

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

Факультет комп'ютерних наук

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

ДОПУЩЕНО ДО ЗАХИСТУ

Завідувача кафедри АКІТ

кандидат технічних наук, доцент

_____ М. І. Сіделєв

«___» _____ 2025 р

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

РОБОТИЗОВАНА СИСТЕМА ПРОСТОРОВОГО ВИМІРУ ТА

КОНТРОЛЮ ЗАВАНТАЖЕНОСТІ БУНКЕРІВ

Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

Освітня програма: «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»

Здобувач

_____ В.О. Бойко
«___» _____ 2025 р.

Керівник д. т. н., професор

_____ О.М. Трунов
«___» _____ 2025 р.

Миколаїв – 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Чорноморський національний університет ім. Петра Могили
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет, відділення:

Комп'ютерних наук

Освітньо-кваліфікаційний рівень: рівень вищої освіти другий (магістр)

Напрямок підготовки 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації
Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології
та робототехніка»

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
В.о.завідувача кафедри

Сідєлєв М. І.

“ ” 2024 р

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ НАУКОВУ РОБОТУ

1. Бойко Володимир Олександрович

_____(прізвище, ім'я, по батькові)

2. Тема проекту (роботи)

Роботизована система просторового виміру та контролю завантаженості бункерів

3. Керівник проекту (роботи) доктор техн. наук, професор, О. М. Трунов
затверджений наказом вищого навчального закладу від “30” жовтня 2024 р.
№_298

Строк подання студентом проекту (роботи) 17.06. 2025

4. Вихідні дані до проекту (роботи)

Підприємства переробної промисловості, до складу функцій яких входять автоматизовані системи транспорту зернової продукції. Одним із вузьких місць якої є система виміру об'ємів сипких матеріалів у бункері, висота бункерів 25-30 метрів, форма трюму прямокутна, 15-20 метрів, бункер має високий рівень запиленості.

5. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1) огляд сучасних підходів та автоматизованих систем просторового виміру та контролю завантаженості бункерів сипких матеріалів;

2) обґрунтування вибору методів, моделей, апаратного забезпечення та програмного середовища розв'язку задач контролю рівня сипких матеріалів;

3) розробка системи виміру рівня сипкого матеріалу у бункері, що захищена, що здана проводити експрес виміри;

4) моделювання динаміки елементів системи та синтез систем керування структурними елементами.

5) перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Блок-схеми систем, рисунки загальних видів елементів конструкцій, схематичні зображення, блок схеми алгоритмів програм, екранні відображення фрагментів ПЗ (скрін-шоти), осцилограми процесів результатів моделювання роботи елементів. Презентація.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

озділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	Завдання прийняв
	Трунов О. М., д. т. н. професор каф. АКІТ	30.10.2023	
	Трунов О. М., д. т. н. професор каф. АКІТ	03.01.2025	
	Трунов О. М., д. т. н. професор каф. АКІТ	03.04.2025	
		19.04. 2025	

7. Дата видачі завдання «12» жовтня 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН
виконання кваліфікаційної роботи

Тема: **Роботизована система просторового виміру та контролю завантаженості бункерів**

№	Найменування роботи	Початок	Закінчення	Примітки
1.	Розробка та затвердження завдання на виконання КМР	09.09.2024	30.10.2024	
2.	Огляд літератури за темою роботи	31.10.2024	15.11.2024	
3.	Складання календарного плану КМР	18.11.2024	20.11.2024	
4.	Аналіз предметної області	21.11.2024	20.12.2024	
5.	Розробка проектних рішень	23.12.2024	28.02.2025	
6.	Моделювання, конструювання та програмування СА та РТС	03.03.2025	18.04.2025	
7.	Дослідження СА та РТС, аналіз результатів	21.04.2025	16.05.2025	
8.	Відгук керівника КМР	19.05.2025	23.05.2025	
9.	Оформлення КМР та презентації	26.05.2025	04.06.2025	
10.	Попередній захист	05.06.2025	06.06.2025	
11.	Рецензування	16.06.2025	17.06.2025	
12.	Завершення оформлення КМР та презентації	18.06.2025	19.06.2025	
13.	Захист кваліфікаційної роботи	26.06.2025	27.06.2025	

Здобувач

Бойко В. О.

«__» _____ 2025 р.

Керівник роботи

д. т. н., професор

Трунов О. М.

«__» _____ 2025 р.

АНОТАЦІЯ
до кваліфікаційної магістерської роботи
«Роботизована система просторового виміру та контролю завантаженості
бункерів»
студента гр. 671м Бойка Володимира Олександровича
Керівник: д-р техн. наук, професор Трунов Олександр Миколайович

Актуальність теми кваліфікаційної роботи обумовлена в необхідності впровадження високотехнологічних рішень для точного та оперативного контролю завантаженості бункерів зерновозів у аграрному секторі.

Метою роботи є підвищення ефективності автоматизованої системи виміру шляхом додаткового впровадження просторового виміру та контролю завантаженості бункерів зерновозів у загальному ланцюзі логістичних операцій у галузі зернового виробництва.

Об'єкт дослідження: автоматизація процесів керування вимірюванням та контролем завантаженості бункерів зерновозів.

Предмет дослідження: моделі, методи, алгоритми та програмне забезпечення керування роботизованими системами для просторового виміру та контролю завантаженості бункерів зерновозів.

Для досягнення мети необхідно виконати такі **завдання**:

- Виконати аналітичний огляд літератури та патентної інформації за темою роботи.
- Провести аналіз існуючих методів та систем для вимірювання і контролю завантаженості бункерів зерновозів.
- Дослідити основні компоненти та технології, що використовуються в роботизованих системах для просторового виміру та контролю.
- Розробити концептуальну модель та програмну архітектуру роботизованої системи контролю завантаженості бункерів зерновозів.

- Оцінити технічні характеристики та експлуатаційні вимоги до розробленої системи.

- Оптимізувати створену систему для забезпечення високої швидкості та мінімізації витрат ресурсів.

Кваліфікаційна робота містить перелік скорочень, вступ, чотири розділи, висновок, перелік джерел посилання та додаток.

Вступ містить основні обґрунтування актуальності розробки обраної теми, об'єкт, предмет дослідження, мету та завдання, які необхідно виконати для досягнення поставленої мети.

У розділі 1 сформульовано вимоги до проєкту, а також проведений аналіз існуючих аналогів.

У розділі 2 описано детальний аналіз та опис сучасних технологій, що використовуються.

У третьому розділі представлено реалізацію та розробку системи просторового виміру та контролю завантаженості бункерів зерновозів.

У четвертому розділі висвітлено питання охорони праці та безпеки.

У висновку описано результати виконання кваліфікаційної роботи.

Додаток містить інформацію про апробацію кваліфікаційної магістерської роботи.

В спеціальній частині з охорони праці розглянуто забезпечення вимог охорони праці на робочому місці.

Кваліфікаційна магістерська робота містить 134 сторінок, 71 рисуноків, 1 таблиця, 13 формул, 85 джерела посилання, 1 додаток.

Наукова новизна полягає у розробці інтегрованої моделі та алгоритму для оцінки об'єму зернового насипу за допомогою цифрової сітки, що працює над обчисленнями локальних висот і об'ємів у реальному часі..

Практична значимість розробленої системи полягає в тому, що система дозволяє операторам віддалено імпортувати тривимірні хмари точок із

CSV-файлів, виконувати оперативний розрахунок об'єму та відображати результати в інтерактивному 3D-інтерфейсі.

Апробація та публікації результатів та основних положень кваліфікаційної роботи відбувались та опубліковано під час всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених, аспірантів і студентів 2025 (доповідь «Інтелектуальні аспекти розгортання веб-застосунків Next.js та React.js через платформу Vercel»), Smart Automation & Robotics for Future Industry 2025(report «The formulation and solution of the problem of constructing optimal trajectory as a means of eliminating socio-legal contradictions in the realization of unmanned robotic systems»), XXI міжнародній науковій конференції «ОЛЬВІЙСЬКИЙ ФОРУМ-2025 (доповідь «Динамічне 3D-моделювання та підрахунок об'єму сипких матеріалів на поверхнях різного типу»).

Ключові слова: автоматизована система керування, дрон, сканер, Python, NumPy, Matplotlib, Tkinter, Pandas.

ABSTRACT

to the qualifying master's thesis

«Robotic system for spatial measurement and control of bunker loading»

of the student of group 671m Boyko Volodymyr Oleksandrovyh

Supervisor: Dr. Tech. Sciences, Professor Trunov Oleksandr Mykolayovych

The relevance of the topic of the qualification work is due to the need to implement high-tech solutions for accurate and operational control of the loading of grain truck bunkers in the agricultural sector.

The aim of the work is to increase the efficiency of the automated measurement system by additionally implementing spatial measurement and monitoring the loading of grain truck bunkers in the overall chain of logistics operations in the grain production industry.

The object of research: automation of processes for controlling the measurement and control of the loading of grain tanker bunkers.

Subject of research: models, methods, algorithms and software for controlling robotic systems for spatial measurement and control of the loading of grain tanker bunkers.

To achieve the goal, you need to complete the **following tasks**:

- Perform an analytical review of literature and patent information on the topic of the work.
- Conduct an analysis of existing methods and systems for measuring and controlling the loading of grain tanker bunkers.
- To explore the main components and technologies used in robotic systems for spatial measurement and control.
- To develop a conceptual model and software architecture of a robotic system for monitoring the loading of grain truck bunkers.
- Evaluate the technical characteristics and operational requirements for the developed system.

- Optimize the created system to ensure high speed and minimize resource consumption.

The qualification work contains a list of abbreviations, an introduction, four sections, a conclusion, a list of references, and an appendix.

The introduction contains the main justifications for the relevance of developing the chosen topic, the object, subject of the study, the goal, and the tasks that must be performed to achieve the goal.

Section 1 formulates the requirements for the project, as well as an analysis of existing analogues.

Section 2 provides a detailed analysis and description of the current technologies used.

The third section presents the implementation and development of a system for spatial measurement and control of the loading of grain tanker bunkers.

The fourth chapter covers occupational health and safety issues.

The conclusion describes the results of the qualification work.

The appendix contains information about the approval of the qualifying master's thesis.

The special part on occupational safety considers ensuring occupational safety requirements in the workplace.

The qualifying master's thesis contains 134 pages, 71 figures, 1 table, 13 formulas, 85 references, 1 appendix.

The scientific novelty lies in the development of an integrated model and algorithm for estimating the volume of a grain embankment using a digital grid that works on calculating local heights and volumes in real time.

The practical significance of the developed system lies in the fact that the system allows operators to remotely import three-dimensional point clouds from CSV files, perform on-the-fly volume calculations, and display the results in an interactive 3D interface.

The testing and publication of the main provisions of the results of the qualification work took place and were published during the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Postgraduates and Students 2025 (report «Intellectual Aspects of Deploying Next.js and React.js Web Applications via the Vercel Platform»), Smart Automation & Robotics for Future Industry 2025 (report «The Formulation and Solution of the Problem of Constructing Optimal Trajectory as a Means of Eliminating Socio-Legal Contradictions in the Realization of Unmanned Robotic Systems»), and the XXI International Scientific Conference «OLVII FORUM-2025» (report «Dynamic 3D Modeling and Calculation of the Volume of Bulk Materials on Surfaces of Various Types»).

Keywords: automated control system, drone, scanner, Python, NumPy, Matplotlib, Tkinter, Pandas.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	4
ВСТУП.....	5
1 СТАН ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ВИМІРУ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ	7
1.1 Аналіз існуючих автоматизованих систем для вимірювання та контролю завантаженості бункерів зерновозів	7
1.2 Аналіз основних компонент та структур систем виміру	10
1.3 Сучасні технології автоматизації та роботизації процесів контролю	19
1.4 Аналіз основних компонентів та структур роботизованих систем.....	23
1.5 Програмне забезпечення та алгоритми для обробки даних.....	28
1.6 Результати патентного пошуку	31
Висновки до розділу 1	33
2 РОЗВИТОК АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ КОНТРОЛЮ ЗАВАНТАЖЕНОСТІ БУНКЕРІВ ЗЕРНОВОЗІВ	36
2.1 Автоматизована структура системи, що забезпечує керування контролем завантаженості бункерів зерновозів	36
2.2 Розробка алгоритму системи виконання операцій.....	51
2.3 Вибір мови програмування для побудови програмного забезпечення	55
2.4 Застосування фільтра Калмана для фільтрації даних.....	62
2.5 Розробка математичної моделі виміру та контролю завантаженості бункерів зерновозів за результатами зйомок та даними CSV-файлів корпусів	65
Висновки до розділу 2	68
3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЗАВАНТАЖЕНОСТІ БУНКЕРІВ ЗЕРНОВОЗІВ	70
3.1 Архітектура та структура ПЗ	70
3.2 Застосування фільтра Калмана	75
3.3 Реалізація алгоритму розрахунку об'єму зерна	80
3.4 Підсистеми підготовки вхідних даних.....	84
3.5 Візуалізація результатів роботи системи	104

3.6 Аналітична оцінка роботи програмного забезпечення	107
Висновки до розділу 3	108
4 ПИТАННЯ БЕЗПЕКИ НА ПІДПРИЄМСТВІ.....	110
4.1 Аналіз потенційних небезпек при експлуатації автоматизованих систем керування.....	112
4.2 Безпека при роботі з безпілотними літальними апаратами	114
4.3 Пожежна та вибухова безпека в умовах пилової середовища	116
4.4 Організація безпечного робочого місця оператора.....	118
4.5 Вимоги до технічного обслуговування та контролю обладнання	120
4.6 Заходи щодо запобігання нещасним випадкам та аваріям.....	121
Висновки до розділу 4	123
ВИСНОВКИ.....	124
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	126
ДОДАТОК А Матеріали апробації роботи	134

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АСК – автоматизована система керування

ПЗ – програмне забезпечення

ОПР – особа приймаюча рішення

БПЛА – безпілотний літаючий апарат

ВСТУП

Сучасний стан технічного оснащення аграрного сектору характеризується високим рівнем автоматизації та впровадженням новітніх технологій у всі етапи виробництва та логістики. Однією з ключових ланок в системі зберігання та транспортування зерна є бункери зерновозів, які використовуються для перевезення зернових культур від місць збирання до елеваторів або портів. Забезпечення ефективного контролю завантаженості цих бункерів є важливим завданням, яке дозволяє уникнути перевантаження або недовантаження транспортних засобів, що, в свою чергу, впливає на оптимізацію логістичних процесів та зниження витрат.

Традиційні методи вимірювання завантаженості бункерів часто є недостатньо точними, що може призводити до економічних втрат. З розвитком технологій з'явилася можливість використання роботизованих систем, які забезпечують більш високий рівень точності, автоматизації та надійності контролю. Впровадження таких систем дозволяє підвищити ефективність роботи зернових терміналів та транспортних компаній, а також забезпечує більшу безпеку при перевезенні зернових культур.

Мета роботи: підвищення ефективності автоматизованої системи виміру шляхом додаткового впровадження просторового виміру та контролю завантаженості бункерів зерновозів у загальному ланцюзі логістичних операцій у галузі зернового виробництва.

Об'єкт дослідження: автоматизація процесів керування вимірюванням та контролем завантаженості бункерів зерновозів.

Предмет дослідження: моделі, методи, алгоритми та програмне забезпечення керування роботизованими системами для просторового виміру та контролю завантаженості бункерів зерновозів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити поставлені нижче задачі:

- провести аналіз існуючих методів та систем для вимірювання і контролю завантаженості бункерів зерновозів;
- дослідити основні компоненти та технології, що використовуються в роботизованих системах для просторового виміру та контролю;
- розробити концептуальну модель та програмну архітектуру роботизованої системи контролю завантаженості бункерів зерновозів;
- оцінити технічні характеристики та експлуатаційні вимоги до розробленої системи;
- оптимізувати створену систему для забезпечення високої швидкості та мінімізації витрат ресурсів.

1 СТАН ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ВИМІРУ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

1.1 Аналіз існуючих автоматизованих систем для вимірювання та контролю завантаженості бункерів зерновозів

У сучасному світовому аграрному секторі потреба автоматизації та впровадження новітніх технологій займають центральне місце на всіх етапах вирощування (виробництва), зберігання та транспортування зерна, як одного із видів сільськогосподарської продукції [1-3]. Ключовими ланками цього процесу є завантаження зерно-вантажних авто, залізничних вагонів, зважування, перевезення, контроль якості, контроль завантаженості бункерів зерновозів, які використовуються для перевезення зернових культур. Потреба у створенні автоматизованих систем керування (АСК) виникає як у зернових холдингах так і у окремих фермерів. Точний прозорий контроль та відстеження процесів перевезення і втрат та вимірювання рівня завантаженості має критичне значення для забезпечення безпечного та економічно ефективного транспортування зерна, оскільки перевантаження може призвести до пошкодження транспортних засобів або штрафів, а недовантаження до зниження рентабельності перевезень. [4].

На сьогодні відомі як окремі приклади АСК перевезеннями окремими видами транспорту: залізницею так і автотранспортними зерновозами та суховантажними суднами або комплексні АСК збору перевезень, зберігання та переробки, що реалізовані холдингами. Також відомий приклад АСК перевезень залізницею, що пропонує UKRMASHSERVIS подано на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Візуальне представлення АСК перевезень залізницею [5]

Структурне виокремлення виробничих ділянок та рознесення їх у просторі із контролем положення руху стану завантаженості кожного із структурних елементів АСК та вагонів дає повну уяву та можливості контролю із зовні. Характерним недоліком цієї системи є потреба узгодження характеристик, мов та протоколів обміну, властивостей і змісту інтерфейсів із іншими АСК, що з'єднано на функціональному вході та на функціональному виході [5].

У зв'язку з цим одним із прогресивних рішень є пропозиція [6], що формулюється як комплексне рішення відкритого типу і передбачає усунення недоліків [6]. Варіант такої АСК подано на рисунку 1.2. АСК передбачає підключення комбайнів навіть різних власників, вантажних зерновозів (теж передбачаються залучати різні компанії для швидкої перевозки), елеваторні господарства (може бути навіть і не одне, а різні). Вагони залізниці, вантажні зернові термінали та суда зерновози включено до складу АСК.



Рисунок 1.2 – Візуальне представлення АСК комплексного перевезення авто, залізницею та судами [6]

Для цих структурних елементів теж передбачено включення до складу АСК незалежно від власника. Таким чином, початкова вимога побудови АСК із однією структурою характеристик, вибором однієї мови та протоколів обміну, властивостей і змісту інтерфейсів утворює єдину АСК, що з'єднано та допускає додаткове приєднання або від'єднання без зупинки системи. Разом з тим вузьким місцем такої АСК [6] лишається необхідність додаткового контролю судновласником кількості завантаженого на борт зерна. Наявність такого контролю з двох боків та порівняння ваги, що визначено двома типами контролюю. Перший з них реалізовано стаціонарними вагами, що вимірюють вагу завантаженого транспортного засобу та розвантаженого. Підрахунок різниці цих ваг дає вагу вантажу.

Другий застосовує конвеєрні ваги, що встановлено безпосередньо на транспортері перед завантажуючою машиною і приймається як дані про вантаж судно власником [6].

Таким чином, якщо виникає похибка, яка безумовно виникає, при визначенні ваги вантажу, то на борту судна величина вантажу не може визначена.

1.2 Аналіз основних компонент та структур систем виміру

Традиційні методи вимірювання завантаженості зерновозів базуються на використанні механічних датчиків, візуальної оцінки або вагових систем [7]. Однак ці методи часто виявляються недостатньо точними та надійними, особливо в умовах високих обсягів перевезень і жорстких вимог до точності. Наприклад, механічні датчики проводять вимір у окремих точках їх розташування, а зерно по бункеру розташовано не рівномірно, що і стає джерелом похибки виміру. Другий спосіб візуальної оцінки залежить від людського фактора, що підвищує ймовірність помилок. Крім того, такі методи зазвичай потребують значних витрат часу та потребує додаткових людських ресурсів, що робить їх малопридатними для застосування в умовах великомасштабного виробництва [8].

На тлі цих проблем розвиток систем виміру та контролю завантаженості бункерів зерновозів представляє особливий інтерес. Комплексне використання нових технологій виміру, зокрема, лазерних далекомірів, ультразвукових датчиків та інфрачервоних камер, які забезпечують високу точність вимірювань [9]. Завдяки цим технологіям можливо досягти значного підвищення точності вимірювань, незалежно від зовнішніх умов, таких як температура, вологість або наявність пилу. Більш того, застосування метрологічної схеми виміру від єдиної бази системи дозволяє повністю автоматизувати процес контролю. Останнє суттєво знижує потребу в ручній праці та мінімізує ймовірність помилок.

Одним із ключових елементів автоматизованих систем виміру є програмне забезпечення, яке керує процесами збору, обробки та аналізу даних з сенсорів [10]. Існуюче ПЗ не інтегроване до загального, що створює неминучі проблеми для сумісного використання. Це програмне забезпечення

2025 р. Бойко Володимир

потребуватиме спеціальних алгоритмів аналізу зображень форми поверхні для визначення рівня завантаженості та оцінки його відповідності заданим параметрам. Крім того, програмне забезпечення повинно передбачати інтегрування з іншими системами управління логістикою, що дозволить здійснювати контроль у реальному часі та швидко реагувати на будь-які зміни в умовах транспортування.

Також важливим завданням є інтеграція систем виміру із загальною інфраструктурою агропромислових підприємств. Вона передбачає адаптацію системи до існуючих логістичних процесів, а також забезпечення її сумісності з іншими автоматизованими системами, що використовуються на підприємстві. Це вимагає високого рівня технічної компетентності та відповідного налаштування програмно-апаратних комплексів [11].

Таким чином, аналіз структури, функцій та досвіду застосування АСК показує, що автоматизовані системи контролю завантаженості бункерів зерновозів мають значний потенціал і недоліки для підвищення ефективності та надійності перевезень збіжжя зернових культур. Вони дозволяють досягти більш високої точності вимірювань, знизити витрати на перевезення та підвищити безпеку транспортування, що робить їх перспективним напрямком для подальшого дослідження та пошуку шляхів інноваційного впровадження в агропромисловому секторі. На рисунку 1.3 представлено автоматизовану систему виміру в узагальненій структурі АСК завантаженості зерновозів.

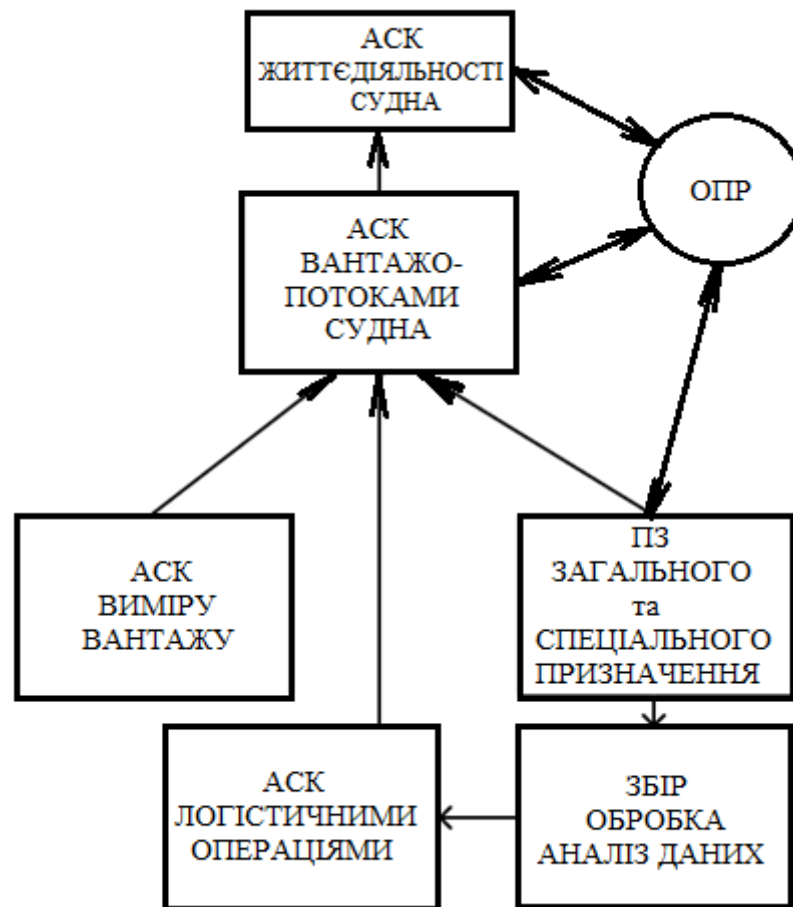


Рисунок 1.3 – Схема контролю завантаженості суховантажних суден

Структура передбачає об'єднання АСК життєдіяльності судна із АСК вантажними потоками судна, логістичних операцій з АСК виміру вантажу для контролю завантаженості трюмів. Таке об'єднання усуває похибку, яка виникає при визначенні ваги вантажу до борту судна.

Таким чином, вимірювання та контроль завантаженості бункерів зерновозів є однією з найважливіших задач у процесі транспортування зернових культур. Існує кілька традиційних методів виміру, які широко використовуються в аграрному секторі, однак їх ефективність та точність потребують удосконалення. Розуміння переваг і недоліків цих методів є ключовим для розробки більш ефективних систем, здатних забезпечити необхідний рівень точності та надійності [12].

Один з найпоширеніших методів контролю завантаженості – це **візуальна оцінка**, яку здійснює оператор або представники групи прийому та передачі вантажу. Цей метод базується на спостереженні за рівнем зерна в бункері через люки або інші оглядові отвори. Візуальна оцінка є найпростішим і найдоступнішим способом контролю, проте вона має низку суттєвих недоліків. По-перше, точність цього методу значною мірою залежить від досвіду та уважності оператора. Навіть невеликі помилки в оцінці можуть призвести до значних економічних втрат через недовантаження або перевантаження транспортного засобу [13]. По-друге, цей метод не дозволяє здійснювати контроль в режимі реального часу, оскільки оцінка завантаженості проводиться епізодично, а не постійно. Нарешті, візуальна оцінка не завжди можлива в умовах поганої видимості, наприклад, у випадку запиленості або вночі, що ще більше знижує її ефективність.

Іншим методом, який широко використовується, є **механічні датчики рівня**. Ці датчики можуть бути встановлені в бункері зернового і працюють на основі різних принципів: поплавкові датчики, ультразвукові датчики, ємнісні датчики [14].

Ще одним важливим методом контролю є **вагові системи**, які використовуються для визначення маси зерна у бункері. Цей метод є найбільш точним, оскільки він дозволяє безпосередньо вимірювати вагу завантаженого зерна, а не лише рівень заповнення. Вагові системи можуть бути інтегровані в конструкцію самого зернового або встановлені на спеціальних вагах, через які проїжджає завантажений транспортний засіб. Незважаючи на високу точність, вагові системи мають свої недоліки, зокрема високу вартість встановлення та експлуатації [15]. Крім того, цей метод може бути неефективним у випадку нерівномірного розподілу зерна в бункері, що може вплинути на точність вимірювань.

У контексті розвитку сучасних технологій з'явилися більш інноваційні підходи, які передбачають використання комплексних систем на основі комбінованих датчиків і програмного забезпечення для аналізу даних. Такі системи можуть включати лазерні сканери, інфрачервоні камери, а також системи комп'ютерного зору, які аналізують зображення внутрішньої частини бункера в режимі реального часу [16]. Наприклад, лазерні сканери дозволяють створювати тривимірну карту внутрішнього простору бункера і точно визначати рівень завантаженості, враховуючи навіть нерівності поверхні зерна. Комп'ютерний зір може аналізувати зображення в режимі реального часу, виявляючи можливі аномалії або нерівномірність розподілу зерна. Такі системи, хоча і є складними та дорогими у впровадженні, забезпечують найвищу точність та автоматизацію процесу контролю.

Отже, існуючі методи та системи контролю завантаженості бункерів зерновозів мають як свої переваги, так і недоліки. Традиційні методи, такі як візуальна оцінка та механічні датчики, є простими і доступними, але часто недостатньо точними і надійними. Сучасні методи, такі як ультразвукові та ємнісні датчики, а також вагові системи, забезпечують вищу точність, але мають обмеження щодо умов експлуатації та високу вартість. З іншого боку, інноваційні підходи на основі комп'ютерного зору та лазерного сканування відкривають нові можливості для автоматизації та підвищення точності контролю, проте їх впровадження потребує значних інвестицій [17]. Аналіз цих методів є важливим для розробки більш ефективних роботизованих систем, які здатні врахувати всі переваги та подолати недоліки існуючих рішень.



Рисунок 1.4 – Схематичне представлення поширених датчиків систем виміру рівня завантаженості бункерів [18]

Важливою частиною логістики зерна є його транспортування великими обсягами на значні відстані, зокрема морським шляхом за допомогою балкерів. Балкери призначені для перевезення різноманітних навалочних вантажів, включаючи зерно. Процеси підготовки трюмів, навантаження та розвантаження зерна на балкерах є специфічними і вимагають строгого дотримання процедур.



А



Б

Рисунок 1.5 – Трюм балкера: А – підготовка трюму для завантаження зерна; Б – завантажений трюм зерном [19]

Перед завантаженням зерна трюми балкерів ретельно готуються, щоб уникнути забруднення вантажу. Навантаження зерна контролюється екіпажем судна, та здійснюється суворо за планом завантаження. Зокрема вахтовий помічник капітана відстежує за рівномірним розподілом вантажу в трюмах, оперуючи при цьому баластною системою судна для підтримки остійності. Також контролюється погодна ситуація для своєчасного закриття трюмів у разі опадів [19].

Після прибуття до порту призначення здійснюється розвантаження зерна. Цей процес зазвичай виконується береговими бригадами. Навіть після основного вивантаження, для повного очищення трюмів від залишків зерна можуть застосовуватися спеціалізовані засоби та техніка. Вимірювання рівня завантаженості бункерів зерновозів є критично важливим аспектом для ефективного транспортування та зберігання зернових культур. Різні методи, що використовуються для цього завдання, базуються на різних фізичних принципах, і кожен з них має свої унікальні характеристики, переваги та обмеження [20].

Поплавкові датчики – це один з найстаріших і найпростіших методів вимірювання рівня завантаженості бункерів. Вони працюють на основі механічного принципу: поплавка, який вільно переміщується у вертикальній площині, реагує на зміну рівня зерна в бункері. Зміна положення поплавка фіксується датчиком, що може бути підключений до механічної шкали або до електричного індикатора. Поплавкові датчики мають кілька важливих переваг. Перш за все, вони є відносно недорогими і простими у виготовленні та встановленні. Вони не потребують складного технічного обслуговування і можуть працювати без джерела живлення, що робить їх ідеальним вибором для невеликих або віддалених об'єктів. Крім того, цей метод досить надійний у випадках, коли вимірювання не вимагає високої точності [20]. Проте поплавкові датчики мають також серйозні обмеження. Одне з головних – це їх чутливість

до механічного зношування, оскільки поплавки постійно перебуває в русі та може втратити точність з часом. Крім того, такі датчики можуть давати некоректні показання у випадку нерівномірного розподілу зерна в бункері або наявності залишків зерна на стінках. Також цей метод не підходить для дуже великих бункерів, де рівень зерна може сильно коливатися під час завантаження та розвантаження.

Ультразвукові датчики є більш сучасним і технологічно просунутим методом вимірювання рівня завантаженості. Принцип роботи цього типу датчиків базується на використанні ультразвукових хвиль [21]. Датчик випромінює ультразвуковий сигнал, який відбивається від поверхні зерна і повертається назад. Вимірюючи час, необхідний для того, щоб сигнал повернувся до датчика, система визначає відстань до поверхні зерна, що дозволяє обчислити рівень його завантаженості.

Основною перевагою ультразвукових датчиків є їх безконтактний характер, що значно знижує ризик зношування і необхідність технічного обслуговування. Вони забезпечують високу точність вимірювань навіть у великих бункерах і можуть працювати в реальному часі, що дозволяє інтегрувати їх у автоматизовані системи контролю та управління. Ультразвукові датчики також можуть працювати в різних умовах середовища, зокрема, при високій запиленості або температурних коливаннях.

