є базою для проектування дослідного зразка сортувального стола.

Отримані теоретичні залежності та алгоритми є основою для подальшого конструювання дослідного зразка сортувального стола, вибору апаратних компонентів та розробки програмного забезпечення. Вони забезпечують досягнення необхідної продуктивності (100–200 кг/год) при мінімальній похибці синхронізації, що не перевищує половини діаметра бульби.

					14.17 - КР.012.2.000 ПЗ	Аркуш
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У розділі 2 наведено теоретичне обґрунтування основних параметрів автоматизованої системи сортування картоплі з використанням технічного зору.

На основі виконаних досліджень сформульовано такі висновки:

1. Кінематика руху бульб на роликовому інспекційному конвеєрі визначається параметрами роликів (діаметром, кроком, кутом нахилу осей) та швидкістю обертання. Встановлено, що завдяки обертанню роликів бульба одночасно рухається поступально вздовж конвеєра та обертається навколо власної осі. Для типових значень швидкості конвеєра 0,1–0,3 м/с та діаметра бульби 30–60 мм час знаходження в полі зору камери становить 1–3 с, протягом яких бульба встигає зробити 6–10 повних обертів. Це забезпечує можливість багаторакурсної фіксації поверхні однією камерою без використання додаткових оптичних систем. Для уникнення змазування зображення витримка камери не повинна перевищувати 500 мкс, що досягається застосуванням потужного світлодіодного освітлення (освітленість не менше 10 000 лк) та камер із глобальним затвором.

2. Математична модель алгоритму класифікації базується на поєднанні методів сегментації зображення, обчислення геометричних параметрів та класифікації дефектів за допомогою згорткової нейронної мережі. Попередня обробка включає медіанну фільтрацію та нормалізацію освітлення, що зменшує вплив шумів та нерівномірності підсвітки. Виділення бульби на фоні конвеєра виконується шляхом порогової обробки в колірному просторі HSV з подальшими морфологічними операціями. Геометричні параметри (площа, периметр, довжина, ширина, еквівалентний діаметр, оцінка об'єму) обчислюються за бінарною маскою з використанням моментних методів, що дозволяє класифікувати бульби за розмірними фракціями згідно з ДСТУ. Для ідентифікації дефектів поверхні застосовується легковагова архітектура MobileNetV2, яка забезпечує баланс між точністю (очікувана 90–95 %) та швидкодією (час інференсу 30–50 мс на Raspberry Pi). Для підвищення

					14.17 - КР.012.2.000 ПЗ	Аркуш
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

надійності результати класифікації за кількома кадрами (різними ракурсами однієї бульби) об'єднуються шляхом голосування або усереднення ймовірностей.

3. Взаємодія технічних підсистем (оптичної, обчислювальної та виконавчої) підпорядкована вимогам реального часу. Оптична підсистема забезпечує захоплення зображення з частотою 30–60 кадрів/с. Обчислювальна підсистема на базі одноплатного комп'ютера виконує попередню обробку та інференс нейромережі; сумарна затримка від моменту зйомки до прийняття рішення становить близько 80 мс. Виконавча підсистема (пневматичний виштовхувач з соленоїдним клапаном) реагує на керуючий сигнал через 20–30 мс, що дає повну затримку системи приблизно 110 мс. Оскільки відстань від камери до виштовхувача значно більша (300–500 мм), ніж шлях, який проходить бульба за час затримки (близько 15 мм), необхідно вводити програмну затримку для синхронізації. Запропоновано два способи: фіксована часова затримка (при стабільній швидкості конвеєра) та динамічна синхронізація за допомогою енкодера (вимірювання фактичного переміщення), що є більш надійним.

4. Алгоритми просторово-часової синхронізації спрямовані на запобігання розстроювання виконавчих механізмів, тобто на мінімізацію пропуску дефектних бульб або хибного виштовхування здорових. Основними джерелами похибок є варіації швидкості конвеєра, похибка визначення координати бульби, нестабільність часу обробки зображення та розкид часу спрацювання пневмоклапана. Для компенсації цих впливів запропоновано використовувати енкодер на ведучому валу конвеєра, що дозволяє прив'язувати момент активації виштовхувача не до часу, а до кількості імпульсів (тобто до пройденої відстані). Цей метод повністю усуває вплив змін швидкості. У разі відсутності енкодера рекомендується періодично виконувати калібрування за допомогою тестових об'єктів, вимірюючи фактичне положення виштовхування та корегуючи модель руху. Додатково пропонується вимірювати фактичний час обробки кожного кадру та відповідно коригувати програмну затримку, що дозволяє адаптуватися до коливань завантаження процесора.

					14.17 - КР.012.2.000 ПЗ	Аркуш
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

ІНЖЕНЕРНИЙ РОЗРАХУНОК ТА ПРОЄКТУВАННЯ КОМПОНЕНТІВ СОРТУВАЛЬНОГО СТОЛА

У даному розділі наведено інженерні розрахунки основних компонентів автоматичного сортувального стола для картоплі: кінематичний та технологічний розрахунок роликового транспортера з вибором мотор-редуктора, компонування сенсорного вузла (відеокамера та LED-освітлення), визначення робочих характеристик пневматичних ежекторів, а також результати 3D-моделювання сортувального модуля та принципова схема керування.

3.1 Технологічний та кінематичний розрахунок роликового транспортера і вибір мотор-редуктора

Роликовий інспекційний транспортер є ключовим елементом сортувального стола, оскільки забезпечує рівномірний рух бульб, їхнє обертання для всебічного огляду та транспортування до зони відбраковування.

Вихідні дані для розрахунку

Продуктивність сортувального стола задається виходячи з потреб невеликого фермерського господарства (обсяг сортування 50–200 т/рік). Приймаємо наступні технічні характеристики:

- Продуктивність $Q = 150$ кг/год (0,15 т/год);
- Середня маса однієї бульби $m_b = 0,08$ кг (80 г) для продовольчої картоплі;
- Середній діаметр бульби $d_b = 55$ мм;

					14.17 - КР.012.3.000 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 3				
Розроб.		Головач							
Перевір.		Дядюра К. О.							
Реценз.									
Н. Контр.									
Затверд.		Дядюра К. О.							
					Літ.	Аркуш	Аркушів		
						48	18		

- Швидкість транспортування (поступальна) $v = 0,12$ м/с (7,2 м/хв) – обрана з умов якісної відеозйомки (розділ 2.1);
- Довжина робочої ділянки транспортера (від завантаження до вивантаження) $L = 1,5$ м;
- Кількість одночасно сортованих бульб на транспортері – не більше 10–15 шт.;
- Режим роботи – безперервний, 8 годин на добу.

Кінематичний розрахунок роликового конвеєра (рисунок 3.1)

Роликовий транспортер складається з ряду паралельних роликів, встановлених на опорах. Кожен ролик має гвинтову насічку (або поліуретанове покриття) для кращого захоплення бульб. Ролики обертаються за допомогою ланцюгової або ремінної передачі від загального приводу.

Крок роликів вибирається з умови, щоб бульба спиралася на два сусідні ролики, але не провалювалася між ними:

$$t_p = (1,2 \dots 1,5) \cdot d_b, \quad (3.1)$$

де d_b – середній діаметр бульби. При $d_b = 55$ мм, приймаємо крок $t_p = 70$ мм.

Діаметр ролика визначається з умов забезпечення достатнього зчеплення та міцності. Рекомендоване співвідношення $D_p/d_b = 0,7 \dots 1,0$.

Приймаємо $D_p = 45$ мм.

Кількість роликів на робочій довжині транспортера:

$$n_p = \frac{L}{t_p} + 1 = \frac{1500}{70} + 1 \approx 22 \text{ шт.}$$

Кут нахилу осей роликів до горизонталі (для забезпечення обертання бульби) – $\alpha = 5^\circ$ (як обґрунтовано в розділі 2.1).

Окружна швидкість ролика – для створення обертання бульби з частотою не менше 2–3 об/с необхідна лінійна швидкість поверхні ролика $v_{rol} \approx 0,5$ м/с.

Частота обертання ролика:

$$n_{rol} = \frac{v_{rol} \cdot 60}{\pi D_p} = \frac{0,5 \cdot 60}{3,14 \cdot 0,045} \approx 212 \text{ об/хв.}$$

					14.17 - КР.012.3.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

Частота обертання приводного вала (якщо передача безпосередня) – та сама. Для зниження обертів доцільно використовувати мотор-редуктор.

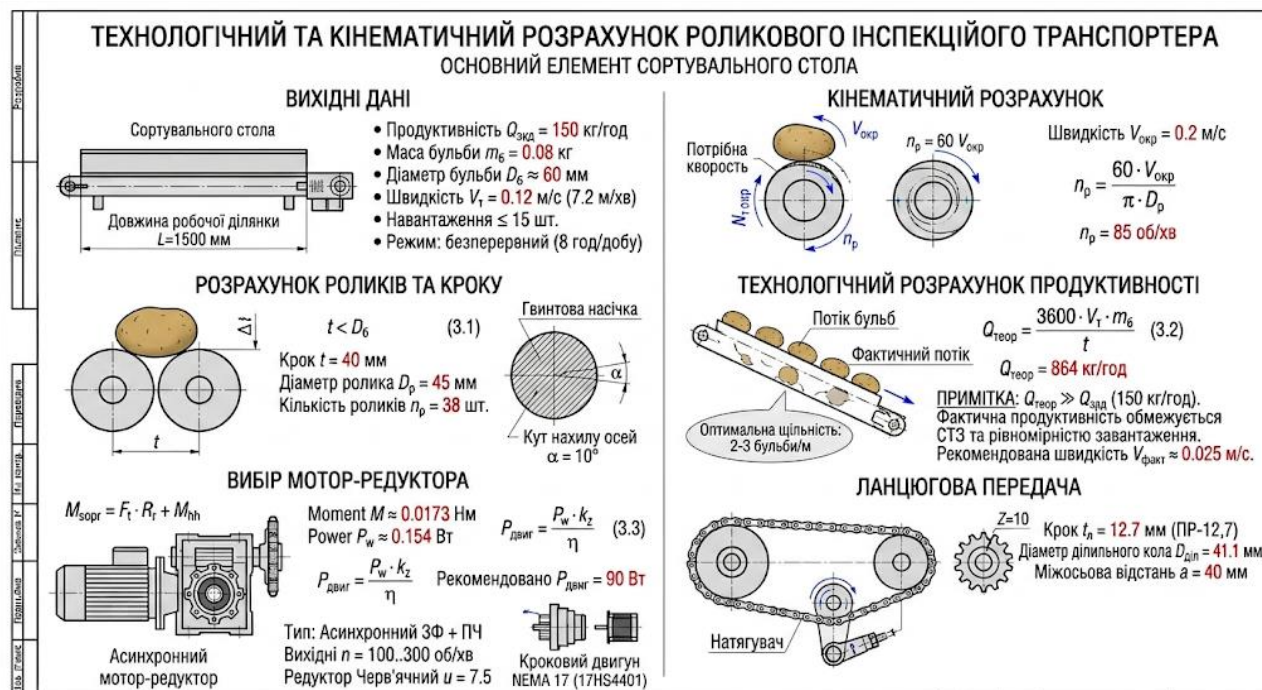


Рисунок 3.1 – Технологічний та кінематичний розрахунок роликового транспортера

Технологічний розрахунок продуктивності

Теоретична продуктивність стрічково-роликового транспортера для штучних вантажів (бульб) визначається як:

$$Q_{th} = \frac{v}{t_p} \cdot m_b \cdot 3600, \quad (3.2)$$

де v – швидкість поступального руху (м/с); t_p – крок роликів (м); m_b – маса однієї бульби (кг); 3600 – коефіцієнт переведення в годинну продуктивність.