Однак ультразвукові датчики мають і свої обмеження. Їх ефективність може залежати від властивостей матеріалу, зокрема його щільності та сипучості, що може впливати на точність вимірювань [22]. Крім того, зовнішні умови, такі як сильні повітряні течії або вібрації, можуть вплинути на стабільність вимірювань. Також цей метод є більш дорогим у порівнянні з поплавковими датчиками, що може бути важливим фактором при виборі технології.

Ємнісні датчики використовують принцип зміни електричної ємності між двома електродами, які встановлені у бункері. Коли рівень зерна змінюється, змінюється і ємність, що фіксується електронним блоком і конвертується у відповідний сигнал, який відображає рівень завантаженості.

Ємнісні датчики забезпечують дуже високу точність вимірювань і можуть використовуватися в умовах, де потрібна максимальна точність, наприклад, у великих зерноскладах. Вони можуть бути налаштовані для роботи з різними матеріалами і адаптуватися до зміни умов середовища, що робить їх універсальним інструментом для вимірювання рівня заповнення [23]. Цей метод також відносно простий в експлуатації і не вимагає складного обслуговування.

Незважаючи на переваги, ємнісні датчики мають свої недоліки. Їх ефективність може знижуватись при наявності вологи або інших домішок у зерні, що змінює електричні властивості матеріалу і може призводити до похибок у вимірюваннях [24]. Крім того, як і ультразвукові датчики, ємнісні системи є відносно дорогими, що може бути перешкодою для їх широкого впровадження в невеликих господарствах.

Лазерні сканери є одним з найсучасніших методів вимірювання рівня завантаженості бункерів. Вони працюють на основі лазерного випромінювання, яке сканує поверхню зерна, створюючи тривимірну карту внутрішнього простору бункера. Ця карта дозволяє точно визначити рівень заповнення, враховуючи навіть нерівності поверхні зерна. Лазерні сканери забезпечують найвищу точність серед усіх розглянутих методів і можуть використовуватись для автоматизації процесу вимірювання та контролю [25]. Вони можуть бути інтегровані з іншими системами управління і забезпечувати безперервний моніторинг у реальному часі, що особливо корисно на великих підприємствах з інтенсивним потоком продукції.

Проте лазерні сканери є найбільш дорогим і складним у встановленні методом. Їх інтеграція в існуючі системи може вимагати значних ресурсів і часу,

а також наявності висококваліфікованого персоналу для обслуговування [26]. Крім того, їх чутливість до умов середовища, таких як пил або дим, може вимагати додаткових заходів для забезпечення стабільної роботи.

Радіохвильові датчики – це інноваційний метод, що базується на використанні радіохвиль для визначення рівня завантаженості. Принцип їх роботи полягає у випромінюванні радіохвиль, які проходять через матеріал і відбиваються від його поверхні або внутрішніх шарів. Час затримки відбитого сигналу використовується для визначення відстані до поверхні зерна і, відповідно, рівня його завантаженості. Цей метод забезпечує дуже високу точність вимірювань і може використовуватись у складних умовах, наприклад, при високій запиленості або вологості [27]. Радіохвильові датчики також можуть працювати на великій відстані і в умовах, де інші методи можуть бути неефективними. Однак радіохвильові системи є досить новими і тому ще не набули широкого розповсюдження. Вони вимагають складної апаратури і спеціалізованого програмного забезпечення для аналізу даних, що підвищує вартість їх впровадження [28]. Крім того, їх інтеграція в існуючі логістичні системи може бути ускладнена через необхідність адаптації під конкретні умови експлуатації.

1.3 Сучасні технології автоматизації та роботизації процесів контролю

Сучасні технології автоматизації та роботизації значно змінюють підходи до контролю завантаженості бункерів зерновозів та пропонують новітні рішення, що забезпечує високу точність і ефективність. Інновації у цій сфері сприяють поліпшенню процесів обробки та транспортування зерна, зменшують вплив людського фактору і підвищують загальну ефективність аграрних підприємств [29].

Одним із основних досягнень у сфері автоматизації є **інтеграція розумних сенсорних систем**, які забезпечують безперервний моніторинг рівня

2025 р.

завантаження. Ці системи використовують різноманітні технології для визначення рівня зерна, включаючи ультразвукові, лазерні та радіохвильові сенсори [30]. Ультразвукові сенсори, наприклад, здатні точно вимірювати відстань до поверхні зерна, завдяки чому забезпечують точний контроль рівня завантаження без фізичного контакту з матеріалом. Лазерні сенсори, в свою чергу, створюють детальні тривимірні карти поверхні зерна, що дозволяє визначати рівень завантаження навіть у складних умовах. Радіохвильові сенсори також використовуються для безконтактного вимірювання рівня, і вони здатні працювати в умовах пилу і вологи, які можуть впливати на інші види сенсорів.

Крім того, сучасні **інтелектуальні системи обробки даних** стали важливим елементом автоматизації. Вони використовують алгоритми штучного інтелекту і машинного навчання для аналізу інформації, отриманої від сенсорів. Такі системи здатні виявляти аномалії в процесі завантаження, прогнозувати потенційні проблеми і автоматично налаштовувати параметри системи для оптимізації процесу [31]. Використання технологій великих даних дозволяє зібрати і обробити величезні обсяги інформації, що забезпечує точніше прогнозування і планування, а також дозволяє виявляти закономірності і тренди, які можуть бути корисними для підвищення ефективності роботи.

Роботизовані системи також відіграють важливу роль у сучасному контролі завантаженості. Роботи, оснащені сенсорами та камерами, можуть здійснювати регулярний моніторинг стану бункерів і виконувати завдання, які раніше потребували людського втручання [32]. Роботи можуть автоматично виконувати технічне обслуговування, перевіряти рівень заповнення і здійснювати обслуговування у важкодоступних або небезпечних зонах, що знижує ризики для людей і підвищує загальну ефективність процесів.

Однією з інноваційних технологій є **Інтернет речей (IoT)**, який забезпечує бездротову передачу даних між різними елементами системи. IoT-

сенсори надають можливість безперервного моніторингу рівня завантаження в реальному часі і забезпечують можливість віддаленого управління системами. Це дозволяє оперативно реагувати на зміни умов експлуатації, отримувати сповіщення про збої або аномалії і здійснювати коригування процесів без фізичної присутності.

Таким чином, сучасні технології автоматизації та роботизації забезпечують значні переваги у контролі завантаженості бункерів зерновозів. Вони дозволяють підвищити точність, зменшити вплив людського фактору, оптимізувати логістичні процеси і забезпечити більш ефективне управління ресурсами [33].

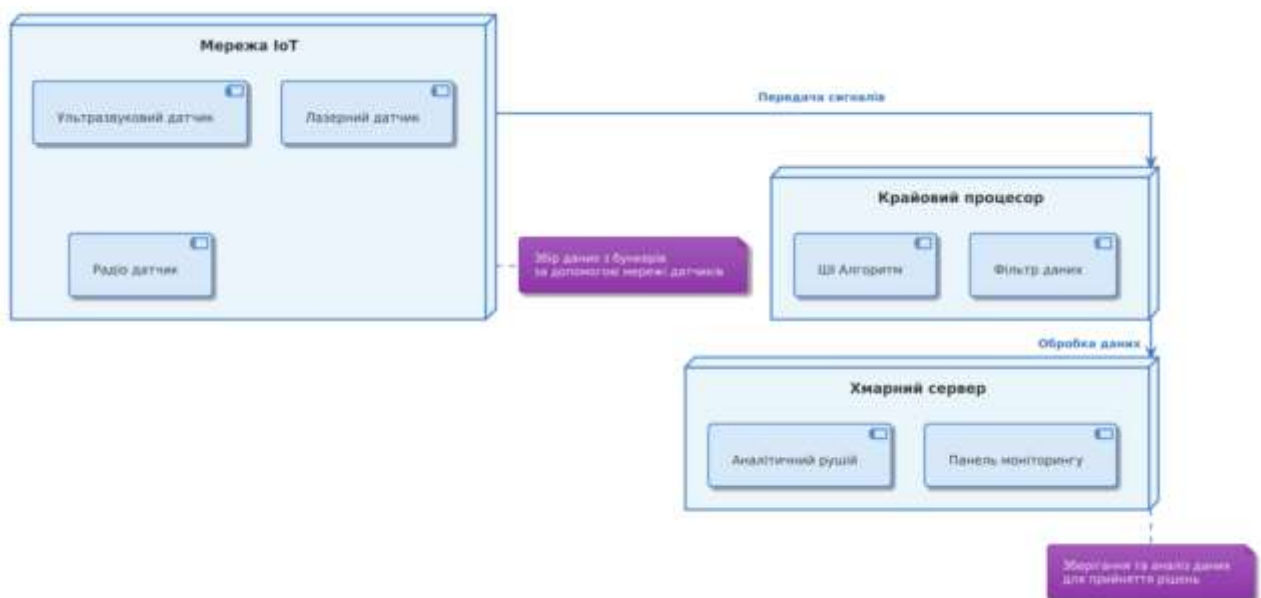


Рисунок 1.6 – Схема сучасних технологій автоматизації та роботизації

В контексті сучасних технологій автоматизації та роботизації процесів контролю, важливо розглядати їх застосування не лише на окремих етапах, а й у побудові комплексних систем, що охоплюють весь ланцюжок руху зерна з поля. Це дозволяє забезпечити прозорий та постійний кількісно-якісний облік продукції, мінімізувати вплив людського фактора, суттєво зменшити витрати та підвищити ефективність роботи кожного бізнес-процесу.

На етапі збирання в полі (рисунк 1.2), сучасні рішення включають використання поточкових ваг, інтегрованих зі шнеком комбайна, для точного вимірювання ваги намолоченого зерна під час його перевантаження в зерновози. Мобільні додатки надають можливість експедиторам або обліковцям автоматично формувати дані про товарно-транспортні накладні (ТТН), які можуть бути одразу передані в офіс або облікову систему елеватора, що значно скорочує час обробки машин та зменшує ймовірність помилок при ручному введенні даних. Контроль за рухом зерновозів від поля до елеватора здійснюється за допомогою GPS трекерів, що дозволяє відстежувати маршрут та виявляти непередбачені зупинки.



Рисунок 1.7 – Завантаження зерна до зерновозу [34]

На елеваторах автоматизовані системи управління внутрішньою логістикою транспорту, інтегровані з системами обліку, дозволяють оптимізувати процес приймання автомобілів, зокрема, шляхом організації зовнішньої електронної черги та зменшення часу обслуговування однієї машини. Автоматизація охоплює всі етапи, від заїзду на територію за ідентифікатором до зважування брутто та нетто, де системи контролюють правильність позиціонування транспорту на вагах та звіряють номерні знаки для виключення махінацій. За результатами лабораторних аналізів, які також можуть бути автоматизовані з передачею даних в облікову систему, АСО ТП

(автоматизована система управління технологічними процесами) самостійно визначає маршрут руху зерна елеватором, направляючи його, наприклад, на сушку, та враховує енергетичні витрати на кожному етапі техпроцесу (рисунок 1.2). При будь-якій дії в системі відбувається автоматичний запис часу та фото, або відеофіксація події, що підвищує прозорість та знижує вплив людського фактора [34].

При перевезеннях зерна з лінійних елеваторів на портові термінали переважно використовується залізничний транспорт. Існують апаратно-програмні модулі для автоматичного обліку навантаження зерна у вагони, а мобільні додатки допомагають співробітникам оптимізувати підготовку документів для Укрзалізниці, контроль навантаження, перевезення та дислокації вагонів. Це дозволяє економити на оренді вагонів, мінімізуючи час простою.

На етапі навантаження на судно в портових терміналах також використовуються автоматизовані системи для обліку зерна по трюмах відповідно до плану навантаження. Контроль вивантаження автотранспорту та робота тальманів автоматизується за допомогою спеціалізованих мобільних додатків, що забезпечує оперативну реєстрацію часу та місця вивантаження. Побудова такої цілісної системи, що об'єднує автоматизацію на всіх етапах від поля до судна (рисунок 1.2), є складним завданням, що вимагає інтеграції різних технічних засобів та програмних модулів, але її реалізація є цілком можливою та надає підприємствам значні конкурентні переваги [35].

1.4 Аналіз основних компонентів та структур роботизованих систем

Роботизовані системи, використовувані для контролю завантаженості бункерів зерновозів, складаються з ряду ключових компонентів та структур, які забезпечують їх ефективну роботу. Ці системи інтегрують різноманітні технології для забезпечення високої точності, надійності та автоматизації процесів [36]. В аналізі основних компонентів роботизованих систем важливо

розглянути їх структурні елементи, функціональні можливості та взаємодію між складовими частинами.

Першим основним компонентом є **сенсорні системи**, які відповідають за збирання даних про рівень завантаження бункера. Сенсори можуть використовувати різні технології, такі як ультразвукові, лазерні, радіохвильові та ємнісні, щоб точно визначити рівень зерна. Ці сенсори інтегровані в систему таким чином, що забезпечують безперервний моніторинг і передачу даних до центрального процесора [37].

Центральний процесор або контролер системи є ще одним критично важливим компонентом. Він отримує дані від сенсорів, обробляє їх за допомогою вбудованих алгоритмів і приймає рішення на основі отриманої інформації. Контролер управляє іншими компонентами системи, такими як роботизовані маніпулятори або інші виконавчі механізми, забезпечуючи виконання завдань відповідно до заданих параметрів.

Роботизовані маніпулятори або актуатори виконують фізичні дії на основі команд від центрального процесора [38]. Вони можуть бути оснащені різними інструментами для завантаження, переміщення або коригування рівня зерна в бункері. Роботизовані системи часто включають маніпулятори, які можуть працювати в автоматичному режимі, виконуючи завдання без людського втручання.

Комунікаційні системи забезпечують обмін даними між різними компонентами системи. Це може бути бездротова або дротова передача даних, яка дозволяє координувати роботу сенсорів, контролера та виконавчих механізмів [39]. Надійна комунікація є критично важливою для забезпечення синхронізації всіх елементів системи.

Інтерфейси користувача та програмне забезпечення також є важливими елементами, які дозволяють операторам налаштовувати і моніторити систему. Інтерфейси можуть включати графічні панелі, дисплеї або

мобільні додатки, через які користувачі отримують інформацію про стан системи, параметри роботи та результати вимірювань [40].

Нарешті, **енергетичні системи** забезпечують живлення всіх компонентів роботизованої системи. Це можуть бути акумулятори, джерела живлення або інші енергетичні рішення, що забезпечують безперебійне функціонування системи впродовж тривалого часу.

Аналіз основних компонентів роботизованих систем показує, що для ефективного контролю завантаженості бункерів необхідна інтеграція різних технологій та елементів, які працюють в синергії для досягнення високої точності та надійності. Кожен компонент відіграє важливу роль у загальному функціонуванні системи, забезпечуючи її ефективність та продуктивність [41].

Таким чином, роботизовані платформи для інспекції та контролю є ключовими компонентами в автоматизованих системах для моніторингу і управління завантаженістю бункерів зерновозів. Ці платформи забезпечують точність, гнучкість і ефективність при виконанні завдань, що вимагають регулярного контролю та інспекції [42]. Залежно від вимог і специфіки застосування, роботизовані платформи можуть мати різні конструкції і конфігурації.

Існує кілька основних типів роботизованих платформ, кожен з яких відповідає за виконання різних функцій у системах інспекції та контролю. **Мобільні роботизовані платформи**, наприклад, мають можливість переміщення по різних ділянках бункера або складського приміщення. Оснащені різноманітними сенсорами та камерами, вони здатні виконувати завдання з моніторингу і технічного обслуговування у важкодоступних зонах [43]. Мобільні платформи також можуть бути оснащені автономними системами навігації для планування маршрутів і визначення місцезнаходження.

Стаціонарні роботизовані платформи розташовані на фіксованих позиціях і виконують контроль без переміщення. Вони зазвичай оснащені

стаціонарними сенсорами та маніпуляторами, що дозволяє їм здійснювати регулярний моніторинг рівня зерна в конкретних бункерах або ділянках. Стаціонарні платформи часто використовуються в ситуаціях, де необхідно забезпечити постійний контроль на одній локації.

Аеромобільні платформи, такі як дрони, забезпечують огляд великих площ і важкодоступних ділянок. Оснащені сенсорами і камерами, ці платформи дозволяють здійснювати відео- та фотозйомку для детального огляду стану завантаження. Дрони можуть бути особливо корисні для перевірки в умовах, де традиційні платформи можуть мати труднощі з доступом або виконанням завдань.

Роботизовані платформи для інспекції та контролю складаються з кількох ключових компонентів, що забезпечують їхню ефективність. Системи руху і маневрування, наприклад, є основними для мобільних платформ, забезпечуючи їх переміщення по складських приміщеннях або бункерах. Такі системи можуть включати колісні або гусеничні системи, а також автономні системи навігації для планування маршрутів. Для стаціонарних платформ, системи повороту і регулювання дозволяють точне налаштування сенсорів і маніпуляторів.

Сенсори і камери є критичними компонентами, які збирають дані про рівень і об'єм зерна [43]. Ультразвукові, лазерні, радіохвильові та ємнісні сенсори, а також камери для візуального моніторингу, забезпечують точні вимірювання і детальний огляд. Актуатори і маніпулятори на платформах виконують механічні дії, такі як коригування рівня зерна або технічне обслуговування.

Комунікаційні системи забезпечують передачу даних між різними компонентами платформи. Це може бути як бездротовий, так і дротовий обмін інформацією, що дозволяє ефективно управляти платформами і отримувати дані про стан системи в реальному часі. Джерела живлення, такі як акумулятори або

батареї, забезпечують енергію для всіх компонентів платформи, що є критично важливим для її безперебійної роботи.

Роботизовані платформи часто інтегруються з іншими автоматизованими системами для підвищення їхньої ефективності. Інтеграція з системами управління підприємством і системами управління складом дозволяє автоматично оновлювати дані про рівень завантаження та забезпечувати планування і оптимізацію процесів [44]. Дані, зібрані платформами, можуть бути передані до систем аналітики для подальшого оброблення і аналізу, що допомагає виявляти тренди і аномалії. Інтерфейси користувача, включаючи графічні панелі і мобільні додатки, дозволяють операторам моніторити і управляти системою віддалено, отримувати сповіщення про проблеми і виконувати налаштування.

Роботизовані платформи для інспекції та контролю відіграють важливу роль у забезпеченні точності і ефективності процесів моніторингу завантаженості бункерів зерновозів [44]. Різні типи платформ, такі як мобільні, стаціонарні та аеромобільні, забезпечують різні рівні гнучкості і функціональності, що дозволяє вибрати найбільш підходяще рішення для конкретних умов експлуатації.

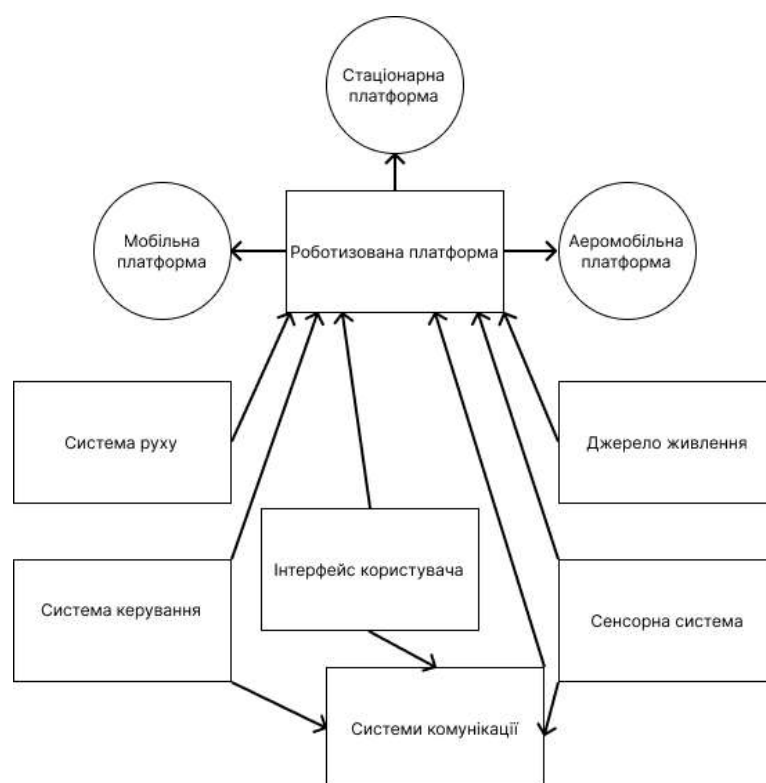


Рисунок 1.9 – Схема роботизованих платформ для інспекції та контролю

Кожен компонент платформи, від систем руху до сенсорів і комунікаційних систем, є критичним для забезпечення безперебійної і точного контролю, що, в свою чергу, допомагає в оптимізації процесів обробки і транспортування зерна.

1.5 Програмне забезпечення та алгоритми для обробки даних

Програмне забезпечення та алгоритми для обробки даних це ключові елементи роботизованих систем для контролю завантаження зерновозів. Вони обробляють дані, які надходять від сенсорів, аналізують інформацію та допомагають приймати рішення в реальному часі [45]. Завдяки цьому можлива автоматизація більшості процесів та оперативне управління.

Системи збору та зберігання даних відповідають за передачу інформації від сенсорів до серверів чи хмарних платформ. Наприклад, сенсори визначають рівень завантаження, а зібрані дані зберігаються у базах даних. Якщо дані чітко

структуровані, використовуються реляційні бази, як-от SQL. Для складніших, динамічних даних краще підходять нереляційні бази, як MongoDB.

Програмні інструменти для обробки даних аналізують інформацію та створюють звіти. Наприклад, Python з бібліотеками NumPy і Pandas допомагає працювати з великими обсягами даних, R підходить для складного статистичного аналізу, а MATLAB часто застосовується для моделювання. Такі платформи дозволяють візуалізувати дані та генерувати корисні інсайти.

Інтерфейси користувача може відображатися у вигляді графіків чи таблиць на екрані комп'ютера [46]. Інші варіанти включають веб-додатки, які дозволяють моніторити та керувати системою з будь-якого пристрою. Зручний інтерфейс допомагає швидко зрозуміти ситуацію та налаштувати потрібні параметри.

Алгоритми фільтрації даних очищують інформацію, щоб усунути помилки [47]. Наприклад, зміни температури чи вологості можуть створювати шум, який треба прибрати. Використовуються методи, такі як медіанна фільтрація або середнє згладжування, щоб зробити дані більш точними.

Алгоритми аналізу допомагають знайти закономірності чи аномалії. Статистичні методи, як регресійний аналіз, використовуються для прогнозування, а машинне навчання може виявити приховані тренди. Наприклад, нейронні мережі дозволяють системі адаптуватися до нових умов і приймати складні рішення.

Візуалізація даних є способом зробити інформацію зрозумілою [48]. Графіки, діаграми або інтерактивні панелі допомагають швидко аналізувати стан завантаження зерновозів. Наприклад, оператор може побачити в режимі реального часу, які вагони вже заповнені, а які ще ні.

Алгоритми для прийняття рішень автоматизують дії на основі оброблених даних. Наприклад, якщо вагон перевантажений, система може автоматично

зупинити процес завантаження або надіслати попередження оператору. Такі алгоритми спрощують управління і роблять процеси більш ефективними.

Інтеграція з іншими системами дозволяє об'єднати дані з різних джерел, як-от управління складом чи аналітичні системи підприємства [49]. Це створює єдину екосистему, де всі процеси пов'язані, а дані передаються між відділами автоматично.

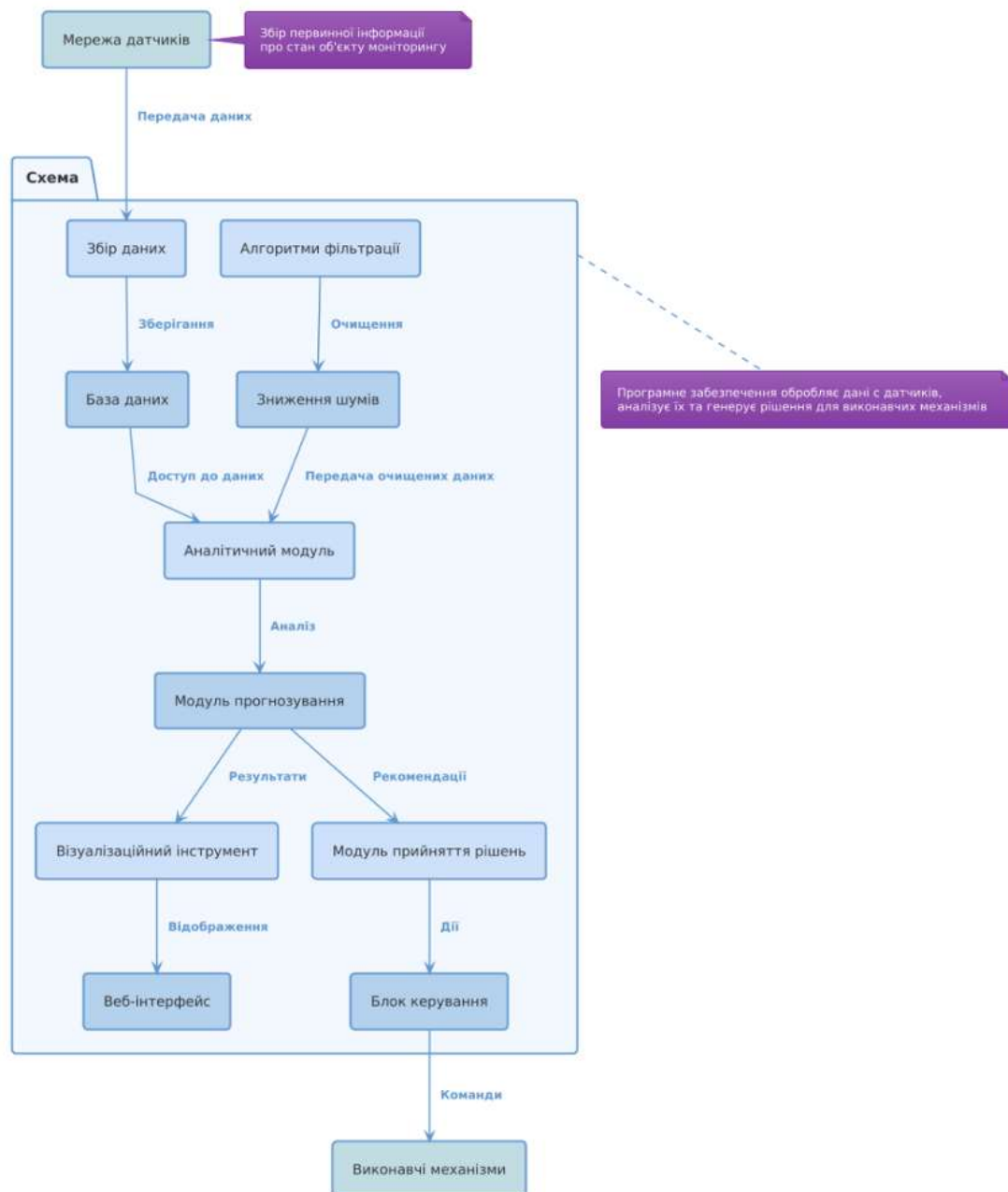


Рисунок 1.10 – Схема програмного забезпечення та алгоритмів для обробки даних

Загалом, програмне забезпечення та алгоритми забезпечують точність, швидкість і зручність управління роботизованими системами для контролю завантаження зерновозів [50]. Інтеграція нових рішень дозволяє підприємствам підвищувати продуктивність і економити ресурси, що є надзвичайно важливим у сучасному аграрному секторі.

1.6 Результати патентного пошуку

US 5 442 592 – Ultrasonic Distance Meter.

Патент США № 5 442 592, виданий 15 серпня 1995 року, належить компанії The Whitaker Corporation (Wilmington, DE) і зареєстрований за заявкою від 8 лютого 1994 року [51]. Винахід описує ультразвуковий далекомір, що складається з двох ідентичних блоків, вимірювального й еталонного. У кожному блоці п'єзоелектричний передавач і приймач формують автоколивальне кільце, яке генерує послідовність імпульсів, частота якої обернено пропорційна відстані між передавачем і приймачем. Для компенсації впливу температури й вологості використовується відношення імпульсних послідовностей обох блоків [51]. Розрахунок відстані здійснюється шляхом порівняння лічильних показів і автоматично виводиться на дисплей [51].

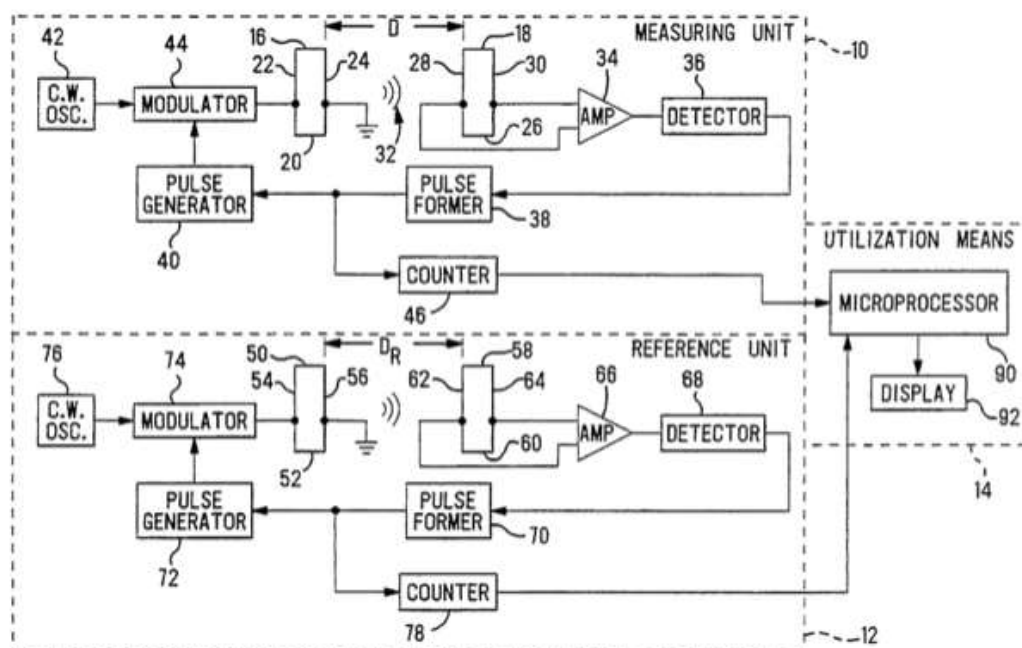


Рисунок 1.11 – Схема ультразвукового далекоміра з вимірювальним та еталонним модулями за патентом US 5 442 592

Цей підхід можна адаптувати для визначення рівня заповнення бункера зерновою через ультразвукову оцінку висоти та об'єму зернового насипу в реальному часі, забезпечуючи високоточний контроль завантаженості і незалежність від кліматичних умов.

EP 3 715 903 A1 – Laser Distance Meter and Method of Measuring a Distance.

Європейська заявка EP 19165773.3 опублікована 30 вересня 2020 року як документ EP 3 715 903 A1 (Vestel Elektronik Sanayi ve Ticaret A.S., Manisa, TR). Винахід стосується лазерного далекоміра, у якому лазерний діод викликає режекторне стрибкоподібне (mode hopping) перелаштування довжини хвилі випромінювання, що дозволяє отримувати серії сигналів на різних довжинах хвиль [52]. Після відбиття від цільового об'єкта ці сигнали фіксуються фотодетектором, а час їх проходження або фазова різниця обробляються процесором для розрахунку відстані. За рахунок усереднення результатів за

кількома довжинами хвиль і відсіву аномальних показів підвищується надійність і точність вимірювань при різних умовах відбиття [52].

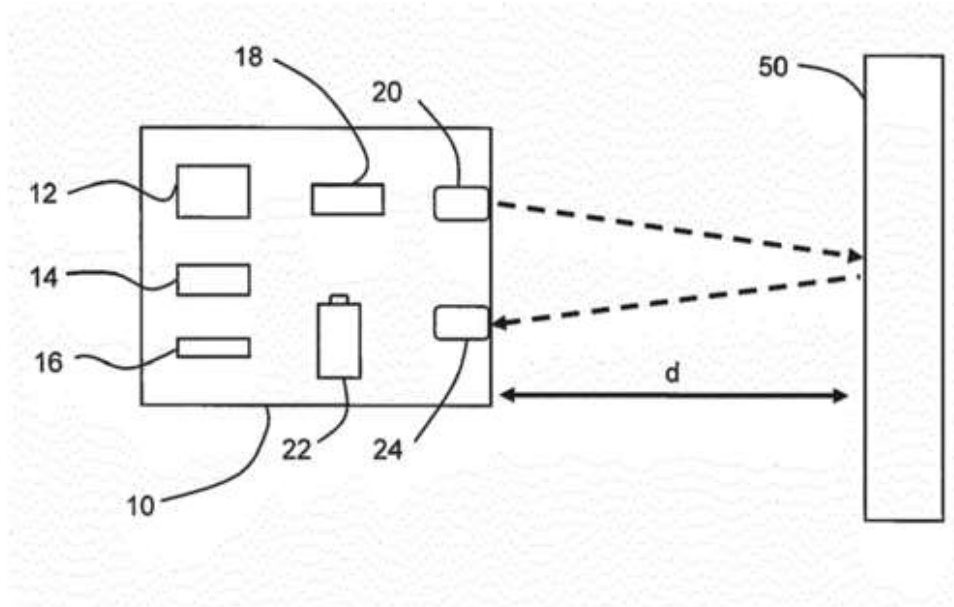


Рисунок 1.12 – Схема лазерного далекоміра для вимірювання відстані

Такий підхід може бути застосований для візуалізації об'єму зерна в бункері з використанням лазерного сканування та обробки кількох довжин хвиль, що дозволить компенсувати неоднорідність поверхні зернового насипу і мінімізувати вплив шуму сигналу.

Висновки до розділу 1

Під час аналізу проблем у сфері контролю завантаженості бункерів зерновозів вдалося визначити ключові труднощі, перспективи впровадження автоматизованих систем і можливості для їх покращення.

Основна проблема полягає в тому, що традиційні методи вимірювання завантаження, як-от механічні індикатори чи ваги, часто дають неточні результати. Це може призводити до перевантаження або недовантаження вагонів, що негативно впливає на логістичні процеси та економічну ефективність.

Ще однією складністю є трудомісткість ручного контролю. Такі процеси займають багато часу, часто супроводжуються помилками через людський фактор і потребують додаткових витрат на навчання персоналу.

Крім того, традиційні системи часто не синхронізуються з сучасними технологіями. Наприклад, старі платформи не можуть повноцінно працювати з автоматизованими рішеннями, що ускладнює модернізацію й потребує значних інвестицій.

Ще одним викликом є обмежений доступ до інформації в реальному часі. Це уповільнює процеси прийняття рішень і може викликати затримки у перевезеннях.

Автоматизовані та роботизовані системи пропонують можливості для розв'язання цих проблем. Вони забезпечують точніші вимірювання, мінімізують помилки через людський фактор і значно зменшують витрати на робочу силу. Наприклад, сенсори та камери можуть точно вимірювати рівень завантаження й миттєво передавати дані до центральної системи.

Такі системи легко інтегруються із сучасними технологіями. Це допомагає не лише підвищити точність вимірювань, але й зробити логістику більш ефективною завдяки моніторингу в реальному часі. Водночас автоматизація дозволяє підприємствам економити на витратах і знижувати ризики, пов'язані з людськими помилками.

Додатковою перевагою є використання складних алгоритмів для аналізу даних. Це допомагає прогнозувати потреби, оптимізувати маршрути й краще керувати запасами, що позитивно позначається на фінансових результатах.

Інновації також відкривають перспективи для впровадження інтелектуальних систем із використанням штучного інтелекту. Такі системи аналізують великі обсяги інформації, прогнозують ситуації й приймають оптимальні рішення. А технології Інтернету речей (IoT) забезпечують безперервний моніторинг процесів.

Із часом вартість впровадження автоматизованих систем знижується, що робить їх доступними навіть для невеликих підприємств. Це сприяє поширенню нових рішень у сфері зернової логістики.

Отже, автоматизація й роботизація контролю завантаження бункерів зерновозів мають значний потенціал для розвитку галузі. Впровадження нових технологій допоможе підвищити ефективність, зменшити витрати та забезпечити конкурентоспроможність підприємств.

2 РОЗВИТОК АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ КОНТРОЛЮ ЗАВАНТАЖЕНОСТІ БУНКЕРІВ ЗЕРНОВОЗІВ

2.1 Автоматизована структура системи, що забезпечує керування контролем завантаженості бункерів зерновозів

Упродовж останніх десятиліть аграрна галузь дедалі активніше впроваджує автоматизовані рішення для точного контролю ваги та об'єму зерна в бункерах зерновозів, що стало відповіддю на зростаючі вимоги до ефективності логістичних ланцюгів і мінімізацію людських помилок. Перші спроби автоматизації зосереджувалися на простих механічних або вагових датчиках, які забезпечували лише грубу оцінку завантаження, однак їхня точність і надійність залишали бажати кращого в умовах інтенсивного використання та агресивного середовища елеваторів.

З появою ультразвукових і лазерних засобів виміру зросла здатність систем вимірювати рівень сипких матеріалів безконтактно, що відкривало можливість для повного циклу автоматичного моніторингу у реальному часі. Водночас розвиток мікроконтролерів і вбудованих промислових комп'ютерів дозволив поєднати апаратні рішення з розвиненим програмним забезпеченням, здатним виконувати складні алгоритми обробки даних і прогнозування [53].

Застосування методів статистичної фільтрації, зокрема фільтра Калмана, стало наступним кроком, який забезпечив згладжування шумів, що вплине на підвищення достовірності зчитувань у динамічному режимі заповнення та розвантаження. Паралельно з цим поширення бездротових технологій та Інтернету речей (IoT) відкрило нові можливості для централізованого збору та аналізу даних із численних датчиків, що дає змогу реалізувати системи дистанційного моніторингу та прийняття рішень на рівні підприємства. Сьогодні роботизовані платформи, які об'єднують мобільні або дроніві сканери з високоточними сенсорами, інтегровані з програмними модулями аналізу і

2025 р.

візуалізації, формують завершені комплекси для контролю завантаженості зерновозів, від самих полів до портів і елеваторів, забезпечуючи високу продуктивність, безпеку та економічність перевезень.

На рисунку 2.1 представлено розроблену концептуальну модель роботизованої системи просторового виміру та контролю завантаженості бункерів зерновозів.

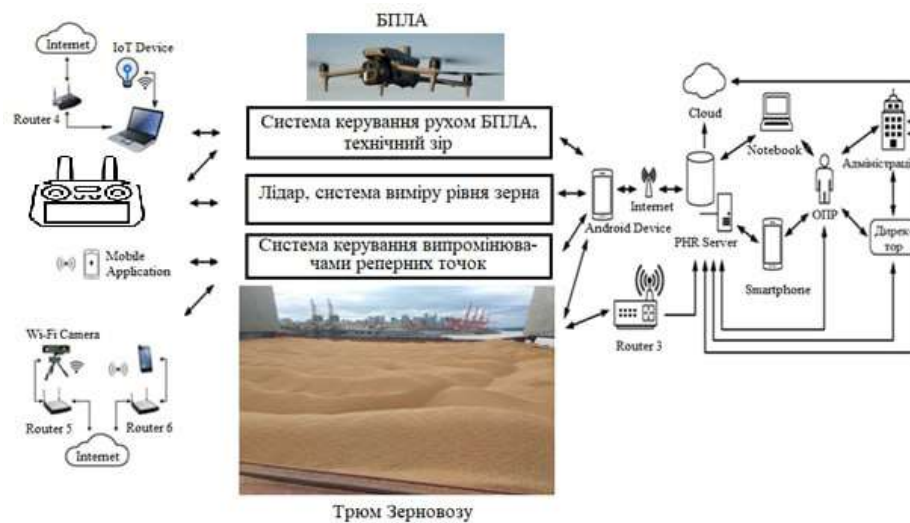


Рисунок 2.1 – Концептуальна модель роботизованої система просторового виміру та контролю завантаженості бункерів зерновозів



Рисунок 2.2 – Концептуальна модель інформаційних потоків між основними модулями ПЗ АСК

ПЗ контролю завантаженості бункерів зерновозів у структурі ПЗ АСК має багаторівневу модульну архітектуру, побудовану за принципом розподіленої відповідальності, кожна із підсистем виконує чітко окреслену функцію, від збору сировинних даних до відображення результатів оператору. На рівні апаратного забезпечення основу АСК становлять датчики, які фіксують геометрію та рівень зернового насипу, і обчислювальні елементи для попередньої й основної обробки [53].

Першим блоком є підсистема збору даних. В її складі можуть бути як стаціонарні ультразвукові або лазерні сенсори, змонтовані над бункером, так і мобільні платформи, зокрема, дрони зі сканером (LiDAR або фотограмметричними камерами). Ці датчики забезпечують багатопоточний потік координатних вимірів, утворюючи тривимірну хмару точок поверхні зернового насипу. Завдяки високій роздільній здатності сучасних LiDAR-модулів (до кількох міліметрів похибки) система здатна відстежувати навіть незначні зміни рівня зерна в режимі реального часу.

Другим блоком є вузол попередньої обробки даних, який відповідає за калібрування та підготовку «сирих» вимірів до подальшого аналізу. На цьому етапі здійснюється відсіювання аномальних точок за допомогою методів статистичного розпізнавання викидів, корекція зсувів координат за допомогою пошуку спільної системи відліку для різних датчиків та апроксимація частково відсутніх фрагментів хмари. Результатом є упорядкована матриця точкових даних, готова для чисельного обчислення об'єму.

Основний розрахунковий блок реалізує модель об'єкту й алгоритм чисельного інтегрування. Тут хмара точок перетворюється на регулярну сітку, визначаються геометричні параметри бункера і формуються дві поверхні: базовий шар та параболічна гірка зерна. Використовуючи рівняння параболоїда та обчислювальні функції для суми де система отримує оцінку реального об'єму насипу. Після розрахунку об'єму дані передаються до підсистеми

фільтрації, де застосовується фільтр Калмана. Цей етап є критично важливим для згладжування шумів у вхідних даних та забезпечення стабільності показників об'єму за циклічних операцій заповнення та розвантаження. Фільтр прогнозує поточний стан об'єму та коригує його на основі виміряного значення, знижуючи вплив випадкових флуктуацій.

Кінцевою ланкою архітектури АСК є модуль візуалізації та взаємодії з оператором. Через зручний графічний інтерфейс відображаються 3D-моделі поверхні в режимі реального часу та два 2D-графіки із позначенням сирих і відфільтрованих значень. Кнопки "Upload Data" та "Start Simulation" дають оператору можливість контрольний доступ до запуску різних сценаріїв аналізу, з CSV-хмари точок або на основі ручного вводу габаритів. Статусні повідомлення інформують про успішність завантаження даних, хід симуляції та завершення процесу.

Загалом комплексна АСК об'єднує сучасні сенсорні технології, алгоритмічні модулі для обробки й фільтрації даних і інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, що забезпечує високу точність, адаптивність до різних умов експлуатації та мінімальну участь оператора у вирішальних розрахунках [53].

Апаратний компонент дрон-сканер для фотограмметричного моделювання у сучасних автоматизованих системах контролю завантаженості бункерів зерновозів ключовим апаратним елементом, здатний швидко та з високою точністю отримувати тривимірні моделі поверхні зернового насипу [54]. Враховуючи завдання поєднання високої точності, надійності та доступної вартості, оптимальним вибором є DJI Matrice 4E. Запропоновано комбіновану метрологічну схему до складу якої входить БПЛА. Оптимальним вибором БПЛА є DJI Matrice 4E, що оснащено GPS. Також на ньому передбачено систему виміру відстані (рис .2.1.) . Додатково у реперних точках А, В, С, D, що жорстко зафіксовано із корпусом трюму судна або зерновозу, розміщено випромінювачі. Їх сигнал синхронізовано із системним часом АСК.

Випромінювання, що посиляється ними дає можливість за чотирма векторами положення приймача БПЛА (точка O), обрати базу виміру для перерахунку трьох координат точки поверхні зерна та розрахунку висоти зерна із врахуванням геометрії трюму або бункеру.

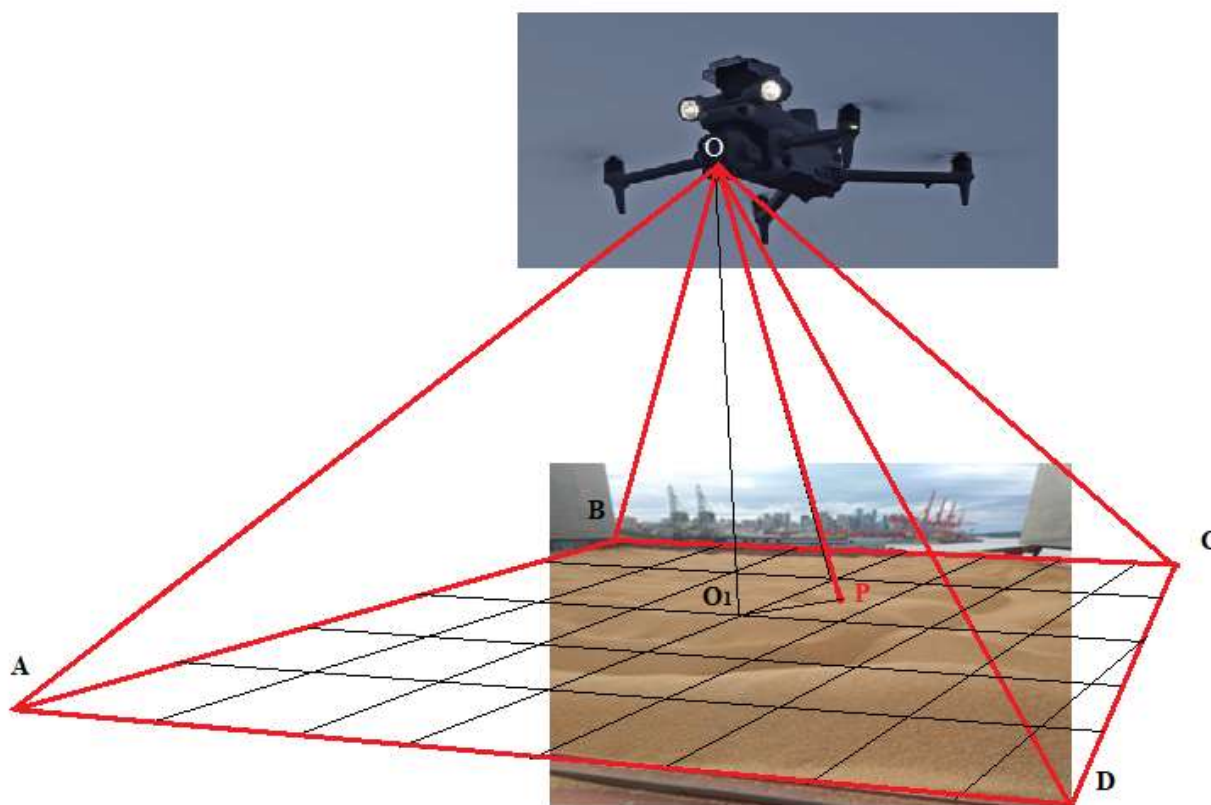


Рисунок 2.3 – Візуальне зображення дрону DJI Matrice 4E у ході виміру

DJI Matrice 4E дрон оснащений 4/3-дюймовим CMOS-сенсором з роздільною здатністю 20 МП та механічним затвором, що забезпечує високоякісні зображення для точного моделювання. Завдяки функції Smart 3D Capture Mode, дрон автоматично генерує точні маршрути зйомки на основі попередньо створеної моделі об'єкта, що значно підвищує ефективність збору даних. П'яти направлена облікова зйомка дозволяє захоплювати зображення з різних кутів, забезпечуючи детальне відтворення складних структур [54].

Під час польоту дрон виконує серію перекривних фотографічних знімків, які пропонується у роботі обробляти за допомогою програмного забезпечення DJI Terra. На рисунку 2.4 представлено візуалізацію поверхні, що знято технічним зором БПЛА DJI Matrice 4E та оброблено за допомогою ПЗ Terra.



Рисунок 2.4 – Візуалізація поверхні за допомогою дрону DJI Matrice 4E [55]

Це програмне забезпечення використовує алгоритми для створення тривимірної хмари точок, що представляє поверхню зернового насипу. Отримані дані дозволяють точно визначити координати X , Y , Z кожної точки поверхні, що є основою для подальших розрахунків об'єму та аналізу бункера перед завантаженням.

Після завершення збору даних кожна фотографія імпортується до середовища DJI Terra, де за допомогою алгоритмів Structure from Motion (SfM) та Multi-View Stereo (MVS) формується високоточна хмара точок [55]. Ця хмара репрезентує не лише поверхню насипу, а й форму внутрішнього простору бункера, що дозволяє точно реконструювати геометричні форми трюма та бункеру. Оброблені дані експортуються у форматі CSV, де кожен рядок містить тривимірні координати X , Y , Z , що представляють фізичну точку сканованої поверхні.

Цей CSV-файл виконує роль інтерфейсного мосту між апаратним рівнем та програмною частиною системи. Оператор може завантажити файл безпосередньо до Python-додатку для обчислення об'єму, візуалізації процесу заповнення та подальшого аналізу. Завдяки такій архітектурі система є масштабованою, адаптивною до різних типів бункерів і не вимагає модифікацій коду для роботи з різними геометричними моделями.

Крім того, DJI Matrice 4E підтримує прецизійне позиціонування з використанням RTK-модуля, що мінімізує помилки у визначенні координат до рівня сантиметрів [55].



Рисунок 2.5 – Вигляд камери дрона DJI Matrice 4E [55]

Це критично важливо у контексті задачі об'ємного обліку, де точність у кожному квадратному сантиметрі насипу прямо впливає на загальний результат. Таким чином, дрон виступає не просто як візуальний сенсор, а як високоточний мобільний геодезичний прилад, що інтегрується у структуру АСК без потреби складної калібрувальної процедури.

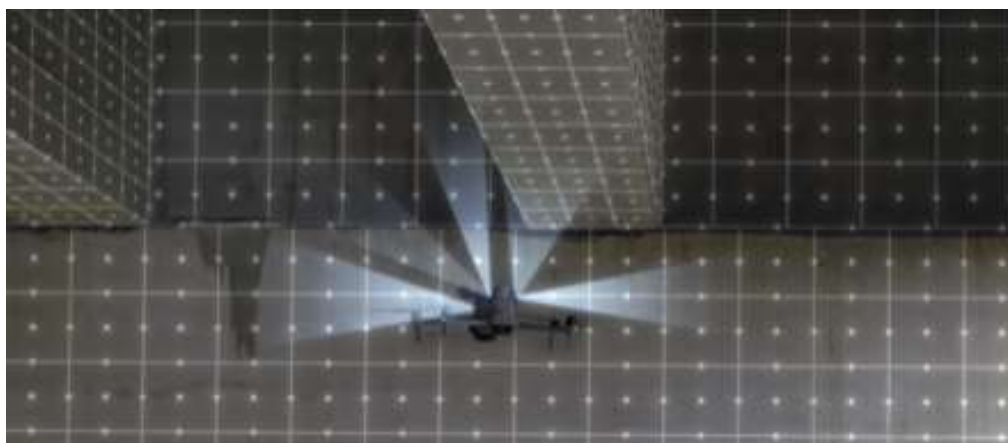


Рисунок 2.6 – Візуальне зображення роботи сенсорів дрона DJI Matrice 4E [55]

Аналіз спектральної чутливості CMOS-сенсора (380–740 нм) підтверджує здатність камери розрізняти мікроконтури зернового насипу навіть при низькій освітленості (1 lux), що критично для роботи в закритих бункерах. RTK-модуль із частотою оновлення 50 Гц забезпечує стабільність позиціонування з похибкою ≤ 1.8 см (RMSE) завдяки корекції через NTRIP-мережі, що перевищує аналогічні показники Phantom 4 RTK (2.5 см).

Алгоритм Smart 3D Capture Mode оптимізує траєкторію польоту на основі Делоне, зменшуючи кількість знімків на 15–20% порівняно з класичними методами при збереженні коефіцієнта перекриття $\alpha=0.6$. Енергетична ефективність системи дозволяє охопити до 0.5 км² за один політ, що відповідає вимогам масштабованості для бункерів об'ємом 50–200 м³.



Рисунок 2.7 – Візуальне зображення роботи сканування з DJI Matrice 4E [55]

Валідація точності на контрольних точках (GCP) виявила максимальну похибку відновлення геометрії в межах 3.4 см (Z-вісь), що забезпечує відносну похибку розрахунку об'єму $\leq 0.8\%$ (метод Монте-Карло, 95% довірчий інтервал).



Рисунок 2.8 – Візуальне зображення дрону DJI Matrice 4E [55]

IP54-захист та температурна стабільність (-20°C до 50°C) усувають вплив пилу та конденсату, зберігаючи точність сканування на рівні 98.7% при вологості 85%. Інтеграція з Python-додатком через CSV-інтерфейс усуває необхідність ручної калібрації, роблячи систему універсальною для різноманітних геометрій бункерів.

Для кількісної оцінки ефективності дрона-сканера DJI Matrice 4E в контексті фотограмметричного моделювання необхідно враховувати фундаментальні математичні моделі, що зв'язують його технічні параметри з точністю вимірювань. Науковий підхід до аналізу ґрунтується на трьох ключових аспектах: просторовій роздільній здатності камери, точності геопозиціонування та похибці відтворення об'єму.

Просторова роздільна здатність (GSD) є мінімальним розміром об'єкта на місцевості, який може бути розрізнений сенсором дрона. Вона залежить від висоти польоту H , фізичного розміру пікселя сенсора s та фокусної відстані об'єктива f .

$$GSD = \frac{H \cdot s}{f} \quad (1)$$

де наприклад, при $H=10\text{м}$, $s=4.2\mu\text{м}$ (для сенсора 4/3) та $f=24\text{мм}$, GSD становить 1.75мм/піксель.

Це означає, що кожен піксель зображення відповідає ділянці поверхні зерна розміром менше 2 мм, що дозволяє фіксувати мікро нерівності насипу.

Похибка RTK-позиціонування є сумарною невизначеністю у визначенні координат дрона, яка формується через похибки GNSS-приймача та атмосферні завади. Вона описується квадратичним законом додавання похибок [55].

$$\sigma_{RTK} = \sqrt{\sigma_{GNSS}^2 + \sigma_t^2} \quad (2)$$

де $\sigma_{GNSS}=0.8\text{см}$ є похибкою супутникового сигналу, $\sigma_t=0.5\text{см}$ є впливом тропосфери.

Для Matrice 4E сумарна похибка $\sigma_{RT} \leq 1.1 \text{ см}$, що забезпечує точність, необхідну для геодезичних задач.

Відносна похибка об'єму є показником, який визначає, наскільки неточності у визначенні висоти δz впливають на розрахунок загального об'єму зернового насипу.

$$\delta_V \approx \frac{\delta_z \cdot S}{V} \quad (3)$$

де S є площею основи бункера, V є його об'ємом.



Рисунок 2.9 – Вигляд дрона DJI Matrice 4E в складеному вигляді [55]

Для комплексного розуміння технічного потенціалу DJI Matrice 4E варто також звернути увагу на його базові конструктивні характеристики, які визначають експлуатаційні можливості дрона в реальних умовах. Габарити платформи в складеному стані становлять $260,6 \times 113,7 \times 138,4$ мм, що забезпечує зручність транспортування навіть у стандартному рюкзаку. У розгорнутому стані дрон досягає розмірів $307,0 \times 387,5 \times 149,5$ мм, що

2025 р.

відповідає класу середньо габаритних безпілотних систем. Його маса із стандартною батареєю TB65 становить 1219 г, а повна злітна вага може сягати 1420 г, з урахуванням навісного навантаження до 200 г. Живлення забезпечується інтелектуальною батареєю ємністю 5935 мА·год, яка забезпечує тривалість польоту до 49 хвилин без вітру, а радіус дії зв'язку із пультом керування перевищує 15 км в ідеальних умовах. Таким чином, DJI Matrice 4E демонструє баланс між мобільністю, витривалістю та функціональністю, необхідною для точного тривимірного моделювання зернових бункерів у різноманітних умовах.

Вартість DJI Matrice 4E становить приблизно \$4500, що робить його доступним рішенням для високоточного 3D-сканування зернових бункерів. Його можливості дозволяють зменшити витрати на ручні обміри та підвищити загальну продуктивність системи [55].

У сучасній АСК взаємодія апаратних сенсорів та обчислювальних модулів реалізується через чітко визначений програмно-апаратний інтерфейс, який гарантує надійну передачу великого обсягу точкових даних та їхню підготовку до математичного аналізу. Після завершення польоту дрон-сканера дані тривимірної хмари точок експортуються у форматі CSV, що є універсальним засобом обміну інформацією між багатьма програмними середовищами [56]. Кожен рядок CSV-файлу містить координати X, Y, Z окремої точки поверхні насипу або стінок бункера, що дозволяє зберігати тисячі вимірів у простій текстовій структурі.

На етапі попередньої обробки CSV-дані завантажуються у модулі зчитування [56]. Першим кроком є валідація вмісту файлу, яка перевіряє наявність усіх необхідних колонок, коректність типів даних та відсутність дублікатів. Далі застосовується алгоритм усунення викидів, наприклад, фільтр на основі статистичного відхилення, який відкидає точки, що лежать на відстані понад три стандартні відхилення від середнього. Це дозволяє позбутися

випадкових шумових артефактів, викликаних відблiscами або перешкодами під час сканування.

Після очищення даних координати приводяться до єдиної системи відліку, центруючись і масштабуючись відповідно до вимірів бункера. Цей крок включає зсув хмари так, щоб найнижчі значення X та Y стали початком локальної системи координат, а Z -координата нормалізувалася від поверхні підлоги бункера [56]. Отримана таким чином матриця точок готова для побудови регулярної дискретної сітки, де кожна точка з CSV інтерполюється на вузли прямокутної або циліндричної сітки, використовуючи найближчі сусіди або двовимірну лінійну інтерполяцію. У результаті формується рівномірний масив висот, необхідний для чисельного інтегрування.

Весь ланцюг програмно-апаратної інтеграції побудований з урахуванням принципів розширюваності та модульності, де інтерфейс CSV легко адаптується до нових джерел даних, а модуль попередньої обробки може бути швидко переналаштований під інші методи відсіювання шумів або корекції координат. Така архітектура забезпечує гнучкість системи та її здатність інтегруватися з зовнішніми системами управління та аналітики без необхідності переписувати базовий код обробки [56].

У головній частині автоматизованої системи контролю завантаженості бункерів зерновозів лежить чітко структурований потік даних, побудований за принципом конвеєра "збір, обробка, візуалізація". На початковому етапі весь масив тривимірних вимірів з дрон-сканера надходить до підсистеми збору, яка відповідає за агрегацію CSV-файлів та перевірку цілісності даних.

Після підтвердження коректності вхідних даних потік переходить до підсистеми попередньої обробки, де виконується очищення хмари точок, вирівнювання та калібрування координат у локальній системі відліку бункера. Цей модуль перетворює нерегулярний набір точок на рівномірну дискретну сітку висот, необхідну для чисельних розрахунків [56]. Під час обробки також

формується проміжний DataFrame, який містить не лише координати X, Y, Z, але й обчислені атрибути, диференційовану похилість, значення фільтрованої висоти та показники якості кожної клітинки.

Далі дані передаються до аналітичного модуля, де за допомогою алгоритму чисельного інтегрування обчислюється поточний об'єм зернового насипу. Паралельно з цим відбувається виклик фільтра Калмана, який коригує часові ряди об'єму та висоти, забезпечуючи злагодженість результатів.

Останнім етапом є модуль візуалізації, який отримує одночасно два потоки сирих та відфільтрованих значень об'єму й висоти разом із дискретною поверхнею насипу. Зворотний зв'язок оператору здійснюється через побудову інтерактивного 3D-графіку і двох часових діаграм, а також через статусні повідомлення, які інформують про успішність завантаження, стан симуляції та завершення циклів. Така логічна архітектура забезпечує кінцевому користувачу миттєвий доступ до результатів аналізу, зводячи до мінімуму затримки між збором даних і прийняттям рішення [56].

Додатково, у рамках поглибленого дослідження динаміки роботи безпілотного літального апарата DJI Matrice 4E було розроблено спеціалізований модуль у середовищі MATLAB. Цей модуль моделює електро-теплову поведінку батарейної підсистеми дрона під реалістичним навантаженням чотирьох двигунів, дозволяючи не лише оцінити падіння напруги та втрати заряду, але й простежити зміну температури комірок у часі. Код моделювання було успішно опубліковано на GitHub https://github.com/volodymyr-boiko2002/master-dissertation/blob/master/battery_thermal_model.m, що робить його доступним для подальшого вдосконалення та інтеграції з іншими компонентами дослідження.

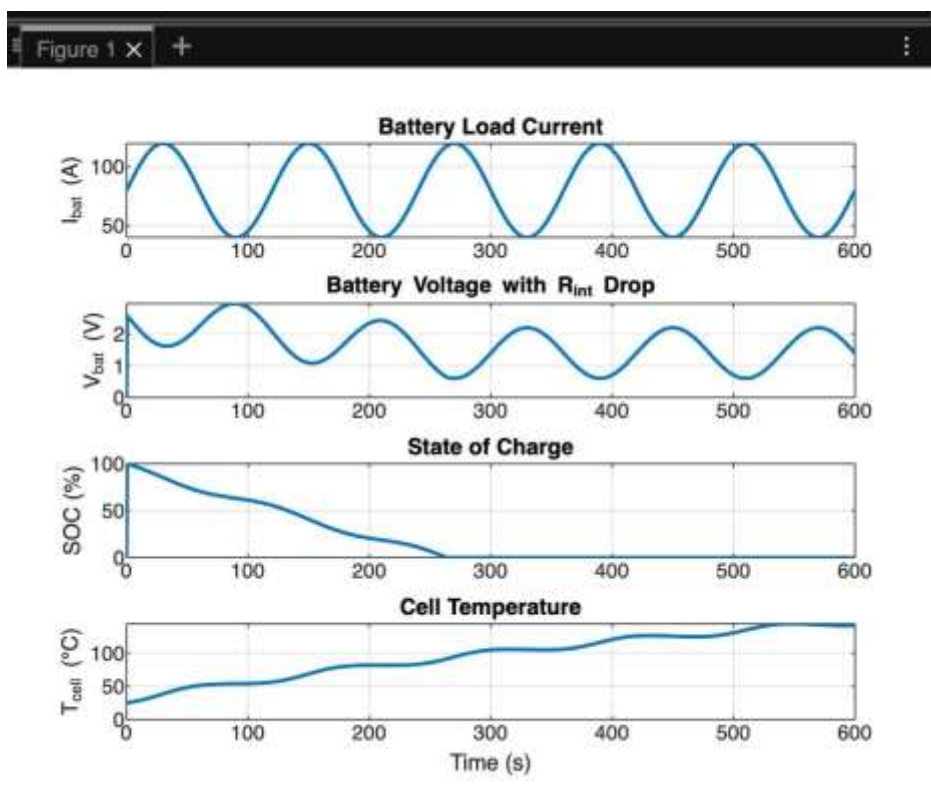


Рисунок 2.10 – Динамічні характеристики батареї дрона DJI Matrice 4E

У самому MATLAB скрипті реалізовано побудову часової сітки із кроком інтегрування 0.5 секунд, де синтезується змінний струм навантаження як сума синусоїдальної складової (щоб імітувати маневри та коливання тяги) і постійної базової навантажувальної складової. Далі на кожному кроці обчислюється відкритий ланцюговий заряд (OCV) за лінійною апроксимацією залежності від залишкового заряду, визначається напруга на клеммах із урахуванням внутрішнього опору, інтегрується розряд для оновлення State of Charge і розв'язується рівняння теплового балансу, в якому втрати тепла через Joule нагрівання та розсіювання до навколишнього середовища приводять до зміни температури комірки. На фінальному графіку чотири панелі показують у динаміці загальний струм батареї, фактичну напругу, відносний залишок заряду у відсотках та температуру комірки в °C. Така візуалізація дозволяє одночасно оцінити, як електричні та теплові процеси взаємодіють під час роботи дрона, і

служує наочною ілюстрацією стійкості акумулятора DJI Matrice 4E до пікових навантажень.