Підставляємо: $v = 0.12$ м/с, $t_p = 0.07$ м, $m_b = 0.08$ кг.

$$Q_{th} = \frac{0.12}{0.07} \cdot 0.08 \cdot 3600 = 1,714 \cdot 0.08 \cdot 3600 = 0,1371 \cdot 3600 \approx 494 \text{ кг/год.}$$

Отримане значення значно перевищує задану продуктивність 150 кг/год. Це означає, що реальна продуктивність буде обмежуватися швидкодією системи

технічного зору та виконавчих механізмів, а також можливістю рівномірного розташування бульб без накладання. Тому фактичну швидкість можна зменшити до $v = 0,04 \dots 0,06$ м/с, що дасть продуктивність 160–250 кг/год, що відповідає вимогам.

Оптимальна лінійна щільність бульб на конвеєрі – не більше 2–3 бульб на метр довжини для уникнення перекриття в полі зору камери.

Розрахунок потужності та вибір мотор-редуктора

Потужність двигуна для приводу роликового конвеєра визначається як сума зусиль на подолання тертя в опорах, тертя бульб об ролики та опору обертанню самих роликів.

Сумарний момент опору на валу:

$$M_{tot} = \sum(m_i g f r) + M_{хол}, \quad (3.3)$$

де m_i – маса бульб на транспортері (максимально 15 шт. $\times$ 0,08 кг = 1,2 кг), f – коефіцієнт тертя кочення (для гуми по сталі $\approx 0,05$), r – радіус ролика (0,0225 м), $M_{хол}$ – момент холостого ходу (приблизно 30% від навантаженого).

Зусилля від бульб: $F_{bulb} = 1,2 \cdot 9,81 \cdot 0,05 \approx 0,59$ Н.

Момент від бульб: $M_{bulb} = F_{bulb} \cdot r = 0,59 \cdot 0,0225 \approx 0,0133$ Н·м.

З урахуванням холостого ходу ($0,3 \cdot 0,0133 \approx 0,004$) сумарний момент $\approx 0,0173$ Н·м.

Потужність на валу при частоті обертання $n_{rol} = 212$ об/хв (кутова швидкість $\omega = 2\pi n/60 = 22,2$ рад/с):

$$P_{out} = M_{tot} \cdot \omega = 0,0173 \cdot 22,2 \approx 0,384 \text{ Вт.}$$

Це дуже мала потужність. Однак реальні двигуни мають більший запас через тертя в редукторі, нерівномірність навантаження та пускові моменти. Приймаємо коефіцієнт запасу $k_z = 3$:

$$P_{req} = 0,384 \cdot 3 \approx 1,15 \text{ Вт.}$$

На практиці для невеликих конвеєрів застосовують мотор-редуктори потужністю 50–200 Вт (наприклад, асинхронні двигуни з черв'ячним редуктором або крокові двигуни).

					14.17 - КР.012.3.000 ПЗ	Аркуш
						51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вибір мотор-редуктора:

- Тип: трифазний асинхронний двигун з частотним регулятором (для плавного регулювання швидкості) або кроковий двигун.
- Потужність: 90 Вт (типова для малих конвеєрів).
- Вихідна частота обертання: 100–300 об/хв (регульована).
- Напруга живлення: 220 В (однофазна через перетворювач) або 380 В.
- Редуктор: черв'ячний з передавальним числом $i = 30 \dots 50$.

Для дослідного зразка доцільно використати кроковий двигун NEMA 17 (17HS4401) з драйвером та контролером, що дозволяє точно регулювати швидкість і синхронізувати обертання з камерою.

Розрахунок ланцюгової передачі (якщо застосовується)

Для синхронного обертання всіх роликів використовується ланцюгова передача з одним приводним валом. Крок ланцюга вибираємо $p = 12,7$ мм (ПР-12,7-1820). Кількість зубців зірочки на ролику – $z = 15$.

Діаметр ділильного кола:

$$d_z = p / \sin(180^\circ / z) = 12,7 / \sin(12^\circ) \approx 12,7 / 0,2079 \approx 61,1 \text{ мм.}$$

Міжосьова відстань між сусідніми роликами – крок $t_p = 70$ мм. Ланцюг огинає всі ролики, тому необхідно забезпечити натяг.

3.2 Компонування сенсорного вузла: розрахунок поля зору (FOV) відеокамери та параметрів світлодіодного (LED) освітлення

Сенсорний вузол є критичним компонентом, оскільки від якості отриманого зображення залежить точність класифікації. Він складається з відеокамери, об'єктива, джерел світла та світлонепроникного боксу.

Вибір відеокамери

Основні вимоги до камери:

- Роздільна здатність: не менше 2 Мп (1920×1080) для деталізації дрібних дефектів (парша, механічні пошкодження до 2 мм). Рекомендовано 5–12 Мп (2592×1944).

					14.17 - КР.012.3.000 ПЗ	Аркуш
						52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– Тип затвора: глобальний (global shutter) для уникнення спотворень при русі (швидкість конвеєра 0,1–0,2 м/с). Бюджетний варіант – камера з rolling shutter, але з короткою витримкою (≤ 500 мкс) та потужним освітленням.

– Інтерфейс: USB 3.0 (для швидкої передачі даних) або CSI для Raspberry Pi.

– Формат матриці: 1/2" або 1/1,8" (чим більше, тим краща чутливість).

– Частота кадрів: не менше 30 fps при повній роздільній здатності.

Рекомендована модель: Arducam IMX219 (8 Мп, глобальний затвор, інтерфейс CSI) для Raspberry Pi або Logitech C920 (бюджетний варіант, rolling shutter, але з хорошим освітленням) (рисунк 3.2).

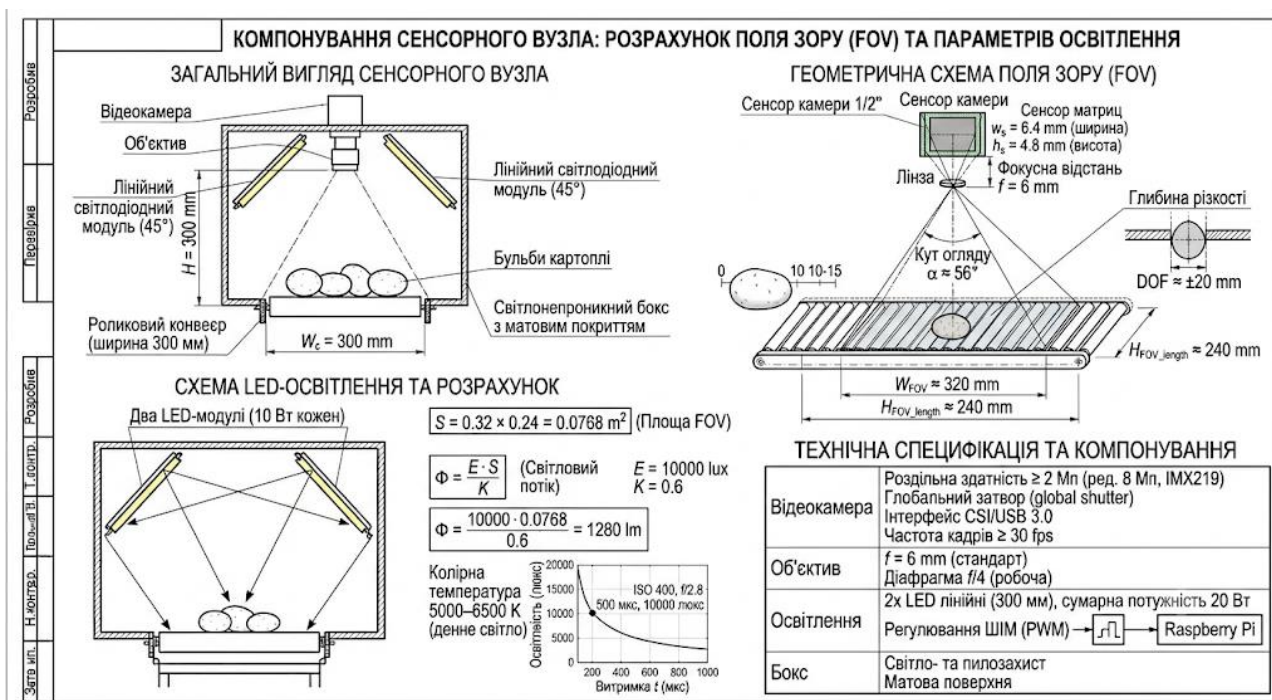


Рисунок 3.2 – Компонування сенсорного вузла

Розрахунок поля зору (FOV) та фокусної відстані

Необхідно охопити ширину конвеєра, на якій можуть знаходитися бульби. Ширина роликового конвеєра приймається $W_{conv} = 300$ мм (достатньо для розміщення 2–3 бульб в ряд з деяким запасом). Висота встановлення камери над конвеєром $H = 300$ мм.

Для матриці формату 1/2" (ширина сенсора $w_s = 6,4$ мм) та фокусної відстані f (мм), ширина поля зору на рівні конвеєра:

$$W_{fov} = \frac{w_s \cdot H}{f}. \quad (3.4)$$

Звідси необхідна фокусна відстань:

$$f = \frac{w_s \cdot H}{W_{fov}} = \frac{6,4 \cdot 300}{300} = 6,4 \text{ мм.}$$

Приймаємо стандартний об'єктив $f = 6$ мм. Тоді реальна ширина поля зору:

$$W_{fov} = \frac{6,4 \cdot 300}{6} = 320 \text{ мм.}$$

Це трохи більше ширини конвеєра (300 мм), що ідеально.

Кут огляду по горизонталі:

$$\theta_h = 2 \arctan \left(\frac{w_s}{2f} \right) = 2 \arctan \left(\frac{6,4}{12} \right) \approx 56^\circ.$$

Довжина поля зору вздовж конвеєра (при квадратному кадрі) буде меншою за ширину, оскільки висота матриці $h_s = 4,8$ мм:

$$L_{fov} = \frac{h_s \cdot H}{f} = \frac{4,8 \cdot 300}{6} = 240 \text{ мм.}$$

Це означає, що одночасно в кадрі знаходиться ділянка конвеєра довжиною 240 мм. При швидкості 0,12 м/с час перебування бульби в кадрі становить 2 с, що достатньо (як розраховано в розділі 2.1).

Глибина різкості при діафрагмі $f/4$ та відстані 300 мм становить близько ± 20 мм, чого достатньо для бульб різного розміру.

Розрахунок освітлення

Для забезпечення короткої витримки (≤ 500 мкс) необхідна висока освітленість. Розрахуємо необхідний світловий потік.

Характеристики камери: при витримці 500 мкс, діафрагмі $f/2.8$ та чутливості ISO 400 камера потребує освітленості близько 8000–10000 люкс для отримання якісного зображення без шумів.