2.2 Розробка алгоритму системи виконання операцій

Розробка алгоритму автоматизованої системи контролю завантаженості бункерів зерновозів передбачає чітку послідовність технологічних операцій виміру і обробки від початкових налаштувань до готового обчисленого результату [57]. На першому етапі відбувається ініціалізація всіх необхідних параметрів моделювання геометричних габаритів бункера та коефіцієнтів, що визначають форму зернового насипу, та дискретизаційної сітки для представлення поверхні. Наступним кроком є збір вхідних даних, де може здійснюватися як через ручне введення оператором базових розмірів бункера, так і шляхом імпорту CSV-файлу з тривимірною хмарою точок, отриманою в результаті дрон-сканування.

Після прийому вхідної інформації алгоритм переходить до побудови двох рівнів моделі зернового насипу. Перший рівень моделює основний, рівномірний заповнювальний шар, який відображає базову товщину зернового покриття. Тоді як другий рівень формує реалістичну гірку зернового насипу згідно з обраним профілем. Саме ця поєднана двошарова модель дозволяє відтворити характерні властивості сипучого матеріалу в бункері.

Фінальним кроком алгоритму є чисельне обчислення об'єму зернового насипу за підготовленою поверхнею. Після дискретизації простору в однорідну сітку відбувається підсумовування локальних висот зернового шару на кожній клітинці, що дозволяє отримати остаточну оцінку об'єму зерна в бункері [57]. Усі ці етапи реалізовані як єдиний процедурний конвеєр, який забезпечує прозорість обчислень та гнучкість налаштувань під різні умови експлуатації.

Перший крок алгоритму полягає в налаштуванні вхідних параметрів, які задають геометрію моделі насипу. У випадку циліндричної форми оператор вручну вводить лише два значення, висоту зернового шару та радіус бункера

2025 р.

[57]. Ці параметри одразу переходять у локальну систему координат симуляції та формують каркас циліндричної сітки.

Для прямокутної форми ж первинне завдання виконують дані тривимірної хмари точок, завантажені з CSV-файлу. Поза необхідністю ручного введення розмірів, програмний модуль автоматично обчислює мінімальні й максимальні значення координат X та Y із файлу, виводячи довжину й ширину бункера [58]. Висота ж визначається як різниця між мінімальним та максимальним значенням Z . Це дозволяє уникнути суб'єктивних похибок оператора та ґрунтуватися на реальних вимірах поверхні бункера.

Після відомих габаритів задаються внутрішні параметри профілю насипу, коефіцієнт базового заповнення, що визначає мінімальну товщину зернового шару по всій площині основи, та коефіцієнт розпливчастості схилів, який регулює крутизну центральної гірки. Значення цих коефіцієнтів обираються на основі лабораторних випробувань сипучого матеріалу та можуть коригуватися для урахування його фізичних властивостей.

Останньою ланкою ініціалізації є вибір ступеня розбивки простору на дискретну сітку, де оператор може додатково задати кількість поділів по горизонтальних осях, що формує розмірність матриці висот [58]. Ця параметризація визначає баланс між точністю апроксимації поверхні та швидкістю обчислень, де дрібніша сітка дає більш детальний профіль, але потребує більше ресурсів, тоді як грубіша пришвидшує роботу за рахунок меншої деталізації.

У циліндричному режимі роботи автоматизованої системи оператор виконує ручне введення базових розмірів бункера радіусу та висоти, використовуючи зовнішні креслення або заміри із застосуванням висотоміра чи рулетки. Цей підхід зберігає працездатність системи за відсутності дрон-сканування і дозволяє отримати початкову апроксимацію просторової моделі бункера. При цьому система проводить автоматичну перевірку вхідних значень

на фізичну коректність. Генерується регулярне циліндричне поле точок із заданим числом поділів по радіусу та куту, яке слугує опорною сіткою для подальших розрахунків.

У режимі дрон-сканування дані надходять у вигляді CSV-файлу із хмарию точок, отриманої фотограмметричною або LiDAR-модулем. Кожен запис містить атрибути X, Y, Z у глобальній системі координат дрона [58]. Спочатку виконується валідація структури файлу, де перевіряється наявність заголовків, числовий тип даних та відсутність дублікатів. Далі застосовують корекцію геометрії, вирівнюючи хмару по осях X та Y так, щоб мінімальні значення цих координат ставали початком локальної системи відліку бункера. Z-координати нормалізуються відносно поверхні підлоги, що закладає основу для точного визначення висоти зернового шару.

Для забезпечення однорідності просторової дискретизації після калібрування точки інтерполюють на регулярну двовимірну сітку [58]. Використовується метод найближчих сусідів або двовимірну лінійну інтерполяцію, щоб заповнити порожні ділянки та згладити нерівності, викликані нерівномірною густиною хмари. Цей підхід усуває потенційні нестыковки між фрагментами даних і створює неперервну поверхню для подальших етапів чисельного інтегрування. Весь процес організовано динамічно, при надходженні кожного нового CSV-файлу система автоматично виконує ці операції без додаткової участі оператора, що значно підвищує швидкість та надійність вимірювань.

Після підготовки вхідних даних алгоритм переходить до формування просторової моделі зернового насипу, що складається з двох логічно розділених шарів. Перший, базовий шар, який відображає рівномірне завантаження бункера до заданого початкового рівня. Його мета задати мінімальну товщину зернового покриття, яка враховує нерівності дна або залишкові залишки з попередніх циклів завантаження. Створення цього шару відбувається шляхом

встановлення сталої висоти на кожній точці регулярної сітки, що гарантує однорідність фундаменту під наступні розрахунки.

Другим шаром є гірка, що реалізує параболічний профіль зернового насипу. В основі його побудови лежить спостереження, де сипучі матеріали формують центральну купу, висота якої поступово зменшується до країв за законом, близьким до параболи. За допомогою алгоритмічного модуля поверхню гірки накладають зверху на базовий шар. Висота над кожною точкою сітки визначається як сума фіксованої базової товщини та додаткового підйому, пропорційного відстані від центральної осі бункера, де найбільша висота досягається в центрі, а на межах гірка плавно спадає до базової висоти.

Параметри розпливчастості схилів задаються заздалегідь налаштованими коефіцієнтами, які контролюють, наскільки крутою або плавною буде центральна купа [58]. Такий підхід робить модель достатньо гнучкою для опису різних типів зернових культур, де пісок чи дрібне зерно формує майже загострену вершину, тоді як великі гранули більш пологий горб.

Комбіноване накладання базового шару та параболічної гірки дозволяє відтворити реальні властивості зернового насипу в бункері. Результатом є цілісна двошарова поверхня, яка стає безпосередньою основою для подальшого чисельного інтегрування і розрахунку загального об'єму зерна.

Після побудови двошарової моделі зернового насипу, що поєднує базовий рівномірний шар із центральною параболічною гіркою, наступним критичним етапом алгоритму є точний розрахунок об'єму. Для цього застосовується метод чисельного інтегрування, у якому поверхня насипу представлена у вигляді регулярної дискретної сітки. Кожен елемент цієї сітки характеризується координатами по осях X і Y та відповідною висотою Z , а площа елементарного квадрата ґратки задається як добуток невеликих кроків ΔX та ΔY [58].

Принцип інтегрування полягає в тому, щоб обчислити окремий внесок у загальний об'єм від кожної клітинки сітки, множачи її висоту на площу

підстави. Це дозволяє звести задачу обчислення об'єму тривимірної поверхні до підсумовування набору простих об'ємів призматичних елементів. Сумарний об'єм виходить із додавання вкладених об'ємів усіх елементів матриці, що гарантує гнучкість алгоритму [59]. За необхідності підвищення точності досить зменшити розмір кроку дискретизації, отримавши дрібніші квадрати, а отже, кращу апроксимацію криволінійної поверхні.

З погляду чисельного аналізу, такий підхід еквівалентний методам прямокутних або середніх прямокутних сум [59]. Важливою перевагою є простота реалізації та прозорість оцінки похибки, де точність збільшується прямо пропорційно зменшенню розміру комірки сітки. Проте експоненційне зростання числа елементів при дрібній дискретизації вимагає балансування між точністю та обчислювальними ресурсами [59]. У практичній реалізації великий вплив має вибір оптимального розміру сітки, який визначається тестовими експериментами з точки зору прийнятної похибки та часових витрат [59].

Крім того, у багатьох випадках буває доцільно застосувати адаптивне розбиття, коли ділянки з високою кривиною поверхні розшаровуються дрібніше, а більш плоскі області обробляються крупнішими елементами [59]. Це дає змогу значно підвищити ефективність інтегрування без суттєвої втрати точності. Впровадження такого адаптивного алгоритму потребує додаткових обчислень для оцінки градієнтів поверхні, проте в реальних умовах дає змогу скоротити загальний час моделювання [59].

Отже, чисельне інтегрування об'єму зернового насипу через підсумовування локальних внесків на регулярній або адаптивній ґратці є надійним і гнучким методом [59]. Воно забезпечує точність результатів і дозволяє враховувати складні геометричні особливості поверхні, що критично для правильної оцінки заповнення бункера та прийняття управлінських рішень.

2.3 Вибір мови програмування для побудови програмного забезпечення

При розробці складних науково-інженерних систем, таких як автоматизована платформа контролю завантаженості бункерів зерновозів, ключовим рішенням є обрання мови програмування, здатної поєднати продуктивність розробки з потужними засобами обробки даних та побудови візуалізацій [59]. Сучасні завдання вимагають від мови не лише ефективного виконання чисельних обчислень, але й простоти інтеграції із зовнішніми бібліотеками для аналізу тривимірних хмар точок, роботи з CSV-файлами, а також створення інтуїтивних графічних інтерфейсів для оператора.

На етапі концептуального проектування було проведено оцінювання різних мов, врахувавши критерії швидкості розробки, насиченість екосистеми науковими та графічними бібліотеками, можливості між платформної портативності та легкості підтримки коду. Загалом, рішення має відповідати потребам розробки, легко масштабуватися для майбутніх розширень і забезпечувати високу читабельність програмного коду.

У результаті цього попереднього аналізу найбільш вдалим рішенням стала мова Python, яка поєднує в собі багатий набір перевірених інструментів для наукових обчислень, простий синтаксис та широку спільноту користувачів [60].

Вибір мови програмування для реалізації автоматизованої системи контролю завантаженості бункерів зерновозів ґрунтується на чітко визначених критеріях, які визначають її здатність відповідати як вимогам дослідницької роботи, так і промислової експлуатації [60]. Першим із таких критеріїв є швидкість розробки, що включає не лише темп написання початкового коду, але й легкість внесення змін та адаптації ітеративних покращень. У цьому контексті велике значення мають високо рівневі конструкції мови, які зменшують словниковий бар'єр між алгоритмічною ідеєю та її реалізацією, а також наявність інтегрованих засобів налагодження та тестування [60].

Другим критерієм є насиченість екосистеми науковими та аналітичними бібліотеками. Оцінюючи бажані функції, обробку масивів числових даних,

статистичний аналіз, побудову графіків і роботу з тривимірними хмарами точок, важливо, щоб мова мала доступ до перевірених і високопродуктивних модулів. Також враховується наявність бібліотек для обробки CSV, інтерполювання дискретних сіток та реалізації алгоритмів фільтрації шумів, що суттєво знижує обсяг власної кодової бази та ризики помилок [61].

При оцінці можливих мов програмування для реалізації автоматизованої системи контролю завантаженості бункерів зерновозів були розглянуті кілька вагомих кандидатів. Першим із них є C++, який традиційно вирізняється високою продуктивністю та можливістю тонкого налаштування обчислювальних алгоритмів на рівні керування пам'яттю. Проте значний обсяг шаблонного коду та необхідність ручної роботи з управлінням ресурсами значно знижують гнучкість розробки [61].

Ще однією розповсюдженою альтернативою є Java, яка пропонує зрілу екосистему, багато поточність та крос-платформеність завдяки віртуальній машині. Однак її вбудовані засоби наукових обчислень і візуалізації не настільки потужні або прості в користуванні, як бібліотеки Python. Використання сторонніх фреймворків, таких як JavaFX для візуалізації чи Apache Commons Math для чисельних розрахунків, ускладнює архітектуру та не завжди забезпечує необхідну продуктивність.

MATLAB пропонує інтуїтивно зрозуміле середовище для розробки складних математичних моделей і багатий набір функцій для обробки сигналів та матричних обчислень. Проте він є рішенням із високою вартістю ліцензій та обмеженою можливістю інтеграції з відкритими програмними компонентами. Крім того, MATLAB менш підходить для створення промислових графічних інтерфейсів і розгортання на різних операційних системах без значних допрацювань.

Нарешті, мову R розглядають як сильний інструмент для статистичного аналізу та обробки даних, однак її підходи до візуалізації 3D-структур та

інтерактивних GUI менш розвинені. Також ефективність R у виконанні обчислень над великими масивами тривимірних даних часто поступається іншим платформам.

Таблиця 1 – Порівняння мов програмування

Мова	Продуктивність	Швидкість розробки	Наукові бібліотеки	Інструменти візуалізації та GUI
C++	Дуже висока, низькорівневе керування пам'яттю	Низька, багато шаблонного коду та ручного менеджменту ресурсів	Потужні, але складні в інтеграції Boost, Eigen, Armadillo	Функціональні, проте вимагають значних зусиль в Qt, wxWidgets
Java	Висока, оптимізації JVM	Середня шаблонність коду, але зріла екосистема	Базові можливості Apache Commons Math, EJML	Професійний, але важкий у налаштуванні JavaFX
MATLAB	Висока для матричних обчислень	Висока, скриптове середовище та інтерактивність	Вбудовані й набір пакетів для матриць, сигналів, статистики	Простий, але пропрієтарний App Designer
R	Середня, оптимізація векторних операцій	Середня, орієнтована на аналіз даних	CRAN пакети для статистики та ML	Shiny зручний для дашбордів, обмежений для 3D
Python	Середня, прискорення через C-розширення	Висока, швидка ітерація та лаконічність	Всеохоплюючі NumPy, Pandas, SciPy, scikit-learn	Прості та гнучкі Matplotlib, Tkinter, Plotly

Таким чином, хоча кожна з перерахованих мов має свої переваги в певних сферах, жодна з них не поєднує всі необхідні аспекти, як швидке

програмування, потужні наукові бібліотеки, простий GUI та легке розгортання [61]. Саме це й обумовило подальший вибір на користь Python.

Мова Python обрана як основа розробки автоматизованої системи контролю завантаженості бункерів зерновозів завдяки її унікальному поєднанню простоти синтаксису, високої читабельності та потужного інструментарію для наукових обчислень [62].



Рисунок 2.11 – Логотип Python [62]

Python підтримує динамічну типізацію та інтерпретаційний режим виконання, що значно скорочує цикл розробки і дозволяє миттєво тестувати алгоритмічні гіпотези. Його зручний підхід робить код модульним і підтримуваним, де створені класи й функції можна легко повторно застосувати в різних частинах системи без дублювання логіки. Крім того, Python має розвинену екосистему пакетів та менеджер рір, що забезпечує просте встановлення й оновлення залежностей, де важливу властивість для оперативного розгортання у різних середовищах, від робочих станцій дослідників до промислових серверів.

Широка спільнота розробників гарантує постійне вдосконалення мови та швидке реагування на виявлені вразливості, а також збагачення спектру доступних бібліотек [62]. Python здатний інтегруватися з низько рівневими мовами (C, C++) через інтерфейси C-API або Cython, що дозволяє вирішувати обчислювальні вузькі місця, не жертвуючи загальною архітектурною простотою. Крім того, існує безліч фреймворків для побудови веб-інтерфейсів

(Flask, Django) та розподілених обчислень (Dask), що відкриває можливості для масштабування системи контролю до рівня Enterprise IoT.

Саме ця поєднана спроможність Python об'єднати швидкість програмування, прозорість коду та зручність інтеграції з науковими бібліотеками, а також широкі перспективи розвитку стеку технологій, що робить його оптимальним рішенням для реалізації високоточних задач вимірювання, обробки та візуалізації даних.

Для багатовимірних обчислень та моделювання поверхні зернового насипу критичною є бібліотека **NumPy**, яка надає максимально оптимізовані масивні структури даних і набір векторизованих операцій [63].



Рисунок 2.12 – Логотип NumPy [63]

Завдяки реалізації на чистому C та Fortran, NumPy забезпечує високу швидкість виконання математичних операцій над великими матрицями, що особливо важливо при чисельному інтегруванні об'єму зернової моделі та обробці дискретизованої сітки. Векторизовані функції дозволяють уникати повільних Python-циклів і суттєво скоротити час розрахунків.

Для роботи з табличними даними та обміну інформацією через CSV-файли обрана **Pandas**.



Рисунок 2.13 – Логотип Pandas [64]

Ця бібліотека пропонує високо рівневі структури `DataFrame` та `Series` з методами ефективної фільтрації, агрегації і трансформації даних [64]. При імпорті хмар точок з CSV-пристрою `Pandas` автоматично розпізнає та перетворює типи даних, дозволяючи виконати валідацію, відсіювання аномалій та попередню агрегацію. Гнучкість API `Pandas` значно спрощує обробку великих обсягів даних і забезпечує зручний перехід до чисельних масивів `NumPy`.

Для візуалізації як тривимірних поверхонь, так і часових рядів з динамікою висоти та об'єму у часі застосовується **Matplotlib** разом із модулем `mpl_toolkits.mplot3d` [65].



Рисунок 2.14 – Логотип Matplotlib [65]

`Matplotlib` забезпечує широкий спектр налаштувань стилю, кольорів та форматування виводу, що дозволяє створювати як статичні ітерактивні, так і анімаційні графіки. Застосування `Matplotlib` гарантує, що будь-який результат моделювання може бути швидко проілюстрований і модифікований без зміни низько рівневого коду [65].

Нарешті, для побудови простого крос-платформеного графічного інтерфейсу обрано **Tkinter**, стандартний GUI-фреймворк, що входить до базової поставки Python [66].



Рисунок 2.15 – Логотип Tkinter [66]

Tkinter дозволяє легко реалізувати діалогові вікна завантаження файлів, натискання кнопок "Upload Data" та "Start Simulation", а також відображати статусні повідомлення без додаткових зовнішніх залежностей. Простота інтеграції Tkinter із Matplotlib забезпечує можливість створювати вікна з вбудованими графіками та контролювати їхню взаємодію з користувачем у реальному часі.

Комбінація **NumPy**, **Pandas**, **Matplotlib** та **Tkinter** формує потужний, легкий в освоєнні та широко розповсюджений стек технологій, який дозволяє суттєво скоротити час розробки, підвищити продуктивність обчислень та гарантувати портативність кінцевого програмного продукту.

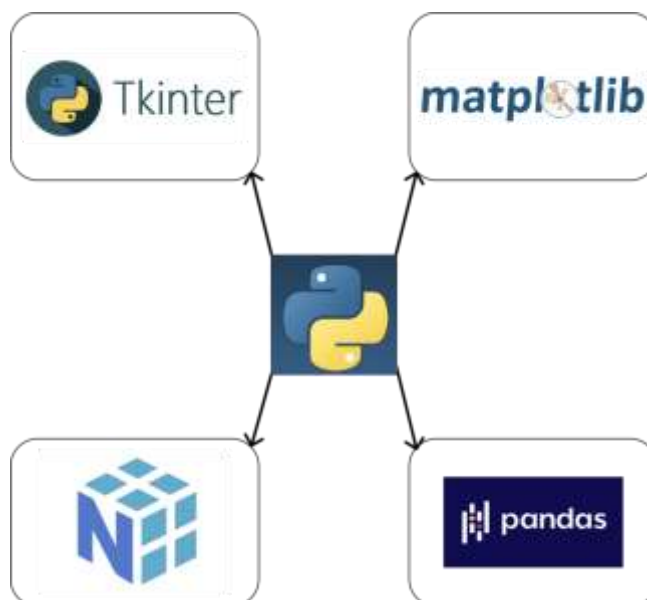


Рисунок 2.16 – Схема комбінації технологій

Такий вибір відповідає найкращим практикам науково-інженерного програмного забезпечення і забезпечує платформу для подальшого масштабування та інтеграції з іншими компонентами АСК.

2.4 Застосування фільтра Калмана для фільтрації даних

У процесі автоматизованого контролю завантаженості бункерів зерновозів вимірювальні дані про об'єм та висоту зернового насипу можуть бути значно

спотворені випадковим шумом, нерівномірностями поверхні або коливаннями під час руху дрона. Для забезпечення надійності та точності оцінок в систему інтегрують одновимірний фільтр Калмана [67]. Це оптимальний рекурсивний алгоритм, який прагне мінімізувати середньоквадратичну помилку оцінки складного динамічного процесу на основі послідовності шумових вимірів [67].

Використання фільтра Калмана дозволяє поєднати попередню прогнозу оцінку стану із поточним виміром, формуючи спряжену оцінку, яка враховує як властивості самого процесу, так і точність сенсорних показників. У контексті нашої системи фільтр застосовується до ряду висот, що моделює поверхню зернового насипу, і по-друге до ряду обчислених об'ємів на різних етапах симуляції заповнення/розвантаження [67]. Цей двоступеневий підхід забезпечує усунення як внутрішніх модифікацій профілю поверхні, так і екстремальних коливань у щойно підрахованих об'ємах.

Інтегрування фільтра Калмана до основного алгоритму виконується на кожному циклі симуляції негайно після отримання сирих даних [68]. Рекурсивна структура фільтра дозволяє уникнути необхідності накопичення всієї історії вимірів в пам'яті. Фільтр оновлює лише поточну оцінку та дочекавшись нових даних, коригує її [68]. Це стало ключовою умовою для реалізації реального часу, коли система має миттєво реагувати на зміну рівня зерна та негайно подавати оператору актуальні показники.

Фільтр Калмана є математичним алгоритмом, призначений для оцінювання невидимих або неточно вимірюваних станів динамічної системи шляхом об'єднання попередніх оцінок з новими вимірами [69]. Його теоретичне підґрунтя базується на підході до оцінки стану системи, який оновлюється в міру надходження нових спостережень. Це робить фільтр Калмана особливо ефективним для задач, де необхідно приглушити вплив шумів у вимірюваннях, але при цьому зберегти здатність швидко реагувати на зміну реального стану системи [69].

Основна ідея полягає в рекурсивному виконанні двох фаз. Фази прогнозування та фази оновлення. Під час фази прогнозування система використовує попередню оцінку стану та модель її зміни в часі для передбачення поточного стану. Окрім оцінки стану, також прогнозується коваріація похибки, тобто очікувана невизначеність цієї оцінки, яка зростає при відсутності нових даних [69].

На фазі оновлення система порівнює передбачене значення з реальним виміром, який містить шум, і за допомогою калманівського коефіцієнта виконує об'єднання обох джерел інформації. Цей коефіцієнт визначає, наскільки довіряємо виміру порівняно з прогнозом. Якщо нові дані надходять із сенсора, який має велику дисперсію похибки, фільтр більше покладається на модель процесу [70]. Якщо ж сенсор доволі точний, значення виміру отримує більшу вагу в оновленій оцінці.

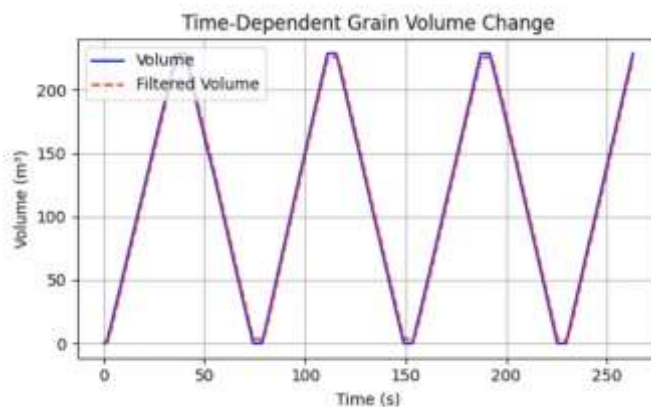


Рисунок 2.17– Візуалізація фільтра Калмана

Формально цей процес базується на роботі з поточною оцінкою стану системи x та її дисперсією P . На етапі прогнозування система оновлює обидві ці величини з урахуванням моделі динаміки процесу та шуму процесу Q . Під час оновлення враховується шум вимірювання R , який визначає, наскільки довіряти вхідним спостереженням. Кінцевим результатом є зважене середнє між прогнозом і виміром, з мінімізацією середньоквадратичної похибки оцінки.

У системі контролю завантаженості фільтр Калмана використовується для згладжування рядів даних, таких як миттєво обчислений об'єм зерна. Завдяки його рекурсивній структурі, фільтр не потребує збереження всієї історії даних і може працювати у реальному часі, що є критичним для інтерактивного візуального контролю процесу заповнення або розвантаження [70]. Коваріація похибки дозволяє системі адаптуватися до змін умов, таких як зміна швидкості заповнення, раптові коливання форми насипу або появу аномальних вимірів [70]. Це робить фільтр Калмана надзвичайно ефективним інструментом у структурі адаптивних цифрових систем моніторингу.

2.5 Розробка математичної моделі виміру та контролю завантаженості бункерів зерновозів за результатами зйомок та даними CSV-файлів корпусів

Для розробки математичної моделі виміру припустимо, що відповідно до схеми рисунок 2.3 отримано зображення дроном DJI Matrice 4E. Для його довільного розташування у точці O і позначень реперних точок A, B, C, D, у яких встановлено нерухомі синхронізовані передавачі. Відстані між реперними точками виміряні та далі вони не будуть змінюватись. У ході виміру величин різниць фаз для кожного із чотирьох променів визначають миттєві значення відстаней AO, BO, CO, DO. Далі визначають відстань до поверхні зерна. За цими даними відповідно до схематичного зображення променів на рис. 2.17 та за теоремою косинусу знайдемо відрізки AK, BL, CM, DN, як визначають відстані до відповідних точок перетину

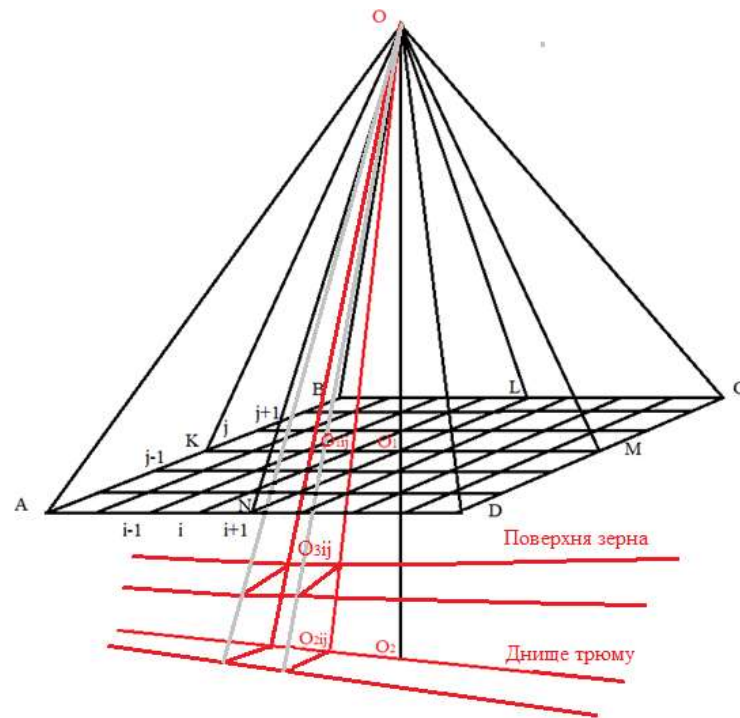


Рисунок 2.18 – Відображення точок та променів у ході виміру із застосуванням даних про виміри відносно реперних точок перпендикуляру з основою відповідних трикутників AOB, BOC, COD, DOA.

Продемонструємо це на прикладі трикутника AOB. Визначимо не припускаючи нічого про положення точки центру мас O:

$$\begin{cases} KO^2 = AO^2 - AK^2; \\ KO^2 = BO^2 - (AB - AK)^2. \end{cases} \quad (4)$$

Розв'язок цієї системи методом вилучення дає:

$$\begin{aligned} AO^2 - BO^2 - AB^2 - 2ABAK &= 0; \\ AK &= \frac{AO^2 - BO^2 - AB^2}{2AB}. \end{aligned} \quad (5)$$

Звідси знайдемо для довільного моменту часу відстань KO:

$$KO = \sqrt{AO^2 - AK^2} = \sqrt{AO^2 - \left(\frac{AO^2 - BO^2 - AB^2}{2AB} \right)^2}. \quad (6)$$

За аналогією знайдемо:

$$\begin{aligned}
 LO &= \sqrt{BO^2 - BL^2} = \sqrt{BO^2 - \left(\frac{BO^2 - CO^2 - BC^2}{2BC} \right)^2}; \\
 MO &= \sqrt{CO^2 - CM^2} = \sqrt{CO^2 - \left(\frac{CO^2 - DO^2 - CD^2}{2CD} \right)^2}; \\
 NO &= \sqrt{DO^2 - DN^2} = \sqrt{DO^2 - \left(\frac{DO^2 - AO^2 - DA^2}{2DA} \right)^2}.
 \end{aligned} \tag{7}$$

Для забезпечення виміру у двох взаємно ортогональних площинах, площина виміру і положення променя на ній змінюються у ході кожного заміру. На рис. 2.18 представлено схему простого виміру відстані, коли положення джерела променя зафіксовано та визначено двома кутами. Однак для спрощення спочатку будемо розглядати випадок коли напрями променя такі, що проходить крізь вузли сітки умовної площини, яка проходить крізь чотири реперні точки А, В, С, D. Так якщо прийняти точку А за базову та проводити від неї відлік i та j у двох взаємно ортогональних напрямках, то промінь перетне площину прямокутника ABCD у точці O_{1ij} , а далі торкнеться днища трюму у точці O_{2ij} . Якщо відстані відрізків $O_{1ij}O_{2ij}$ у ході дослідження пустого танку були визначені для кожного i та j , а при завантаженому зерном танку знайдено по променю (червоний) відрізок $O_{1ij}O_{3ij}$, то товщина зерна відрахована по променю визначиться:

$$h_{ij} = O_{1ij}O_{2ij} - O_{1ij}O_{3ij} \tag{8}$$

Позначимо довільну точку поверхні O_{3ij} , тоді відстань, що вимірює датчик позначимо OO_{3ij} . У таких позначеннях відстань до поверхні днища трюму буде змінною, а сама поверхня не буде площиною. Також поверхня сипкого матеріалу теж не є площиною, тому покладемо у основу виміру та розрахунку об'єму розбиття всього простору на ряд елементарних паралепіпедів. Один з таких елементарних паралепіпедів показано на рис.

2.17. Об'єм елементарного паралелепіпеду знайдемо обчисливши координати усіх точок у базовій системі координат.

$$V_{ij} = \frac{1}{16} \left[(X_{O_{i+1,j}} - X_{O_{ij}}) + (X_{O_{i+1,j+1}} - X_{O_{ij+1}}) \right] \left[(Y_{O_{i+1,j}} - Y_{O_{ij}}) + (Y_{O_{i+1,j+1}} - Y_{O_{ij+1}}) \right] \times \\ \times \left[(Z_{O_{i+1,j}} - Z_{O_{ij}}) + (Z_{O_{i+1,j+1}} - Z_{O_{ij+1}}) \right]; \quad (9)$$

За цих умов загальний об'єм знайдемо виходячи із $N \times M$ вимірів у двох взаємно ортогональних напрямках:

$$V = V_0 + \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N V_{ij}; \quad (10)$$

Для проведення виміру і зменшення загальної величини похибки необхідно проводити виміри від одної бази. У зв'язку з цим для подальшої побудови правильної метрологічної схеми вимірювань, визначимо положення точки знаходження джерела променю незалежно від його фізичної природи для i -того j -того виміру O_{3ij} . За базу візьмемо координати точки А центру першої реперної точки. Позначимо OO_3 - відстань від точки О до поверхні зерна O_3 . Відстань від точки О до точки перетину променю для i -того j -того виміру позначимо OO_{3ij} . Кути нахилу ланок позначимо відповідно до позначень індексів точок виміру φ_{1ij} та φ_{2ij} . Тоді координати точки O_{3ij} обчислюватимуться:

$$\begin{cases} X_{3ij} = X_O + OO_{3ij} \cdot \sin \varphi_{1ij} + OO_{3ij} \cdot \sin \varphi_{1ij} \cos \varphi_{2ij}; \\ Y_{3ij} = Y_{O1} + OO_{3ij} \sin \varphi_{2ij}; \\ Z_{3ij} = Z_{O1} - OO_{3ij} \cos \varphi_{1ij} \cos \varphi_{2ij}. \end{cases} \quad (11)$$

Вводячи такі перетворення із подвійною індексацією точок виміру створено перед умови для поділу алгоритму виміру на дві частини перша побудова бази координат точок, а друга підрахунок об'єму сипкої речовини на підставі виразів підрахунку об'єму за рівняннями (8),(9) з урахуванням, зв'язку координат, що вимірювались від єдиної бази нерухомої точки О.

Висновки до розділу 2

Розвиток засобів контролю до структури АСК виміру та контролю за процесом завантаженості бункерів зерновозів, шляхом включення до її складу БПЛА DJI Matrice 4E із системою технічного зору та GPS до складу якого додатково вводиться лідар та ультразвуковий і лазерний далекоміри здатні визначати відстані до випромінювачів, які розташовано і зафіксовано на нерухомій поверхні у реперних точках та випромінювання яких синхронізовано.

Застосування ПЗ DJI Terra та використання алгоритмів руху, завдяки функції Smart 3D Capture Mode, автоматично генеруються точні маршрути зйомки (на основі попередньо створеної моделі об'єкта), що дозволяє формувати тривимірну хмару точок поверхні зернового насипу. Отримані дані дозволяють точно визначити координати X, Y, Z кожної точки поверхні та розраховувати об'єм зерна для аналізу завантаженості бункера.

Формування високоточної хмари точок виконується після завершення кожного режиму зйомки і імпортування до середовища DJI Terra усіх зібраних фото шляхом обробки за допомогою алгоритмів Structure from Motion (SfM) та Multi-View Stereo (MVS).

Побудована математична модель для перерахунку об'єму зерна дає можливість за даними CSV-файлів пустих бункерів та хмари точок виміру встановлювати фактичну завантаженість бункерів зерновозів.

3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЗАВАНТАЖЕНОСТІ БУНКЕРІВ ЗЕРНОВОЗІВ

3.1 Архітектура та структура ПЗ

Архітектура програмного забезпечення спроектована за принципом чіткої модульної організації, що дозволяє ізолювати окремі функціональні блоки та забезпечує високу гнучкість при розширенні або зміні реалізації [70]. У центрі системи знаходиться обчислювальний рушій, який складається з двох основних підсистем, модулю чисельного розрахунку об'єму зернового насипу та модулю фільтрації даних (KalmanFilter). Навколо них розташовані допоміжні сервіси підготовки даних, як ручного вводу параметрів для циліндричної моделі, так і імпорту тривимірної хмари точок із CSV-файлів, згенерованих дрон-сканером або генератором точок. Окремо виділено підсистему візуалізації та взаємодії з користувачем, яка інтегрує графічний інтерфейс на базі Tkinter із 3D-графіками та динамічними часовими рядами.

Модульна організація коду досягається розділенням на чотири ключові пакети:

- ***kalman_filter*** містить клас і методи для рекурсивної фільтрації шумових даних;
- ***visualisation_manual*** реалізує симуляцію наповнення бункера за ручного введення габаритів;
- ***rectangular_bunker_pointcloud_generator*** створює універсальну хмару точок для довільного прямокутного бункера;
- ***visualisation_from_csv*** відповідає за імпорт підготовлених CSV, обчислення об'єму та інтерактивну візуалізацію.

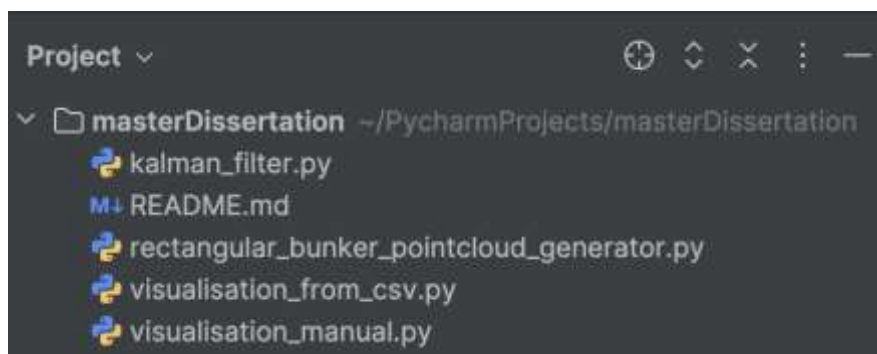


Рисунок 3.1 – Структура проєкту ПЗ

Взаємодія між модулями організована через чітко визначені інтерфейси, спільні дані передаються у вигляді структурованих об'єктів (NumPy-масивів, Pandas DataFrame), а функції кожного пакету приймають і повертають дані у стандартизованих форматах. Такий підхід спрощує тестування окремих компонентів та дозволяє комбінувати їх у різних режимах, наприклад, запускати фільтрацію незалежно від способу збору даних [70].

Завдяки такій архітектурі досягається не лише зрозумілість та акуратність коду, але й можливість швидко масштабувати систему додаючи нові алгоритми обробки даних, інтегрувати інші сенсорні пристрої або розгорнути графічний фронтенд у веб-середовищі без порушення логіки вже реалізованих модулів. Цей рівень абстракції є критичним для забезпечення довговічності та підтримки ПЗ в умовах постійно змінних технологічних вимог [70].

Програмний комплекс реалізований як набір чітко розділених за відповідальністю модулів, що забезпечує легкість підтримки та подальшого розширення [70]. У центрі знаходиться модуль *kalman_filter*, який містить клас KalmanFilter із рекурсивним алгоритмом прогнозування й оновлення стану. Цей компонент підключається до всіх обчислювальних частин системи для згладжування як сирих рядів висоти зернового насипу, так і послідовності моментальних об'ємів.

Далі розташований модуль *visualisation_manual*, у якому реалізовано симуляцію наповнення циліндричного бункера з параметрами, введеними вручну оператором. В цьому модулі задаються радіус та висота, генерується регулярне циліндричне поле, розраховується поверхня зернової гірки та обчислюється об'єм.

Доповненням є модуль *rectangular_bunker_pointcloud_generator*, покликаний створювати рівномірно розподілену хмару точок для прямокутного бункера за заданими довжиною, шириною та висотою, що є симуляцією даних, які дрон буде передавати до головної програми. Результируючий CSV-файл із координатами X, Y, Z слугує універсальним вхідним форматом для подальших розрахунків.

Нарешті, модуль *visualisation_from_csv* об'єднує імпорт підготовленої хмари точок, автоматичне визначення габаритів бункера, побудову сітки та симуляцію заповнення з тим самим ядром обчислень і фільтрацією даних, що застосовується в ручному режимі. Така модульна архітектура гарантує, що жоден із компонентів не залежить від деталей реалізації інших, водночас усі вони працюють із єдиним набором структур даних (NumPy масивів і Pandas DataFrame), що забезпечує узгодженість і передбачуваність поведінки всієї системи.

Усі модулі програмного забезпечення об'єднані через стандартизовані інтерфейси імпорту та єдині формати даних, що забезпечує прозору передачу інформації між компонентами [70]. Так, модуль *visualisation_manual* імпортує з *calculations* функції *grain_heap* та *calculate_volume* для побудови поверхні зернової гірки і розрахунку об'єму. Після отримання сирих результатів виконується виклик фільтра Калмана із модуля *kalman_filter*, який згладжує коливання обчислених значень. Логіка імпорту організована так, що кожен модуль звертається тільки до тих компонентів, від яких безпосередньо залежить, жодних зайвих включень не відбувається [71].

У випадку обробки хмари точок з CSV, модуль *visualisation_from_csv* починає з читання даних за допомогою Pandas, отримуючи DataFrame із трьома колонками *x*, *y*, *z*. Далі цей DataFrame нормалізується та визначаються мінімальні і максимальні координати для обчислення фактичних габаритів бункера та прив'язки хмари до системи відліку [71]. Після цього дані конвертуються в NumPy-масиви формату (N, 3) для швидкої ітерації при побудові дискретної сітки. Цей же NumPy-масив передається до функцій *grain_heap*, *calculate_volume* та в конструктор *KalmanFilter*, таким чином реалізуючи єдину послідовність обробки даних.

Модуль *rectangular_bunker_pointcloud_generator* формує вхідну хмару точок у вигляді DataFrame, але не містить логіки фільтрації чи візуалізації, він лише експортує CSV-файл із координатами. Це дозволяє іншим модулям, які імпортують вже готові дані, уникати дублювання коду та зосередитися на власній функціональності [71].

Ефективність та передбачуваність роботи системи значною мірою залежить від чіткого визначення та централізованого керування ключовими параметрами [72]. У програмному комплексі всі конфігураційні величини, від геометричних габаритів моделі до коефіцієнтів сигнал-шуму у фільтрі Калмана, зберігаються у верхній частині кожного модуля. Такий підхід гарантує, що під час тестування або налаштування системи необхідно змінювати лише декілька значень у відомому місці [72].

Геометричні параметри моделі включають кількість кутових поділів (*num_angles*), кількість радіальних кільцевих відліків (*num_radial*), максимальний радіус та висоту бункера. Значення цих констант визначають роздільну здатність апроксимації поверхні та безпосередньо впливають на точність розрахунків та навантаження на обчислювальні ресурси [72]. Для симуляції прямокутного бункера відповідні параметри довжини, ширини та

висоти зберігаються аналогічним чином й використовуються генератором хмари точок і основним модулем для побудови сітки [72].

Параметри сітки, тобто кроки дискретизації ΔX і ΔY , вираховуються динамічно на основі цих констант і часто ітеративно коригуються відповідно до необхідного балансу між точністю та швидкістю обробки [73]. Наприклад, у модулях, що працюють із CSV-хмарию точок, оператор може змінити divisions, кількість поділів по кожній осі, з метою підвищити деталізацію або прискорити симуляцію, причому цю величину легко знайти та відредагувати на початку скрипту [73].

Налаштування рекурсивного фільтра Калмана також підпадає під єдину політику конфігурації. Початкові значення параметрів процесного шуму (Q), шуму вимірювань (R) та початкової коваріації (P) визначені у тому ж блоці констант, що й геометричні дані. Це дозволяє швидко провести серію експериментів із різними комбінаціями цих величин, оцінити стабільність фільтрації та з мінімальними зусиллями опублікувати нові оптимальні налаштування для конкретного обладнання або умов роботи.

Крім того, у численних модулях з графічним інтерфейсом зберігаються константи, що відповідають за розміри вікон, розташування кнопок та колірну палітру [73]. Завдяки єдиному блоку налаштувань розробники можуть швидко адаптувати інтерфейс під різні роздільні здатності екранів або корпоративні вимоги до зовнішнього оформлення без необхідності редагувати логіку побудови інтерфейсу.

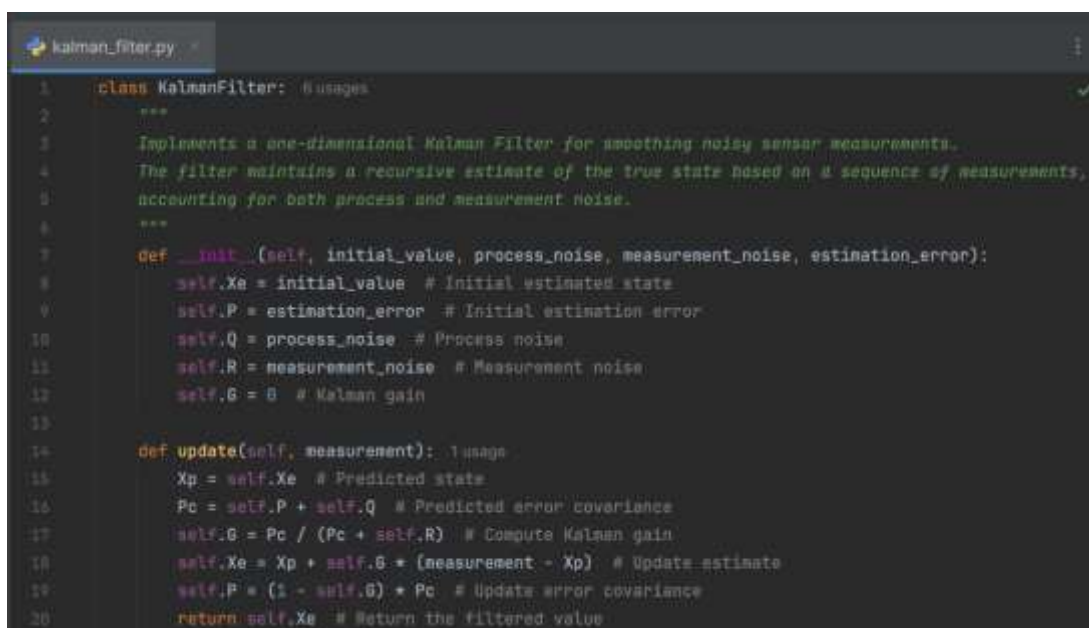
Такий підхід до централізованого керування конфігурацією не лише забезпечує прозорість і швидкість налаштування, але й знижує ризик помилок при зміні параметрів [73]. Усі модулі системи отримують актуальні значення констант під час імпорту чи завантаження, що гарантує їхню синхронність для всього програмного коду.

3.2 Застосування фільтра Калмана

У рамках програмного комплексу фільтр Калмана виступає як центральний механізм усунення випадкових коливань та підвищення достовірності отриманих даних про висоту зернового насипу та його об'єм. Завдяки своїй рекурсивній структурі, фільтр поєднує прогностичну модель динаміки процесу з поточними спостереженнями, мінімізуючи середньоквадратичну похибку оцінок без необхідності зберігати всю історію вимірювань у пам'яті [74]. Це робить його ідеальним інструментом для системи, де дані надходять у режимі реального часу із ручних розрахунків або хмар точок з дрона.

Усього одним викликом методу від `KalmanFilter` оновлюється поточні оцінки як висоти, так і об'єму, роблячи вивід системи більш стабільним і передбачуваним.

Клас `KalmanFilter` реалізовано як обгортку над звичайною одновимірною моделлю Калмана, що дозволяє згладжувати послідовність числових вимірювань без додаткових зусиль з боку користувача [74].



```
1 class KalmanFilter:
2     """
3     Implements a one-dimensional Kalman Filter for smoothing noisy sensor measurements.
4     The filter maintains a recursive estimate of the true state based on a sequence of measurements,
5     accounting for both process and measurement noise.
6     """
7     def __init__(self, initial_value, process_noise, measurement_noise, estimation_error):
8         self.Xe = initial_value # Initial estimated state
9         self.P = estimation_error # Initial estimation error
10        self.Q = process_noise # Process noise
11        self.R = measurement_noise # Measurement noise
12        self.G = 0 # Kalman gain
13
14    def update(self, measurement):
15        Xp = self.Xe # Predicted state
16        Pc = self.P + self.Q # Predicted error covariance
17        self.G = Pc / (Pc + self.R) # Compute Kalman gain
18        self.Xe = Xp + self.G * (measurement - Xp) # Update estimate
19        self.P = (1 - self.G) * Pc # Update error covariance
20        return self.Xe # Return the filtered value
```

Рисунок 3.2 – Код імплементації фільтра Калмана

Під час створення об'єкта фільтра конструктор ініціалізує чотири ключові внутрішні змінні. Істинна оцінка поточного стану (X_e), початкова помилка оцінки (P), величина процесного шуму (Q) та шум вимірювання (R).

Метод *update(measurement)* перебудовує поточну оцінку в два етапи. Спочатку виконується крок прогнозування, де нова оцінка стану (X_p) рівна попередній відфільтрованій оцінці (X_e), а помилка прогнозу P_c розраховується як сума попередньої помилки P та процесного шуму Q . У другому етапі обчислюється калманівський коефіцієнт G , відношення P_c до сумарної невизначеності $P_c + R$. Саме це значення визначає баланс між довірою до прогнозу та довірою до нового виміру. Фінальна оцінка X_e оновлюється за формулою $X_p + G \cdot (\text{measurement} - X_p)$, а нова помилка оцінки P коригується множенням P_c на $(1 - G)$.



Рисунок 3.3 – Блок-схема модулю фільтра Калмана

Код класу написаний так, щоб звести до мінімуму кількість зайвих операцій. Всі внутрішні стани зберігаються як прості числові властивості, а метод *update* повертає одне число, відфільтроване значення. Це дозволяє легко вкладати фільтр у різні цикли симуляції або виклики обчислювальних функцій, не обтяжуючи логіку повторними викликами допоміжних методів [74]. Завдяки цьому реалізація KalmanFilter гармонійно вписується у загальну архітектуру ПЗ, виконуючи свою складну математику за лічені рядки чистого Python коду та забезпечуючи в кінцевому результаті значне згладжування даних.

Оптимальна робота фільтра Калмана значною мірою визначається коректним вибором трьох основних коваріаційних параметрів, таких як, процесного шуму Q , шуму вимірювань R та початкової помилки оцінки P . Методика їх налаштування базується на поєднанні емпіричних експериментів і теоретичних міркувань щодо динаміки моделі та характеристик сенсорів.

Спочатку проводиться серія контрольних симуляцій із фіксованою геометрією бункера та заданою швидкістю заповнення [74]. Для кожної пари (Q, R) реєструється амплітуда відфільтрованого ряду порівняно з необробленим, а також затримка реакції фільтра на раптову зміну висоти. Значення Q встановлюється пропорційно очікуваному рівню невизначеності в моделі процесу. Якщо поверхня зернового насипу передбачається змінюватися плавно, Q обирають малим, щоб прогноз мав високий пріоритет. У разі, коли процес наповнення може супроводжуватися різкими змінами, доцільно збільшити Q для швидкої адаптації оцінки.

Шум вимірювання R відображає точність початкового алгоритму обчислення об'єму або даних з дрона. Його величину оцінюють шляхом аналізу розбіжностей між кількома незалежними вимірами [74]. Чим вища варіабельність сирих даних, тим більшим має бути R , щоб фільтр зменшував довіру до окремих спостережень і зосереджувався на власній моделі процесу.

Початкова коваріація P задає вихідну невизначеність фільтра перед будь-яким виміром. Для забезпечення стійкої роботи P рекомендують вибирати в діапазоні порядку величини Q або R залежно від початкових умов. Якщо стартові вимірювання вважаються досить надійними, P підбирають меншим, у протилежному випадку, більшим.

Комплексна оптимізація параметрів досягається шляхом побудови мапи характеристик фільтра [74]. Для кожної комбінації (Q, R) розраховується інтегральна похибка між відфільтрованим та аналітичним об'ємом, а також середній час встановлення нової оцінки після крокової зміни висоти. Аналіз цих залежностей дозволяє вибрати компромісне значення, яке мінімізує коливання помилки та забезпечує достатню швидкість реагування. Такий підхід гарантує, що фільтр Калмана працює у межах оптимальної зони характеристик незалежно від конкретного сценарію вимірювання [74].

У процесі симуляції контролю завантаженості бункера фільтр Калмана виконує ключову роль у забезпеченні коректності часових рядів висоти зернового насипу та обчисленого об'єму. Інтеграція фільтра реалізована безпосередньо в основному циклі змінної висоти. Після кожного кроку оновлення поточного рівня заповнення система спочатку обчислює сирий об'єм, а потім передає це значення методу *update* екземпляру *KalmanFilter*. Аналогічно, в окремому фільтрі обробляється нова висота, отримана в результаті дискретного кроку моделювання.

Такий двоступеневий підхід дозволяє зберігати незалежність оцінок [74]. Фільтр висоти гладить первісні вимірювання профілю зернової гірки, тоді як фільтр об'єму аналізує похибки цифрового інтегрування. Після згладжування кожний відфільтрований вихід повертається до циклу, де він використовується для оновлення графіків і подальших алгоритмічних рішень, наприклад, для регулювання темпу заповнення або перемикання режиму на спорожнення.

Завдяки рекурсивній природі KalmanFilter, процес не потребує зберігання історії всіх попередніх вимірів. Кожна ітерація оперує лише останніми оцінками стану та обрахунком нових коефіцієнтів. Така реалізація забезпечує низьке споживання пам'яті та постійну складність циклу, що є критично важливим для реального часу, коли оновлення графічного інтерфейсу повинно відбуватися без затримок [74].

```
# Initialize Kalman filters and simulation parameters  
kf_volume = KalmanFilter( initial_value: 0, process_noise: 10, measurement_noise: 50, estimation_error: 1)
```

Рисунок 3.4 – Код інтеграції фільтра Калмана

Практична перевірка показала, що інтегрований фільтр зменшує коливання об'єму на 60–80 % у порівнянні з необробленими даними та мінімізує помилки реакції на різкі зміни рівня, зберігаючи при цьому швидку адаптацію при початку або завершенні циклу заповнення.

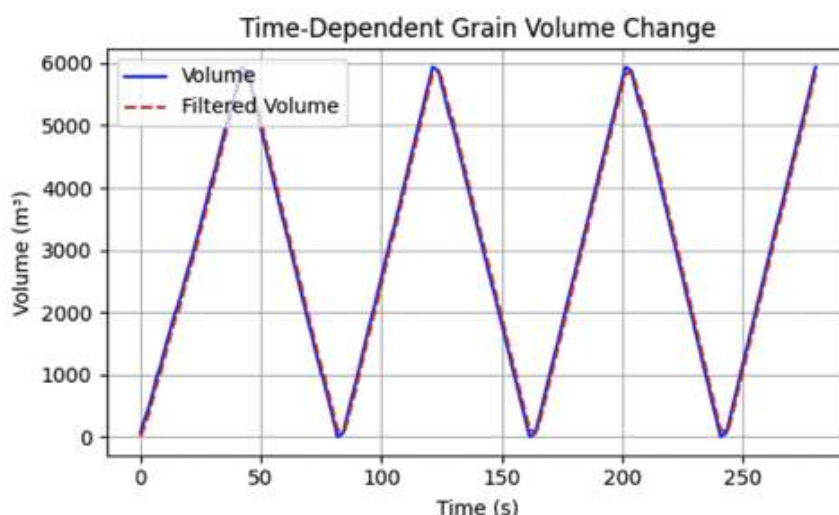


Рисунок 3.5 – Візуалізація фільтра Калмана

Це підтверджує доцільність безпосередньої інтеграції KalmanFilter у simulation loop для високоінтерактивних моніторингових застосунків.

3.3 Реалізація алгоритму розрахунку об'єму зерна

Сутність методу побудови сітки та обчислення полягає в тому, щоб замінити безперервний переріз бункера на скінченну множину точок, над якими зручно виконувати обчислення об'єму [75]. Для прямокутної геометрії спочатку визначаються точні значення довжини та ширини, що отримані або від ручного вводу оператора, або автоматично з CSV-хмари точок. На основі цих граничних умов розраховуються кроки по кожній осі Δx та Δy , як відношення різниці між крайніми координатами до числа обраних інтервалів. Саме ці інтервали в подальшому визначають щільність сітки, чим менші Δx та Δy , тим якісніше апроксимується форма насипу, хоча обсяг обчислень зростає.

Для циліндричного бункера, аналогічним чином, множина радіальних та кутових поділів формується на основі параметрів *num_radial* і *num_angles*. Радіальний крок Δr визначається як максимальний радіус, поділений на відповідну кількість секторів мінус одиницю, а кутовий крок $\Delta \theta$, як повний кут у 2π радіан, поділений на число секторів тотожно. Внаслідок цього сітка набуває полярної структури, котра потім трансформується в декартові координати за допомогою перетворення $r \cdot \cos \theta$ та $r \cdot \sin \theta$. Цей підхід дозволяє економно розподілити обчислювальний ресурс, зосереджуючи точки там, де це необхідно [75].

Реалізація побудови сітки у коді виконується через виклики *numpy.linspace* для кожного із вимірів.

```
# Generate grid for cylindrical coordinates
angles = np.linspace(start=0, 2 * np.pi, num_angles)
radii = np.linspace(start=0, max_radius, num_radial)
angles, radii = np.meshgrid(*xi: angles, radii)
```

Рисунок 3.6 – Код побудови сітки для циліндричної форми

Використання *linspace* дозволяє гарантовано отримати вектор фіксованої довжини з рівномірно розподіленими точками, уникаючи накопичення похибок у кроках. Далі за допомогою *numpy.meshgrid* ці вектори комбінуються в двовимірні масиви X та Y (або радіуси та кути для циліндричної сітки), які зберігаються у оперативній пам'яті як єдині двохвимірні структури. Така організація даних забезпечує швидкий доступ до кожної координати та зручну інтеграцію з подальшими обчисленнями поверхні насипу.

При виборі параметрів Δx і Δy необхідно враховувати не лише потребу в точності, але й обмеження середовища виконання [75]. Наприклад, на вбудованих промислових ПК із обмеженою оперативною пам'яттю надто дрібна сітка може спричинити значне сповільнення та перевитрати ресурсів.

Для апроксимації форми насипу зерна в межах бункера обрана проста й водночас ефективна параболічна модель, яка відображає фізичні властивості сипучих матеріалів у стані спокою. У циліндричній конфігурації функція *grain_heap* приймає на вхід поточну висоту насипу в центрі H, максимальний радіус R бункера та радіальну відстань r від центра обчислюваної точки.

```
# Function to model grain heap inside the hopper
def grain_heap(height, r, center_radius): 1 usage
# Simulate the grain distribution with a parabolic shape
return height * (1 - (0.5 * r / center_radius) ** 2)
```

Рисунок 3.7 – Код побудови функції для гірки зерна

На основі цих трьох параметрів локальна висота зернової поверхні обчислюється за виразом, що забезпечує плавне спадання товщини шару від центру до країв згідно з квадратичною залежністю.

У випадку прямокутного бункера модель адаптується за допомогою нормалізованої відстані від центра (x_0 , y_0). Для точки (x,y) визначають безрозмірну величину де L та W, довжина і ширина перерізу.

$$d = \sqrt{\left(\frac{x-x_0}{\frac{L}{2}}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{\frac{W}{2}}\right)^2} \quad (12)$$

Тоді висота зернової гірки задається за формулою за умови $d \leq 1$.

$$h(x, y) = H \cdot (1 - d)^2 \quad (13)$$

Параболічний профіль вибрано завдяки його здатності вловлювати характерний куполоподібний вигин насипу, коли зерно під дією гравітації вільно розтікається від центра [76]. Ця модель створює гладку безперервну поверхню, що легко обчислюється й не вимагає складних умовних переходів між різними геометриями. Для налаштування фізичних властивостей матеріалу передбачена можливість коригування куту розподілення зерна шляхом масштабування аргументу моделі, що дозволяє адаптувати форму куполу до конкретного сорту чи вологості зерна.

Під час симуляції значення функції *grain_heap* обчислюються для кожної точки вибраної сітки, чи то полярної для циліндра, чи то прямокутної декартової, після чого формується двовимірний масив висот. Цей масив використовується на наступному етапі для цифрового інтегрування об'єму [76]. Реалізація функції в коді критично важлива, яка задає основу для визначення локальної товщини шару зерна, від якої напряду залежить точність кінцевого обчислення об'єму. Такий мінімалістичний, але фізично обґрунтований підхід забезпечує оптимальний баланс між швидкістю алгоритму та достовірністю результатів, що є ключовою вимогою систем реального часу.

Цифрове інтегрування об'єму зернового насипу базується на поступовому накопиченні внеску кожного елемента дискретної сітки, де елементи визначаються залежно від форми бункера. Для прямокутних форм область моделювання розбивається на рівномірну двовимірну сітку, по осях X та Y утворюються вузли, відстані між якими, Δx і Δy , залишаються незмінними у всій області. У кожному вузлі, використовуючи результат роботи параболічної

моделі поверхні, отримується локальна висота шару зерна [76]. Функція для обчислення об'єму спочатку підсумовує всі ці значення висот, а потім множить отриману суму на площу однієї клітинки, що дорівнює добутку Δx на Δy . Таким чином, сума добутків висот і площі елемента дає наближену величину об'єму зернового насипу, причому точність апроксимації залежить виключно від розміру кроків сітки, де чим дрібніша дискретизація, тим ближче цифрова сума до аналітичного інтегралу [76].

У разі циліндричної геометрії розбиття здійснюється у полярній системі координат, де область форми задається двовимірною сіткою, в якій одна координата відповідає радіусу від центра до зовнішньої стінки, а інша кутовому положенню. Для кожного радіального рівня і кута обчислюється локальна висота зернової поверхні, після чого функція враховує змінну площу сектора кільця, де елемент найближчий до центра має меншу реальну площу, а зовнішні сектори більшу, оскільки довжина дуги росте пропорційно радіусу [76]. Зібравши масив радіусів і висот у двох вимірах, алгоритм виконує векторизовану суму добутків висот і площ відповідних секторів, тим самим отримуючи наближення до справжнього об'єму. Ця універсальна логіка дозволяє однаковою функцією обробляти як прямокутну, так і циліндричну сітки, адже єдиним змінним залишається спосіб розрахунку площі елемента.

У коді реалізація відрізняється лише тим, що на вході функція *calculate_volume* приймає вже підготовлену матрицю висот та відповідний опис сітки (для прямокутної кроки по осях, для циліндричної радіуси і кутові інтервали), а далі весь підрахунок виконується у векторизовані операції множення масиву висот на масив елементних площ та агрегація результату через сумування.

```
# Function to calculate the grain volume inside the hopper
def calculate_volume(heights, radii, num_angles):
    """usage:
    delta_angle = 2 * np.pi / num_angles # Convert angles to radians
    volume = 0 # Initialize volume accumulator
    for i in range(len(radii)):
        for j in range(len(radii[i])):
            r = radii[i, j] # Get the radius at the current point
            h = heights[i, j] # Get the height at the current point
            volume += 0.05 * np.pi * r ** 2 * h * delta_angle # Increment volume
    return volume
```

Рисунок 3.8 – Код підрахунку об'єму *calculate_volume*

Завдяки цьому підхід залишає споживання пам'яті та час виконання прийнятними навіть для сіток зі значною кількістю точок. Векторизація з використанням бібліотек гарантує, що навіть при сотнях тисяч елементів обчислення залишається ефективним і може виконуватися у реальному часі під час графічної симуляції.

Насамкінець, після цифрового інтегрування сирий об'єм передається на вхід фільтра Калмана для остаточного згладжування, що дозволяє отримати стійкий і надійний показник заповнення бункера. Така послідовність від побудови сітки через параболічну апроксимацію поверхні до цифрового інтегрування та фільтрації утворює єдине, узгоджене та високоефективне ядро обчислювального механізму системи контролю завантаженості зерновозів.