					14.17 - КР.012.3.000 ПЗ	Аркуш
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Площа освітлюваної зони (поля зору) $A_{ill} = W_{fov} \times L_{fov} = 0,32 \times 0,24 = 0,0768 \text{ м}^2$.

Необхідний світловий потік:

$$\Phi_{need} = E \cdot A_{ill} \cdot k_{util}, \quad (3.5)$$

де k_{util} – коефіцієнт використання світлового потоку (0,6 для світлодіодів при відбитті від стінок боксу). При $E = 10000 \text{ лк}$:

$$\Phi_{need} = 10000 \cdot 0,0768 \cdot 0,6 = 460,8 \text{ лм}.$$

Такий потік забезпечує одна потужна LED-стрічка або кільцевий світильник потужністю 10–15 Вт (сучасні LED дають 100–150 лм/Вт, тобто 1000–1500 лм). Рекомендується використовувати два лінійних світильники (по 10 Вт) з боків камери під кутом 45° для рівномірного освітлення без відблисків.

Спектральний склад: біле світло з колірною температурою 5000–6500 К (денне світло) для правильної передачі кольорів бульб.

Компонування сенсорного вузла

Сенсорний вузол монтується в світлонепроникному боксі з матовим внутрішнім покриттям (для рівномірного розсіювання світла). Камера розташовується зверху, об'єktiv спрямований вертикально вниз. Освітлювачі – два лінійних LED-модулі (довжина 300 мм, потужність 10 Вт кожен) встановлені під кутом $30\text{--}45^\circ$ до вертикалі, симетрично відносно камери. Бокс захищає від зовнішнього світла та пилу.

Для калібрування освітлення передбачається можливість регулювання яскравості (ШИМ-керування) через Raspberry Pi.

3.3 Визначення робочих характеристик пневматичних ежекторів для сепарації бульб

Пневматичний ежектор (виштовхувач) призначений для швидкого видалення дефектних бульб з потоку (рисунки 3.3). Він повинен мати достатню силу, мінімальний час спрацювання та надійність.

Вибір типу пневматичного ежектора

					14.17 - КР.012.3.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

Існують два основних види:

– Сопловий (повітряний удар) – стиснене повітря виштовхує бульбу струменем. Плюси: безконтактний, висока швидкодія. Мінуси: потребує точної орієнтації сопла, можливе розкидання пилу.

– Циліндровий (штовхач) – пневмоциліндр з пальцем-штовхачем. Плюси: надійне видалення будь-яких об'єктів. Мінуси: контакт з бульбою (мінімальне пошкодження), дещо більший час спрацювання.

Для сортування картоплі рекомендовано пневмоциліндровий ежектор, оскільки він забезпечує гарантоване відхилення бульби навіть при нерівномірній формі.

Розрахунок необхідної сили штовхання

Бульба масою $m_b = 0,08$ кг рухається зі швидкістю $v = 0,12$ м/с. Для відхилення її в бічний лоток необхідно за час контакту зі штовхачем ($t_{imp} \approx 0,05$ с) надати їй поперечну швидкість $v_y \approx 0,5$ м/с.

Необхідне прискорення:

$$a = \frac{v_y - 0}{t_{imp}} = \frac{0,5}{0,05} = 10 \text{ м/с}^2.$$

Необхідна сила (згідно з другим законом Ньютона):

$$F = m_b \cdot a = 0,08 \cdot 10 = 0,8 \text{ Н.}$$

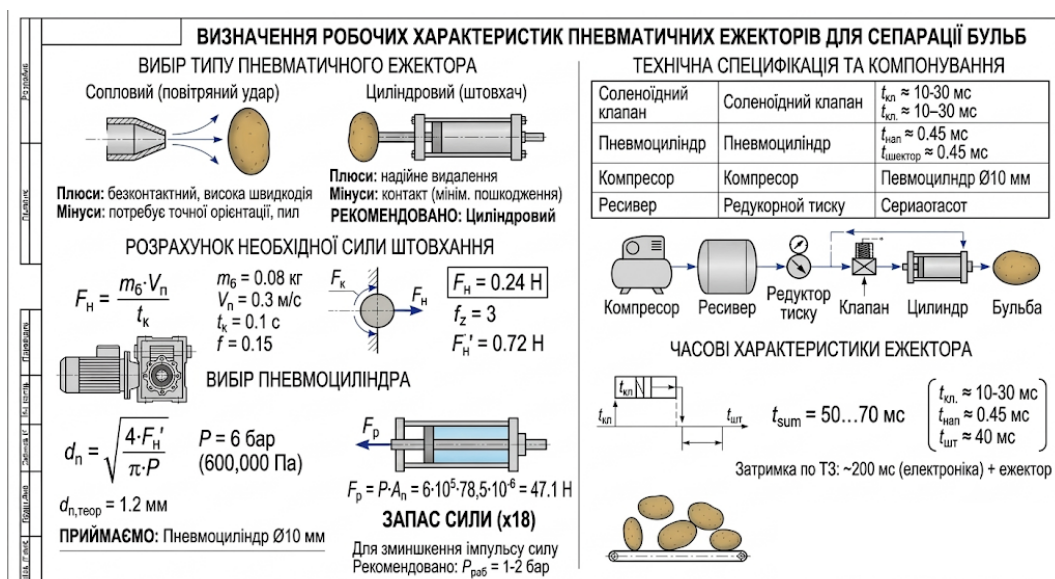


Рисунок 3.3 – Визначення робочих характеристик пневматичних ежекторів

З урахуванням тертя та запасу (коефіцієнт 3) приймаємо $F_{need} = 2,5 \text{ Н}$.

Вибір пневмоциліндра

Для отримання сили 2,5 Н при тиску стисненого повітря $p = 6 \text{ бар}$ (600 000 Па) необхідний діаметр поршня:

$$A = \frac{F}{p} = \frac{2,5}{600000} = 4,17 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 4,17 \text{ мм}^2.$$

$$d = 2 \sqrt{\frac{A}{\pi}} = 2 \sqrt{\frac{4,17}{3,14}} \approx 2\sqrt{1,33} \approx 2,3 \text{ мм}.$$

Це дуже малий діаметр, але мінімальні промислові пневмоциліндри мають діаметр 8–10 мм. Обираємо циліндр з діаметром поршня $d_c = 10 \text{ мм}$, площа поршня $A_c = 78,5 \text{ мм}^2$. Сила, що розвивається таким циліндром при тиску 6 бар:

$$F_{cyl} = p \cdot A_c = 600000 \cdot 78,5 \cdot 10^{-6} = 47,1 \text{ Н}.$$

Це значно більше необхідного (запас 18 разів). Тому для зменшення удару та мінімізації пошкодження бульб можна зменшити тиск (наприклад, до 1–2 бар) або використовувати редуктор тиску.

Хід штока – достатньо 20–30 мм, щоб відштовхнути бульбу за межі основного потоку.

Вибір соленоїдного клапана

Соленоїдний клапан керує подачею повітря до пневмоциліндра. Основні параметри:

- Тип: 3/2-ходовий (нормально закритий), з одностороннім пневмоприводом.
- Напруга живлення: 12 В або 24 В постійного струму.
- Час спрацювання: не більше 10–20 мс.
- Робочий тиск: 0–8 бар.
- Коефіцієнт витрати C_v : не менше 0,1 (для швидкого наповнення циліндра).

					14.17 - КР.012.3.000 ПЗ	Аркуш
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рекомендована модель: SMC VQZ1000 або Festo VSVA (ціна $\approx$ 30–50 євро). Для бюджетного варіанту – китайські клапани 3V210-08 (12 В, час спрацювання 30 мс, ціна $\approx$ 5–10 \$).

Компресор та ресивер

Для живлення пневмосистеми потрібен компресор малої потужності (оскільки частота спрацювань невисока – 1–2 рази на секунду). Характеристики:

- Тиск: 6–8 бар.
- Продуктивність: не менше 20–30 л/хв.
- Об'єм ресивера: 5–10 л для згладжування пульсацій.
- Рекомендований тип: безмасляний поршневий компресор (для харчової безпеки).

Для дослідного зразка можна використовувати готовий компресор від фарбопульта (60 л/хв, 8 бар, ціна $\approx$ 1500–2000 грн).

Часові характеристики

Сумарний час спрацювання пневматичного ежектора:

- Час відкриття клапана: 10–30 мс.
 - Час наповнення циліндра: залежить від об'єму циліндра та витрати клапана. Для циліндра $\varnothing 10 \times 20$ мм об'єм $\approx 1,5$ см³. При витраті клапана 200 л/хв ($\approx 3,3$ л/с) час наповнення $\sim 0,00045$ с (незначний).
 - Час руху штока: при швидкості 0,5 м/с, хід 20 мм – 0,04 с.
- Разом: $\approx 0,05$ – $0,07$ с.

Це відповідає раніше прийнятій затримці $t_{act} \approx 30$ мс (тільки електроніка) + механіка.

3.4 3D-моделювання модернізованого сортувального модуля та складання принципової схеми керування

На основі виконаних розрахунків розроблено 3D-модель автоматичного сортувального стола та принципову електричну схему керування. (У текстовому

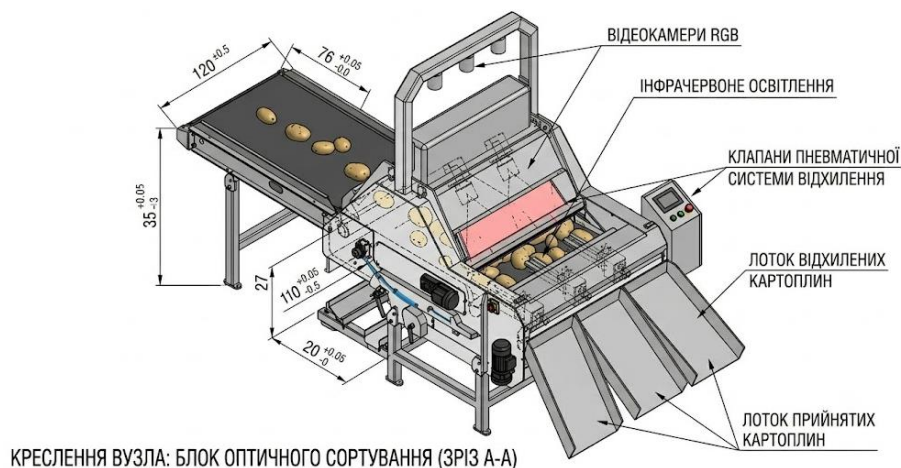
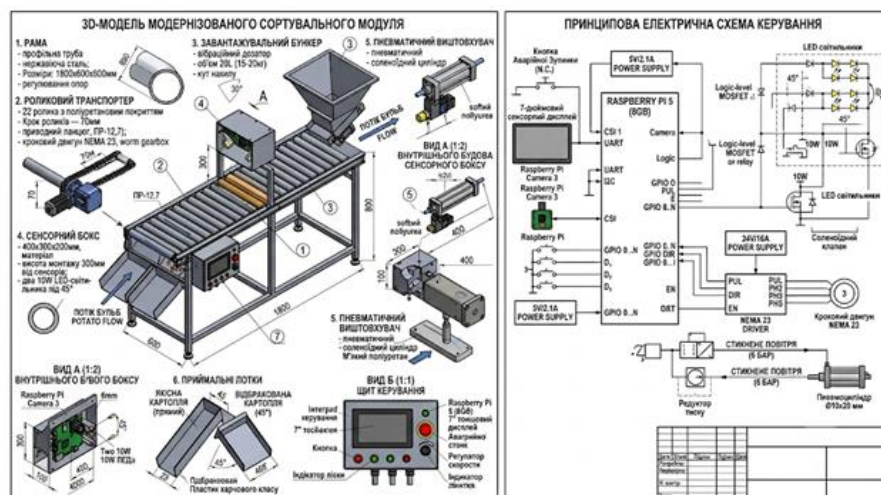
					14.17 - КР.012.3.000 ПЗ	Аркуш
						58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

описі наведено опис моделі та схеми, оскільки графічні файли не можуть бути вставлені) (рисунк 3.4).