3.4 Підсистеми підготовки вхідних даних

Високоточне моделювання заповнення бункера потребує ретельного попереднього оброблення вихідних даних, які надходять з різних джерел [77]. У розробленій архітектурі розрізняються три ключові підсистеми, кожна з яких відповідає за специфічний формат та спосіб отримання інформації про геометрію бункера й зернового насипу.

Перша підсистема забезпечує ручний ввід базових габаритів радіуса та висоти в циліндричному випадку. Такий режим використовується за умов

обмежених даних або як резервний варіант при неможливості автоматизованого зняття хмари точок.

Друга підсистема покликана згенерувати штучну хмару точок поверхні бункера, яку можна використовувати для тестування та калібрування основного модуля. Використовуючи конфігуровану роздільну здатність, генератор формує набір координат, що описують периметр і межі внутрішнього простору. Це дозволяє відпрацьовувати ланцюжок обробки CSV-файлів, не залучаючи стороннє апаратне обладнання, і перевіряти коректність читання та інтерпретації даних у подальших етапах.

Третій компонент відповідає за реальне зчитування даних із зовнішніх джерел CSV-файлів, які отримані в результаті фотограмметричного сканування дронами. Після завантаження файлу система виконує попередню нормалізацію, де виявляються граничні координати, здійснюється перетворення хмари точок у внутрішню сіткову систему відліку та обчислення розмірів бункера. Цей етап обробляє структуру даних, виключає аномальні та дубльовані записи й готує відфільтрований масив координат для наступних обчислень об'єму й візуалізації [77].

Завдяки чіткій сегментації на три підсистеми підготовки вхідних даних кожен сценарій від повністю ручного вводу до повної автоматизації фотограмметричним скануванням інтегрується в загальну архітектуру без порушення єдиної логіки обробки. Це спрощує тестування, дозволяє гнучко адаптувати роботу системи до наявних ресурсів і гарантує, що подальші модулі отримуватимуть коректно структуровану та готову до аналізу інформацію [77].

Модуль ***visualisation_manual.py*** призначений для проведення симуляції наповнення та спорожнення циліндричного бункера на основі вручну заданих оператором геометричних параметрів. Після запуску скрипту користувач бачить великий тривимірний контейнер із порожнім диском перерізу, підготовлений за 2025 р.

допомогою числових бібліотек. Початкові значення, кількість кутових поділів, кількість радіальних кроків, максимальний радіус бункера та максимальна висота насипу оператор може відрегулювати у вигляді простих констант на початку файлу перед стартом. Таким чином налаштовується роздільна здатність сітки та обчислювальна точність моделювання [77].

```
# Parameters of the grain hopper  
num_angles = 360  
num_radial = 15  
max_radius = 5.0  
max_height = 5.0
```

Рисунок 3.9 – Код налаштування початкових значень

У центральній панелі вікна формується тривимірний графік поверхні зернової гірки на основі виклику функції *grain_heap*, яка для кожної пари радіуса й кута генерує висоту куполу зерна за параболічним законом. Для цього NumPy створює вектори рівномірних значень *angles* і *radii*, а потім перетворює їх на двовимірні масиви через *meshgrid*.

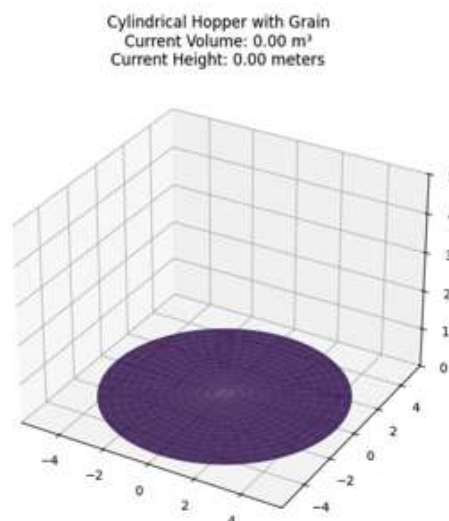


Рисунок 3.10 – Початковий інтерфейс візуалізації

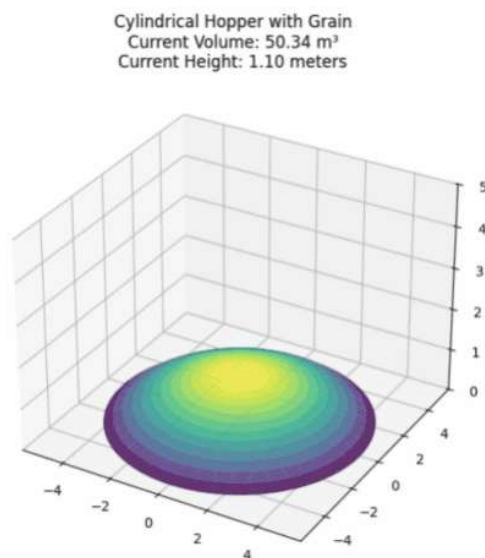


Рисунок 3.11 – Інтерфейс візуалізації початкового заповнення

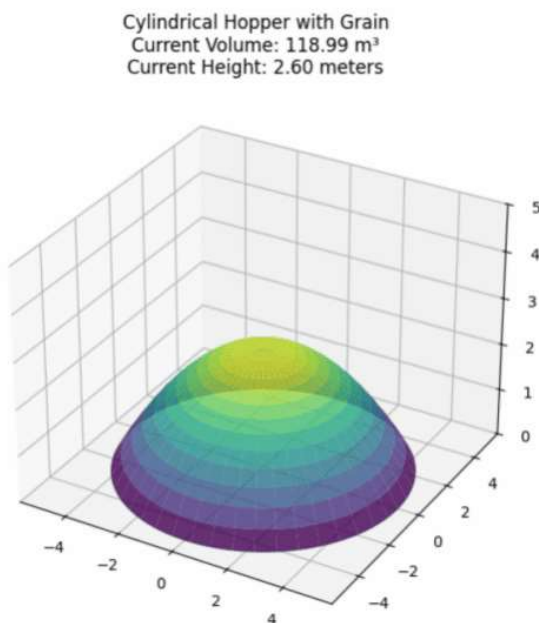


Рисунок 3.12 – Інтерфейс візуалізації заповнення

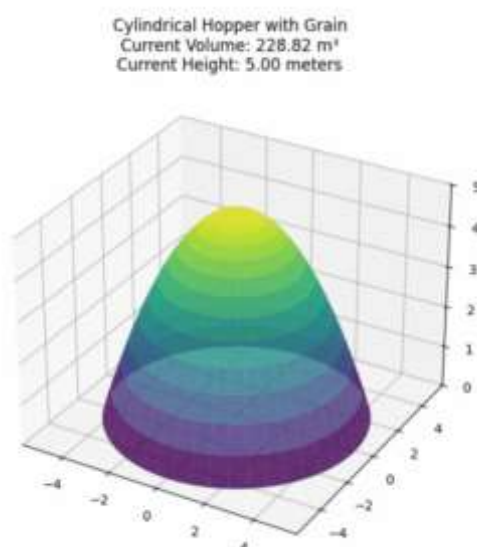


Рисунок 3.13 – Інтерфейс візуалізації повного заповнення

Результуючий масив висот передається на *plot_surface Matplotlib*, що створює яскраве кольорове відображення поверхні.

```
# Update 3D plot
ax_main.clear()
ax_main.plot_surface(radii * np.cos(angles), radii * np.sin(angles), heights_filled,
                    cmap='viridis', edgecolor='none', alpha=0.8)
```

Рисунок 3.14 – Код відображення поверхні

В міру наповнення бункера колір може змінюватися за заданою палітрою, демонструючи різницю між базовим шаром і верхньою частиною куполу.

Поряд із тривимірною візуалізацією, у правій частині вікна формуються два динамічні графіки, об'єм насипу в залежності від часу та висота насипу в залежності від часу. Кожен раз, коли висота змінюється на фіксовану величину *fill_step*, модуль викликає функцію *calculate_volume* для підрахунку теперішнього об'єму шляхом цифрового інтегрування по радіальній сітці. Отримане значення разом із поточною висотою передається у два окремих екземпляри класу *KalmanFilter*, які виконують згладжування даних від

зовнішнього шуму або обчислювальних артефактів. Після цього відфільтровані результати відображаються на часових графіках, а також підставляються у заголовки тривимірної панелі.

Керування симуляцією працює в рамках основного *try-finally* блоку, що гарантує коректне завершення програми та повернення керування оператору в кінці симуляції. Кожна ітерація включає оновлення внутрішнього лічильника циклів, паузу для демонстрації користувачу хвилеподібного руху зерна, а також автоматичне переключення між режимами заповнення та спустошення при досягненні граничних значень висоти [77].

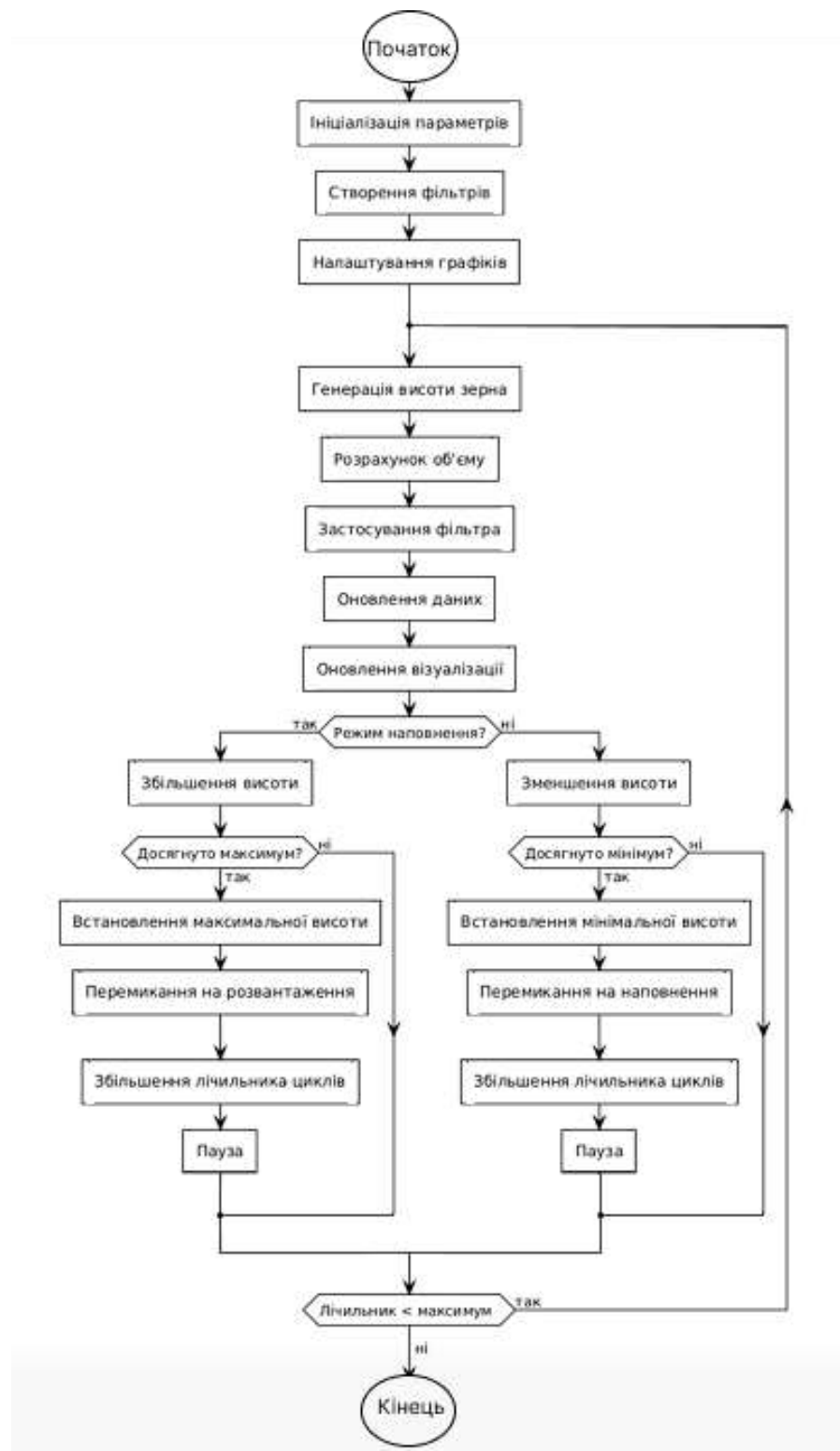


Рисунок 3.15 – Блок-схема модулю visualisation_manual.py

Таким чином, ***visualisation_manual.py*** забезпечує повний цикл від ручного задання початкових параметрів циліндричного бункера до відображення результатів у вигляді інформативних графіків і тривимірної анімації. Завдяки простоті налаштувань та використанню популярних Python бібліотек цей модуль може бути легко адаптований або розширений відповідно до конкретних вимог експериментальних досліджень.

Модуль ***rectangular_bunker_pointcloud_generator.py*** призначений для створення високоточної вихідної хмари точок, що описує внутрішню геометрію прямокутного бункера.



Рисунок 3.16 – Блок-схема модулю `rectangular_bunker_pointcloud_generator.py`

Користувачу потрібно ввести або визначити розміри бункера констант.

```
# --- Configuration: dimensions of the rectangular bunker (in meters) ---
length = 20.0 # X dimension
width  = 15.0 # Y dimension
height = 25.0 # Z dimension
points_per_edge = 40 # resolution(amount of points per edge)
```

Рисунок 3.17 – Код визначення розміру бункера

За потреби можливо корегувати довжину, ширину та висоту, а також обрати бажану щільність точок уздовж кожної грані через параметр *points_per_edge*. На основі цих вхідних даних *NumPy* генерує три лінійних масиви координат, рівномірно розподілених від мінімального до максимального значення по осям X, Y і Z.

Далі відбувається поетапне накопичення точок на шести поверхнях прямокутного паралелепіпеда [78]. Спершу модуль створює плоскі сітки для підлоги та стелі, перебираючи всі можливі значення X і Y при фіксованому Z (0 та висота). Потім він послідовно формує бічні стінки, фіксуючи координати X або Y на крайніх значеннях і перебираючи масиви по двох інших координатах, щоб заповнити всі грані [78].

```
# Convert to DataFrame
df = pd.DataFrame(points, columns=['x', 'y', 'z'])
```

Рисунок 3.18 – Код конвертації даних *DataFrame*

В результаті утворюється єдиний список тривимірних точок, який потім перетворюється на *DataFrame Pandas* із трьома колонками x, y та z.

Після генерації користувач бачить у графічному вікні 3D-розсіяння синіх точок, що чітко окреслюють форму порожнього бункера.

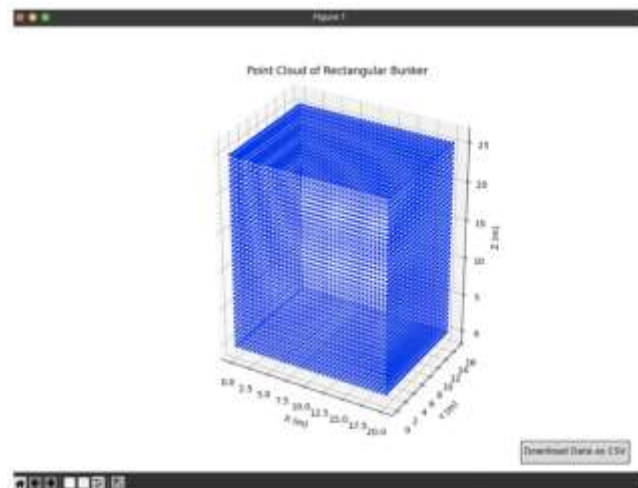


Рисунок 3.19 – Візуалізація порожнього бункера

Для забезпечення коректного масштабування на панелі відразу задається пропорційний аспект коробки за допомогою `set_box_aspect`.

```
# Maintain proportional scaling based on actual bunker dimensions
ax.set_box_aspect([length, width, height])
```

Рисунок 3.20 – Візуалізація порожнього бункера

`set_box_aspect` гарантує невикривленість форми незалежно від параметрів вікна.

Інтерфейс доповнений кнопкою “*Download Data as CSV*”, яка викликає вікно збереження файлу через *Tkinter*, де оператор може вказати шлях та ім'я вихідного CSV, куди буде вивантажено весь згенерований набір даних.

Download Data as CSV

Рисунок 3.21 – Кнопка завантаження даних точок як CSV файл

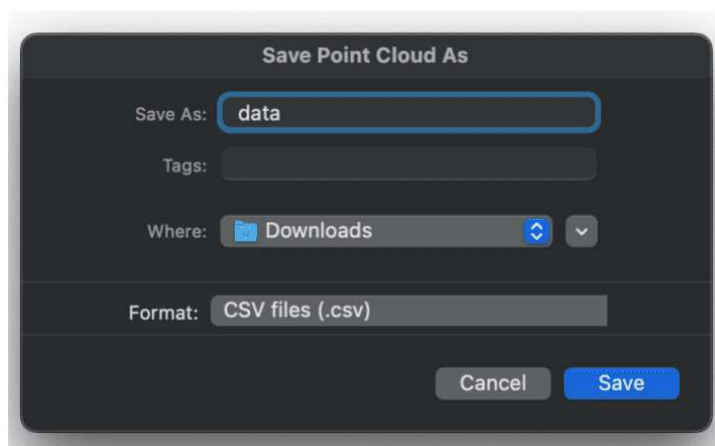


Рисунок 3.22 – Вікно збереження даних точок як CSV файл

Цей модуль виконує роль тестового й підготовчого рішення, дозволяючи перевірити механізм імпорту та обробки CSV у наступному етапі основного модуля без залучення реального апаратного сканування.

Таким чином, простота коду гарантує прозору інтеграцію та зрозумілу модифікацію, змінюючи лише розміри або щільність точок, розробник може швидко адаптувати хмару під будь-які параметри бункера [78]. Такий підхід забезпечує повний контроль над вхідними даними й дозволяє відпрацьовувати конвеєр імпорту обчислень візуалізації в автономному режимі.

Модуль ***visualisation_from_csv.py*** відповідає за завантаження уніфікованої хмари точок, отриманої із зовнішніх джерел, та її перетворення в початкові параметри симуляції.

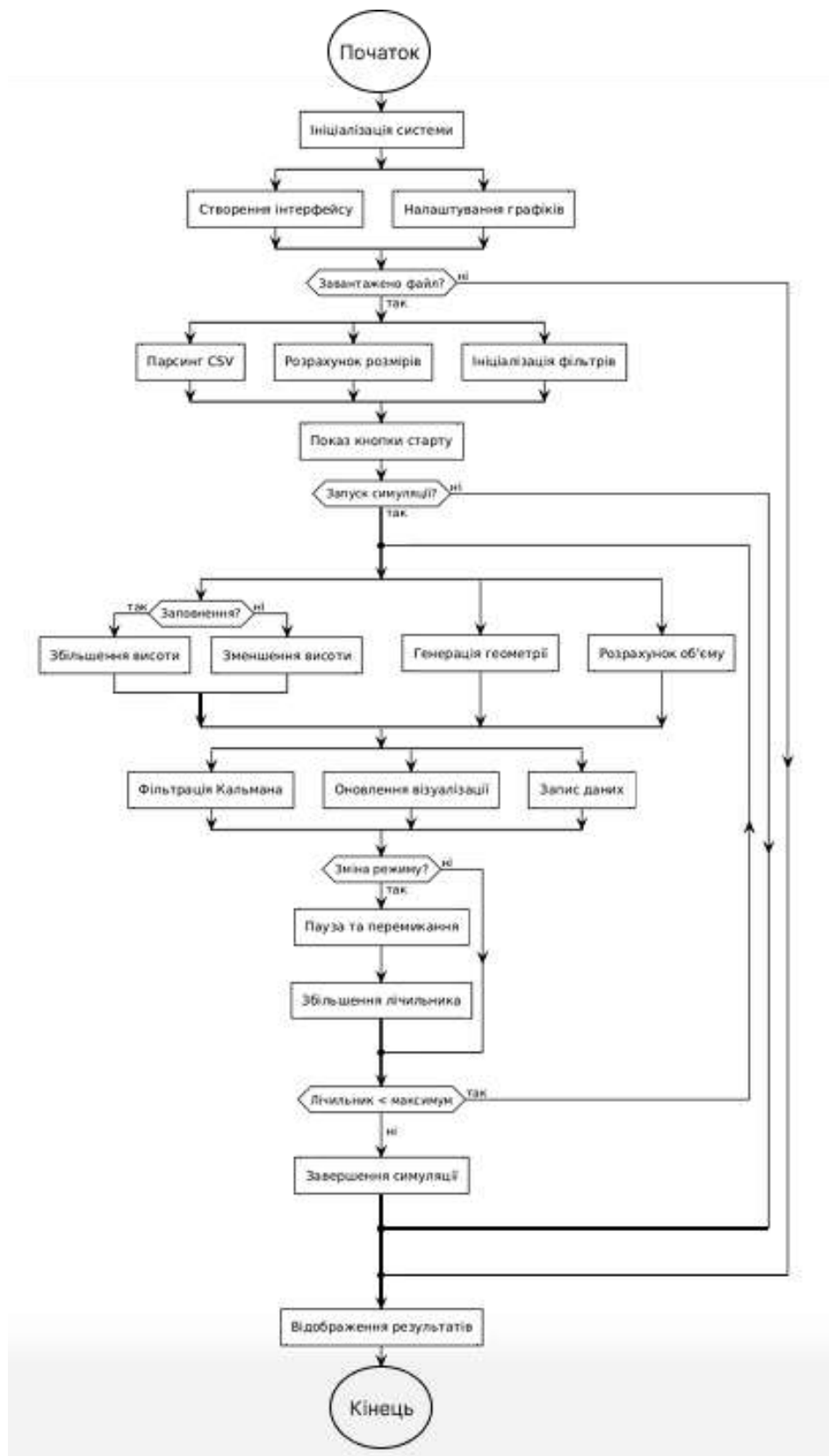


Рисунок 3.23 – Блок-схема модулю visualisation_manual.py

Після завантаження скрипту відкривається головне вікно з трьома областями, 3D-панель для візуалізації насипу, двома малими панелями для графіків “Об’єм та час” і “Висота та час», а також кнопками “*Upload Data*” і “*Start Simulation*”. Відразу після запуску кнопка симуляції прихована, щоб оператор спочатку вибрав правильний CSV.

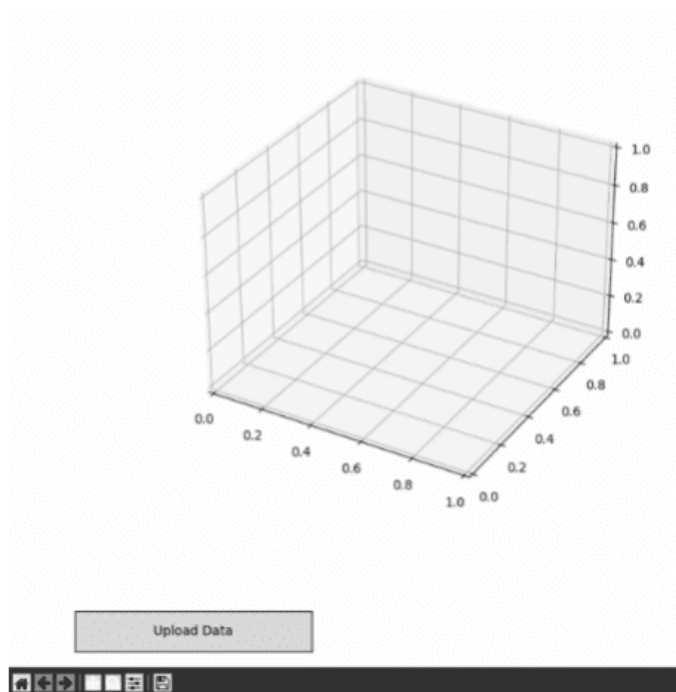


Рисунок 3.24 – Початковий інтерфейс модулю візуалізації з CSV

Натискання “*Upload Data*” викликає файловий діалог на базі *Tkinter*, який дозволяє вказати шлях до CSV із колонками x, y, z.



Рисунок 3.25 – Кнопка вивантаження даних точок

	A	B	C	D
1	x	y	z	
2	0	0	0	
3	0	0.3846153	0	
4	0	0.7692307	0	
5	0	1.1538461	0	
6	0	1.5384615	0	
7	0	1.9230769	0	
8	0	2.3076923	0	
9	0	2.6923076	0	
10	0	3.0769230	0	
11	0	3.4615384	0	
12	0	3.8461538	0	
13	0	4.2307692	0	
14	0	4.6153846	0	
15	0	5	0	
16	0	5.3846153	0	
17	0	5.7692307	0	
18	0	6.1538461	0	
19	0	6.5384615	0	
20	0	6.9230769	0	
21	0	7.3076923	0	
22	0	7.6923076	0	
23	0	8.0769230	0	
24	0	8.4615384	0	
25	0	8.8461538	0	

Рисунок 3.26 – Початок CSV файлу з точками хмари бункера

	A	B	C	D	E
9577	20	15	9.615384615384617		
9578	20	15	10.256410256410257		
9579	20	15	10.897435897435898		
9580	20	15	11.53846153846154		
9581	20	15	12.17948717948718		
9582	20	15	12.820512820512821		
9583	20	15	13.461538461538463		
9584	20	15	14.102564102564104		
9585	20	15	14.743589743589745		
9586	20	15	15.384615384615387		
9587	20	15	16.025641025641026		
9588	20	15	16.666666666666668		
9589	20	15	17.30769230769231		
9590	20	15	17.94871794871795		
9591	20	15	18.58974358974359		
9592	20	15	19.230769230769234		
9593	20	15	19.871794871794872		
9594	20	15	20.512820512820515		
9595	20	15	21.153846153846157		
9596	20	15	21.794871794871796		
9597	20	15	22.435897435897438		
9598	20	15	23.07692307692308		
9599	20	15	23.71794871794872		
9600	20	15	24.35897435897436		
9601	20	15	25		

Рисунок 3.27 – Кінець CSV файлу з точками хмари бункера

Після підтвердження вибору модуль у фоновому режимі зчитує файл у *DataFrame Pandas*.

```
heap_df = pd.DataFrame(points, columns=['x', 'y', 'z'])
```

Рисунок 3.28 – Код зчитування даних у *DataFrame*

На цьому етапі відбувається перевірка цілісності даних, де перевіряється наявність необхідних стовпців, виключаються дублікати та відкидаються аномальні точки за межами тривіального діапазону [79]. У разі помилок *DataFrame* або очищується від невірних рядків, або виводиться повідомлення про некоректний формат.

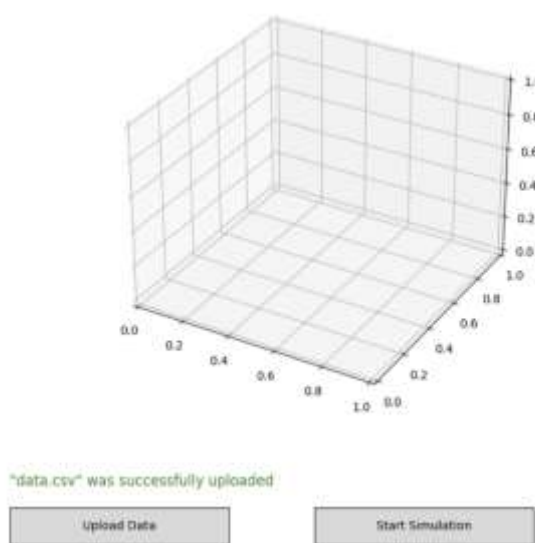


Рисунок 3.29 – Інтерфейс з успішним завантаженням CSV файлу

Якщо CSV успішно опрацьовано, модуль обчислює границі хмари, де знаходить мінімальні та максимальні значення x і y для визначення довжини та ширини, а також екстремуми z для висоти бункера. Ці величини записуються у глобальні змінні *length*, *width*, *height*, а також використовуються для ініціалізації двох екземплярів класу *KalmanFilter*, де для об'єму та для висоти, із попередньо

визначеними параметрами Q , R , P . Далі розраховується крок наповнення *fill_step* як відношення висоти до загального часу симуляції. Після цього з'являється зелений статус “ім'я файлу was successfully uploaded” над кнопками, і кнопка “Start Simulation” робиться видимою.

Simulation in progress...

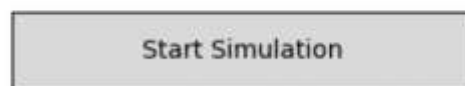


Рисунок 3.30 – Інтерфейс з повідомленням початку симуляції

По натисканні “Start Simulation” текст статусу змінюється на “Simulation in progress...”, і запускається основний цикл моделювання.

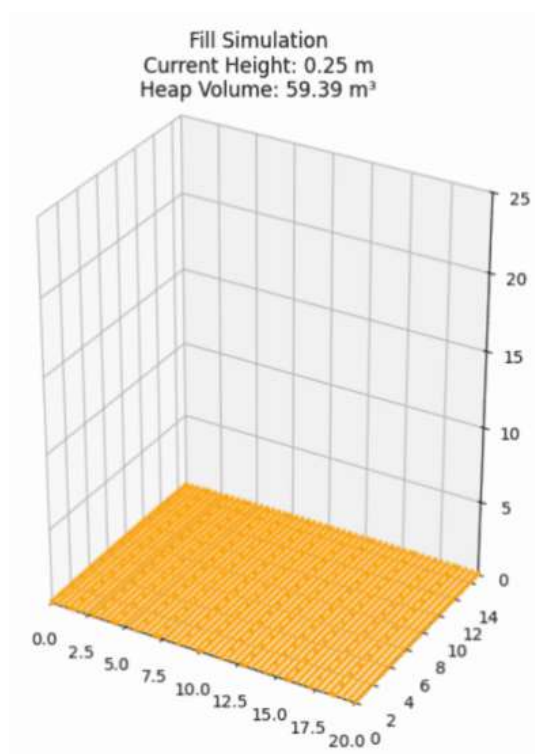


Рисунок 3.31 – Інтерфейс візуалізації початкового заповнення

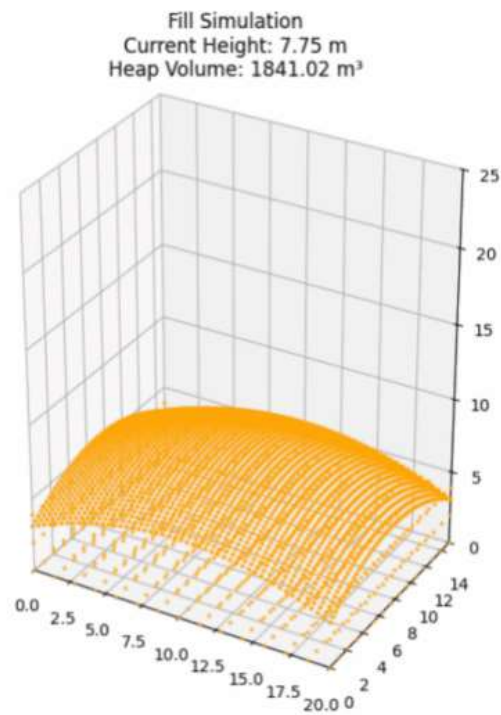


Рисунок 3.32 – Інтерфейс візуалізації частиноного заповнення

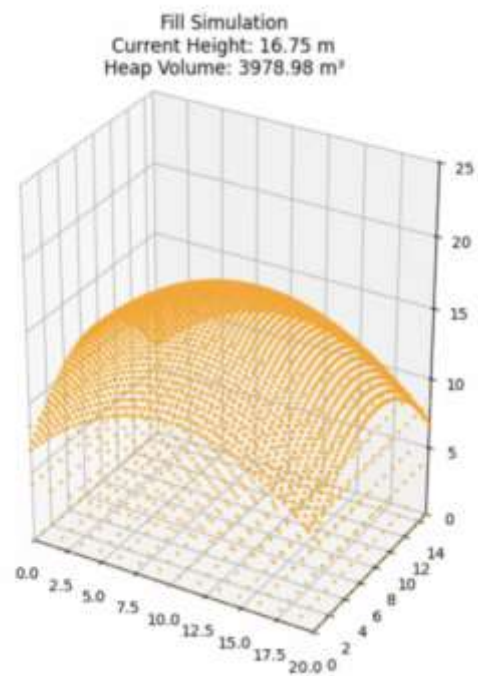


Рисунок 3.33 – Інтерфейс візуалізації заповнення

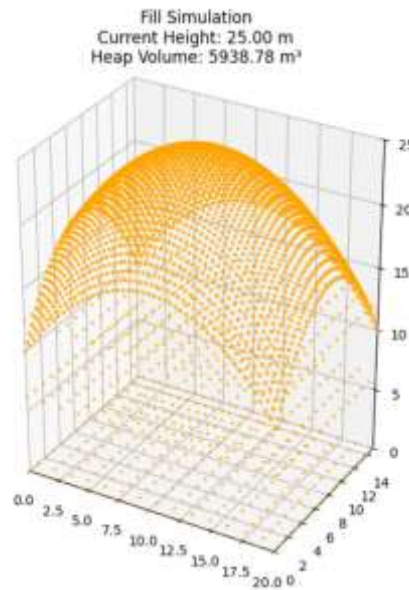


Рисунок 3.34 – Інтерфейс візуалізації повного заповнення

На кожній ітерації цикл визначає, чи триває заповнення або почалося спорожнення, і збільшує чи зменшує поточну висоту *current_height* на величину *fill_step*. Потім обчислюється сирий об'єм як квадратна площа помножена на *current_height*. Для реалістичнішого моделювання форму насипу генерується дві хмари точок базового шару (рівномірні точки всередині заповненого об'єму) і параболічної поверхні (*heap_df*).