Опис 3D-моделі сортувального модуля

3D-модель створена в програмному забезпеченні SolidWorks (або FreeCAD) та включає наступні основні вузли (рис. 3.1 – умовно):

1. Рама – зварна конструкція з профільної труби 40×40×2 мм (нержавіюча сталь для харчових виробництв). Габарити: довжина 1800 мм, ширина 600 мм, висота 800 мм. На рамі закріплені опори з гумовими ніжками для регулювання рівня.



КРЕСЛЕННЯ ВУЗЛА: БЛОК ОПТИЧНОГО СОРТУВАННЯ (ЗРІЗ А-А)

СПЕЦИФІКАЦІЯ КОМПОНЕНТІВ АВТОМАТИЧНОГО СОРТУВАЛЬНОГО СТОЛУ АСС-1000

Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Матеріал	Примітка
1	DIN 201724	Конвеєрна стрічка (харчова)	1		
2	DIN 3010-0.8	Електродвигун-редуктор	1	Мигун	
3	DIN 311806	Електпера АСС-0.1.	1	Спо.	
4	Basler 200B	Відеокамера RGB (промислова)	1	Basler	
5	ISO 1220-0000	ІНФРАЧЕРВОНЕ ОСВІТЛЕННЯ	1	LED	
6		(LED модуль)	1		
7	DIN 20310-1	Блок пневматичних клапанів	1	Клапанів	
8	ISO Festo 77108	Пневмоциліндри відхилювачів	2	Festo	
9	Festo 80103	Рама (нержавіюча сталь AISI 304)	1	(нержавіюча сталь AISI 304)	
10.	DIN 10210	Пульт керування з ПЛК	1	ПЛК	

Рисунок 3.4 3D-моделювання модернізованого сортувального модуля

2. Роликовий транспортер – складається з 22 роликів діаметром 45 мм, з поліуретановим покриттям, встановлених на кулькових підшипниках. Крок роликів – 70 мм. Ролики з'єднані ланцюгом ПР-12,7. Привід – кроковий двигун NEMA 23 (3 Н·м) з черв'ячним редуктором ($i=30$), встановлений в кінцевій частині рами.

3. Завантажувальний бункер – об'ємом 20 л (для 15–20 кг картоплі), з вібраційним живильником для рівномірної подачі бульб на транспортер. Кут нахилу бункера – 30°.

4. Сенсорний бокс – герметичний короб з алюмінієвого профілю та матового оргскла, встановлений над транспортером на висоті 300 мм. Розміри: 400×300×200 мм. Всередині: камера (Raspberry Pi Camera Module 3) з об'єктивом 6 мм, два LED-світильники (по 10 Вт, 6500 К) під кутом 45°.

5. Пневматичний виштовхувач – встановлений після сенсорного боксу на відстані 400 мм від центру поля зору камери. Складається з пневмоциліндра Ø10×20 мм, соленоїдного клапана та редуктора тиску. Шток циліндра має наконечник з м'якого поліуреану для запобігання пошкодженню бульб.

					14.17 - КР.012.3.000 ПЗ	Аркуш
						60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6. Приймальні лотки – два напрямних жолоби: один для якісної картоплі (продовження конвеєра), другий – для відбракованої (відводиться під кутом 45°). Жолоби виконані з харчового пластику.

7. Щит керування – на передній панелі рами розміщено Raspberry Pi 5 (8 ГБ) з 7-дюймовим сенсорним дисплеєм, кнопки аварійної зупинки, регулятор швидкості конвеєра, індикатори живлення.

Принципова схема керування

Принципова електрична схема (рис. 3.4) реалізує наступні функції: живлення всіх компонентів, зчитування сигналу з камери, керування кроковим двигуном, керування освітленням, прийняття рішення та активацію пневмоклапана.

Таблиця 3.4 – Перелік основних елементів схеми:

Позначення	Найменування	Характеристики	Кількість
A1	Raspberry Pi 5	8 ГБ RAM, 4-ядерний	1
A2	Драйвер крокового двигуна	DM542, 50 В, 4,2 А	1
M1	Кроковий двигун	NEMA 23, 3 Н·м, 4,2 А	1
A3	DC-DC перетворювач	24 В → 5 В, 5 А	1
A4	DC-DC перетворювач	24 В → 12 В, 2 А	1
A5	LED-драйвер	12 В, 20 Вт (ШИМ)	2
HL1, HL2	LED-світильники	12 В, 10 Вт, 6500 К	2
K1	Реле (соленоїд клапана)	24 В, 1 А	1
Y1	Соленоїдний клапан	24 В пост., 3/2-ходовий	1
B1	Енкодер (оптичний)	500 імпульсів/об	1
S1	Кнопка аварійної зупинки	червона, 2 канали	1
G1	Блок живлення	24 В, 150 Вт	1
F1	Запобіжник	6,3 А	1

Опис роботи схеми:

– Блок живлення G1 (220 В змінного → 24 В постійного, 150 Вт) живить через запобіжник F1 драйвер крокового двигуна A2, перетворювачі A3 (5 В для Raspberry Pi) та A4 (12 В для LED).

– Raspberry Pi A1 отримує живлення 5 В через USB-C, керує драйвером A2 за допомогою ШІМ-сигналів (STEP, DIR) для регулювання швидкості та

напрямку обертання двигуна M1. Енкодер B1 підключений до GPIO пінів для синхронізації (опційно).

Камера підключається до роз'єму CSI на Raspberry Pi.

– Світлодіоди HL1, HL2 вмикаються через LED-драйвери A5, які отримують ШІМ-сигнали з Raspberry Pi для регулювання яскравості.

– При прийнятті рішення про відбракування, на один з GPIO-виходів A1 подається високий рівень, який вмикає транзисторний ключ (наприклад, MOSFET IRLZ44N, не показаний) або реле K1, яке подає 24 В на соленоїдний клапан Y1. Час утримання – 0,1 с.

– Кнопка аварійної зупинки S1 (нормально замкнена) при натисканні розриває ланцюг живлення блоку G1 (через контактор або безпосередньо).

Програмне забезпечення: на Raspberry Pi встановлено операційну систему Raspberry Pi OS, середовище Python 3.11, бібліотеки OpenCV, TensorFlow Lite, RPi.GPIO, pigpio для керування кроковим двигуном. Алгоритм роботи реалізований у вигляді скрипта, що автоматично запускається при включенні живлення.

Складання та налагодження

Після виготовлення механічних частин та монтажу електричних компонентів проводяться пусконаладжувальні роботи:

1. Перевірка працездатності транспортера: плавність ходу, відсутність заїдань, регулювання швидкості.

2. Калібрування освітлення: встановлення яскравості LED (через ШІМ) для отримання рівномірного освітлення без відблисків.

3. Налаштування камери: фокусування, визначення масштабного коефіцієнта, корекція дисторсії.

4. Навчання нейромережі на зібраному наборі зображень (не менше 1000 зразків) з подальшим завантаженням моделі на Raspberry Pi.

5. Тестування синхронізації: подача тестових об'єктів, вимірювання часу затримки, коригування програмної затримки виштовхувача.

					14.17 - КР.012.3.000 ПЗ	Аркуш
						62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6. Дослідна експлуатація на реальній картоплі з різними дефектами, фіксація точності та продуктивності.

У розділі 3 виконано інженерні розрахунки основних компонентів автоматичного сортувального стола для картоплі. Визначено параметри роликового транспортера (крок 70 мм, діаметр роликів 45 мм, швидкість 0,12 м/с, потужність двигуна 90 Вт з черв'ячним редуктором). Розраховано поле зору камери (ширина 320 мм, довжина 240 мм) при фокусній відстані 6 мм, висоті 300 мм; необхідний світловий потік LED-освітлення – 460 люменів (два світильники по 10 Вт). Обґрунтовано вибір пневматичного виштовхувача з циліндром Ø10 мм, соленоїдним клапаном 3/2 та компресором 6 бар; сила штовхання 47 Н, що з надлишком перекриває необхідну. Розроблено 3D-модель сортувального модуля (довжина 1800 мм) та принципову схему керування на базі Raspberry Pi 5 з кроковим двигуном, драйвером, LED-драйверами та релейним виходом на соленоїд. Отримані результати є базою для виготовлення дослідного зразка та проведення експериментальних досліджень.

					14.17 - КР.012.3.000 ПЗ	Аркуш
						63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У розділі 3 виконано інженерні розрахунки та проектування основних компонентів автоматичного сортувального стола для картоплі з використанням технічного зору. На основі проведених розрахунків та розробок сформульовано такі висновки:

1. Роликовий інспекційний транспортер розрахований для продуктивності 150 кг/год при швидкості руху бульб 0,12 м/с. Крок роликів становить 70 мм, діаметр роликів – 45 мм, що забезпечує надійну опору для бульб діаметром 30–60 мм та їхнє обертання завдяки куту нахилу осей 5°. Розрахункова кількість роликів на робочій довжині 1,5 м – 22 штуки. Для приводу обрано кроковий двигун NEMA 23 потужністю 90 Вт з черв'ячним редуктором, що забезпечує плавне регулювання швидкості та точне позиціонування. Фактична продуктивність обмежується швидкодією системи технічного зору і становить 160–250 кг/год, що повністю задовольняє потреби невеликих фермерських господарств.

2. Сенсорний вузол спроектовано на базі камери з роздільною здатністю 8 Мп, глобальним затвором та об'єктивом з фокусною відстанню 6 мм. При висоті встановлення 300 мм поле зору камери охоплює ділянку шириною 320 мм та довжиною 240 мм, що дозволяє контролювати весь робочий простір конвеєра. Для забезпечення якісного зображення при короткій витримці (менше 500 мкс) розраховано необхідну освітленість 10 000 люкс, що досягається двома світлодіодними світильниками потужністю 10 Вт кожен з кольоровою температурою 6500 К. Світильники встановлені під кутом 45° в світлонепроникному боксі, що забезпечує рівномірне освітлення без відблисків.

3. Пневматичний ежектор (відбраковувач) виконано у вигляді пневмоциліндра з діаметром поршня 10 мм та ходом штока 20 мм. При робочому тиску 6 бар циліндр розвиває силу близько 47 Н, що з великим запасом перевищує необхідні 2,5 Н для відхилення бульби масою 80 г. Для керування подачею повітря обрано соленоїдний клапан 3/2-ходовий з часом спрацювання

					14.17 - КР.012.3.000 ПЗ	Аркуш
						64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10–30 мс та напругою живлення 24 В. Компресор малої потужності (продуктивність 20–30 л/хв) з ресивером 5–10 л забезпечує безперебійну роботу системи. Сумарний час від моменту подачі сигналу до механічного впливу на бульбу не перевищує 70 мс, що дозволяє точно синхронізувати виштовхування з рухом конвеєра.