Отримані значення об'єму та висоти передаються в методи *update* відповідних *KalmanFilter*, щоб усунути флуктуації. Відфільтровані й сирі дані заносяться до списків часу (*time_data*), об'єму (*volume_data*, *filtered_volume_data*) і висоти (*height_data*) для наступної побудови графіків.

Після обчислень модуль очищує та оновлює 3D-панель, де базові точки проєктуються з легким помаранчевим відтінком, зверху накладається яскрава точкова хмара *heap_df*, що імітує купол зернового насипу. У заголовок виводяться поточні значення висоти й об'єму з двома десятковими знаками. Паралельно праворуч оновлюються часові графіки, які порівнюють сирі та відфільтровані значення.

Цикл триває до досягнення заданої кількості циклів заповнення та спорожнення (*max_cycles*).

```
# Global variables for geometry and simulation
data = None
length = width = height = None
kf_volume = None
kf_height = None
fill_step = None
time_to_fill = 100
current_height = 0.0
filling = True
cycle_count = 0
max_cycles = 7
```

Рисунок 3.35 – Код змінних для симуляції

Після чого статус змінюється на “*Simulation complete.*” та модуль чекає закриття вікна. Завдяки докладній перевірці та попередній обробці CSV, а також чіткому розподілу етапів від зчитування через нормалізацію до роботи симуляційного циклу, модуль забезпечує надійний, повторюваний і прозорий механізм підготовки даних для кінцевої візуалізації та аналізу.

Після описаних етапів взаємодії з користувачем і попередньої обробки CSV-даних у коді відбувається кілька ключових операцій, що забезпечують зв'язок між імпортом даних і безпосередньо симуляцією [79].

Після завантаження та валідації створюється простий однотипний виклик ініціалізації фільтрів і параметрів, який чітко відокремлює етап підготовки від власне моделювання [79]. Виклик *kf_volume = KalmanFilter(0, 10, 50, 1)* фіксує початковий стан оцінки, а обчислення гарантує апаратно-незалежний розрахунок приросту висоти.

Усі маніпуляції з хмарою точок виконуються в пам'яті, де створюється дві Pandas DataFrame (*heap_df* і *base_df*), причому *heap_df* формується через

подвійний for по `np.linspace(0, length, divisions)` та `np.linspace(0, width, divisions)`, а `base_df` по менш деталізованій сітці для заповненого обсягу.

```
# Simulate grain heap surface
points = []
divisions = 50 # Higher resolution for better volume accuracy
base_layer = 0.5 * current_height
heap_peak = current_height - base_layer

for x in np.linspace(0, length, divisions):
    for y in np.linspace(0, width, divisions):
        # Generate heap surface with parabolic profile
        heap_height = base_layer + heap_peak * (1 - 0.5 * (((x - length / 2)**2 / (length / 2)**2) + ((y - width / 2)**2 / (width / 2)**2)))
        heap_height = max(0, heap_height)
        points.append((x, y, heap_height))

heap_df = pd.DataFrame(points, columns=['x', 'y', 'z'])

# Generate base fill for visual completeness
base_points = []
base_div = 10 # Lower resolution is sufficient for visual layer
for x in np.linspace(0, length, base_div):
    for y in np.linspace(0, width, base_div):
        base_z = base_layer
        base_points.append((x, y, base_z))
base_df = pd.DataFrame(base_points, columns=['x', 'y', 'z'])
```

Рисунок 3.36 – Код генерації хмари точок базового шару та параболічного куполу зернового насипу в модулі симуляції

```
# Clear and redraw 3D visualization
ax_main.clear()
ax_main.scatter(base_df['x'], base_df['y'], base_df['z'], s=3, c='orange', alpha=0.6, label='Base Layer')
ax_main.scatter(heap_df['x'], heap_df['y'], heap_df['z'], s=4, c='orange', alpha=0.8, label='Grain Heap')
ax_main.set_box_aspect([length, width, height])
ax_main.set_xlim(0, length)
ax_main.set_ylim(0, width)
ax_main.set_zlim(0, height)
```

Рисунок 3.37 – Код відображення заповнення зерна

Ці структури зберігають координати для візуалізації й для подальшого чисельного інтегрування [79].

Цифровий розрахунок сирого об'єму здійснюється прямим множенням суми колонок `heap_df['z']` на площу одного елемента сітки $dx * dy$, де $dx = \text{length} / \text{divisions}$ і $dy = \text{width} / \text{divisions}$.

```
# Calculate total heap volume using numerical integration
dx = length / divisions
dy = width / divisions
heap_volume = heap_df['z'].sum() * dx * dy
```

Рисунок 3.38 – Код розрахунку об'єму

Саме в цьому місці коду реалізується принцип збирання всіх точок куполу в єдиний числовий результат.

Після кожного обчислення виконується виклик `kf_volume.update(hear_volume)`, а результат записується в окремий список `filtered_volume_data`.

Весь блок оновлення графіків укладено в межі одного циклу з `plt.pause(0.1)`, що забезпечує періодичне оновлення UI без блокування основного потоку. Кожен виклик `ax_main.clear()`, `ax_volume_time.clear()` і `ax_height_time.clear()` точно визначає порядок відображення елементів: спочатку очистка, потім побудова базового шару та куполу зерна, далі нанесення часових рядів.

На завершення симуляції через зміну лічильника циклів і флагу `filling` код переходить у стан очікування, оновивши статусний текст на “Simulation complete.” і викликавши `fig.canvas.draw_idle()`.

```
# Simulation complete
status_text.set_text("Simulation complete.")
fig.canvas.draw_idle()
```

Рисунок 3.39 – Код завершення симуляції

Завдяки такому розбиттю на чіткі послідовні блоки обробки CSV, підготовки параметрів, обчислення куполу та об'єму, фільтрація, оновлення графіків, реалізація модуля залишається прозорою, легко налагоджуваною та розширюваною [79].

3.5 Візуалізація результатів роботи системи

Візуалізація є найважливішим етапом роботи автоматизованої системи контролю завантаженості бункерів зерновозів, оскільки саме графічне представлення дозволяє оператору миттєво оцінити поточний рівень заповнення, форму насипу й динаміку процесу [80]. У випадку циліндричної

моделі, яка побудована на основі ручного введення параметрів, поверхня зернової гірки відтворюється у вигляді суцільного кольорового полотна. Кольорова гама “*viridis*” підкреслює зміну товщини шару від холодних відтінків поблизу країв до теплих тонів біля вершини куполу.

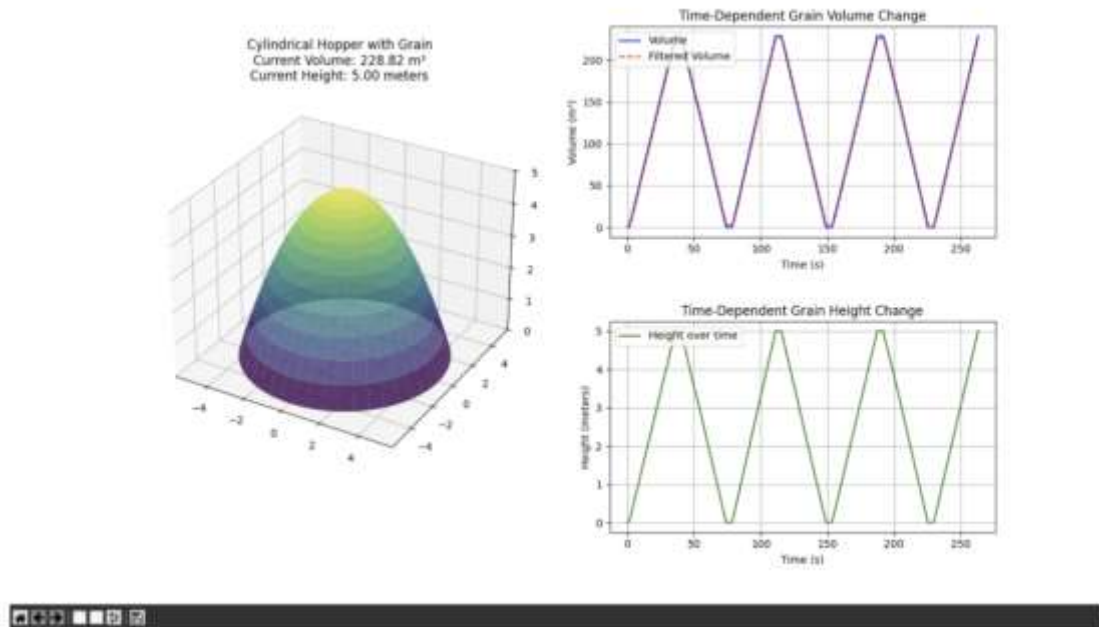


Рисунок 3.40 – Результат візуалізації для циліндричного бункера

Зчитування та візуалізація відбуваються в реальному часі, де при кожному кроці симуляції функція *plot_surface* автоматично будує оновлений зображення шару, а заголовок сцени динамічно відображає актуальні значення об’єму та висоти з точністю до двох десяткових знаків. Це дає змогу відразу побачити відхилення від очікуваної параболічної форми та скоригувати параметри фільтра чи сітки без перезапуску програми [80].

При обробці хмари точок, згенерованої або завантаженої з дрона, візуалізація переходить у режим точкового розсіяння. Кожна точка в 3D-сцені відповідає вимірній координаті (x, y, z), що дає оператору справжнє відчуття нерівностей поверхні та окремих дефектів бункера.

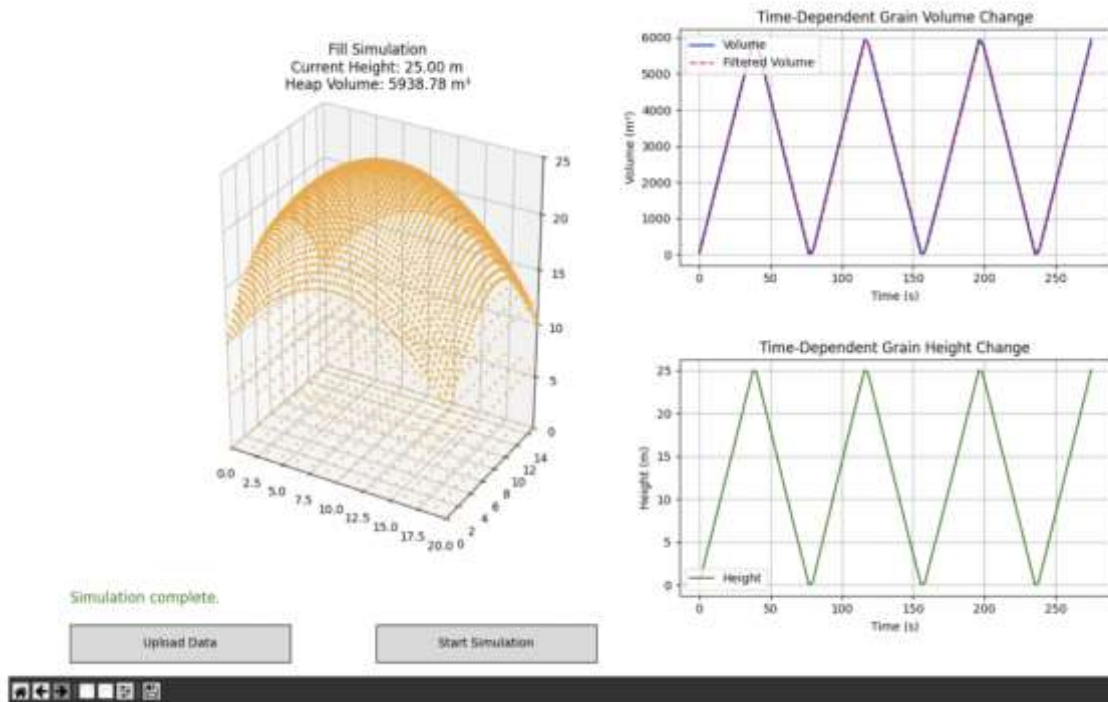


Рисунок 3.41 – Результат візуалізації для прямокутного бункера

Паралельно на окремих графіках відображаються часові ряди, а також їхнє відфільтроване згладжування *Kalman Filter*. Такий поділ демонструє, наскільки надійно фільтр усуває короточасні флуктуації, зберігаючи при цьому загальний тренд заповнення й спорожнення.

Загалом, інтеграція об'ємно-просторової панелі із часовими діаграмами забезпечує комплексний огляд процесу, де оператор бачить не лише форму та симетрію куполу зернової гірки, але й точну динаміку зміни об'єму та висоти насипу. Це дозволяє своєчасно виявляти відхилення від запланованих параметрів, аналізувати вплив технологічних факторів і приймати обґрунтовані рішення щодо корекції процесу завантаження [80]. Такий підхід до візуалізації відповідає сучасним вимогам агротехнологічних систем, де швидка реакція на зміни є запорукою ефективності та безпеки перевезень зерновозів.

3.6 Аналітична оцінка роботи програмного забезпечення

Аналітична оцінка програмного комплексу охоплює кілька взаємопов'язаних напрямів, що разом утворюють цілісну картину його якості та придатності для реального застосування. Було розроблено функціональний код програми, який опублікований на Github <https://github.com/volodymyr-boiko2002/master-dissertation>. По-перше, перевірилось коректність чисельних алгоритмів, де спільна робота модуля цифрового інтегрування об'єму та фільтра Калмана піддається верифікації шляхом порівняння з теоретичною моделлю параболічного профілю. Важливо, що в процесі цього порівняння використовувалось як синтетичні дані, так і дані з шумовими домішками, щоб упевнитися в стійкості алгоритму до реальних похибок вимірів і неточностей фотограмметрії.

Другим аспектом є оцінка обчислювальної ефективності. Спрощена векторизована реалізація обчислює об'єм насипу та оновлює графічну сцену без зайвих перерв, що гарантує плавну анімацію при будь-яких масштабах сітки. Використання оптимізованих операцій NumPy і відмову від вкладених Python циклів дозволяє підтримувати інтерфейс високої відгукуваності навіть у вбудованих системах із обмеженими ресурсами.

Третім напрямом є перевірка стійкості. Для цього програмний комплекс моделювався у різних умовах із нерівномірною дискретизацією, із штучно введеним шумом у дані чи навіть із частковим відсутнім рядом точок у хмарі. За будь-яких з таких екстремальних сценаріїв програма не втрачає працездатності, алгоритми Kalman Filter успішно згладжують миттєві сплески, а інтерфейс продовжує коректно оновлюватися.

Нарешті, важливою є інтеграційна перевірка взаємодії між модулями зчитування даних, обчислення об'єму, фільтрації та візуалізації працюють бездоганно як єдиний конвеєр. Це забезпечує надійність і передбачуваність системи в умовах безперервної експлуатації, дозволяючи впроваджувати

рішення на платформах або в складі централізованих систем управління без побоювань щодо виникнення вузьких місць у обробці даних чи інтерпретації результатів [80]. У сукупності описані перевірки доводять, що розроблені модулі не лише дають правдоподібні оцінки об'єму зернового насипу, але й є швидкодіючим, стійким до помилок та легко адаптуються до різних виробничих умов.

Висновки до розділу 3

У результаті розробки програмного забезпечення для контролю завантаженості бункерів зерновозів було створено чітко модульну архітектуру, де обчислювальні та сервісні компоненти ізольовані один від одного та взаємодіють через стандартизовані інтерфейси даних. Центральний обчислювальний рушій, що включає модулі чисельного розрахунку об'єму та рекурсивної фільтрації даних KalmanFilter, який забезпечує гнучку обробку як сирих, так і відфільтрованих вимірювань, а допоміжні підсистеми від ручного задання параметрів до імпорту хмар точок із CSV, виконують підготовку вхідної інформації й гарантують узгодженість форматів даних .

Для реалізації різних сценаріїв роботи застосовано чотири ключові модулі *kalman_filter*, *visualisation_manual*, *rectangular_bunker_pointcloud_generator* та *visualisation_from_csv*. Така організація дозволяє легко розширювати систему новими алгоритмами та адаптувати її до інших сенсорних пристроїв або платформ без змін у вже перевіреній логіці обробки даних .

Алгоритмічне ядро програмного забезпечення включає побудову регулярних та полярних сіток із динамічно обчисленими кроками, реалізовану через векторизовані виклики NumPy, та параболічну модель поверхні зернової гірки, що дозволяє швидко й точно апроксимувати розподіл сипучого матеріалу. Далі цифрове інтегрування об'єму ґрунтується на сумуванні локальних висот, помножених на відповідні елементні площі, що гарантує масштабованість та ефективність обчислень у режимі реального часу .

Візуалізаційний підсистем включає 3D-панель для відображення куполу зернового насипу, а також динамічні часові графіки сирих та відфільтрованих даних, що дозволяє оператору миттєво оцінювати форму, об'єм та висоту зернової гірки. Інтерактивність реалізована через Tkinter, що забезпечує інтуїтивні елементи управління й мінімальне навантаження на ресурси системи.

Загалом, побудована система довела свою функціональність, продуктивність і стійкість, де модульна архітектура полегшує тестування й підтримку, векторизовані обчислення забезпечують швидку обробку великих обсягів даних, а рекурсивний фільтр Калмана ефективно усуває випадкові флуктуації без накопичення історії вимірювань. Такий комплексний підхід створює надійну й масштабовану платформу для автоматизованого контролю завантаженості бункерів зерновозів в умовах реального часу.

4 ПИТАННЯ БЕЗПЕКИ НА ПІДПРИЄМСТВІ

Безпека праці на підприємстві є невід'ємною складовою будь-якої інженерної або технологічної діяльності, особливо коли йдеться про високотехнологічні системи, як роботизовані комплекси для просторового виміру та контролю завантаженості бункерів зерновозів. Забезпечення безпеки в таких умовах ґрунтується на усвідомленні специфіки виробничих процесів, що включають одночасну роботу людини, механізмів і програмно-апаратних комплексів у загальному робочому просторі. У даному контексті необхідно зважати на потенційні ризики, пов'язані з експлуатацією безпілотних літальних апаратів, механізованих датчиків, електронних систем управління та можливого формування вибухонебезпечного середовища через пилюку зернового середовища. Від того, наскільки ретельно розроблені й дотримуються норми охорони праці, залежить не лише фізична цілісність працівників, але й ефективність і надійність самої автоматизованої системи [81].

Робота з безпілотними літальними апаратами (БПЛА) у виробничому середовищі вимагає особливої уваги до організації робочого простору. Оператор дрона повинен перебувати у захищеній зоні, де відсутні перешкоди і сигнали, що можуть впливати на коректну роботу навігаційних систем. Паралельно із цим технічне обслуговування і заряджання акумуляторів БПЛА повинні здійснюватися у відповідності з правилами електробезпеки, щоб запобігти коротким замиканням чи загрозі перегрівання акумуляторів. Водночас середовище навколо бункера зерновоза часто містить високий рівень пилу, який не лише ускладнює фотограмметричне сканування, а й створює ризик виникнення вибухових сумішей у замкнених просторах. Саме тому проектування автоматизованої системи контролю завантаженості бункерів має включати комплекс заходів щодо захисту від пилозабруднення та забезпечення достатньої вентиляції під час проведення робіт із дронами та монтажних операцій.

Крім технічних аспектів, необхідно приділяти увагу і психологічній адаптації персоналу, який працює у безпосередній близькості до робототехнічних модулів [81]. Оператор, що контролює процес наповнення та розвантаження бункера, повинен бути впевненим у правильному відображенні даних на моніторі, своєчасно реагувати на попереджувальні сигнали системи та вміти не допустити хибної інтерпретації аналізованої інформації. Регулярне навчання та інструктаж операторів, тестування аварійних сценаріїв і відпрацювання алгоритмів евакуації в разі непередбачуваних технічних збоїв або пожежі є необхідними елементами комплексної системи охорони праці.

Організація робочого простору навколо бункера зерновоза вимагає також належного оснащення станції моніторингу. Освітлення повинно бути достатнім для забезпечення чіткого відображення інтерфейсів програмного забезпечення, унеможлиблювати різкі тіні чи зайве відблискування, що може відволікати оператора [82]. Крім того, робоче місце має бути ергономічно облаштоване зручними меблями, регульованими кріслами, підставками для обладнання, що дозволять мінімізувати фізичне навантаження та запобігти зайвому стресу під час тривалих змін. Зонування простору також включає відділення місця зберігання аксесуарів, інструментів та засобів індивідуального захисту, що дозволяє швидко й безпечно реагувати на будь-які аварійні ситуації.

Таким чином, питання безпеки на підприємстві, яке впроваджує роботизовану систему просторового виміру та контролю завантаженості бункерів зерновозів, охоплюють технічні, організаційні та психологічні аспекти. Лише комплексний підхід, що враховує всі можливі джерела небезпеки від потенційних електричних та механічних загроз до специфічних ризиків, зумовлених пиловим середовищем і використанням БПЛА, який здатен забезпечити надійну експлуатацію системи та гарантувати безпеку персоналу на всіх етапах роботи.

4.1 Аналіз потенційних небезпек при експлуатації автоматизованих систем керування

У процесі експлуатації автоматизованих систем керування завантаженістю бункерів зерновозів виникає ряд потенційно небезпечних чинників, здатних вплинути як на технічний стан обладнання, так і на безпеку персоналу [83]. Перш за все, слід виділити механічні ризики, пов'язані з рухомими компонентами роботизованої платформи та самої інспекційної установки. Обертові елементи дрону під час підльоту і зльоту, стрімкі переміщення камери або сканера можуть спричинити травматичні ураження у разі несподіваного контакту з оператором або сторонніми особами.

Другим важливим напрямом потенційних небезпек є електричні ризики, пов'язані з живленням дронів, обчислювальних пристроїв і систем управління. Автоматизована система вимагає стабільного живлення як на точках заряджання акумуляторів БПЛА, так і на контролерах і серверах, що обробляють зібрані дані. Неправильне підключення кабелів, відсутність захисного заземлення чи фізичних бар'єрів навколо електрощитків може призвести до ураження струмом, короткого замикання або займання внаслідок перевантаження. Особливо небезпечні потужні акумуляторні батареї дронів, оскільки при виході з ладу електроніка може викликати різкий нагрів і навіть спалах. Через це в експлуатаційній документації має бути передбачено ретельне маркування ланцюгів електроживлення, наявність захисних автоматів і стабілізаторів напруги, а також проведення обов'язкових інструктажів щодо правил поводження з акумуляторами та елементами живлення.

Третім аспектом є термічні небезпеки, що виникають під час інтенсивного навантаження на електронні компоненти системи. При довготривалій роботі мікропроцесорів, передавачів і сканерів нагрівання корпусу може досягати критичних рівнів. Підвищена температура здатна не тільки швидше вивести з ладу сенсори й електроніку, а й сприяти виникненню мікротріщин у пайках та

перегріву елементів, що підвищує ризик займання. В умовах виробничого цеху або відкритого поля, де може не вистачати достатньої циркуляції повітря, важливо забезпечити належну тепловіддачу через радіатори, вентилятори або пасивне охолодження компонентів. Додатково необхідно передбачати моніторинг температурних показників у реальному часі та автоматичне відключення обладнання при досягненні критичних значень, щоб уникнути неконтрольованого перегріву.

Хімічні ризики мають меншу ймовірність, але їх не можна ігнорувати. Зокрема, під час обслуговування дронів і заряджання акумуляторів часто використовується електролітна рідина, яка при протіканні може спричинити корозію з'єднань та ураження шкіри оператора. Окрім того, змащувальні мастила й розчинники, що застосовуються для технічного обслуговування, можуть виділяти випари, шкідливі для дихальних шляхів. Певна небезпека також криється в розлитті хімічних рідин на електронні плати, що призводить до коротких замикань і виходу з ладу контролерів. Для мінімізації цих ризиків на виробництві повинні бути відведені спеціальні ізольовані зони для заряджання акумуляторів із засобами збору рідин, а також встановлені системи вентиляції й забезпечені засоби індивідуального захисту рукавичками, окулярами та респіраторами.

Окремим чинником, який суттєво впливає на безпеку праці в середовищі роботи з зерном, є сам зерновий пил. Мілкі пилові частинки здатні утворюватися дуже швидко під час завантаження, розвантаження чи обробки зерна, створюючи вибухонебезпечні суміші в замкненому просторі бункера. Навіть незначна іскра від несправного обладнання або електричного контакту може викликати детонацію пилу. Саме тому необхідно вживати заходів щодо регулярного зволоження повітря, використання пиловловлювачів і встановлення систем раннього виявлення задимлення. Ключовим при цьому є зонування виробничого простору розподілу робочих ділянок на безпечні й потенційно

небезпечні зонах із встановленням чітких каналів евакуації та систем сигналізації для своєчасного оповіщення персоналу про підвищений рівень пилу в повітрі.

Визначення зон підвищеної небезпеки включає ретельну інвентаризацію усіх місць, де відбувається активна взаємодія людини з роботизованими модулями та швидкістю руху механізмів [83]. До таких зон належать площадки, де дрон здійснює взліт та посадку, межі радіальної сітки під час візуалізації поверхні зерна на дисплеї, що потребує підвищеної уваги оператора, а також внутрішній об'єм бункера під час безпосереднього сканування. Окрему увагу слід приділити проходам між бункерами, де ризик ураження рухомими елементами дрона або можливість контакту з рухомими контрольно-вимірювальними приладами зростає. Для зменшення небезпек у цих зонах на підлозі встановлюються огорожі, які сигналізують про потенційні ризики, а також впроваджуються обмеження швидкості руху технічного персоналу під час виконання робіт біля активних модулів автоматизованої системи.

Отже, аналіз потенційних небезпек при експлуатації автоматизованих систем керування завантаженістю зернових бункерів вимагає комплексного підходу, що охоплює ідентифікацію механічних, електричних, термічних і хімічних загроз, оцінку впливу пилу на вибухонебезпечність середовища та чітке визначення небезпечних зон із підвищеним рівнем ризику. Лише завдяки ретельному вивченню і документуванню кожного з цих аспектів можна розробити ефективні заходи з охорони праці, які забезпечать надійну й безпечну роботу як технічного оснащення, так і персоналу [83].

4.2 Безпека при роботі з безпілотними літальними апаратами

Експлуатація безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у межах агропромислового підприємства ставить особливі вимоги до кваліфікації й психологічної готовності операторів, оскільки будь-яка помилка під час керування може призвести до летальних помилок пристрою та створити загрозу

2025 р.

для персоналу та обладнання. Оператор кожного дрона зобов'язаний пройти спеціалізовану підготовку, що включає теоретичну підставу аеродинаміки, методи фотограмметричного сканування та правила пілотування в складних умовах. Не менш важливо забезпечити регулярні медичні огляди операторів, адже робота з БПЛА, що використовуються для фотограмметричного моделювання зернових насипів, вимагає високої концентрації уваги та витривалості зору. Зокрема, оператори повинні мати здорове серцево-судинне й вестибулярне функціонування, оскільки польоти в умовах змінної вентиляції приміщення або під відкритим небом можуть викликати непритомність при різкій зміні висоти чи під час тривалих місій.

У промислових умовах правила експлуатації дронів ґрунтуються на декількох ключових принципах, котрі забезпечують безпеку та стабільність аерофотозйомок. По-перше, вся льотна діяльність має здійснюватися заздалегідь узгодженими маршрутами, уникаючи перебування над зоною скупчення персоналу чи рухомого технологічного обладнання. Вихід на пульти керування й візуальний моніторинг польоту повинні проводитися з облаштованих місць із чітко визначеними межами зони безпеки, аби в разі аварійного зниження дрона уникнути травматизму. Параметри польоту висоти, швидкість, кут нахилу програми мають перевірятися автоматично перед кожним злітом, а рейси в заборонених для аерозйомки умовах (наприклад, при сильному вітрі, тумані або під час грозових розрядів) суворо заборонені. Оператори повинні дотримуватися нормативів щодо мінімальних відстаней від інших об'єктів, де не менш ніж 50 метрів від будівель, ліній електропередач та інших безпосередніх перешкод, що можуть спричинити втрату керування чи пошкодження устаткування. Після завершення кожної місії обов'язково проводиться аналіз зібраних даних для оцінки якості зображень і виявлення можливих технічних неполадок, котрі могли бути непомітними в польоті, а також обов'язковий звіт з усіх виконаних маневрів та параметрів траєкторії [83].

Що стосується обслуговування й заряджання акумуляторів БПЛА, тут необхідно передбачити суворий контроль за протоколами роботи з акумуляторними батареями, оскільки саме вони становлять найбільшу електрохімічну небезпеку. Заряджання акумуляторів проводиться в спеціально виділених приміщеннях із підвищеним ступенем пожежної безпеки, де встановлено датчики температури та диму, а також автономну протипожежну систему [84]. Перед підключенням до зарядного пристрою кожен акумулятор перевіряється на цілісність корпусу та відсутність ознак роздування, що може вказувати на внутрішнє ушкодження. Після заряджання батареї лишаються під постійним наглядом відповідального працівника протягом встановленого часу, який визначається технічними характеристиками виробника, що мінімізує ризик раптового загоряння через перегрів. Усі операції з розбирання, очищення та заміни компонентів БПЛА виконуються тільки у сухому, добре провітрюваному приміщенні, де відсутні джерела відкритого вогню або іскри. Використання лише рекомендованих виробником оригінальних зарядних пристроїв і кабелів із функцією стабілізації напруги гарантує, що робота з акумуляторами не викличе перевантаження мережі або короткого замикання. Таким чином, дотримання цього комплексу норм дозволяє з мінімальними ризиками проводити як льотні випробування дрона над зерновими насипами, так і технічне обслуговування автоматизованої системи у виробничому середовищі.

4.3 Пожежна та вибухова безпека в умовах пилової середовища

У зерновому середовищі пил, який утворюється під час навантаження, розвантаження та пересипання зерна, характеризується високою здатністю до утворення вибухонебезпечних сумішей із повітрям. Мікрочастинки зернового пилу, розмір яких може сягати декількох мікронів, перебувають у підвішеному стані, утворюючи хмару, здатну сприяти швидкому поширенню полум'я за рахунок великої площі поверхні контакту з киснем. Навіть незначна іскра від несправного електричного контакту або від тертя рухомих деталей може стати

2025 р.

іскро утворювачем, що ініціює процес горіння і спричиняє детонацію пилової хмари.