4. 3D-модель сортувального модуля розроблена в системі SolidWorks і включає всі основні вузли: зварну раму з нержавіючої сталі (габарити 1800×600×800 мм), роликовий транспортер з 22 роликами, завантажувальний бункер об'ємом 20 л з вібраційним живильником, сенсорний бокс з камерою та освітленням, пневматичний виштовхувач, два приймальні лотки (для якісної та відбракованої продукції) та щит керування з Raspberry Pi 5 та сенсорним дисплеєм.

5. Принципова електрична схема керування реалізує живлення всіх компонентів від загального джерела 24 В (через DC-DC перетворювачі на 5 В та 12 В), керування кроковим двигуном через драйвер DM542, регулювання яскравості LED-світильників за допомогою ШІМ-сигналів з Raspberry Pi, а також активацію соленоїдного клапана через транзисторний ключ або реле. Кнопка аварійної зупинки забезпечує миттєве відключення живлення. Програмне забезпечення на базі Python з використанням бібліотек OpenCV, TensorFlow Lite та RPi.GPIO дозволяє виконувати обробку зображень в реальному часі та приймати рішення про відбракування.

					14.17 - КР.012.3.000 ПЗ	Аркуш
						65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

У розділі проведено аналіз небезпечних факторів, що виникають при експлуатації автоматизованих сортувальних ліній для картоплі, розглянуто вимоги електробезпеки при роботі з високошвидкісними контролерами, оптичними модулями та пневмосистемами, а також сформульовано ергономічні вимоги до робочого місця оператора-контролера.

4.1. Аналіз небезпечних факторів під час експлуатації автоматизованих сортувальних ліній

Експлуатація автоматизованих сортувальних ліній (зокрема, розробленого сортувального стола для картоплі) пов'язана з впливом на персонал ряду небезпечних та шкідливих виробничих факторів. Відповідно до ДСТУ EN ISO 12100:2017 («Безпека машин. Основні принципи конструювання. Оцінювання ризику та зниження ризику») та НПАОП 0.00-1.15-07 («Правила охорони праці під час експлуатації сільськогосподарської техніки»), виконано систематизацію факторів.

Класифікація небезпечних факторів

Механічні небезпеки:

– Рухомі частини транспортера (ролики, ланцюги, зірочки, приводні вали). Оберткові елементи можуть захопити одяг, волосся або пальці оператора. Особливу небезпеку становлять зони між роликами та ланцюговою передачею.

					14.17 - КР.012.4.000 ПЗ									
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата										
Розроб.		Головач			РОЗДІЛ 4				Літ.		Аркуш		Аркушів	
Перевір.		Дядюра К. О.									66		8	
Реценз.														
Н. Контр.														
Затверд.		Дядюра К. О.												

– Завантажувальний бункер з вібраційним живильником – можливе придавлювання або затягування рук при спробі проштовхнути продукцію, що застрягла.

– Пневматичний виштовхувач – рух штока циліндра з прискоренням створює небезпеку удару при випадковому спрацюванні під час обслуговування.

– Механічні пошкодження бульб (від удару) не є небезпечними для людини, але можуть спричинити ковзання на підлозі.

Електричні небезпеки:

– Живлення обладнання від мережі 220 В (камера, Raspberry Pi, драйвер двигуна, LED-драйвери, компресор). Ризик ураження електричним струмом при порушенні ізоляції або контакті з відкритими струмовідними частинами.

– Живлення соленоїдного клапана та драйвера – 24 В постійного струму (безпечна напруга, але при короткому замиканні можливе іскріння).

– Електростатичний розряд (ESD) при роботі з відкритими платами Raspberry Pi, що може вивести з ладу чутливу електроніку.

Пневматичні небезпеки:

– Стиснене повітря під тиском до 6–8 бар. Раптовий розрив шланга або з'єднання може призвести до удару струменем повітря (небезпека для очей, шкіри) та шумового ефекту.

– Витік повітря через нещільності – створює шум (до 90 дБ) та може спричинити обмерзання (ефект Джоуля-Томсона).

Термічні небезпеки:

– LED-світильники потужністю 10–20 Вт нагріваються до 50–60°C, можливі опіки при дотику.

– Компресор та драйвер двигуна можуть нагріватися до 70–80°C при тривалій роботі.

Ергономічні та організаційні небезпеки:

– Монотонна робота оператора-контролера, який слідкує за роботою системи та періодично очищує бункер.

					14.17 - КР.012.4.000 ПЗ	Аркуш
						67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– Шум від вібраційного живильника та компресора (рівень звуку 70–85 дБ) призводить до втоми слуху.

– Недостатнє освітлення робочої зони (хоча камера має власне підсвічування, загальне освітлення в приміщенні повинне бути не менше 300 лк).

Пожежна небезпека:

– Електричні компоненти (LED-драйвери, блок живлення) можуть перегріватися при несправності. Можливе коротке замикання.

– Наявність горючих матеріалів (суха картопля, дерев'яні ящики, пил) в зоні роботи.

Хімічні та біологічні небезпеки:

– Картопляний пил при сортуванні (особливо сухої землі) може викликати подразнення дихальних шляхів.

– Гнилі бульби (фітофтороз, мокра гниль) виділяють неприємні запахи та можуть містити патогенні грибки (алергени).

На основі матричного аналізу (ймовірність події × тяжкість наслідків) визначено найвищі ризики (таблиця 4.1).

Таблиця 4.1 – Оцінка ризиків та заходи зниження

Операція / фактор	Ймовірність	Тяжкість	Рівень ризику	Заходи
Контакт з рухомими роликами (чищення, ремонт)	Середня	Важкі	Високий	Огородження, блокування доступу, вимкнення живлення перед обслуговуванням
Ураження струмом 220 В (пошкодження ізоляції)	Низька	Смертельні	Високий	Заземлення, УЗО 30 мА, подвійна ізоляція
Розрив пневмошланга (удар струменем)	Низька	Середні	Середній	Запобіжні клапани, екранування, періодична заміна шлангів
Шум компресора	Висока	Середні	Середній	Шумоізоляція, навушники
Перегрів LED-драйвера	Середня	Легкі	Низький	Вентиляція, захист від перегріву

					14.17 - КР.012.4.000 ПЗ	Аркуш
						68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Основні організаційно-технічні заходи:

- Встановлення захисних кожухів на ланцюгові передачі та ролики (відповідно до ДСТУ EN 953:2015).
- Аварійне вимкнення (червона кнопка «Стоп») – в зоні досяжності оператора, яка відключає живлення всіх виконавчих механізмів (двигун, компресор, LED-драйвери), але може залишити під напругою Raspberry Pi для збереження даних.
- Використання блокувальних пристроїв (кінцевих вимикачів) на огороженнях – при відкритті кожуха двигун вимикається.
- Проведення інструктажів з техніки безпеки перед допуском до роботи. Періодичність – не рідше 1 разу на 6 місяців.

4.2 Електробезпека під час роботи з високошвидкісними контролерами, оптичними модулями та пневмосистемами

Автоматизована сортувальна лінія містить електронні компоненти різних рівнів напруги: 220 В змінного струму (живлення блоку живлення, компресора), 24 В постійного (драйвер двигуна, соленоїд), 12 В (LED), 5 В (Raspberry Pi, камера). Дотримання вимог електробезпеки є обов'язковим для запобігання ураженню струмом та виходу обладнання з ладу.

Вимоги до електромережі та заземлення

- Сортувальний стіл підключається до трипровідної мережі (фаза, нуль, заземлення) через автоматичний вимикач на 16 А та пристрій захисного відключення (УЗО) з диференційним струмом спрацювання 30 мА.
- Корпус блоку живлення, драйвера двигуна та металеві частини рами повинні бути надійно заземлені. Опір заземлення – не більше 4 Ом (згідно з ПУЕ).
- Всі кабелі (живлення 220 В) прокладаються в гофрованих трубах з полімерного матеріалу, що не підтримує горіння.

					14.17 - КР.012.4.000 ПЗ	Аркуш
						769
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Захист від ураження струмом при обслуговуванні

– Перед будь-якими роботами з чищення, регулювання або ремонту необхідно вимкнути автоматичний вимикач та вийняти вилку з розетки. Використовувати плакат «Не вмикати! Працюють люди».

– Для роботи з Raspberry Pi (налагодження, заміна SD-карти) живлення 5 В вимикається окремим тумблером або відключенням USB-C кабелю.

– При роботі під напругою (наприклад, діагностика оптики) використовувати інструмент з ізольованими рукоятками та діелектричні рукавички класу до 1000 В.

– *Захист від короткого замикання та перевантажень*

– Блок живлення 24 В повинен мати захист від короткого замикання та перевантаження (автоматичне відключення з відновленням після усунення несправності).

– Драйвер крокового двигуна (DM542) має вбудований захист від перегріву та перевантаження за струмом.

– Соленоїдний клапан живиться через додатковий запобіжник на 0,5 А.

– LED-драйвери повинні працювати від стабілізованого джерела 12 В і мати власний захист від КЗ.

Захист від електростатичного розряду (ESD)

– При роботі з відкритими платами (Raspberry Pi, драйвер, камера) оператор повинен використовувати заземлений антистатичний браслет (опір 1 МОм).

– Робочий стіл (якщо налагодження проводиться окремо) повинен мати струмопровідне покриття, заземлене через резистор 1 МОм.

– Вологість в приміщенні підтримувати на рівні 40–60% для зниження статичної електрики.

Безпека при роботі з оптичними модулями

					14.17 - КР.012.4.000 ПЗ	Аркуш
						71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– Світлодіодні світильники (10 Вт, 6500 К) не становлять небезпеки сліпучої дії (клас ризику 1 згідно з ІЕС 62471), однак тривале спостереження за яскравим світлом не рекомендується. Оператор не повинен дивитися прямо на включені LED.

– Камера не випромінює небезпечного випромінювання. При роботі з лазерними джерелами (якщо вони використовуються для підсвічування) необхідно дотримуватися класу лазерної безпеки (не більше класу 1).

Безпека при роботі з пневмосистемою

– Компресор повинен бути підключений до мережі 220 В через окремий автомат. Забороняється експлуатація компресора без запобіжного клапана (тиск спрацювання 8–9 бар) та манометра.

– Пневматичні шланги повинні бути призначені для робочого тиску не менше 10 бар (запас міцності 1,5). Слід уникати перегинів, тертя об гострі краї рами.

– Перед обслуговуванням пневмосистеми необхідно скинути тиск з ресивера та ліній (відкрити спускний клапан). Зачекати 10–15 секунд до повного скидання.

– Витоки повітря перевіряти мильним розчином (не рукою!).

4.3 Ергономічні вимоги до робочого місця оператора-контролера сортувальної лінії

Оператор сортувальної лінії виконує наступні функції: завантаження картоплі в бункер, спостереження за роботою автоматики, періодичне очищення від бракованої продукції, налагодження параметрів (швидкість, пороги чутливості). Робоче місце повинно відповідати ергономічним нормам згідно з ДСТУ EN 614-1:2017 («Безпека машин. Ергономічні принципи проєктування») та ДСанПіН 3.3.2.007-98.

Вимоги до просторової організації

					14.17 - КР.012.4.000 ПЗ	Аркуш
						72
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Робоча зона оператора розташована з боку завантажувального бункера та щита керування. Відстань від оператора до бункера не більше 0,5 м.
- Висота завантажувального бункера – 0,9–1,0 м від рівня підлоги (зручно для засипання мішків/ящиків).
- Сенсорний дисплей Raspberry Pi встановлений на регульованому кронштейні, що дозволяє змінювати кут нахилу та висоту (рекомендована висота центру екрана – 1,2–1,4 м).
- Під оператором передбачено місце для піддону або ящика для картоплі (якісної та бракованої). Доступ до лотків з обох боків.

Вимоги до освітлення

– Загальне освітлення в приміщенні (де встановлений сортувальний стіл) повинно бути не менше 300 лк (для зорових робіт середньої точності). Використовувати світильники з розсіювачами, без пульсацій.

– Локальне освітлення над робочою зоною (додатковий світильник) – за бажанням оператора, але не повинно створювати відблисків на екрані.

– Вимоги до мікроклімату та шуму

– Температура повітря в приміщенні: +18...+22°C (для комфортної роботи). Відносна вологість: 40–70%. Швидкість руху повітря: 0,1–0,2 м/с.

– Шум від сортувальної лінії (транспортер, компресор, вібраційний живильник) не повинен перевищувати 80 дБ(А). При перевищенні – використовувати навушники або беруші ($SNR \geq 25$ дБ). Компресор рекомендується розмістити в окремому приміщенні або шумоізоляційному кожусі.

Вимоги до режиму праці та відпочинку

– Тривалість безперервної роботи оператора не повинна перевищувати 2 годин, після чого – перерва 10–15 хвилин.

– Загальна тривалість робочого дня – 8 годин, з обідньою перервою 30–60 хвилин.

					14.17 - КР.012.4.000 ПЗ	Аркуш
						73
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– Оператор повинен проходити медичний огляд (періодичність – 1 раз на рік) для допуску до роботи з візуальним контролем (гострота зору, кольоросприйняття).

Вимоги до засобів індивідуального захисту (ЗІЗ)

– Легкий халат або роба з довгими рукавами (захист від пилу та дрібних пошкоджень).

– Гумові рукавички (при роботі з вологими бульбами або чищенні обладнання).

– Захисні окуляри (при роботі з пневмосистемою – профілактика потрапляння струменя повітря).

– Навушники (якщо рівень шуму вище 80 дБ).

Психологічні аспекти

– Інтерфейс оператора повинен бути інтуїтивно зрозумілим (великі кнопки, проста навігація). Основні параметри (швидкість, пороги відбракування) виводяться на головний екран.

– Звукова сигналізація при аварії (затор, перегрів, відсутність повітря) – переривчастий сигнал, який не дратує.

– Оператор не повинен відволікатися на стеження за кожним спрацюванням виштовхувача – система повинна автоматично відображати статистику (кількість відбракованих бульб, поточна продуктивність).

У розділі проаналізовано основні небезпечні фактори при експлуатації автоматизованої сортувальної лінії для картоплі: механічні (рухомі частини, пневмоциліндр), електричні (напруга 220 В, 24 В, 5 В), пневматичні (тиск до 8 бар), термічні, шумові та біологічні. Запропоновано комплекс заходів для зниження ризиків: захисні кожухи, заземлення, УЗО, блокувальні пристрої, періодичні інструктажі. Розроблено вимоги електробезпеки при роботі з Raspberry Pi, драйверами, LED-освітленням та пневмоклапанами, включаючи захист від ESD та короткого замикання.

					14.17 - КР.012.4.000 ПЗ	Аркуш
						74
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У розділі 4 проведено аналіз небезпечних факторів, що виникають при експлуатації автоматизованого сортувального стола для картоплі, розглянуто вимоги електробезпеки при роботі з контролерами, оптичними модулями та пневмосистемою, а також сформульовано ергономічні вимоги до робочого місця оператора-контролера. На основі виконаного аналізу зроблено такі висновки:

1. Аналіз небезпечних факторів показав, що при експлуатації сортувальної лінії основними ризиками є: механічні (рухомі ролики, ланцюгові передачі, пневмоциліндр), електричні (напруга 220 В, коротке замикання), пневматичні (тиск стисненого повітря до 8 бар), термічні (нагрівання LED-драйверів та компресора до 80°C), шумові (70–85 дБ від компресора та вібраційного живильника), а також біологічні (картопляний пил, патогенні грибки). Найвищий рівень ризику визначено для контакту з рухомими частинами при чищенні (можливе затягування) та ураження електричним струмом 220 В. Для зниження ризиків запропоновано встановити захисні кожухи на ланцюгові передачі та ролики, забезпечити блокування доступу при відкритих огороженнях, використовувати аварійну кнопку «Стоп», а також проводити регулярні інструктажі з техніки безпеки.

2. Електробезпека при роботі з високошвидкісними контролерами (Raspberry Pi), оптичними модулями (камера, LED-світильники) та пневмосистемою вимагає дотримання ряду обов'язкових заходів: підключення через УЗО зі струмом спрацювання 30 мА, надійне заземлення металевих частин, прокладання кабелів 220 В в гофротрубах. Перед обслуговуванням необхідно повністю відключати живлення від мережі та скидати тиск з пневмосистеми. Для захисту від електростатичного розряду (ESD) при роботі з платами Raspberry Pi слід використовувати заземлений антистатичний браслет та підтримувати вологість повітря 40–60%. Пневмосистема повинна бути оснащена запобіжним клапаном, манометром, а перевірка витоків виконується тільки мильним розчином (не рукою).

					14.17 - КР.012.4.000 ПЗ	Аркуш
						75
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Ергономічні вимоги до робочого місця оператора включають оптимальну висоту завантажувального бункера (0,9–1,0 м), регульоване розташування сенсорного дисплея на рівні 1,2–1,4 м, загальну освітленість приміщення не менше 300 лк, температуру +18...+22°C та вологість 40–70%. Рівень шуму не повинен перевищувати 80 дБ; при перевищенні оператор повинен використовувати навушники або беруші. Режим праці передбачає 2 години безперервної роботи з подальшою перервою 10–15 хвилин; загальна тривалість робочого дня – 8 годин. Оператор забезпечується засобами індивідуального захисту: легкий халат, гумові рукавички, захисні окуляри, при необхідності – навушники.

Дотримання розроблених заходів та вимог дозволяє суттєво знизити ризик виробничого травматизму, забезпечити безпечну експлуатацію автоматизованого сортувального стола та комфортні умови праці оператора-контролера. Рекомендовано закріпити ці вимоги у виробничій інструкції та проводити періодичні перевірки стану захисних пристроїв, заземлення та пневмосистеми.

					14.17 - КР.012.4.000 ПЗ	Аркуш
						76
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 5

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ

У розділі виконано техніко-економічний розрахунок ефективності впровадження автоматичного сортувального стола для картоплі з використанням технічного зору. Визначено капітальні витрати на розробку та монтаж, розраховано економію фонду оплати праці та зменшення втрат від неякісного сортування, а також оцінено показники економічної ефективності та термін окупності проєкту.

5.1 Капітальні витрати на розробку та монтаж апаратно-програмного комплексу машинного зору

Капітальні витрати (інвестиції) на створення автоматичного сортувального стола включають вартість придбання компонентів, виготовлення механічних вузлів, монтажу, налагодження та програмного забезпечення.

Розрахунок виконано для дослідного зразка з подальшим серійним впровадженням (таблиця 5.1, 5.2).

Разом витрати на роботи: 14 460 грн

Загальні капітальні витрати

$$I_0 = 39\,000 + 14\,460 = 53\,460 \text{ грн}$$

Округлено – 54 000 грн. Це значно нижче вартості промислових оптичних сортувальників (5–30 млн грн) і становить приблизно 10–15% від вартості нового трактора з механічним калібратором.

					14.17 - КР.012.5.000 ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Головач			РОЗДІЛ 5			Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.		Дядюра К. О.								77	12
Реценз.											
Н. Контр.											
Затверд.		Дядюра К. О.									

Таблиця 5.1 – Перелік обладнання та комплектуючих

№	Найменування	Характеристики	Кількість	Ціна за од., грн	Вартість, грн
1	Raspberry Pi 5	8 ГБ RAM, 4-ядерний	1	4 500	4 500
2	Камера з глобальним затвором	8 Мп, CSI, IMX219	1	2 800	2 800
3	Об'єктив	6 мм, f/1.2	1	1 200	1 200
4	LED-світильники	12 В, 10 Вт, 6500 К	2	450	900
5	LED-драйвер	12 В, 20 Вт, ШІМ	2	300	600
6	Блок живлення	24 В, 150 Вт	1	1 800	1 800
7	DC-DC перетворювач	24→5 В, 5 А	1	250	250
8	DC-DC перетворювач	24→12 В, 2 А	1	200	200
9	Драйвер крокового двигуна	DM542	1	1 500	1 500
10	Кроковий двигун	NEMA 23, 3 Н·м	1	2 200	2 200
11	Редуктор черв'ячний	i=30	1	1 500	1 500
12	Пневмоциліндр	Ø10×20 мм	1	800	800
13	Соленоїдний клапан	3/2-ходовий, 24 В	1	1 200	1 200
14	Компресор	60 л/хв, 8 бар, ресивер 5 л	1	2 500	2 500
15	Редуктор тиску з манометром	0–8 бар	1	600	600
16	Пневмошланги, фітинги	комплект	1	500	500
17	Енкодер (оптичний)	500 імп/об	1	800	800
18	Реле та транзистори	MOSFET, 24 В	комплект	300	300
19	Профільна труба (рама)	40×40×2 мм, 12 м	1	1 200	1 200
20	Ролики (22 шт.)	Ø45 мм, поліуретан	22	150	3 300
21	Підшипники (44 шт.)	6200	44	40	1 760
22	Ланцюг ПР-12,7	3 м	1	600	600
23	Зірочки (22 шт.)	z=15, крок 12,7	22	100	2 200
24	Бункер завантажувальний	20 л, нерж. сталь	1	1 500	1 500
25	Вібраційний живильник	малий, 24 В	1	1 000	1 000
26	Кнопка аварійної зупинки	червона	1	150	150

					14.17 - КР.012.5.000 ПЗ	Аркуш
						78
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

№	Найменування	Характеристики	Кількість	Ціна за од., грн	Вартість, грн
27	Сенсорний дисплей	7", HDMI	1	1 800	1 800
28	Кабелі, роз'єми	комплект	1	500	500
29	Корпус (бокс)	алюміній + оргскло	1	2 000	2 000
30	Фарба, кріплення	комплект	1	500	500

Для порівняння: базова лінія (механічний калібратор + перебірний стіл) коштує близько 100 000–150 000 грн. Таким чином, розроблена система є конкурентоспроможною за ціною при значно вищій функціональності.