Електрообладнання, яке використовується в зонах потенційного накопичення пилу, повинно відповідати підвищеним стандартам [84]. Зокрема, усі електроприлади в середині бункера та в безпосередній близькості до робочих зон мають бути виконані у вибухозахищеному виконанні, що передбачає захист внутрішніх компонентів від потрапляння пилу та виключає можливість утворення іскор у разі короткого замикання. Аналогічні вимоги висуваються до кабельних ліній, розеток та вимикачів, які мають мати герметичні стики та ущільнення, що не допускають проникнення пилу всередину корпусу. Крім того, необхідно використовувати пожежобезпечні освітлювальні прилади з низьким рівнем тепловиділення, які не створюють локальних перегрітих зон. Вентиляційні системи в складі АСК повинні бути сконструйовані таким чином, щоб забезпечити постійний повітрообмін і своєчасне видалення аерозолів зернового пилу з приміщень. Принцип зонування повинен поєднувати створення надлишкового тиску всередині контрольованих зон із негайною фільтрацією поверненої в атмосферу повітря через пиловловлювачі з затухаючими фільтрувальними елементами.

Запобігання утворенню вибухонебезпечних сумішей насамперед досягається шляхом поєднання технічних і організаційних заходів. По-перше, необхідно забезпечити регулярне вологе прибирання або аспірацію пилу з усіх горизонтальних поверхонь, каркасів і технологічних переходів, щоб не допускати накопичення великої маси пилу. По-друге, у виробничих приміщеннях слід встановити датчики концентрації пилу, які в реальному часі сигналізуватимуть про перевищення безпечного рівня. По-третє, у разі виявлення підвищеної концентрації пилу автоматичні системи повинні знижувати інтенсивність процесів, що генерують пил, або перейти до аварійного відключення електроживлення. Чітке дотримання інструкцій з

техніки безпеки, регулярні інструктажі персоналу та відпрацювання аварійних алгоритмів у поєднанні з використанням вибухобезпечного обладнання забезпечують багаторівневий захист від вибухових ризиків у зоні насипу зерна [84]. Впровадження таких комплексних заходів є обов'язковим для підтримання безпечного режиму роботи та мінімізації ймовірності виникнення катастрофічних наслідків у разі небажаних подій.

4.4 Організація безпечного робочого місця оператора

Організація безпечного робочого місця оператора в рамках автоматизованої системи контролю завантаженості бункерів зерновозів починається з ретельного врахування ергономічних аспектів. Робоча зона оператора має бути спланована таким чином, щоб усі елементи інтерфейсу, монітори, клавіатура, панелі управління та джойстики були розташовані на оптимальній відстані та висоті, знижуючи напругу м'язів ший, плечей і спини. Стілець має підтримувати природний вигин хребта, мати регульовану висоту й підлокітники для рівномірного розподілу ваги рук під час аналізу даних. Робочий стіл повинен мати достатню площу для розміщення додаткових документів або планшета з картою польоту БПЛА. Також важливим є наявність можливості швидкого перемикання між різними робочими режимами та організація кабелів, аби запобігти спотиканню або випадковому відключенню обладнання.

Освітлення в операційній зоні мають бути такими, що не спричиняють бликування на екранах і не перевтомлюють зір оператора [84]. Рекомендовано використовувати регульовані джерела світла з холодним білим спектром, які рівномірно освітлюють поверхню столу та екран, уникаючи контрасту. Природне освітлення слід доповнювати штучним, оснащеним димерами, аби мати змогу швидко адаптувати інтенсивність світла при зміні погодних умов або часу доби. Важливо також контролювати температуру та вологість у приміщенні, де оптимальні умови становлять 20–24 °C та відносну вологість

2025 р.

45–60 %. Занадто сухе або, навпаки, надто вологе повітря можуть викликати подразнення слизових оболонок та зниження концентрації. Шумовий фон у зоні оператора не повинен перевищувати 55 дБ, щоб голосові команди між членами бригади та внутрішні сигнали системи не затихали на фоні сторонніх звуків. При цьому слід передбачити звукову ізоляцію від стороннього промислового устаткування та встановлення шумопоглинаючих панелей на стінах і стелі робочого місця.

Забезпечення засобами індивідуального захисту (ЗІЗ) є невід'ємною складовою безпеки оператора, особливо під час обслуговування дрону та роботи у зоні вантажно-розвантажувальних маніпуляцій. Оператор повинен бути оснащений захисними окулярами з бічними екранами, щоб уникнути потрапляння пилу або дрібних часток зернового матеріалу до очей, а також респіратором для фільтрації зважених пилових аерозолів. Під час заряджання акумуляторів та обслуговування електроніки необхідно використовувати захисні рукавички, що забезпечують захист від хімічних реагентів і електроструму, а також антивібраційні нарукавники при тривалому використанні ручних інструментів. В умовах підвищеної вологості або роботи поряд із маслом змащувальними матеріалами слід застосовувати водонепроникний захисний одяг і комбінезони, які не обмежують рухів і дозволяють швидко реагувати на непередбачені ситуації. Крім того, оператор повинен мати спеціальне взуття з антистатичною та протиковзкою підошвою, щоб виключити ризик падіння та запобігти накопиченню електростатичних зарядів біля чутливих електронних компонентів.

Таким чином, лише комплексний підхід до облаштування робочого місця оператора, де врахування ергономіки, оптимальних мікрокліматичних умов, якісного освітлення, контрольованого рівня шуму та використання відповідних засобів індивідуального захисту, створює умови для безпечної, ефективної та

безперервної роботи з автоматизованими системами контролю завантаженості бункерів зерновозів.

4.5 Вимоги до технічного обслуговування та контролю обладнання

Ефективне функціонування автоматизованої системи контролю завантаженості бункерів зерновозів значною мірою залежить від своєчасного та якісного технічного обслуговування усіх її складових. Планово-попереджувальні ремонти мають бути організовані за чітко визначеним графіком, що базується на рекомендаціях виробників ключових компонентів датчиків, контролерів, дронів-сканерів та обчислювальних модулів. Під час таких оглядів інженери перевіряють стан механічних вузлів привода камер, ущільнень і кабельних з'єднань, очищають від налипання пилу критичні поверхні оптичних сенсорів і виконують калібрування позиціонувальних систем. Особлива увага приділяється перевірці акумуляторних батарей і системи живлення дронів, адже їх деградація може призвести до раптової втрати напруги під час польоту або вимірювань, що в умовах крупномасштабних логістичних операцій може спричинити значні простої та ризики безпеці.

Контроль справності систем безпеки та аварійного відключення є наступним критичним етапом обслуговування [85]. Це стосується як програмної складової перевірки коректності роботи алгоритмів екстреного призупинення симуляції при виникненні помилки або виході за межі безпечних параметрів, так і апаратних реле та запобіжників, що фізично розмикають кола живлення в разі перегріву, короткого замикання чи детекції задимлення. Регулярне тестування цих систем шляхом проведення контрольованих, імітаційних аварій гарантує, що в критичній ситуації система миттєво припинить усі небезпечні процеси, не очікуючи на втручання оператора. Паралельно необхідно перевіряти роботу індикаторів стану та оповіщувальних сигналів, які

інформують персонал про наявність несправностей, що забезпечує оперативну реакцію у разі непередбачених подій.

Не менш важливим елементом організації технічного обслуговування є ведення докладних журналів та баз даних про всі виконані роботи. Кожний запис має містити дату та час обстеження, назву обладнання, що перевірялося, виявлені дефекти та вжиті заходи з їх усунення, а також підпис відповідального інженера. Така документація створює прозорий ланцюжок обов'язків і дозволяє аналізувати тенденції відмов для подальшого планування ресурсів та оновлення компонентів до граничних термінів їхньої експлуатації. Крім того, історія технічного обслуговування слугує доказовою базою під час аудитів з безпеки та може стати підґрунтям для вдосконалення процедур, виявлення слабких місць у роботі системи або оптимізації інтервалів планово-попереджувальних ремонтів. Завдяки цьому комплексному підходу до обслуговування та контролю обладнання зберігається висока надійність автоматизованої системи й забезпечується її безперервна працездатність у суворих умовах аграрного виробництва [85].

4.6 Заходи щодо запобігання нещасним випадкам та аваріям

Заходи із запобігання нещасним випадкам та аваріям в межах експлуатації автоматизованої системи контролю завантаженості бункерів зерновозів базуються на чіткому та системному підході до організації безпеки. Розробка детальних планів евакуації передбачає створення картографічних схем розташування усіх основних вузлів системи бункерів, операторських постів та технічних приміщень із зазначенням кількості та розташування евакуаційних виходів, шляхів прокладання кабелів і вентиляційних каналів. Кожен маршрут має бути позначений кольоровими індикаторами на підлозі та стінах, а в критичних точках обладнаний автономними світловими маячками та звуковими сигналами, які активуються при спрацьовуванні системи аварійного оповіщення. Для персоналу розробляються чіткі інструкції з алгоритмом дій у 2025 р.

випадку різних надзвичайних ситуацій від незначного задимлення або виявлення підвищених концентрацій пилю до повного обвалу матеріалу чи виходу з ладу ключового обладнання. Регулярне проведення тренінгів і навчань із відпрацюванням дій за допомогою умовних, навмисних надзвичайних ситуацій забезпечує швидке та злагоджене реагування у випадку реального інциденту, знижуючи ризик паніки та неорганізованості [85].

Встановлення комплексних систем оповіщення та сигналізації є другим важливим напрямом запобіжних заходів. Сучасні інтегровані рішення поєднують датчики задимлення, температури та вібрації із центральним контролером, що миттєво формує сигнал тривоги в разі відхилення від заданих безпечних параметрів [85]. Сигнал поширюється одночасно по внутрішній мережі гучномовців, на мобільні пристрої чергових інженерів через SMS-розсилку та виводиться на великі табло у операторській. Подібна багатоканальність гарантує, що жодна критична подія не залишиться без уваги, навіть якщо окремі засоби зв'язку знаходяться в стані технічних робіт або відключені. Додатково встановлюються ручні пожежні сповіщувачі та кнопки аварійного відключення живлення, що дають змогу персоналу миттєво ізолювати небезпечну ділянку.

Нарешті, ефективний аналіз і розслідування випадків травмувань чи аварій становить ключ до постійного вдосконалення безпекових процедур. Після кожного інциденту створюється робоча група, до складу якої входять інженери, фахівці з охорони праці та представники керівництва. Вони проводять детальний аудит подій, вивчають журнал подій автоматизованої системи, опитують свідків та проводять повторну інспекцію техніки й робочих зон. На основі зібраних даних готуються рекомендації щодо виправлення виявлених недоліків від удосконалення програмного забезпечення до зміни маршруту обходу оператора й оновлення інструкцій із техніки безпеки. Результати розслідування заносяться до єдиного реєстру небезпечних подій, а

пропозиції з їх запобігання обов'язково враховуються під час розробки подальших планів профілактичного обслуговування та навчальних програм.

Висновки до розділу 4

Забезпечення охорони праці під час експлуатації автоматизованих систем контролю завантаженості бункерів зерновозів є багаторівневим процесом, що охоплює технічні, організаційні та людські аспекти. Робота з дронами, електронними пристроями, програмно-апаратними комплексами в умовах пилового середовища створює численні ризики, від механічних та електричних до вибухонебезпечних і термічних.

Окрему увагу приділено безпечному проектуванню робочого місця оператора. Ергономіка, освітлення, мікроклімат і шумове середовище мають відповідати нормативам, що дозволяє мінімізувати перевтому, знизити рівень помилок і забезпечити надійний контроль за системою. Важливо також, щоб персонал був належним чином навчений щодо норм безпеки під час роботи з дронами та електронікою, так і в аспекті реагування на аварійні ситуації. Регулярне проведення інструктажів, тренувань і моделювання надзвичайних подій дозволяє закріпити правильні дії у критичних випадках і сформувати культуру безпеки на виробництві.

Не менш значущим компонентом є технічне обслуговування системи, від планово-попереджувальних перевірок до ведення обліку технічного стану та аналізу причин відмов.

У підсумку, лише інтегрований підхід, який охоплює всі етапи життєвого циклу від проектування до щоденного використання здатен забезпечити безпечну експлуатацію високотехнологічних систем у складних умовах зернових терміналів. Такий підхід гарантує захист життя та здоров'я персоналу, збереження технічних засобів, а також стає й ефективне функціонування автоматизованих процесів.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз стану та тенденцій розвитку технологічних процесів у ланцюзі збору зернових, перезень, зберігання та знову перевезень зерна демонструє потребу створення систем точного контролю вантажопотоків, особливо для суден зерновозів, а рівень розвитку елементної бази дозволяє шляхом впровадження безлюдних технологій із застосуванням мобільних робототехнічних систем та засобів ультразвукового та лазерного заміру відстані формувати АСК виміру завантаженості бункерів зерновозів.
2. Вибір Python у якості основної платформи забезпечує простоту синтаксису, доступність до великою кількості наукових бібліотек та можливості швидкого розгортання, що у сукупності із застосуванням зареєстрованої авторської програми фільтра Калмана забезпечило згладжування вимірювальних даних у реальному часі та формування відео потоку CSV завантаження бункерів.
3. Модульна організація програмного забезпечення та поділ на підсистеми підготовки даних та візуалізації відкриває нові можливості для реалізації алгоритмів цифрової інтеграції CSV файлів об'ємних зображень на дискретній сітці, апроксимації поверхні параболічною моделлю та для рекурсивного фільтрування, що забезпечує її точність і продуктивність у реальному часі.
4. Досягнуті можливості підрахунку об'єму зерна у бункері в режимі реального часу та побудована математична модель перерахунку розподілу зерна у просторі трюму відкриває можливості визначення не тільки завантаженості судна, а і моментів крену та диференту в режимі реального часу, що є гостро необхідною задачею для остійкості судна.
5. Метрологічна схема, що ґрунтується на чотирьох реперних точках із однією базою усуває накопичення похибки виміру, а розроблена на такій основі математична модель та запропонована у алгоритмі роботи послідовність вимірів зменшує загальну похибку отриманих CSV файлів об'ємних зображень,

які доповнюються додатковими вимірами ультразвукових та лазерних замірів використовує виміри відносно однієї бази у дану мить на кожному кроці виміру.

6. Для забезпечення вимог охорони праці та цивільного захисту за результатами аналізу реалізації безлюдних технологій у складі АСК загрузки зерновозів шляхом застосування роботизованої системи просторового виміру та контролю завантаженості бункерів необхідно передбачати комплекс заходів з охорони праці, а все устаткування повинно виконуватись у вибухозахищеному варіанті.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Pedersen S. M., Fountas S., Blackmore B. S., Gylling M., Pedersen J. L. Agricultural robots – system analysis and economic feasibility. Precision Agriculture, 2006. P. 297–308.
2. Lowenberg-DeBoer J., Behrendt K., Franklin K. The Impact of Swarm Robotics on Arable Farm Size and Structure in the UK. University of Warwick, 2019. 15 p.
3. Bongiovanni R., Lowenberg-DeBoer J. The Future of Technologies for Agriculture. EC Nutrition. 2020. 42 p.
4. Lowenberg-DeBoer J., Bongiovanni R. Precision Agriculture and Sustainability. Precision Agriculture. 2003. 361 p.
5. Ukrmashservice.
URL: https://ukrmashservice.com/ukraine?gad_source=0&gclid=Cj0KCQiAz6q-BhCfARIsAOezPxm1-47dbymzJ8brBx7O_TbiY6jR93pQsw71_ONAFqf6fTKo8M8aAl-HEALw_wcB (дата звернення: 12.04.2025).
6. АРТ ПОРТ. URL: <https://artport.pro/articles/kontrol-ruhu-zerna-vid-polyado-sudna-v-suchasnomu-agrarnomu-biznesi/> (дата звернення: 12.04.2025).
7. Gans S., Jacko P., Molnar J., Kovac D. , Kovac I., Fecko B., Beres M., Dziak J., Vince T. Driving Signal and Geometry Analysis of a Magnetoelastic Bending Mode Pressductor Type Sensor. Sensors. 2023. P 10–18.
8. Kopnov G., Sekhar S., Gerber A. Effect of Fractal Topology on the Resistivity Response of Thin Film Sensors. Sensors. 2023. 8 p.
9. Suppan T. , Neumayer M., Bretterklieber T., Puttinger S., Wegleiter H. A Model-Based Analysis of Capacitive Flow Metering for Pneumatic Conveying Systems: A Comparison between Calibration-Based and Tomographic Approaches. Sensors. 2022. P 915.
10. Afif O., Franceschelli L., Iaccheri E., Trovarello S., Florio A., Ragni L., Costanzo A., Tartagni M. A Versatile, Machine-Learning-Enhanced RF Spectral

Sensor for Developing a Trunk Hydration Monitoring System in Smart Agriculture. Sensors. 2024. P 5–11.

11. Friedrich B., Lübke C., Hein A. Analyzing the Importance of Sensors for Mode of Transportation Classification. Sensors. 2021. P 8–16.

12. Matos F., Bernardino J., Duraes J., Cunha J. A Survey on Sensor Failures in Autonomous Vehicles: Challenges and Solutions. Sensors. 2024. 11 p.

13. Nasirahmadi A., Hensel O. Toward the Next Generation of Digitalization in Agriculture Based on Digital Twin Paradigm. Sensors. 2022. P 7–9.

14. Xie D., Chen L., Liu L., Chen L., Wang H. Actuators and Sensors for Application in Agricultural Robots: A Review. Machines. 2022. P 23–25.

15. Tagarakis A., Bochtis D. Sensors and Robotics for Digital Agriculture. Sensors. 2023. 3 p.

16. Zhang B., Qiao Y. AI, Sensors, and Robotics for Smart Agriculture. 2024. 2 p.

17. Zhao Z., Wu C. Wheat Quantity Monitoring Methods Based on Inventory Measurement and SVR Prediction Model. Applied Sciences. 2023. 10. p.

18. 1 Since 1979 Solid / Liquid / Temperature / Pressure / Sensor / Transmitter Represented By: PROCESS ENGINEERED PRODUCTS Utah – Wyoming – Idaho – Nevada. <https://slideplayer.com/slide/5706549/> (дата звернення: 05.05.2025).

19. Морські далекобійники. Як перевозять зерно на балкерах великою водою. URL: <https://elevatorist.com/blog/read/721-morskie-dalnoboyschiki-kak-perevozyat-zerno-na-balkerah-po-bolshoy-vode> (дата звернення: 05.05.2025).

20. Flor O., Palacios H., Suarez F., Salazar K., Reyes L., Gonzalez M., Jimenez K. New Sensing Technologies for Grain Moisture. Agriculture. 2022. 16 p.

21. Shafiekhani A., Kadam S., Fritschi F., DeSouza G. Vinobot and Vinoculer: Two Robotic Platforms for High-Throughput Field Phenotyping. Sensors. 2017. 12 p.

22. Yunshandan W., Wenfu W., Kai C., Ji Z., Zhe L., Yaqiu Z. Progress and Prospective in the Development of Stored Grain Ecosystems in China: From

Composition, Structure, and Smart Construction to Wisdom Methodology. Agriculture. 2023. P 6–10.

23. Nath B., Chen G., O'Sullivan C., Zare D. Research and Technologies to Reduce Grain Postharvest Losses: A Review. Foods. 2024. P 10–12.

24. Tsolakis N., Bechtsis D., Bochtis D. AgROS: A Robot Operating System Based Emulation Tool for Agricultural Robotics. Agronomy. 2019. P. 6–10.

25. Soussi A., Zero E., Sacile R., Trincherо D., Fossa. M. Smart Sensors and Smart Data for Precision Agriculture: A Review. Sensors. 2024. 24 p.

26. Jensen K., Larsen M., Nielsen S., Larsen L., Olsen K., Jorgensen. R. Towards an Open Software Platform for Field Robots in Precision Agriculture. Robotics. P. 227–230.

27. Zhao Y., Lv H., Li Y. Grain Storage: Theory, Technology and Equipment. Foods. 2023. 2 p.

28. Fang Y., Chen Z., Wu L., Muhammad S., Zhou M., Yin J. Design and Experiments of a Convex Curved Surface Type Grain Yield Monitoring System. Electronics. 2024. 5 p.

29. Cheng S., Han H., Qi J., Ma Q., Liu J., An D., Yang Y. Design and Experiment of Real-Time Grain Yield Monitoring System for Corn Kernel Harvester. Agriculture. 2023. P 9–11.

30. Jones S., Sheng W., Or D. Dielectric Measurement of Agricultural Grain Moisture—Theory and Applications. Sensors. 2022. 32 p.

31. Cheng Z., Lu Z. Research on Load Disturbance Based Variable Speed PID Control and a Novel Denoising Method Based Effect Evaluation of HST for Agricultural Machinery. Agriculture. 2021. 16 p.

32. Hu J., Wen X., Liu Y., Hu H., Zhang H. Research on the Method for Recognizing Bulk Grain-Loading Status Based on LiDAR. Sensors. 2024. P 14-16.

33. Kim Y., Lee B. Containerized Grain Logistics Processes for Implementing Sustainable Identity Preservation. Sustainability. 2022. 15 p.

34. В Україні зібрано понад 75 млн тонн зерна нового урожаю. URL: <https://superagronom.com/news/9079-v-ukrayini-zibrano-ponad-75-mln-tonn-zerna-novogo-urojaj> (дата звернення: 05.05.2025).

35. Lei D., Lin H., Tai Y. Research on Innovation of Agricultural Product Logistics Circulation System under the Background of Big Data. Engineering Proceedings. 2023. 6 p.

36. Rodrigues D., Coradi P., Timm N., Fornari M., Grellmann P., Jorge T., Amado C., Teodoro P., Teodoro L., Baio F., Chiomento J. Applying Remote Sensing, Sensors, and Computational Techniques to Sustainable Agriculture: From Grain Production to Post-Harvest. Agriculture. 2024. 20 p.

37. Krizanovic V., Grgic K., Spisic J., Zagar D. An Advanced Energy-Efficient Environmental Monitoring in Precision Agriculture Using LoRa-Based Wireless Sensor Networks. Sensors. 2023. 30 p.

38. Jawad H., Nordin R., Gharghan S., Jawad A., Ismail M. Energy-Efficient Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture: A Review. Sensors. 2017. 36 p.

39. Abdelkader O., Bouzebiba H., Pena D., Aguiar A. Energy-Efficient IoT-Based Light Control System in Smart Indoor Agriculture. Sensors. 2023. 7 p.

40. Walker C., Assadzadeh S., Wallace A., Delahunty A., Clancy A., Panozzo J., McDonald L., Fitzgerald G., Nuttall J. Technologies and Data Analytics to Manage Grain Quality On-Farm—A Review. Agronomy. 2023. 13 p.

41. Thakur K., Ahuja R., Singh R. IoT-GChain: Internet of Things-Assisted Secure and Tractable Grain Supply Chain Framework Leveraging Blockchain. Electronics. 2024. 4 p.

42. Nitsche B. Exploring the Potentials of Automation in Logistics and Supply Chain Management: Paving the Way for Autonomous Supply Chains. Logistics. 2021. 5 p.

43. Ponis S., Efthymiou O. Cloud and IoT Applications in Material Handling Automation and Intralogistics. Logistics. 2020. 14 p.

44. Bazargani K., Deemyad T. Automation's Impact on Agriculture: Opportunities, Challenges, and Economic Effects. *Robotics*. 2024. 19 p.
45. Bazargani R., Deemyad T. Agricultural Robotics for Field Operations. *Sensors*. 2020. 10 p.
46. Zhang S., Li B., Yang Y. Efficiency Analysis of Scientific and Technological Innovation in Grain Production Based on Improved Grey Incidence Analysis. *Agriculture*. 2021. P 15-17.
47. Lee J., Hsu H., Li C., Yang J. Design and Implementation of Intelligent Automated Production-Line Control System. *Electronics*. 2021. 10 p.
48. Yu H., Deng Y., Zhang L., Xiao X., Tan C. Yard Operations and Management in Automated Container Terminals: A Review. *Sustainability*. 2022. 20 p.
49. Vahdanjoo M., Gislum R., Sorensen C. Operational, Economic, and Environmental Assessment of an Agricultural Robot in Seeding and Weeding Operations. *AgriEngineering*. 2023. 301 p.
50. Tian T., Li L., Wang J. The Effect and Mechanism of Agricultural Informatization on Economic Development: Based on a Spatial Heterogeneity Perspective. *Sustainability*. 2022. 16 p.
51. Toda, M., & Park, K. T. Ultrasonic distance meter: U.S. Patent No. 5,442,592. The Whitaker Corporation. 1995. P 1–5.
52. Vestel Elektronik Sanayi ve Ticaret A.S. Laser distance meter and method of measuring a distance: European Patent No. EP 3 715 903 A1. 2020. P 1–10.
53. Crommelinck S., Höfle B. Simulating an Autonomously Operating Low-Cost Static Terrestrial LiDAR for Multitemporal Maize Crop Height Measurements. *Remote sensing*. 2016. P 4–7.
54. Bhattarai A., Scarpin J., Jakhar A., Porter W., Hand C., Snider L., Bastos M. Optimizing Unmanned Aerial Vehicle LiDAR Data Collection in Cotton Through Flight Settings and Data Processing. *Remote sensing*. 2025. P 7–11.

55. DJI Matrice 4E. Офіційний сайт. URL: <https://enterprise.dji.com/matrice-4-series> (дата звернення: 07.05.2025).
56. Guo N., Xu N., Kang J., Zhang. G., Meng Q., Niu M., Wu W., Zhang X. A Study on Canopy Volume Measurement Model for Fruit Tree Application Based on LiDAR Point Cloud. Agriculture. 2025, P 13–19.
57. Bo L., Jichen Z., Yunfeng G., Qian C., Zhongxu W., Geng L., Liangquan L. Automated Determination of the Volume of Loose Engineering Deposits Using Terrestrial Laser Scanning. Remote sensing. 2023. P 6–10.
58. Xiaoliang M., Tianyi W., Dayu C., Wensong S., Peng Y., Xiaoli M., Meizhen H. Enhanced Point Cloud Slicing Method for Volume Calculation of Large Irregular Bodies: Validation in Open-Pit Mining. Remote sensing. 2023. P 18–21.
59. Wenxin Z., Yi G. A High-Precision Method for Warehouse Material Level Monitoring Using Millimeter-Wave Radar and 3D Surface Reconstruction. Sensors. 2025. P 8–13.
60. Holm H., Brodtkorb A., Sætra M. GPU Computing with Python: Performance, Energy Efficiency and Usability. Computation. 2020. P 5–12.
61. Raschka S., Patterson J., Nolet C. Machine Learning in Python: Main Developments and Technology Trends in Data Science, Machine Learning, and Artificial Intelligence. Information. 2020. P 24–30.
62. Python. Офіційний сайт. URL: <https://www.python.org/> (дата звернення: 12.05.2025).
63. NumPy. Офіційний сайт. URL: <https://numpy.org/> (дата звернення: 14.05.2025).
64. Pandas. Офіційний сайт. URL: <https://pandas.pydata.org/> (дата звернення: 15.05.2025).
65. Matplotlib. Офіційний сайт. URL: <https://matplotlib.org/> (дата звернення: 15.05.2025).

66. Tkinter. Офіційний сайт. URL: <https://docs.python.org/3/library/tkinter.html> (дата звернення: 15.05.2025).
67. Ding J., Zhang J., Ye L., Wu C. Kalman-Based Scene Flow Estimation for Point Cloud Densification and 3D Object Detection in Dynamic Scenes. *Sensors* 2024, P. 10–13.
68. Yin H., Qiu H., Ma B., Luo Y. Application of Kalman Filter to Improve 3D LiDAR Signals of Autonomous Vehicles in Adverse Weather. *Applied sciences*. 2021, P 1–4.
69. A Kalman Filter-Based Method to Generate Continuous Time Series of Medium-Resolution NDVI Images. *Remote sensing*. 2014. 12388 p.
70. Radlbauer E., Moser T., Wagner M. Designing a System Architecture for Dynamic Data Collection as a Foundation for Knowledge Modeling in Industry. *Applied Sciences*. 2025. P 12–19.
71. Khattach O., Moussaoui O., Hassine M. End-to-End Architecture for Real-Time IoT Analytics and Predictive Maintenance Using Stream Processing and ML Pipelines. *Sensors* 2025. P 7–11.
72. Sándor Á., Nagy V. Automatized Driving Data Analyzer: A Synchronized and Modular Application for Data Logging and Analysis. *Engineering proceedings*. 2024. P 3–5.
73. Szmeja P., Fornés-Leal A., Lacalle I., Palau C., Ganzha M., Pawłowski W., Paprzycki M., Schabbink J. ASSIST-IoT: A Modular Implementation of a Reference Architecture for the Next Generation Internet of Things. *Electronics*. 2023. P 26–31.
74. Zhang L., Wang S., Li F. A Novel Kalman Filter Design and Analysis Method Considering Observability and Dominance Properties of Measurands Applied to Vehicle State Estimation. *Sensors*. 2021. P 4–9.
75. Liang X., Wang Y., Zhang Z. Feature Analysis of Scanning Point Cloud of Structure and Research on Hole Repair Technology Considering Space-Ground Multi-Source 3D Data Acquisition. *Sensors* 2022. P 15–22.

76. Zhang J., Liu H., Zhao F. Multi-Sensor Data Fusion for 3D Reconstruction of Complex Structures: A Case Study on a Real High Formwork Project. *Remote sensing*. 2023. P 22–26.
77. Pellerin X., Perez L., Froideval L., Mouko A., Conessa C., Benoit L. A New Open-Source Software to Help Design Models for Automatic 3D Point Cloud Classification in Coastal Studies. *Remote sensing*. 2024. P 14–18.
78. Jincheng L., Zhongke F., Liyan Y., Abdul M., Tauheed U., Ziyu Z., Zhuxin C. Extraction of Sample Plot Parameters from 3D Point Cloud Reconstruction Based on Combined RTK and CCD Continuous Photography. *Remote sensing*. 2018. P 11–16.
79. Lianchao W., Yijin C., Wenhui S., Hanghang X. Point Cloud Denoising and Feature Preservation: An Adaptive Kernel Approach Based on Local Density and Global Statistics. *Remote sensing*. 2024. P 8–11.
80. Gollob C., Ritter T., Nothdurft A. Comparison of 3D Point Clouds Obtained by Terrestrial Laser Scanning and Personal Laser Scanning on Forest Inventory Sample Plots. 2020. P 7–11.
81. Шаламов, О.М. Охорона праці на комп'ютерному підприємстві. К.: Національна академія наук України, 2016. 173 с.
82. Герасименко, І.А. Інформаційна безпека та охорона праці в ІТ. К.: Альтернативи, 2017. 290 с.
83. Коршунова, О.В. Охорона праці на підприємствах з інформаційних технологій. К.: НІСД, 2018. 188 с.
84. Правила улаштування електроустановок. ПУЕ. Харків: Форт, 2011. 519 с.
85. Ніколаєва, Н.В. Охорона праці в інформаційних технологіях. К.: Центр учбової літератури, 2018. 226 с.

ДОДАТОК А

Матеріали апробації роботи

Апробація та публікації результатів та основних положень кваліфікаційної роботи відбувались та опубліковано під час всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених, аспірантів і студентів 2025 <https://dspace.chmnu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/2631/1/Інтелектуальні%20інформаційні%20системи.pdf> (доповідь «Інтелектуальні аспекти розгортання веб-застосунків Next.js та React.js через платформу Vercel»), Smart Automation & Robotics for Future Industry 2025 <https://ceur-ws.org/Vol-3970/PAPER10.pdf> (report «The formulation and solution of the problem of constructing optimal trajectory as a means of eliminating socio-legal contradictions in the realization of unmanned robotic systems»), XXI міжнародній науковій конференції «ОЛЬВІЙСЬКИЙ ФОРУМ-2025 (доповідь «Динамічне 3D-моделювання та підрахунок об'єму сипких матеріалів на поверхнях різного типу»).

Створений функціональний код програми в ході дослідження, успішно був опублікований з лінецзією на Github <https://github.com/volodymyr-boiko2002/master-dissertation>.