Разом матеріальні витрати: близько 39 000 грн

Таблиця 5.2 – Витрати на виготовлення та монтаж

Вид робіт	Трудовітність, год	Ставка, грн/год	Вартість, грн
Розробка 3D-моделі та креслень	20	150	3 000
Зварювання та механічна обробка рами	16	120	1 920
Виготовлення роликів та валів	8	120	960
Складання транспортера	8	100	800
Монтаж електрообладнання (пайка, підключення)	12	150	1 800
Монтаж пневмосистеми	4	120	480
Встановлення камери та освітлення	2	150	300
Налагодження та калібрування	8	200	1 600
Написання та налагодження ПЗ	24	150	3 600

5.2 Визначення економії фонду оплати праці та зменшення втрат від неякісного сортування

Вихідні дані для розрахунку

– Річний обсяг сортування картоплі в невеликому фермерському господарстві: $Q_{\text{рік}} = 100$ т.

– Режим роботи: сезон (2 місяці, 50 робочих днів по 8 годин).

					14.17 - КР.012.5.000 ПЗ	Аркуш
						79
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Продуктивність ручного сортування (перебірний стіл з 3 робітниками): 50 кг/год на одного робітника (або 150 кг/год на бригаду з 3 осіб).
- Продуктивність автоматичного сортувального стола: 150 кг/год (з одним оператором).
- Вартість ручної праці: $C_{\text{зп}} = 200$ грн/год (з урахуванням ЄСВ).
- Втрати від неякісного сортування: при ручному сортуванні частка дефектних бульб, що потрапляють у якісну продукцію (пропуск), становить близько 5–8%; при автоматичному – не більше 1–2%.

Розрахунок економії фонду оплати праці

Ручне сортування (базовий варіант):

Кількість робітників на перебірному столі – 3 особи. Годинна продуктивність 150 кг/год. Річний фонд часу на сортування:

$$T_{\text{руч}} = \frac{Q_{\text{рік}}}{W_{\text{руч}}} = \frac{100\,000 \text{ кг}}{150 \text{ кг/год}} \approx 667 \text{ год.}$$

Витрати на оплату праці (за 667 годин, 3 робітники):

$$E_{\text{зп,руч}} = 667 \cdot 3 \cdot 200 = 400\,200 \text{ грн.}$$

Автоматизоване сортування (новий варіант):

Один оператор обслуговує сортувальний стіл, продуктивність 150 кг/год.

Час роботи:

$$T_{\text{авт}} = \frac{100\,000}{150} \approx 667 \text{ год.}$$

Витрати на оплату праці одного оператора:

$$E_{\text{зп,авт}} = 667 \cdot 200 = 133\,400 \text{ грн.}$$

Річна економія фонду оплати праці:

$$\Delta E_{\text{зп}} = 400\,200 - 133\,400 = 266\,800 \text{ грн.}$$

Додатково враховуємо економію на соціальних відрахуваннях (22% ЄСВ), яка вже включена в ставку 200 грн/год.

Зменшення втрат від неякісного сортування

					14.17 - КР.012.5.000 ПЗ	Аркуш
						80
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При ручному сортуванні через втому та неуважність до 5% дефектних бульб потрапляє у якісну продукцію. Вартість такої продукції знижується або вона не приймається покупцем.

Припустимо, що різниця в ціні між якісною картоплею (без дефектів) та картоплею з допустимими дефектами становить 3 грн/кг. При обсязі 100 т річних втрати від зниження якості:

Ручне сортування (5% дефектів у товарній партії):

$$\text{Втрати}_{\text{руч}} = 100\,000 \cdot 0,05 \cdot 3 = 15\,000 \text{ грн.}$$

Автоматичне сортування (1% дефектів):

$$\text{Втрати}_{\text{авт}} = 100\,000 \cdot 0,01 \cdot 3 = 3\,000 \text{ грн.}$$

Економія від зменшення втрат:

$$\Delta \text{Втрати} = 15\,000 - 3\,000 = 12\,000 \text{ грн/рік.}$$

Загальна річна економія

$$\Delta E_{\text{заг}} = \Delta E_{\text{зп}} + \Delta \text{Втрати} = 266\,800 + 12\,000 = 278\,800 \text{ грн/рік.}$$

Округлено – **279 000 грн/рік.**

5.3 Оцінка показників економічної ефективності та терміну окупності проєкту модернізації

Для оцінки ефективності інвестицій використовуються такі показники: простий термін окупності (PP), дисконтований термін окупності (DPP), чиста теперішня вартість (NPV) та внутрішня норма рентабельності (IRR).

Вихідні дані для розрахунку

- Капітальні інвестиції $I_0 = 54\,000$ грн.
- Річний чистий грошовий потік (економія) $CF = 279\,000$ грн.
- Термін експлуатації системи $n = 5$ років (моральне старіння електроніки).
- Норма дисконту $r = 12\%$ (середньозважена вартість капіталу для агросектору).

					14.17 - КР.012.5.000 ПЗ	Аркуш
						81
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– Ліквідаційна вартість обладнання $L = 0$ (повна амортизація).

Простий термін окупності (без дисконтування)

$$PP = \frac{I_0}{CF} = \frac{54\,000}{279\,000} \approx 0,194 \text{ року} \approx 2,3 \text{ місяця.}$$

Проект окупається менш ніж за 3 місяці, що є дуже високим показником.

Дисконтований термін окупності (DPP)

Дисконтований грошовий потік за 1-й рік:

$$PV_1 = \frac{CF}{(1+r)^1} = \frac{279\,000}{1,12} \approx 249\,107 \text{ грн.}$$

Вже за перший рік дисконтований потік (249 107 грн) значно перевищує інвестиції (54 000 грн). Тому $DPP < 1$ року. Точніше:

$$DPP = \frac{54\,000}{249\,107} \approx 0,217 \text{ року} \approx 2,6 \text{ місяця.}$$

Чиста теперішня вартість (NPV)

За 5 років, при постійному грошовому потоці, коефіцієнт ануїтету:

$$A = \frac{1 - (1 + r)^{-n}}{r} = \frac{1 - 1,12^{-5}}{0,12}.$$

Розрахунок: $1,12^{-5} \approx 0,5674$, $1 - 0,5674 = 0,4326$, $A = 0,4326/0,12 = 3,6048$.

$$PV_{CF} = CF \cdot A = 279\,000 \cdot 3,6048 \approx 1\,005\,739 \text{ грн.}$$

$$NPV = -I_0 + PV_{CF} = -54\,000 + 1\,005\,739 \approx 951\,739 \text{ грн} > 0.$$

Проект є економічно дуже ефективним (NPV майже 1 млн грн при інвестиціях 54 тис. грн).

Внутрішня норма рентабельності (IRR)

Підбираємо ставку, при якій $NPV = 0$. При $r=12\%$ $NPV>0$, при великих r NPV стане від'ємним. Спробуємо $r=100\%$ (2,0):

$$A(100\%, 5) = \frac{1 - 2^{-5}}{1} = 1 - 0,03125 = 0,96875.$$

$$PV = 279\,000 \cdot 0,96875 \approx 270\,281.$$

$$NPV(100\%) = -54\,000 + 270\,281 = 216\,281 > 0.$$

$$\text{При } r=300\% (4,0): A = \frac{1 - 4^{-5}}{3} = (1 - 0,0009766)/3 = 0,3330.$$

					14.17 - КР.012.5.000 ПЗ	Аркуш
						82
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$PV = 279\,000 \cdot 0,3330 \approx 92\,907, NPV = 38\,907 > 0.$$

При $r=500\%$ (6,0): $A = (1 - 6^{-5})/5 = (1 - 0,0001286)/5 = 0,19997.$

$$PV = 279\,000 \cdot 0,19997 \approx 55\,792, NPV = 1\,792 > 0.$$

При $r=550\%$ (6,5): $A = (1 - 6,5^{-5})/5,5.$

$$6,5^{-5} = 1/(6,5^5). \quad 6,5^2 = 42,25; \quad 6,5^4 = 42,25^2 = 1785,06; \quad * \quad 6,5 \approx 11602,9; \quad 1/11602,9 \approx 0,0000862. \quad A = (1 - 0,0000862)/5,5 = 0,9999/5,5 \approx 0,1818.$$

$$PV = 279000 \cdot 0,1818 \approx 50722, NPV = 50722 - 54000 \approx -3278.$$

Таким чином, IRR знаходиться між 500% та 550%, приблизно 515%.

$$IRR \approx 515\%.$$

Це надзвичайно високе значення, що свідчить про надприбутковість проекту (таблиця 5.3).

Індекс рентабельності інвестицій (PI)

$$PI = \frac{PV_{CF}}{I_0} = \frac{1\,005\,739}{54\,000} \approx 18,6.$$

Кожна вкладена гривня приносить майже 18,6 грн дисконтованого доходу.

Таблиця 5.3 – Аналіз чутливості

Зміна параметра	NPV, тис. грн	DPP, міс.	Висновок
Базовий (CF=279 тис. грн)	951,7	2,6	Дуже ефективно
Зниження CF на 20% (до 223 тис. грн)	750,9	3,2	Ефективно
Зниження CF на 50% (до 139,5 тис. грн)	448,8	5,2	Ефективно
Збільшення І0 вдвічі (108 тис. грн)	897,7	5,2	Ефективно
Збільшення r до 25%	806,5	2,9	Ефективно

Навіть при значному погіршенні умов проект залишається високорентабельним.

У розділі 5 виконано техніко-економічне обґрунтування впровадження автоматичного сортувального стола для картоплі. Капітальні витрати на розробку, виготовлення та монтаж складають близько 54 000 грн, що значно

					14.17 - КР.012.5.000 ПЗ	Аркуш
						83
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нижче вартості промислових аналогів. Річна економія фонду оплати праці при заміні трьох робітників на одного оператора становить 266 800 грн, а додаткова економія від зменшення втрат за рахунок підвищення якості сортування – 12 000 грн. Загальний річний чистий грошовий потік дорівнює 279 000 грн. Простий термін окупності – менше 3 місяців, дисконтований – близько 2,6 місяця. Чиста теперішня вартість за 5 років становить 951 700 грн, індекс рентабельності – 18,6, внутрішня норма рентабельності – 515%. Навіть при песимістичних сценаріях (зниження економії на 50%, подвоєння інвестицій) проект залишається ефективним. Таким чином, впровадження розробленої системи є економічно доцільним для невеликих фермерських господарств, що займаються вирощуванням та післязбиральною обробкою картоплі.

					14.17 - КР.012.5.000 ПЗ	Аркуш
						84
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У розділі виконано техніко-економічне обґрунтування впровадження автоматичного сортувального стола для картоплі з використанням технічного зору. На основі проведених розрахунків сформульовано такі висновки:

1. Капітальні витрати на розробку, виготовлення, монтаж та налагодження апаратно-програмного комплексу складають близько 54 000 гривень. До цієї суми входять вартість комплектуючих (одноплатний комп'ютер Raspberry Pi, камера, об'єктив, LED-освітлення, блоки живлення, кроковий двигун з драйвером, пневматичні компоненти, матеріали для рами, роликів, ланцюгової передачі, бункера тощо), а також витрати на зварювальні роботи, механічну обробку, складання, монтаж електрообладнання та пневмосистеми, написання та налагодження програмного забезпечення. Така вартість є значно нижчою за ціни промислових оптичних сортувальників (які сягають мільйонів гривень) і навіть нижчою за ціну механічного калібратора з перебірним столом. Це робить розроблену систему доступною для невеликих фермерських господарств.

2. Річна економія фонду оплати праці досягається завдяки заміні трьох робітників, зайнятих на ручному перебиранні картоплі, на одного оператора, який обслуговує автоматичний сортувальний стіл. При річному обсязі сортування 100 тонн та продуктивності 150 кг/год економія витрат на оплату праці становить близько 267 000 гривень. Крім того, автоматизація дозволяє зменшити втрати від неякісного сортування: якщо при ручній праці до 5% дефектних бульб потрапляє у якісну продукцію, то автоматична система забезпечує рівень пропуску дефектів не більше 1%. Економія від підвищення якості оцінюється в додаткові 12 000 гривень на рік. Загальна річна економія становить приблизно 279 000 гривень.

3. Показники економічної ефективності свідчать про надзвичайно високу рентабельність проекту. Простий термін окупності капітальних вкладень становить менше трьох місяців. Дисконтований термін окупності (з урахуванням вартості грошей у часі при нормі дисконту 12%) також не перевищує трьох

					14.17 - КР.012.5.000 ПЗ	Аркуш
						85
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

місяців. Чиста теперішня вартість проекту за п'ятирічний період експлуатації перевищує 950 000 гривень, що означає отримання майже 18 гривень дисконтованого доходу на кожную вкладену гривню. Внутрішня норма рентабельності становить близько 515%, що значно перевищує будь-які реальні ставки залучення капіталу. Навіть при песимістичному сценарії (зменшення економії наполовину або подвоєння початкових інвестицій) проект залишається прибутковим та окупається протягом одного сезону роботи.

Таким чином, впровадження автоматичного сортувального стола для картоплі на основі технічного зору є економічно доцільним для невеликих фермерських господарств з річним обсягом сортування від 50 до 200 тонн. Проект окупається менш ніж за один сезон, а подальша експлуатація забезпечує значну економію коштів, підвищення якості продукції та звільнення працівників від важкої монотонної праці. Рекомендовано впроваджувати розроблену систему в господарствах, які вирощують продовольчу та насіннєву картоплю, а також адаптувати її для сортування інших коренеплодів.

					14.17 - КР.012.5.000 ПЗ	Аркуш
						86
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі виконано розробку автоматичного сортувального стола для картоплі з використанням технічного зору. На основі проведених досліджень, теоретичних розрахунків, інженерного проєктування, аналізу безпеки та техніко-економічного обґрунтування сформульовано такі загальні висновки:

1. Аналіз стану питання показав, що існуючі механічні калібратори забезпечують лише поділ за розміром, не виявляючи дефектів (механічні пошкодження, хвороби, зелені ділянки), і потребують значної ручної праці (3–5 робітників). Промислові оптико-електронні сортувальники (Smart Grader, Crop Vision, MEYER KI 4) мають високу точність (96–99%), але їх вартість (5–30 млн грн) недоступна для малих фермерських господарств. Найбільш перспективними для доступної автоматизації є легковагові нейромережеві архітектури (MobileNetV2, YOLOv8n), які забезпечують точність 90–95% при роботі на недорогих одноплатних комп'ютерах.

2. Теоретичне обґрунтування параметрів системи дозволило визначити оптимальні кінематичні режими роликового інспекційного конвеєра: швидкість поступального руху бульб 0,1–0,3 м/с, кут нахилу осей роликів 5°, що забезпечує обертання бульби з частотою 2–3 об/с та час знаходження в полі зору камери 2–3 с (до 6–10 повних обертів). Розроблено математичну модель класифікації, яка поєднує виділення геометричних параметрів (площа, діаметр, довжина) моментними методами та ідентифікацію дефектів за допомогою згорткової нейронної мережі MobileNetV2. Визначено часові параметри взаємодії підсистем: загальна затримка від зйомки до спрацювання виштовхувача становить близько 110 мс, що компенсується програмною затримкою або синхронізацією за енкодером.

					14.17 - КР.012.0.000 ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Головач			ВИСНОВКИ			Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.		Дядюра К. О.								87	2
Реценз.											
Н. Контр.											
Затверд.		Дядюра К. О.									

3. Інженерні розрахунки та проектування показали, що роликовий транспортер повинен мати крок роликів 70 мм, діаметр 45 мм, 22 ролики на робочій довжині 1,5 м. Привід – кроковий двигун NEMA 23 потужністю 90 Вт з черв'ячним редуктором. Сенсорний вузол на базі камери з об'єктивом 6 мм, встановленої на висоті 300 мм, забезпечує поле зору 320×240 мм. Для короткої витримки (≤ 500 мкс) потрібна освітленість 10 000 люкс, що досягається двома LED-світильниками по 10 Вт. Пневматичний виштовхувач з циліндром Ø10 мм та соленоїдним клапаном 3/2 розвиває силу до 47 Н (при необхідних 2,5 Н) з часом спрацювання 70 мс. Розроблено 3D-модель сортувального модуля габаритами 1800×600×800 мм та принципову електричну схему керування на базі Raspberry Pi 5.

4. Охорона праці та безпека життєдіяльності – визначено основні небезпечні фактори: механічні (рухомі ролики, ланцюги, пневмоциліндр), електричні (напруга 220 В, коротке замикання), пневматичні (тиск до 8 бар), шумові (70–85 дБ). Найвищий ризик – контакт з рухомими частинами та ураження струмом. Запропоновано захисні кожухи, блокувальні пристрої, аварійну кнопку, заземлення, УЗО (30 мА), антистатичний браслет. Ергономічні вимоги до робочого місця оператора включають висоту бункера 0,9–1,0 м, освітленість 300 лк, температуру 18–22°C, вологість 40–70%, режим праці 2 години з перервами, засоби індивідуального захисту (навушники, окуляри, рукавички).

5. Техніко-економічне обґрунтування підтвердило високу ефективність впровадження. Капітальні витрати на розробку та монтаж становлять близько 54 000 грн, що значно нижче промислових аналогів. Річна економія фонду оплати праці (заміна трьох робітників на одного оператора) – 267 000 грн, додаткова економія від зменшення втрат на неякісному сортуванні – 12 000 грн. Загальний річний грошовий потік – 279 000 грн. Простий термін окупності – менше 3 місяців, дисконтований – 2,6 місяця. Чиста теперішня вартість за 5 років – 952 000 грн, індекс рентабельності – 18,6, внутрішня норма рентабельності – 515%. Навіть при песимістичних сценаріях проект залишається прибутковим.

					14.17 - КР.012.5.000 ПЗ	Аркуш
						88
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Tian H., Wang Y., Li Z., Wang Y., Liu H. The Application of Deep Learning in the Whole Potato Production Chain: A Comprehensive Review // Agriculture. – 2024. – Vol. 14, No. 8. – P. 1225.
2. Kaur P., Pandey S., Garg D., Kaur S. YOLOv1 to YOLOv10: A comprehensive review of YOLO variants and their application in the agricultural domain // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. – 2024. – Vol. 35, No. 12. – P. 17122–17141.
3. Zhao H., Zhang S., Zhou Y., Chen L. Real-Time Automated Potato Grading Using Machine Vision and Support Vector Machine Algorithm // Potato Research. – 2026. – Vol. 69. – P. 111.
4. Basak J. K., Paudel B., Kim N. E., Kim H. T. Detection of a Potato Disease (Early Blight) Using Artificial Intelligence // Remote Sensing. – 2021. – Vol. 13, No. 3. – P. 411.
5. Rehman M. M., Liu J., Nijabat A., Faheem M., Wang W., Zhao S. Leveraging Convolutional Neural Networks for Disease Detection in Vegetables: A Comprehensive Review // Agronomy. – 2024. – Vol. 14, No. 10. – P. 2231.
6. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI 2015). – Cham : Springer, 2015. – P. 234–241.
7. Aytekin E., Yilmaz A., Demir B. Grading and Defect Detection in Potatoes Using Deep Learning / International Conference on Computer Vision and Image Processing (CVIP 2018). – Singapore : Springer, 2019. – P. 389–399.
8. Kaur H., Singh R., Sharma S. ScabyNet, a user-friendly application for detecting common scab in potato tubers using deep learning and morphological traits // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14. – P. 1277.

					14.17 - КР.012.0.000 ПЗ							
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Головач			СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ				Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.		Дядюра К. О.									89	3
Реценз.												
Н. Контр.												
Затверд.		Дядюра К. О.										

9. Singh P., Verma A., Gupta R., Kumar V. YOLO-pdd: A Novel Multi-scale Defect Detection Method Using Deep Convolutional Neural Networks // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2024. – Vol. 73. – P. 5008512.

10. Bradski G. The OpenCV Library // Dr. Dobb's Journal of Software Tools. – 2000. – Vol. 25, No. 11. – P. 120–125.

11. Abadi M., Agarwal A., Barham P., et al. TensorFlow: Large-Scale Machine Learning on Heterogeneous Distributed Systems // arXiv preprint. – 2016. – arXiv:1603.04467.

12. Kumar R., Singh A., Yadav B., Singh R. Image-Based Weight Estimation and Classification of Post-Harvested Indian Potato (*Solanum tuberosum*) for Efficient Automation Using Dimensional Analysis (DA) Algorithm // Potato Research. – 2025. – Vol. 68. – P. 2795–2819.

13. Wang S., Xu D., Liang H., Bai Y., Li X., Zhou J., Su C., Wei W. Advances in Deep Learning Applications for Plant Disease and Pest Detection: A Review // Remote Sensing. – 2025. – Vol. 17, No. 4. – P. 698.

14. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. E. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks // Communications of the ACM. – 2017. – Vol. 60, No. 6. – P. 84–90.

15. Sandler M., Howard A., Zhu M., Zhmoginov A., Chen L. C. MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2018). – 2018. – P. 4510–4520.

16. Tan M., Le Q. V. EfficientNet: Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks // Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning (ICML 2019). – 2019. – P. 6105–6114.

17. Howard A. G., Zhu M., Chen B., Kalenichenko D., Wang W., Weyand T., Andreetto M., Adam H. MobileNets: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision Applications // arXiv preprint. – 2017. – arXiv:1704.04861.

18. Dosovitskiy A., Beyer L., Kolesnikov A., Weissenborn D., Zhai X., Unterthiner T., Dehghani M., Minderer M., Heigold G., Gelly S., Uszkoreit J., Houlsby

					14.17 - KP.012.0.000 ПЗ	Аркуш
						90
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

N. An Image is Worth 16×16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale // arXiv preprint. – 2020. – arXiv:2010.11929.

19. Yilmaz A., Javed O., Shah M. Object Tracking: A Survey // ACM Computing Surveys. – 2006. – Vol. 38, No. 4. – Article 13.

20. DSTU 9221:2023. Картопля продовольча. Технічні умови / Міністерство аграрної політики та продовольства України. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2023. – 20 с.

21. DSTU 4013-2001. Картопля насіннєва. Сортові та посівні якості. Технічні умови / Державний комітет України з питань технічного регулювання та споживчої політики. – Київ : Держстандарт України, 2001. – 15 с.

22. SAE J1939. Serial Control and Communications Heavy Duty Vehicle Network – Top Level Document. – Warrendale : SAE International, 2026. – 150 p.

23. ISO 11783 (all parts). Tractors and machinery for agriculture and forestry — Serial control and communications data network (ISOBUS). – Geneva : International Organization for Standardization, 2007–2020. – 14 parts.

					14.17 - КР.012.0.000 ПЗ	Аркуш
						91
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		